Технологии производства: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Монография

Ф. В. Новиков / В. А. Жовтобрюх / С. А. Дитиненко
А. Г. Крюк / Н. Ф. Савченко / В. Г. Шкурупий
В. И. Полянский / И. А. Рябенков / Д. Ф. Новиков

Днепр
ЛИРА
2018

В. И. Полянский
И. А. Рябенков
Д. Ф. Новиков
А. Г. Крюк
Н. Ф. Савченко
В. Г. Шкурупий
Ф. В. Новиков
В. А. Жовтобрюх
С. А. Дитиненко
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА:
ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Ф. В. Новиков
В. А. Жовтобрюх
С. А. Дитиненко
А. Г. Крюк
Н. Ф. Савченко
В. Г. Шкурупий
В. И. Полянский
И. А. Рябенков
Д. Ф. Новиков

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Монография

Днепр / **ЛИРА** / 2018

УДК 621.01(02.064)
Н73

Рецензенты: докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры "Технология машиностроения" Одесского национального политехнического университета *Ларшин В. П.*; докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры "Теоретическая механика и детали машин" Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко *Коломиец В. В.;* докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры "Технология машиностроения и металлорежущие станки" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" *Сизый Ю. А*.

Авторский коллектив: докт. техн. наук, профессор Новиков Ф. В. – введение, разделы 1, 4, выводы; канд. техн. наук Жовтобрюх В. А. – раздел 3; канд. техн. наук, доцент Дитиненко С. А. – раздел 5; канд. техн. наук, профессор Крюк А. Г. – раздел 2; канд. техн. наук, доцент Савченко Н. Ф. – раздел 6; канд. техн. наук, доцент Шкурупий В. Г. – раздел 7; канд. техн. наук Полянский В. И. – раздел 8; канд. техн. наук Рябенков И. А. – раздел 9; аспирант Новиков Д. Ф. – раздел 10.

Н73 Технологии производства: проблемы и решения : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, С. А. Дитиненко и др. – Д. : ЛИРА, 2018. − 536 с.
ISBN 978-966-981-006-9

Приведены результаты теоретических исследований и внедрения на предприятиях Украины прогрессивных технологий производства, разработанных участниками проводимых в городе Харькове ежегодных Международных научно-практических конференций "Физические и компьютерные технологии". Показана важная роль научных технологических разработок в повышении эффективности производства и создании конкурентоспособной продукции. Раскрыты закономерности и особенности механической обработки резанием и пластическим деформированием различных изделий. Значительное внимание уделено вопросам механики и теплофизики механической обработки лезвийными и абразивными инструментами, в том числе с применением современных металлорежущих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и сборных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями. Даны практические рекомендации по повышению качества и производительности обработки.

Рекомендовано для студентов, аспирантов и преподавателей инженерных и экономических специальностей высших учебных заведений, а также для специалистов и руководителей предприятий, повышающих свою квалификацию.

УДК 621.01(02.064)

© Новиков Ф. В., Жовтобрюх В. А.
Дитиненко С. А. и др., 2018

ISBN 978-966-981-006-9

© ЛИРА, 2018

Введение

Условия рыночной экономики требуют коренной перестройки производства для создания наукоемкой конкурентоспособной промышленной продукции. В успешном решении этой задачи важная роль принадлежит эффективному применению современных технологий производства, обеспечивая высокие показатели качества, точности, производительности, экономичности, экологичности и т.д. За последние годы достигнуты значительные успехи в этом направлении. На смену устаревшему оборудованию на предприятия поступают новые высокопроизводительные станки, инструменты и технологии зарубежного производства. Несмотря на высокую стоимость, их приобретение достаточно быстро окупается. При этом обеспечивается высококачественное изготовление машин и другой промышленной продукции, которая становится вполне конкурентоспособной на мировых рынках.

С целью повышения эффективности производства в Харькове ежегодно, начиная с 2000 года, проводятся международные научно-практические конференции "Физические и компьютерные технологии". Участниками конференций являются как известные ученые, так и специалисты предприятий и частных компаний, что позволяет более тесно объединить науку с производством и выйти на создание и эффективное применение современных технологий производства. В рамках проводимых конференций под общей редакцией профессоров Новикова Ф. В. и Якимова А. В. подготовлено коллективное научное 10-томное издание "Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения", которое стало важным фактором решения научных и практических задач технологии машиностроения на современном этапе. В связи с этим, настоящая монография посвящена дальнейшему развитию этого фундаментального 10-томного издания. В монографии приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов механической обработки материалов резанием и пластическим деформированием. Основное внимание уделено процессам лезвийной обработки, шлифованию и доводке. Обоснованы условия эффективного применения сборных твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства на операциях точения, фрезерования и сверления на основе оптимизации процесса резания по критерию наимень-

шей себестоимости обработки. Показано, что в производственных условиях достаточно часто удается установить режимы резания, близкие к оптимальным, при которых себестоимость обработки принимает экстремальное (минимальное) значение. Это в максимальной степени реализует потенциальные возможности инструментов за счет применения высокоскоростного резания, чего сложно добиться с использованием традиционных твердосплавных инструментов.

Значительное внимание в монографии уделено исследованию тепловых процессов при резании и шлифовании, в результате чего разработаны упрощенные математические модели процессов, согласно которым температура резания с течением времени обработки увеличивается, асимптотически приближаясь к постоянному значению, определяемому энергоемкостью обработки и теплофизическими характеристиками обрабатываемого материала. Полученные решения являются подтверждением ранее установленных аналогичных закономерностей, что открывает новые условия уменьшения температуры резания и повышения качества и производительности обработки.

В работе получил дальнейшее развитие предложенный профессором Якимовым А. В. перспективный метод прерывистого шлифования. На основе разработанных математических моделей прерывистого шлифования определены условия обработки, при которых температура резания принимает минимальные значения. Это позволяет интенсифицировать процесс при обеспечении высокого качества обработки.

Приведены новые теоретические решения о закономерностях формирования параметров шероховатости и точности при абразивной обработке. Показаны возможности достижения высоких технологических показателей обработки при шлифовании с заданным натягом в технологической системе. Разработаны теоретические основы и обобщен опыт создания металлоизделий с оптическими свойствами поверхностей за счет существенного уменьшения высотных параметров шероховатости поверхности в условиях абразивного полирования.

В работе показаны этапы становления научной технологической школы профессора Якимова А. В. и творческого научного коллектива кафедры техники и технологий Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеца, которые являются организаторами проводимых в Харькове международных научно-практических конференций "Физические и компьютерные технологии".

Раздел 1
Этапы становлення технологических знаний

1.1. Науку в производство

Создание надежных и высокоэффективных современных машин и систем требует постоянного совершенствования технологий обработки деталей и агрегатов с целью обеспечения высоких показателей качества и точности обрабатываемых поверхностей. В настоящее время решены основные проблемы металлообработки. Разработан огромный арсенал технологических средств для достижения требуемых показателей качества, точности, производительности и экономичности обработки.

Вместе с тем, с появлением новых обрабатываемых материалов и повышением технических требований к их обработке постоянно возникают трудноразрешимые задачи по проектированию оптимальной технологии обработки: выбору условий обработки, инструментов и т.д. Например, применение нового конструкционного материала при изготовлении деталей авиационного назначения не позволило обеспечить качественную обработку на операции зубодолбления. Для решения этой задачи были опробованы различные инструменты, в том числе упрочненные износостойкими покрытиями, режимы резания и другие средства. Однако достаточно удовлетворительного решения получить не удалось. С чем это связано? Это связано, прежде всего, с отсутствием глубоких фундаментальных знаний по физике процессов обработки, поскольку теория процессов резания (и в целом теория механической обработки) базируется в основном, как и 100 лет назад, на частных эмпирических решениях, полученных для конкретных условий обработки. Достаточно строгой физико-математической теории процесса резания нет. В результате практика опережает теорию. Этим объясняется отсутствие мощных технологических решений, позволяющих совершить своего рода прорыв в наших познаниях процесса резания и кардинально решить проблему повышения (в 10 раз и более) технико-экономических показателей обработки. Практические рекомендации, приведенные в справочной литературе и основанные на эмпирических знаниях, трудно использовать при решении вопросов

обработки новых материалов, даже незначительно отличающихся по своим физико-механическим свойствам от известных, хорошо обрабатываемых резанием материалов. В идеале выбор оптимальных условий обработки должен производиться расчетным путем на основе механических и теплофизических характеристик обрабатываемого материала и технических требований на обработку. Однако для этого нужны новые фундаментальные решения, адекватно описывающие процессы обработки.

Для решения проблем обработки материалов и технологии машиностроения в 1999 году по инициативе выдающегося ученого-технолога, доктора технических наук, профессора Якимова Александра Васильевича предложено ежегодно проводить в таком мощном индустриальном городе как Харьков на базе Харьковского машиностроительного завода "ФЭД" – флагмана отечественного машиностроения – международные научно-практические конференции "Физические и компьютерные технологии" с участием ведущих технологических школ.

Цель проводимых конференций – приблизить науку к производству, активизировать работы по созданию и внедрению новых научных разработок в производство для создания конкурентоспособной машиностроительной продукции, обмен научно-технической информацией, установление деловых контактов и согласование совместных работ по новым научным разработкам и их широкому внедрению. Ставилась задача популяризации научных разработок и вовлечения в научную среду творческой молодежи, акцентировать внимание на применение фундаментальных физико-математических подходов для решения технологических проблем, чтобы как можно быстрее перевести технологические дисциплины в ранг точных наук и положить в основу системные решения, полученные с использованием методов высшей математики и математической физики.

Тематика конференций: научные концепции развития технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки; инновационные технологии, оборудование и инструменты; прогрессивные технологии алмазной лезвийной и абразивной обработки; динамика и прочность машин, проблемы математики, механики и управления; безопасные технологии производства и охраны окружающей среды; экономика и организация производства.

Участники конференции (апрель 2001 г.)

Вспоминается наша первая конференция, тогда еще под названием "Проблемы теории и практики технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки", проведенная 22−26 мая 2000 года, в очень солнечные теплые майские дни в Актовом зале Харьковского машиностроительного завода "ФЭД". На удивление, конференция превзошла все ожидания и получила большой резонанс не только в городе Харькове. Незабываем подъем, который царил тогда на заводе "ФЭД". Актовый зал завода, вмещающий 300 человек, был полностью заполнен. Все выступающие были едины в желании помочь производству "встать на ноги". В докладах Генерального директора завода Жданова А. А., главного инженера завода Фадеева В. А., профессоров Якимова А. В. и Новикова Ф. В. был раскрыт реальный потенциал производства и науки, а также те возможности, которые открываются от их тесного союза.

Особенно запомнился доклад Генерального директора завода Жданова А. А., в котором он рассказал о первых производственных успехах, достигнутых на заводе, и перспективах его развития в ближайшее время. Радовало то, что появились первые заказы на традиционно изготавливаемую на заводе продукцию, которая всегда отличалась высокими к ней технологическими требованиями и изготавливалась исключительно лишь на заводе "ФЭД". Радовало и то, что, несмотря на временные трудности, завод не покинули высококвалифицированные специалисты, они продолжали работать на заводе и создавать высококлассную авиационную технику, так необходимую нашему государству.

В течение двух дней с необычайным вниманием были выслушаны интересные доклады ученых и специалистов Харькова, Украины и России (профессоров Ямникова А. С., Морачковского О. К., Грабченко А. И., доцентов Загребельного В. Н., Гришко Я. А., аспиранта Богуслаева А. В. и многих других), а первые экскурсии по заводу и посещение музея произвели на участников конференции неизгладимое впечатление от увиденных сложнейших агрегатов авиационной техники, изготавливаемых на заводе.

В дальнейшем было проведено еще 22 конференции: до 2014 года – на базе Харьковского машиностроительного завода "ФЭД", а затем – в стенах Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеца. Все они оставили глубокий след в серд-

цах и душах присутствующих, в первую очередь, своей необычностью. Необычность состояла в том, что под "одной крышей" собрались производственники и ученые, творческая заводская и университетская молодежь, убеленные сединой профессоры. Пожалуй, это одна из немногих конференций, проводимых в Украине, в заводских стенах, где был слышен звук работающих станков, а докладчикам не без труда приходится отвечать на сложные практические вопросы заводских специалистов.

В этом особенность наших конференций, позволивших приблизить академическую науку к заводским цехам, услышать злободневные проблемы, которыми живет производство. Наверное, под впечатлением конференций, многие ученые и университетские специалисты стали совсем по-другому смотреть на объекты и предметы своих исследований, открыли для себя совершенно новый мир науки и техники, требующий новых подходов и решений.

Одна из главных задач конференций – привлечь творческую молодежь к решению актуальных научно-технических и производственных проблем. Поэтому не случайно основными докладчиками на конференциях были молодые ученые и специалисты. Многие из них получили настоящую "путевку в мир Науки и Знаний", успешно подготовили и защитили не только кандидатские, но и докторские диссертации.

Сборники научных трудов Международных научно-практических конференций "Физические и компьютерные технологии"

Большую работу по организации конференций проводил профессор Якимов Александр Васильевич. Благодаря его усилиям, к каждой конференции готовили и издавали сборники научных трудов конференции и ВАКовские сборники, специально предоставленные Харьковским национальным техническим университетом сельского хозяйства имени Петра Василенко, Одесским национальным политехническим университетом, Инженерной академией Украины, в которых печатались научные статьи участников конференций. В рамках проводимых конференций был подготовлен и издан ряд учебных пособий для студентов по актуальным проблемам техники и технологий.

В работе конференций приняло участие большое количество различных по направлениям научных школ. Среди них, в первую очередь, следует отметить всемирно известную научную технологическую школу основателя и руководителя наших конференций, выдающегося ученого-технолога, Заслуженного деятеля науки Украины, Лауреата Государственной премии Украины, почетного профессора НТУУ "Киевский политехнический институт", доктора технических наук, профессора кафедры "Технология машиностроения" Одесского Национального политехнического университета Якимова Александра Васильевича, который внес большой вклад в развитие научных основ технологии машиностроения, процессов механической и физико-технической обработки материалов. Научная технологическая школа профессора Якимова А. В. охватывает не только город Пермь (где родился и начал трудовую деятельность Александр Васильевич Якимов) и Одессу (где он жил и работал в последние годы жизни), но и наш родной город Харьков, где живут и работают его ученики.

Под руководством Александра Васильевича был успешно решен ряд принципиально важных для отечественного машиностроения проблем по повышению качества обработки ответственных деталей машин, особенно авиационного назначения. Им впервые в мировой практике создан чрезвычайно эффективный метод прерывистого шлифования, который кардинально решает проблему снижения температуры в зоне резания и улучшения качества поверхностного слоя обрабатываемого материала, повышает надежность и долговечность работы деталей машин, особенно изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Создание и широкое применение метода прерывистого шлифования стало признанным ми-

ровым достижением научной технологической школы профессора Якимова Александра Васильевича. Всеобщее признание получили также работы профессора Якимова А. В. и его учеников в области технологии машиностроения, теории и практики абразивной обработки, а подготовленные ими учебники, учебные пособия и монографии стали настольными книгами для многих студентов и инженеров-технологов.

Александр Васильевич − автор более чем четырехсот научных трудов, из них около полусотни монографий, учебников, учебных пособий, а также автор почти сотни изобретений. Он подготовил целую плеяду кандидатов и докторов технических наук, и навсегда останется Учителем и кумиром для многих и многих специалистов.

Большая заслуга в организации и проведении наших конференций на протяжении 2000–2013 годов принадлежит Генеральному директору Харьковского машиностроительного завода "ФЭД" Жданову Александру Андреевичу и главному инженеру завода Фадееву Валерию Андреевичу. Мы благодарны им за предоставление всех возможностей для проведения конференций в стенах завода, за их участие и интересные доклады.

За время проведения конференций на заводе "ФЭД" выросла целая плеяда кандидатов наук, а главный инженер Фадеев В. А. защитил докторскую диссертацию, в которой на научной основе определил основные направления модернизации производства и выпуска высококачественной и надежной авиационной техники. В 2009 году Фадеев В. А. стал Лауреатом Государственной премии Украины.

Большую работу по организации и популяризации наших конференций постоянно проводит докт. техн. наук, профессор Одесского национального политехнического университета Ларшин Василий Петрович – один из учеников профессора Якимова А. В., автор большого количества изобретений и научных трудов. Он стал одним из самых молодых профессоров Одесского национального политехнического университета (ОНПУ) и сейчас плодотворно работает над разработкой эффективных технологических процессов в производство, с не меньшим успехом обучает технологическим наукам студенческую молодежь.

Интересные доклады на конференциях постоянно представляет канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения ОНПУ Гусарев Владимир Сергеевич, один из основателей энергетической теории технологии машиностроения. В материалах конференций были

опубликованы и прошли апробацию две его актуальные и очень интересные работы по истории развития науки:

1) Виктор Афанасьевич Добровольский. Инженер. Педагог. Ученый: эссе о жизни и творчестве;

2) Портреты основоположников науки "Технология машиностроения".

Впоследствии они были изданы отдельными книгами:

Виктор Афанасьевич Добровольский. Инженер. Педагог. Ученый: эссе о жизни и творчестве / В. С. Гусарев. – Одесса: Интерпринт, 2015. – 68 с.

Технологи машиностроения (Биографии основоположников) / В. С. Гусарев. – Одесса: Печатный дом, 2017. – 112 с).

Активными участниками конференций являются сотрудники ОНПУ: профессоры Усов А. В., Оргиян А. А., Лебедев В. Г., Деревянченко А. Г., доценты Кремнев Г. П., Наддачин В. Б. и др. Постоянно участвовал в конференциях докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения ОНПУ Линчевский П. А.

В работе конференций постоянно принимает участие творческий научный коллектив кафедры техники и технологий Харьковского национального экономического университета (в дальнейшем ХНЭУ им. Семена Кузнеца).

Преподаватели кафедры: профессор Крюк А. Г., доценты Дитиненко С. А., Шкурупий В. Г., Савченко Н. Ф., Чистяк В. Г., Стрельчук Р. М. неоднократно выступали с докладами на конференциях и участвовали во внедрении новых технологических процессов обработки деталей на заводе "ФЭД", а Дитиненко С. А. и Шкурупий В. Г. в эти годы успешно защитили кандидатские диссертации.

Большое внимание подготовке конференций уделял старейший преподаватель этой кафедры, видный ученый, педагог и Учитель для многих из нас профессор Дудко Петр Дмитриевич, которого уже 10 лет нет с нами, но добрая память о нем по-прежнему жива.

В развитии предприятий особое место занимает экономика производства. Поэтому в рамках конференции в Харьковском национальном экономическом университете была организована секция "Экономика и организация производства" под руководством докторов экономических наук, профессоров Гриневой В. Н. и Орлова П. А. На секции были заслушаны доклады многих ученых-экономистов, аспирантов и студентов ХНЭУ им. Семена Кузнеца, НТУ "ХПИ", ХАИ и т.д.

Дитиненко С. А. на конференции (сентябрь 2010 г.)

Коломиец В. В., Скобло Т. С., Новиков Ф. В.,
Круговой Н. А. (главный технолог завода "ФЭД")

Савченко Н. Ф., Шкурупий В. Г., Крюк А. Г., Дитиненко С. А., Товстоплет А. К. (заместитель главного технолога завода "ФЭД")

Следует отметить активное участие в наших конференциях коллективов многих кафедр НТУ "ХПИ": технологии машиностроения (зав. каф. проф. Тимофеев Ю. В.), динамики и прочности машин (зав. каф. проф. Львов Г. И.), теоретической механики (зав. каф. проф. Морачковский О. К.), сопротивления материалов (зав. каф. проф. Хавин В. Л.), обработки металлов давлением (зав. каф. проф. Евстратов В. А.), детали машин (зав. каф. проф. Гапонов В. С.), колесных и гусеничных машин (зав. каф. проф. Александров Е. Е.), экономики (зав. каф. проф. Тимофеев В. Н.) и других. С интересными докладами постоянно выступали профессоры Сизый Ю. А., Пермяков А. А., Шелковой А. Н., Хавин Г. Л., Клочко А. А., Ткачук Н. А., Степанов М. С., Бреславский Д. В., Шатохин В. М., Геворкян Э. С., Рамашов Ю. В., Петков А. А., доценты Столбовой А. С., Фесенко А. В., Серховец О. И., Ушаков А. Н., Гуцаленко Ю. Г., Громов В. А. и многие другие.

Большую работу по организации наших конференций всегда проводили научные коллективы: кафедр Харьковского национального технического университета сельского хозяйства, особенно профессоры

Коломиец В. В., Скобло Т. С., Тришевский О. И.; кафедры "Материалы и технология изготовления изделий транспортного назначения" Академии железнодорожного транспорта (г. Харьков), руководимой профессором Тимофеевой Л. А; кафедры технологии машиностроения Приазовского государственного технического университета (г. Мариуполь), руководимой профессором Андилахаем А. А.; Института сверхтвердых материалов НАН Украины имени В. Н. Бакуля и Ассоциации технологов-машиностроителей Украины, руководимые профессорами Клименко С. А. и Лавриненко В. И.; отдела Института проблем машиностроения НАН Украины под руководством профессора Воробьева Ю. С.; кафедры технологии машиностроения Национальной металлургической академии Украины, руководимой профессором Проволоцким А. Е.; кафедры приборостроения Луцкого национального технического университета, руководимой профессором Марчуком В. И.; НТУ "Киевский политехнический институт" и других университетов и предприятий.

Заслуживают особого внимания доклады профессоров Борисевича В. К., Костюка Г. И., Мовшовича А. Я., Тернюка Н. Э. (г. Харьков), Лавриненко В. И. (г. Киев), Усова А. В., (г. Одесса), Гурея И. В. (г. Львов), доцентов и кандидатов технических наук Наддачина В. Б. (г. Одесса), Радченко С. Г. (г. Киев), Настасенко В. А. (г. Херсон), Иноземцева К. А. (г. Курск), Колодяжного А. В., Вакуленко К. В., Милешкина М. Б., Сметанкиной Н. В., Тарабановой В. П., Романова А. А. (г. Харьков), специалистов предприятий Кленова О. С., Макутонина В. Б., Гулюк А. А. и др.

Очень интересные доклады постоянно представляли на конференции: Дудин А. Т. (г. Евпатория), кандидаты технических наук Новиков Г. В., Науменко А. А., Рябенков И. А. (г. Харьков), Якимов А. А. (г. Одесса), Иванов Е. И., Андилахай В. А., Иванов И. Е. (г. Мариуполь), Осипов В. А. (г. Сумы), доктора технических наук, профессоры: Оборский Г. А., Товстоногий В. М., Линчевский П. А., Оргиян А. А., Деревянченко А. Г., Лебедев В. Г. (г. Одесса), Самотугин С. С., Андилахай А. А. (г. Мариуполь), Матюха П. Г. (г. Донецк), Карпусь В. Е. (г. Харьков) и др.

В конференциях постоянно участвовали ученые из Московского государственного открытого университета (научная школа профессора Назарова Ю. Ф.), Тульского государственного университета (научная школа профессора Ямникова А. С.), Курского государственного технического университета (научная школа профессора Емельянова С. Г.), Ульяновского государственного технического университета (научная

школа профессора Худобина Л. В.), Саратовского государственного технического университета (научная школа профессора Королева А. В.), Пермского государственного технического университета (научная школа профессора Свирщева В. И.) и др.

Активное участие в конференциях принимали специалисты машиностроительных предприятий: ГП "Завод им. Малышева" (профессоры Любченко А. П., Лобанов В. К.), АО "Мотор - Січ" (главный инженер Жеманюк П. Д.), Харьковское государственное Авиационное производственное предприятие, ПО "Коммунар", ОАО ХМЗ "Свет шахтера" (Генеральный директор канд. техн. наук Ковальчук А. Н.), ОАО Завод "Потенциал" (директор канд. техн. наук Ткаченко В. П.), ЗАО Завод "Южкабель" (генеральный директор, докт. техн. наук Золотарев В. М., технический директор канд. экон. наук Карпушенко В. П.), ОАО "Харьковский завод "Гидропривод" (директор канд. техн. наук Яценко С. М.) и др.

Фактически на всех конференциях выступал с докладами канд. техн. наук, доцент Юго-Западного государственного технического университета (бывшего Курского государственного технического университета), член оргкомитета конференции Малыхин В. В., выпускник аспирантуры Харьковского политехнического института, специалист в области обработки материалов резанием. Для него Харьков стал родным городом, и он с удовольствием участвовал в конференциях. Вместе с ним из Курска постоянно приезжали его коллеги и выступали на конференциях с интересными докладами. Среди них особенно хочется отметить канд. техн. наук, доцента Новикова С. Г., замечательного и очень увлеченного наукой человека, который с юмором может рассказать о серьезных научных математических результатах.

Наряду с университетской академической наукой, на конференциях был широко представлен научно-технический потенциал частных фирм и компаний. Сейчас частный капитал – мощный двигатель машиностроения. На него приходится львиная доля поставок на предприятия технологического оборудования, инструментов и технологий. Он четко отслеживает "рынок", быстро реагирует на все изменения в нем. Но при этом частные фирмы и компании заняты не только коммерческими вопросами, они еще и изготавливают прекрасные инструменты, разрабатывают наукоемкие технологии и, конечно же, могут предложить большой спектр современных (к сожалению, импортных) станков, которые так нужны предприятиям для изготовления высокока-

чественной наукоемкой машиностроительной продукции, успешно конкурирующей с зарубежными аналогами.

Директор ООО Технический центр "ВариУс",
канд. техн. наук Жовтобрюх В. А.

Такой высокий уровень развития малого бизнеса достигнут благодаря тому, что многие руководители фирм и компаний являются кандидатами наук и серьезно занимаются решением научных проблем. Поэтому в программах конференций и в сборниках материалов всегда достаточно много докладов представителей частных фирм и компа-

ний, занимающихся научно-производственной деятельностью. В особой мере это относится к ООО Технический центр "ВариУс" (г. Днепр), ООО "Империя металлов" и фирме "ДиМерус Инженеринг" (г. Харьков), руководителями которых являються кандидаты технических наук Жовтобрюх В. А., Полянский В. И., Кленов О. С. Специалисты этих фирм постоянно участвуют в конференциях, выступают с интересными докладами, предлагают свои научно-технические разработки для внедрения в производство. Так, ООО Технический центр "ВариУс", работая на промышленном рынке Украины, является наибольшей компанией, специализирующейся на обеспечении предприятий оборудованием, инструментом, запасными частями. Фирма предлагает полный комплекс работ по подготовке технологий, а также поставку и сервис металлообрабатывающего оборудования. Постоянными заказчиками компании являются фактически все действующие предприятия машиностроительной, металлургической и других отраслей промышленности, а также много подразделений железной дороги.

Будем надеяться, что участие в наших конференциях поможет им поближе познакомиться с проблемами теории и практики машиностроения, удачно представить свои разработки и установить полезные деловые контакты с работниками предприятий.

По итогам проведенной первой конференции, состоявшейся 22−26 мая 2000 года, было принято:

Обращение к участникам конференции

Бурное развитие турбостроения и атомного реакторостроения, двигателестроения, авиационной и ракетно-космической техники предопределило создание научных методов расчета на прочность и надежность машин и систем в условиях высоких скоростей и температур для решения крупных научных и практических проблем проектирования техники современного и перспективного машиностроения. Это открыло новые возможности в решении на научной основе проблем теории и практики технологии машиностроения, создания высокоэффективных процессов, инструментов и оборудования для механической и физико-технической обработки материалов. Появилась возможность научно обоснованного проектирования инструментов, оборудования, оснастки и сложных технологических систем, аналитического расчета оптимальних условий и схем обработки.

Последние 15 лет нами ведуться интенсивные работы по созданию общей математической теории технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки на основе новой методологии, базирующейся на фундаментальных знаниях физики и механики. Полученные результаты показали перспективность исследований. Установлено, что существуют значительные резервы повышения производительности, качества и точности при создании машин и систем, связанные с новыми знаниями о физике процессов обработки. Для их практической реализации необходимо как применение новых технологий, инструментов и оборудования, так и дальнейшее развитие широко известных технических решений.

Учитывая многообразие различных по физической сущности источников энергии, используемых для обработки материалов, и большие трудности создания общей теории, приглашаем всех специалистов и ученых, занимающихся данными вопросами, принять участие в систематизации и обобщении известных научных разработок в области технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки на основе новой методологии. Необходимо результаты исследований, в том числе опубликованные в научно-технической литературе, подчинить законам физики и, в первую очередь, закону сохранения энергии. По результатам работы планируется издание коллективных научных трудов в 10-ти томах под общим названием "Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения".

На данном этапе важно решить две задачи:

1. Выбрать наиболее приемлемый физико-математический подход, который может быть положен в основу создания новой теории и который позволил бы с единых теоретических позиций рассмотреть основные разделы классического построения технологии машиностроения, теории резания материалов и других дисциплин по механической и физико-технической обработке материалов, т.е. их математически формализовать, используя фундаментальные законы механики и физики.

2. Произвести оценку энергетического уровня всех известных процессов механической и физико-технической обработки и дать ему физико-математическую трактовку (разработать математические модели процессов) с целью упорядоченного расположения процессов по энергоемкости обработки. Под энергоемкостью следует понимать от-

ношение затраченной мощности процесса (в Ваттах) к производительности обработки (в $м^3/с$). Важно также знать физико-математические связи энергоемкости обработки с основными технико-экономическими показателями обработки (точностью, качеством, производительностью, мощностью, себестоимостью обработки).

Полученные результаты будут иметь чрезвычайно большое научное и практическое значение при создании новой техники и подготовке специалистов. Достаточно отметить, что в настоящее время отсутствуют научно обоснованные рекомендации по выбору оптимальных методов обработки при проектировании операционной технологии, не говоря о более сложном проектировании маршрутной технологии. В результате технолог подходит к проектированию операционной и маршрутной технологии чисто интуитивно, ссылаясь на свой опыт, а не на теорию, что, несомненно, не отвечает требованиям рыночной экономики по созданию конкурентоспособной продукции.

Это чрезвычайно важно именно сейчас, когда на предприятия поступает компьютерная техника, с помощью которой можно автоматизировать проектные работы, выбирать оптимальные варианты операционно-маршрутной технологии на основе количественных расчетов. Для этого необходима хорошая практичная формализованная теория технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки, доведенная до уровня инженерных формул.

Появившиеся недавно вместе с компьютерной техникой иностранные пакеты прикладных программ по автоматизированному проектированию технологических процессов, как показывает опыт, также не решают выбора оптимальных методов обработки и проектирования оптимальной операционно-маршрутной технологии, так как направлены, главным образом, на автоматизацию "ручного труда" и мало содержат новых технологических решений. Это связано с отсутствием как у нас в Украине, так и в странах ближнего и дальнего зарубежья формализованной теории технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки. Как видно, существует противоречие. С одной стороны, технология машиностроения, как наука, связана с изготовлением самых совершенных машин и систем, с другой стороны, она не имеет достаточной физико-математической основы и базируется на частных, полученных в основном опытным путем, результатах. Поэтому конференция призвана произвести, своего рода, смотр науч-

ных сил в области теории и практики технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки, выявить наиболее предпочтительные направления интенсификации производства, выработать условия координации совместных работ по данным направлениям. Надеемся, что общими усилиями нам удастся решить многие сложные научные и практические проблемы, внести свой вклад в развитие экономики Украины.

Данное обращение стало поистине руководством к действию. В течение пяти лет (2000–2005 гг.) под общей редакцией профессоров Новикова Ф. В. и Якимова А. В. было подготовлено и вышло в свет 10-томное издание под общим названием "Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения". В нем отражены научные технологические достижения прошлых столетий и сформулированы научные концепции дальнейшего развития процессов обработки материалов и технологии машиностроения.

10-томное научное издание "Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения"

Цель издания − новый физико-математический взгляд на проблемы механической, физико-технической обработки и технологии машиностроения; вооружение специалистов и ученых-технологов новыми фундаментальными знаниями для создания наукоемких технологий.

Основное содержание 10-томного издания:

Том 1. Механика резания материалов (авторы: Новиков Ф. В., Якимов А. В., Новиков Г. В., Якимов А. А., Остафьев В. А., Кривошапка Ю. Н., Фадеев В. А., Ткаченко В. П., Мазур Н. П., Малыхин В. В., Иноземцев К. А., 2002 г. – 580 с.).

Том 2. Теплофизика резания материалов (авторы: Новиков Ф. В., Якимов А. В., Новиков Г. В., Якимов А. А., Остафьев В. А., Кривошапка Ю. Н., Усов А. В., Лебедев В. Г., Худобин Л. В., Хусаинов А. Ш., Ларшин В. П., Сизый Ю. А., Слободяник П. Т., 2003 г. – 625 с.).

Том 3. Резание материалов лезвийными инструментами (авторы: Новиков Ф. В., Якимов А. В., Новиков Г. В., Фадеев В. А., Зубарь В. П., Коломиец В. В., Кривошапка Ю. Н., Карюк Г. Г., Бочко А. В., Ямников А. С., Валиков Е. Н., Гнатюк А. П., Айрикян А. Л., 2003 г. – 546 с.).

Том 4. Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов (авторы: Новиков Ф. В., Якимов А. В., Новиков Г. В., Якимов А. А., Кривошапка Ю. Н., Ткаченко В. П., Рыбицкий В. А., Новоселов Ю. К., Проволоцкий А. Е., Негруб С. Л. Матюха П. Г., 2002 г. – 802 с.).

Том 5. Обработка металлов методами пластического деформирования (авторы: Новиков Ф. В., Новиков Г. В., Крюк А. Г., Чистяк В. Г., Савченко Н. Ф., Морачковский О. К., Бреславский Д. В., Кривошапка Ю. Н., Лавинский В. И., Мовшович А. Я., Буденный М. М., Тришевский О. И., Плеснецов Ю. А., Юрченко А. А., 2004 г. – 522 с.).

Том 6. Качество обработки деталей машин (авторы: Новиков Ф. В., Якимов А. В., Новиков Г. В., Якимов А. А., Ларшин В. П., Лавриненко В. И., Новоселов Ю. К., Каинов Д. А., Коломиец В. В., Кривошапка Ю. Н., Дудко П. Д., Шкурупий В. Г., Браташевский А. Ю., Ткаченко В. П., Гуцаленко Ю. Г., 2003 г. – 716 с.).

Том 7. Точность обработки деталей машин (авторы: Новиков Ф. В., Якимов А. В., Новиков Г. В., Якимов А. А., Ларшин В. П., Фадеев В. А., Кривошапка Ю. Н., Дитиненко С. А., Оборский Г. А., Тонконогий В. М., Слободяник П. Т., 2004 г. – 546 с.).

Том 8. Оптимизация технологических процессов в машиностроении (авторы: Новиков Ф. В., Якимов А. В., Новиков Г. В., Якимов А. А., Ларшин В. П., Кривошапка Ю. Н., Проволоцкий А. Е., Ясев А. Г., Лапшин С. П., Малыхин В. В., Шелковой А. Н., 2004 г. – 509 с.).

Том 9. Проектирование технологических процессов в машиностроении (авторы: Новиков Ф. В., Якимов А. В., Якимов А. А., Лар-

шин В. П., Чумный Ю. И., Кривошапка Ю. Н., Емельянов С. Г., Куц В. В., Гуцаленко Ю. Г., 2005 г. – 584 с.).

Том 10. Концепции развития технологии машиностроения (авторы: Новиков Ф. В., Якимов А. В., Новиков Г. В., Якимов А. А., Ларшин В. П., Шепелев А. А., Лавриненко В. И., Кривошапка Ю. Н., Ковальчук А. Н., Яценко С. М., Шкурупий В. Г., Тигарев В. Н., 2005 г. – 565 с.).

В авторский коллектив издания вошли ведущие ученые-технологи и специалисты предприятий. Издание носит энциклопедический характер и охватывает все основные теоретические и практические вопросы, относящиеся к специальностям технологии машиностроения; механической и физико-технической обработки материалов. Данное издание получило достаточно широкое признание и весьма полезно как для научных работников, так и для заводских специалистов, а также для лиц, углубляющих свои знания в технологической области.

В развитие основных положений 10-томного издания в последние годы опубликовано большое количество монографий и учебных пособий, которые открывают новые технологические возможности изготовления конкурентоспособной машиностроительной продукции. Настоящая монография также посвящена дальнейшему развитию научных идей этого издания и направлена на решение актуальных проблем технологии производства.

Важным практическим выходом проведенных конференций в 2000–2010 гг. стала разработанная программа внедрения на ГП ХМЗ "ФЭД" наиболее эффективных технологий, предложенных участниками конференций. Согласно программе, внедрена и успешно функционирует в инструментальном производстве завода технология круглого наружного шлифования алмазными кругами на металлических связках 1А1 300×25×6 АС6 125/100 М1-01 4, разработанная профессором Новиковым Ф. В. и доцентом Дитиненко С. А. Технология обеспечивает высокопроизводительный съем больших припусков (например, свыше 4-х мм при шлифовании специальных трехступенчатых твердосплавных зенкеров) и одновременно шероховатость обработки на уровне 8–9 классов чистоты. Эффект достигается за счет применения периодической электроэрозионной правки алмазного круга, обеспечивающей высококачественное вскрытие алмазоносного слоя круга, а также за счет специальной подготовки круга к работе для обеспечения высокой чистоты обработки.

Получены положительные результаты от применения технологии импрегнирования (специальной термической обработки) шлифовальных кругов из обычных абразивов и применения твердых смазок, разработанной под руководством профессоров Якимова А. В. и Ларшина В. П. Для обработки различных материалов предложены оптимальные условия импрегнирования шлифовальных кругов и оптимальные составы твердых смазок. Разработан компьютерный вариант оптимального проектирования технологии.

На заводе впервые в отечественной практике проведены широкие испытания режущих инструментов с износостойкими покрытиями нового поколения, изготовленными по технологии КИНТ (конденсация с ионной бомбардировкой низкотемпературная) под научным руководством Романова А. А. Достигнуто увеличение стойкости инструментов до 20-ти раз при сверлении, до 8-ми раз при долблении и т.д. Кроме того, упрочненный инструмент обеспечивает осуществление процессов резания тех труднообрабатываемых материалов, которые резанию обычным инструментом не поддаются. Применение упрочненных по новой технологии инструментов открыло широкие перспективы с точки зрения повышения производительности и качества обработки, снижения расхода инструмента.

Технологией будущего является высокоскоростное резание, реализующее скорости резания 100 – 200 м/с. С этой целью заводом в начале 2000-х годов приобретен обрабатывающий центр C 800 U фирмы HERMLE (Германия), который предназначен для высокоскоростного резания деталей со сложными пространственными формами. Участники конференций оказали помощь в проведении опытных работ по оснащению станка специальными эффективными режущими инструментами, реализующими условия высокоскоростного резания, что позволило добиться существенного повышения производительности и качества обработки и повысить уровень конкурентоспособности изготавливаемой продукции.

Заслуживает внимания предложенная на конференции доцентом Савченко Н. Ф. технология термо-импульсной очистки криволинейных литейных каналов корпусных деталей многофазными газожидкостными высокоскоростными потоками. Технология весьма производительна. По сравнению с действующей механической технологией резко снижает трудоемкость и повышает качество обработки. Последний

фактор особенно важен при создании высоконадежной авиационной техники. Перечень разработок можно расширить, однако и этого достаточно, чтобы оценить важность научных разработок в оснащении производства новыми технологиями.

1.2. Научная технологическая школа профессора Якимова Александра Васильевича

Решение сложных проблем технологии машиностроения по повышению качества и надежности машин и систем неразрывно связано с именем выдающегося ученого-технолога, Заслуженного деятеля науки Украины, Лауреата Государственной премии Украины, академика Инженерной Академии Наук Украины, доктора технических наук, профессора Одесского государственного политехнического университета Якимова Александра Васильевича.

Профессор Якимов Александр Васильевич

Созданное им новое научное направление, основанное на управлении нестационарными термодинамическими процессами, протекающими в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом, открыло новые возможности интенсификации производства, обеспечения высококачественной обработки ответственных изделий авиационной и ракетно-космической техники. Идея периодического прерывания контакта режущего инструмента с деталью с целью исключения теплового насыщения поверхностных слоев обрабатывае-

мого материала и снижения температуры резания получила широкое практическое воплощение в прогрессивных конструкциях абразивных и алмазно-абразивных инструментов с прерывистой рабочей поверхностью, используемых в различных отраслях промышленности. В настоящее время трудно представить обработку высокопрочных сталей и сплавов, твердых пород камня и других труднообрабатываемых металлических и неметаллических материалов без применения кругов с прерывистой рабочей поверхностью.

Благодаря применению метода прерывистого шлифования успешно решены проблемы обработки сложно-фасонных высокоточных деталей современных реактивных и турбовинтовых авиационных двигателей, например зубчатых колес, работающих с окружными скоростями 80 ... 100 м/с и передающих нагрузки порядка 800 ... 1000 кГс/см, газотурбинных и компрессорных лопаток из жаропрочных и титановых сплавов и т.д.

Прерывание процесса шлифования снижает температуру в зоне резания и возбуждает высокочастотные колебания в упругой системе, уменьшая тем самым энергоемкость процесса и обеспечивая непрерывную правку круга. При прерывистом шлифовании уменьшение температуры происходит по двум каналам: за счет прерывания процесса резания до того момента, пока температура не достигла квазистационарного состояния, и за счет создания острого режущего рельефа круга. Ни один из известных методов шлифования не обладает таким двойным физическим эффектом. По данному направлению Александр Васильевич в 1986 году удостоен высокого звания Лауреата Государственной премии Украины.

Вся история развития научной технологической школы профессора Якимова А.В. – это образец самоотверженного труда во имя науки и ее тесной связи с производством. Образцом бескорыстной любви к науке навсегда останется замечательный человек, наш УЧИТЕЛЬ Алексадр Васильевич Якимов. Именно любовь к науке сплотила под знамена научной технологической школы профессора Якимова А.В. большой отряд увлеченной и целеустремленной творческой молодежи, которая своей жизненной позицией и моральными устоями доказала высокие принципы своего Учителя.

Более полусотни кандидатов и докторов наук подготовил Александр Васильевич за свою многолетнюю и плодотворную научную дея-

тельность, и за каждым из них стоит большой и кропотливый труд, высочайший профессионализм Учителя. В нем всегда поражало постоянное стремление к новому – к новым задачам и решениям. Поражали глубочайшие физико-математические знания, которые, как правило, не свойственны ученым-технологам. Восхищала лаконичность его научной мысли – написанный им текст отличался четкостью и ясностью и являлся настоящим образцом для подражания. Как Учитель, он оказывал на своих учеников большое влияние, открывал им новый мир знаний, помогал вырабатывать стратегию научного поиска, за что они ему очень благодарны.

Александр Васильевич был настоящим ПЕДАГОГОМ. За свою долгую жизнь он подготовил тысячи инженеров-технологов, которые и сейчас трудятся в производстве и учебных заведениях, передавая знания и опыт следующему поколению.

Александр Васильевич Якимов родился 16 марта 1925 года в г. Чермоз Пермской области в семье рабочего. Отец его работал прокатчиком на металлургическом заводе, а мать была домохозяйкой. По окончании семилетней школы в 1939 году поступил в механический техникум, после окончания которого был зачислен в Ленинградский военно-механический институт. С первого курса, в 1943 году, был призван в армию и направлен в Челябинское авиационное училище, а после его окончания – в Высшую школу штурманов авиации дальнего действия в г. Рязани (с 1944 по 1946 годы).

После демобилизации работал конструктором на Пермском машиностроительном заводе и учился на заочном отделении моторного факультета Московского авиационного института (МАИ). После окончания института (в декабре 1952 года) поступил в аспирантуру МАИ по кафедре "Производство авиадвигателей". В 1956 году в МАИ успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему "Исследование жесткости металлорежущих станков типа МААГ" и был направлен на работу в Запорожский машиностроительный институт, где работал доцентом кафедры "Станки и режущий инструмент". В 1961 году по конкурсу перешел работать в Пермский политехнический институт (ППИ) доцентом кафедры "Станки и режущий инструмент", с 1963 по 1974 годы работал заведующим кафедрой "Технология машиностроения". За это время он создал научную школу по проблемам повышения качества поверхностного слоя деталей технологическими методами с широким

привлечением специалистов смежных областей науки: физики, автоматики и телемеханики, математики, сопротивления материалов, металловедения и термической обработки. Благодаря творческому сотрудничеству коллективов представилась возможность решить ряд важных научных проблем, а главное – разработать эффективный метод прерывистого шлифования, основанный на идее прерывания процесса шлифования до момента, пока температура в зоне резания не достигла максимального квазистационарного состояния. Это позволило исключить прижоги и микротрещины на обрабатываемых деталях машин, увеличить ресурс их работы, сократить до 30 % расход дорогостоящих алмазов при изготовлении алмазных кругов и т.д.

Идея прерывистого шлифования была положена в основу докторской диссертации А. В. Якимова "Технологические основы процесса шлифования кругами с прерывистой рабочей поверхностью", которую он защитил в возрасте 45 лет в 1970 году в Московском авиационном институте. По тем временам он был одним из самых молодых и перспективных докторов технических наук по специальности "Технология машиностроения".

В 1974 году Александр Васильевич стал заведующим кафедрой "Технология машиностроения" Одесского политехнического института, где под его руководством были созданы и оснащены необходимым оборудованием и приборами учебные и научно-исследовательские лаборатории кафедры.

Необходимо отметить, что руководимые им кафедры технологии машиностроения в Пермском и Одесском политехнических институтах были одними из ведущих кафедр страны – центрами научно-технологических знаний, где постоянно проводились научно-технические конференции, защищались диссертационные работы по специальности "Технология машиностроения".

Александр Васильевич постоянно находился в центре технологических событий. Защиты кандидатских и докторских диссертаций по специальности "Технология машиностроения" всегда проходили с его участием. К нему обращались за помощью аспиранты и докторанты, а также производственники, нуждающиеся в решении технологических вопросов обеспечения качества изготовления различных машин и систем, поскольку разработанный им метод прерывистого шлифования открывал широкие перспективы высококачественной обработки деталей машин.

Значительным событием для многих специалистов стала вышедшая в 1975 году монография Александра Васильевича "Оптимизация процесса шлифования". В ней мы впервые увидели удивительный мир формул и дифференциальных уравнений, доведенных до практического применения при разработке новых конструкций прерывистых кругов и определении условий бездефектной обработки сложных в изготовлении деталей, в особенности авиационного назначения. Своим научным трудом Александр Васильевич убедительно показал новые возможности развития технологии машиностроения на основе широкого применения современного математического аппарата – дифференциальных уравнений в частных производных, решения которых и сейчас вызывают большие сложности не только у технологов, но и у математиков самого высокого уровня. Александр Васильевич стал одним из первых технологов-машиностроителей, кто не испугался этих трудностей, а смело взялся за решение сложнейших дифференциальных уравнений теплопроводности материалов и добился значительных успехов в соединении теории и практики металлообработки. Ему первому удалось установить принципиально новую закономерность постоянства температуры прерывистого шлифования с течением времени обработки, тогда как при обычном шлифовании и лезвийной обработке имеет место непрерывное увеличение температуры резания и соответственно снижение эффективности обработки. Знание этой закономерности открыло новое понимание прерывистого шлифования и основных путей его развития, связанное с существенным уменьшением температуры резания и повышением качества обрабатываемых поверхностей, обеспечивающим бездефектную обработку ответственных деталей авиационной техники и других наукоемких изделий.

Его решение дифференциального уравнения теплопроводности при шлифовании, приведенное на первых страницах монографии "Оптимизация процесса шлифования", поистине стало символом прогресса технологической науки, девизом научных работ его учеников и последователей. Поэтому многие диссертационные работы по технологии машиностроения начинаются с анализа его решения дифференциального уравнения теплопроводности. Для демонстрации преимущества теоретических подходов в решении практических задач, предложенных Александром Васильевичем, в Приложении А настоящей монографии приведено одно из его самых удачных и простых решений

дифференциального уравнения теплопроводности, положенное в основу создания процесса прерывистого шлифования.

Не менее значимыми и интересными являются монографии, учебники и учебные пособия, подготовленные под научным руководством Якимова А. В.:

Качество изготовления зубчатых колес / А. В. Якимов, Л. П. Смирнов, Ю. А. Бояршинов и др. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.

Управление процессом шлифования / А. В. Якимов, А. Н. Паршаков, В. И. Свирщев, В. П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 184 с.

Якимов А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

Якимов А. В. Прерывистое шлифование. – К.; О.: Вища школа, 1986. – 175 с.

Технология автоматизированного шлифования / А. В. Якимов, В.П. Ларшин. – К: О-во "Знание" Укр. ССР, 1988. – 15 с.

Теплофизика механической обработки: учебное пособие / А. В. Якимов, П. Т. Слободяник, А. В. Усов. – К.; Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.

Обоснование маршрута обработки и размерный анализ технологических процессов: учебное пособие / А. В. Якимов, П. А. Линчевский, А. А. Якимов. – К.: УМК ВО, 1993. – 125 с.

Технология автоматизированного машиностроения: учебник / А. В. Якимов, В. С. Гусарев, А. А. Якимов, П. А. Линчевский. – К.: УМК ВО, 1993. – 440 с.

Технологія автоматизованого машинобудування: підручник / О. В. Якимов, В. С. Гусарєв, О. О. Якимов, П. А. Лінчевський. – К.: ІСДО, 1994. – 400 с.

Оптимизация технологических процессов в машиностроении: учебное пособие / А. В. Якимов, В. П. Ларшин, А. А. Якимов, Б. О. Ткаченко, Н. И. Решетнев. – К., 1995. – 105 с.

Теоретические основы интегрированных технологических систем: учебное пособие: В 5 кн. / Под общ. ред. А. В. Якимова. – Одесса: ОГПУ, 1997.

Технологія автоматизованого машинобудування: підручник / О. В. Якимов, В. С. Гусарєв, О. О. Якимов, П. А. Лінчевський, Ф. В. Новіков, Г. В. Новіков, В. П. Ларшин. – Одеса: ОДПУ, 1999. – 402 с.

Теплофізика механічної обробки: підручник / О. В. Якимов, О. В. Усов, П. Т. Слободяник, Д. В. Іоргачев. – Одеса: Астропринт, 2000. – 256 с.

Технология машиностроения: учебник / А. В. Якимов, В. Н. Царюк, А. А. Якимов, Г. А. Оборский, В. П. Ларшин, А. В. Самойленко. – Одесса: Астропринт, 2001. – 608 с.

Технологія машино- та приладобудування: підручник / О. В. Якимов, В. І. Марчук, П. А. Лінчевський, О. О. Якимов, В. П. Ларшин. – Луцьк: Редакційно-видавничий відділ ЛДТУ, 2005. – 712 с.

Технология машиностроения: учебник / А. В. Якимов, А. А. Якимов, В. П. Ларшин, В. И. Свирщев. – Пермь, 2002. – 563 с.

Начиная с 1986 года, началось активное творческое сотрудничество Новикова Г. В. и тогда еще кандидата технических наук Новикова Ф. В. (выпускников Харьковского политехнического института) с профессором Якимовым А. В. Это позволило выйти на создание и широкое внедрение в производство эффективных технологических процессов алмазного шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов. Более чем на 100 промышленных предприятиях Украины, России и Республики Беларусь были внедрены технологии алмазно-абразивной обработки изделий из высокотвердых металлических и

неметаллических материалов (твердых сплавов, керамических материалов, ферритов и твердых пород камня, износостойких покрытий и наплавок, изделий радиоэлектроники, стекла, хрусталя, огранку природных алмазов в бриллианты и т.д.).

Благодаря участию Александра Васильевича, в 1990 году Новиковым Г. В. была защищена кандидатская диссертация на тему "Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями" (научный руководитель профессор Беззубенко Н. К.), а в 1995 году Новиковым Ф. В. – докторская диссертация на тему "Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования" (научный консультант профессор Якимов А. В.). Обе диссертации были защищены в Одесском политехническом институте. За 30 лет плодотворного сотрудничества были подготовлены и изданы учебные пособия и учебники по проблемам обработки материалов и технологии машиностроения:

Високопродуктивна обробка абразивно-алмазними інструментами: навчальний посібник / О. В. Якимов, Ф. В. Новіков, О. О. Якимов. – К.: Техніка, 1993. – 152 с.;

Високопродуктивне шліфування: навчальний посібник / О. В. Якимов, Ф. В. Новіков, Г. В. Новіков, О. О. Якимов. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с.;

Теория и прогрессивные технологии глубинного алмазного шлифования: учебное пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, А. А. Якимов. – Харьков, 1995. – 102 с.;

Алмазная обработка: учебное пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, А. А. Якимов. – Киев: ІСДО, 1996. – 167 с.;

Тепловые и механические процессы при резании металлов: учебное пособие / Ф. В. Новиков, А. А. Якимов, С. Г. Зимин, Г. В. Новиков, В. А. Вайсман. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 179 с.;

Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании: учебное пособие / А. В. Якимов, Б. О. Ткаченко, С. Г. Зимин, А. А. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков. – Одесса: ОГПУ, 1998. – 272 с.;

Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: учебное пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, А. А. Якимов, Г. В. Новиков. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с.;

Теоретические основы резания и шлифования материалов: учебное пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, А. А. Якимов, Г. В. Новиков, Б. С. Серов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.;

Теоретические основы технологии машиностроения: учебник / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, А. А. Якимов, Г. В. Новиков, Н. И. Решетнев. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 491 с.

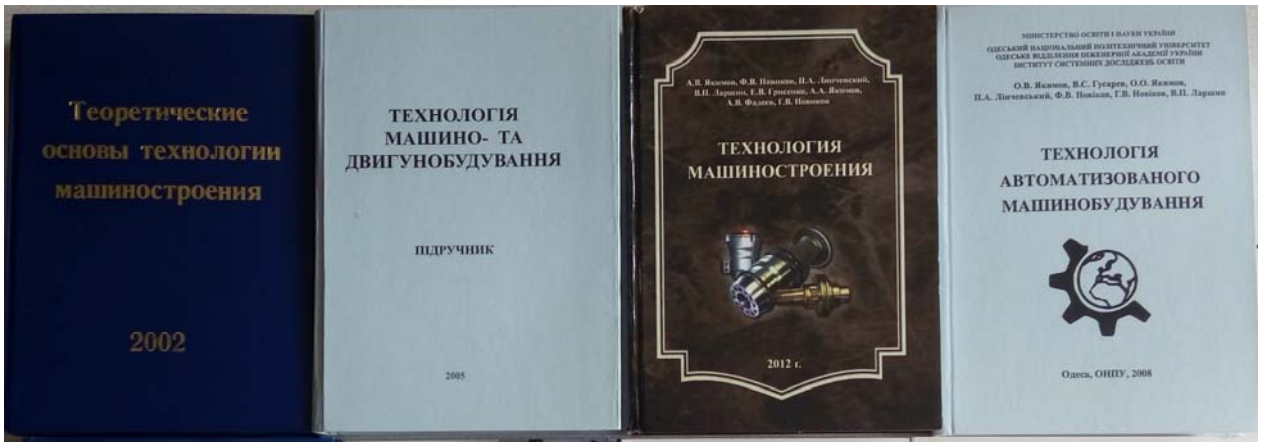
Двигатели и технологии: учебное пособие / А. Т. Дудин, Ф. В. Новиков; Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. − Одесса: ОНПУ, 2004. − 280 с.

Технологія машино- та двигунобудування: підручник / О. В. Якімов, Ф. В. Новіков, В. М. Тонконогий, О. О. Якімов, Г. О. Оборський, В. П. Ларшин, Г. В. Новіков, Ю. М. Кривошапка. − Одеса: ОНПУ, 2005. − 720 с.

Технологические процессы изготовления высокоточных деталей гидро- и пневмоаппаратуры: учебное пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Е. В. Грисенко, В. П. Ларшин, А. А. Якимов, Г. В. Новиков; Под общ. ред. проф. А. В. Якимова. − Одесса: ОНПУ, 2006. − 328 с. (Физические и компьютерные технологии).

Технологія автоматизованого машинобудування: підручник / О. В. Якимов, В. С. Гусарев, О. О. Якимов, П. А. Лінчевський, Ф. В. Новіков, Г. В. Новіков, В. П. Ларшин. − Одеса: ОНПУ, 2005. − 410 с.

Технология машиностроения: учебник / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, П. А. Линчевский, В. П. Ларшин, Е. В. Грисенко, А. А. Якимов, А. В. Фадеев, Г. В. Новиков. − Одесса: ОНПУ, 2012. − 693 с.



Как уже отмечалось, совместными усилиями были организованы и проведены в Харькове 20 международных научно-технических конференций "Физические и компьютерные технологии", подготовлено 10-томное издание "Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения", издано большое количество сборников научных статей по итогам проведенных конференций.

Ларшин В. П., Якимов А. В. и Новиков Ф. В. в Харькове (ноябрь 2000 г.)

Учениками Якимова А. В. являются известные ученые и педагоги: Свирщев В. И. (заведующий кафедрой технологии машиностроения Пермского государственного технического университета, профессор), Новоселов Ю. К. (директор департамента Севастопольского приборостроительного института, профессор), Анельчик Д. Е. (профессор кафедры металлорежущих станков и систем ОНПУ), Усов А. В. (заведу-

ющий кафедрой математики ОНПУ, Лауреат государственной премии Украины, профессор), Ларшин В. П. (профессор кафедры технологии машиностроения ОНПУ), Калинин Е. П. (профессор Петербургского политехнического университета), Новиков Ф. В. (профессор Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеца), Марчук В. И. (заведующий кафедрой приборостроения Луцкого национального технического университета). Научным консультантом по их докторским диссертациям, а также докторской диссертации Линчевского П. А. (ОНПУ) был Якимов А. В.

Александру Васильевичу своими научными работами удалось возвысить свою любимую дисциплину – технологию машиностроения – до уровня академических наук, что позволило создавать лучше, быстрее и экономичнее самолеты, холодильники и многое-многое другое …

С гордостью можно сказать: нам очень повезло жить в эпоху Александра Васильевича – выдающегося ученого, который всегда поражал своими незаурядными разносторонними знаниями в области механики, математики, теплофизики, материаловедения, технологии машиностроения и других наук. Трудно назвать человека, который бы так глубоко понимал "весь букет" фундаментальных наук и мог их эффективно использовать для решения практических технологических задач. Его основополагающие решения по тепловым и механическим процессам, возникающим при резании материалов, и разработанные высокоэффективные технологии прерывистого шлифования получили всеобщее признание и утвердили Александра Васильевича Якимова как мирового классика технологии машиностроения. Чего только стоят его работы по теории зубошлифования – одного из самых сложных видов механической обработки. Лишь в его книгах можно легко и просто разобраться с этим сложным с кинематической и теплофизической точек зрения процессом. Лаконично и в доступной форме написанные им книги по технологии машиностроения стали научным руководством для целых поколений специалистов и студентов.

Александр Васильевич вобрал в себя лучшие качества, присущие человеку: простоту, скромность, честность, порядочность, отзывчивость, желание прийти на помощь человеку в трудную минуту. За это мы его очень любили, и будем всегда помнить. Рождение наших конференций «Физические и компьютерные технологии», проводимых на Харьковском машиностроительном заводе "ФЭД", как уже отмечалось,

в первую очередь, обязано Александру Васильевичу Якимову. Его можно назвать “отцом” конференций, идея проведения которых впервые возникла в 1999 году на пороге нового тысячелетия и совпала с возрождением экономики Украины, становлением новых производственных отношений и первыми успехами харьковских предприятий, которые получили первые серьезные заказы после долгого застоя и блестяще с ними справились, что стало мощным импульсом возрождения былых достижений трудовых коллективов предприятий.

За особые заслуги в работе Александр Васильевич награжден Почетной грамотой Верховного Совета РСФСР и медалями. На протяжении 20 лет он возглавлял методическую комиссию Министерства образования и науки. С 1980 по 1985 гг. был членом комитета по присуждению Государственных премий при Совете Министров УССР.

С 1986 по 1989 гг. был членом экспертного совета Высшей аттестационной комиссии УССР. Был председателем Специализированного Совета по присуждению научных степеней.

Прошло два года, как перестало биться серце Алексадра Васильевича Якимова. До последних дней жизни он оставался верным своим идеалам: НАУКЕ, которую он любил и которой посвятил все свои прекрасные годы, ПРОИЗВОДСТВУ, которое он обогащал практическими разработками и доводил до мировых стандартов, ОБРАЗОВАНИЮ, которому отдавал все свои силы, знания и богатый жизненный опыт, воспитывая подрастающее поколение в духе патриотизма и высокого профессионализма.

В декабре 2016 года в ХНЭУ имени Семена Кузнеца состоялась очередная 22 конференция, на которой выступающие отмечали большие заслуги Александра Васильевича в развитии и популяризации научных технологических знаний и активизации участия молодых специалистов в творческой деятельности по созданию эффективных технологий современного производства.

Подчеркивался его огромный вклад в создание новых эффективных технологий машиностроения, которые широко используются в производстве. Разработанный им метод прерывистого шлифования стал образцом решения задач металлообработки благодаря возможности существенного снижения силы и температуры резания и обеспечения высококачественной бездефектной обработки деталей машин без уменьшения производительности обработки.

На конференции (декабрь 2016 г.)

На конференции (декабрь 2016 г.)

Отмечалась также возможность улучшения экологических условий обработки прерывистыми кругами, поскольку применение прерывистого шлифования благодаря ударно-циклическому взаимодействию прерывистого круга с обрабатываемой деталью позволяет обеспечить его высокую режущую способность, которая в условиях шлифования

обычным сплошным абразивным кругом той же характеристики фактически не обеспечивалась. Поэтому для поддержания высокой режущей способности сплошного круга требовалась его частая механическая правка со съемом значительного поверхностного слоя круга, что приводило к образованию на рабочем месте обильной абразивной пыли, вредной для здоровья рабочего и применяемого оборудования, т.е. ухудшало экологию производства. В связи с этим постоянно поступали жалобы от рабочих о неудовлетворительных с точки зрения экологии условиях работы и необходимости применения других абразивных кругов, работающих эффективно в режиме самозатачивания и не ухудшающих экологию рабочего места. Однако для шлифования труднообрабатываемых материалов требуется применение более твердых абразивных кругов, иначе при использовании относительно мягких абразивных кругов процесс шлифования может быть неосуществим из-за их интенсивного износа. В результате возникала трудноразрешимая задача шлифования материалов повышенной твердости. Эффективным ее решением стало применение прерывистых кругов, которые, обладая высокой твердостью, обеспечивали работу в режиме интенсивного самозатачивания, не требуя их дополнительной механической правки, так как, по сути, правка производилась непрерывно в процессе шлифования. При этом достигалось снижение размерного износа круга, поскольку частые правки обычных сплошных кругов приводили к значительным потерям рабочего слоя круга. Поэтому применение прерывистого шлифования позволило решить проблему улучшения экологии производства, которая в настоящее время приобретает особо важное значение в связи с техническим перевооружением предприятий и улучшением условий работы для рабочих.

Особенно значительный эффект достигнут от применения шлифования прерывистыми алмазными кругами на металлических связках, которые не требуют традиционных электрохимической и электроэрозионной правок, ухудшающих экологические условия обработки. В значительной степени это относится к электрохимической правке, осуществляемой с применением сильных электролитов, вредных для здоровья рабочего и используемого оборудования. Применение прерывистых алмазных кругов благодаря осуществлению, по сути, непрерывной механической правки в процессе шлифования вследствие ударного характера взаимодействия рабочих выступов с обрабатыва-

емым материалом, позволяет стабильно обеспечить их высокую режущую способность и исключить необходимость применения дополнительных электрохимической и электроэрозионной правок, ухудшающих экологические условия обработки. Таким образом, разработанный профессором Якимовым А. В. процесс прерывистого шлифования позволяет решить как технологические, так и экологические задачи, обеспечить высококачественную и высокопроизводительную обработку деталей машин, что имеет первостепенное значение при создании конкурентоспособной машиностроительной продукции.

Коллектив кафедры "Технология машиностроения"
Одесского национального политехнического университета
в день рождения профессора Якимов А. В. (15.03.2013 г.)

Александр Васильевич до последних дней своей жизни работал на кафедре "Технология машиностроения" Одесского национального политехнического университета. Созданная им всемирно известная научная технологическая школа в г. Одесса верна традициям своего Учителя и продолжает активно участвовать в решении научных и практических проблем технологии машиностроения и создании высокоэффективных технологических процессов обработки деталей машин и других разнообразных высокоточных изделий, изготовленных из труднообрабатываемых материалов.

1.3. Творческий научный коллектив кафедры техники и технологий Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеца

Современный уровень развития машиностроения и техническое перевооружение предприятий требуют создания и применения новых технологий, оборудования, инструментов и, естественно, подготовки высококвалифицированных кадров, способных решать сложные задачи по организации производства и выпуску конкурентоспособной машиностроительной продукции. В успешном решении этих задач важное значение приобретают формы обучения студентов в высших учебных заведениях по техническим и экономическим направлениям. Выпускники технических университетов, наряду со специальными техническими знаниями, должны хорошо владеть экономическими знаниями, а выпускники экономических университетов, наоборот, наряду со специальными экономическими знаниями, должны хорошо владеть общетехническими (инженерными) знаниями. Это позволит максимально реализовать потребности производства в профессиональных кадрах, вывести предприятия Украины на мировые рынки и занять достойное место среди ведущих мировых фирм и компаний, занимающихся созданием наукоемкой машиностроительной продукции, в особенности авиационной и космической техники.

Необходимо отметить, что соединение технологических и экономических знаний является важным направлением развития научно-технического прогресса и создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. В особой мере это относится к подготовке менеджеров, маркетологов и других специалистов экономики, которые, наряду с экономическими знаниями, должны владеть инженерно-технологическими знаниями для эффективного решения практических задач.

Большой опыт подготовки специалистов, владеющих в одинаковой мере техническими и экономическими знаниями, накоплен в Харьковском национальном университете имени Семена Кузнеца – бывшем Харьковском инженерно-экономическом институте (ИНЖЭК).

Длительное время, начиная с 1930 года – года основания Харьковского инженерно-экономического института, его выпускники получали специальность инженер-экономист. Это открывало им широкие

перспективы в производственной деятельности по инженерному и экономическому направлениям. Многие из них после нескольких лет работы становились руководителями предприятий, поскольку имели фактически двойное образование: инженера и экономиста, что ставило их в более выигрышное положение по отношению к выпускникам других институтов и университетов. Так, в 1970–1980-е годы на большинстве крупных харьковских промышленных предприятий директорами и главными инженерами были выпускники ИНЖЭКа. По сути, ИНЖЭК готовил организаторов и руководителей производства, что вызывало большой интерес среди абитуриентов. По уровню инженерного образования выпускники ИНЖЭКа мало в чем уступали выпускникам других технических ВУЗов, например, ХПИ, ХАИ и т.д. В течение первых трех лет студенты ИНЖЭКа изучали все общеинженерные дисциплины в полном объеме и в несколько сжатом виде – специальные технические и технологические дисциплины, такие как технология машиностроения и металлорежущие станки, теория резания и режущие инструменты, теория обработки металлов давлением, технология металлов, технологии важнейших отраслей промышленности и другие. Эти дисциплины преподавали кандидаты и доктора технических наук, имеющие к тому же большой опыт практической работы.

Дипломная работа выпускника ИНЖЭКа состояла из технической и экономической частей. Требования к технической части диплома были такие же, как и в других технических ВУЗах. Инженерная подготовка в ИНЖЭКе осуществлялась несколькими кафедрами: технологии машиностроения, деталей машин, теоретической механики и инженерной графики и др. При этом основная роль в инженерной подготовке студентов отводилась кафедре технологии машиностроения, которая была создана в 1930 году с целью обеспечения технологической подготовки инженеров-экономистов в области машиностроения и являлась старейшей кафедрой института. В послевоенное время (1948 году) кафедра была восстановлена и оснащена всем необходимым оборудованием, включая современные металлорежущие станки (в том числе с ЧПУ), кузнечно-прессовое, сварочное и другое оборудование, а так же всеми необходимыми контрольно-измерительными приборами (микроскопы МБС-9, МИМ-7, МИМ-8, ЭМВ-100Л, профилограф-профилометр ВЭИ "Калибр", проектор для изучения зубчатого зацепления и др.). Всего имелось в наличии более 100 наименований новейших образцов отече-

ственного оборудования. На кафедре были созданы две учебные лаборатории, в которых демонстрировались операции штамповки пластин статора электродвигателя, операции обработки деталей с применением компьютерного программного обеспечения и т.д.

По количеству и качеству имевшегося оборудования кафедра технологии машиностроения ИНЖЭКа ничем не уступала известным кафедрам резания материалов ХПИ и ХАИ. Это позволяло готовить выпускников ИНЖЭКа с глубокими инженерными знаниями.

За время своего существования кафедра постоянно была укомплектована квалифицированными преподавателями, которые имели большой производственный опыт и хорошо владели технологическими и экономическими знаниями. Это обеспечивало подготовку высококлассных специалистов, которые успешно работали в разных отраслях промышленности. В тяжелый для Украины период перехода на рыночную экономику выпускники тогда уже Харьковского государственного экономического университета также были в авангарде создания малого и среднего бизнеса в промышленном производстве.

Заведующими кафедрой в разное время были: канд. экон. наук, доцент Кононенко В. В., канд. техн. наук, доцент Неделин Ю. Л., канд. техн. наук, доцент Назаров Ю. Ф., канд. техн. наук, доцент Коваленко В. С., канд. техн. наук, доцент Алимочкин В. М., докт. техн. наук, профессор Кобрин В. Н. В 1997–2011 гг. заведующим кафедрой был канд. техн. наук, доцент Крюк А. Г., а в 2011–2017 гг. - докт. техн. наук, профессор Новиков Ф.В.

Канд. экон. наук, доцент Кононенко Виктор Васильевич в 1931 г. окончил графическое отделение Харьковского художественно-промышленного техникума, работал гравером-литографом. В 1938 г. окончил механический факультет Харьковского автодорожного института и получил специальность инженера-механика. В 1941 г. был направлен на работу на Среднеуральский механический завод (г. Свердловск) инженером-технологом, где проявил себя талантливым и опытным специалистом, организатором производства в тяжелое военное время. Работал начальником цеха, добился больших производственных показателей за счет применения новых технологий и новых форм организации труда. После окончания аспирантуры Харьковского инженерно-экономического института в 1948 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему "Организация производственного процесса по-

точной работы в механических цехах заводов серийного производства", стал кандидатом экономических наук. Длительное время с 1951 по 1973 г.г. возглавлял кафедру технологии машиностроения, был деканом машиностроительного факультета и проректором по научной работе. Преподавал учебные дисциплины: резание материалов, станки и инструменты, новейшие достижения техники и технологии машиностроения, важнейшие проблемы экономики. Много усилий приложил в организации кафедры, создал уникальный на то время станочный парк в Харьковском инженерно-экономическом институте, подготовил многих руководящих специалистов предприятий индустриального Харькова. Большое внимание уделял перспективным научным направлениям в развитии производства: эффективному применению станков с числовым программным управлением и промышленных роботов, применению синтетических сверхтвердых материалов в создании инструментов, проектированию технологических процессов с помощью ЭВМ и т.д. [52; 112]. В свободное время увлекался живописью, писал картины и выставлял в галерее.

В эти годы на кафедре профессором работал Аврамов Федор Павлович, который до прихода в институт был главным инженером Харьковского совнархоза, а в военное время работал в цехе по производству артиллерийских систем "Катюша". Свой бесценный производственный опыт и знания он передавал студентам.

Основную дисциплину "Технология металлов" преподавали канд. техн. наук, доцент Указов Виктор Поликарпович, Островерх Валентин Андреевич, Гулевский Владимир Дмитриевич. Научными интересами Указова В. П. были исследования напряженно-деформированного состояния ответственных деталей объектов новой техники, им создана научная лаборатория по исследованию голограмм. Островерх В. А. занимался литейным производством, организовал учебную лабораторию литейного производства. Гулевский В. Д. проводил исследования напряженно-деформированного состояния деталей при холодном выдавливании деталей, разрабатывал и внедрял в производство на Харьковском велосипедном заводе процессы холодного выдавливания деталей. Кроме того, он заведовал лабораторией холодного выдавливания в институте ПТИМАШ.

Канд. техн. наук Губин Геннадий Иванович преподавал дисциплину "Концепции современного естествознания", был изобретателем.

Его научные интересы – управление динамикой полета летательного аппарата; разработка и исследование алгоритмов бесструктурного синтеза корректирующих контуров для сложных динамических систем.

Канд. техн. наук, доцент Левченко Николай Васильевич преподавал дисциплины: технология машиностроения, технология металлов. Выпускник Харьковского политехнического института, после окончания аспирантуры по кафедре резания материалов и металлорежущих инструментов, он в 1970 году защитил кандидатскую диссертацию на тему "Исследование процесса электроалмазного шлифования инструментальных материалов". В 1974 году с его участием опубликована монография "Электроалмазное шлифование инструментальных материалов" (авторы: Семко М. Ф., Грабченко А. И., Левченко Н. В., Раб А. Ф.) [193]. Активно занимался разработкой и внедрением на предприятиях Харькова эффективных технологических процессов электроалмазного шлифования различных инструментальных материалов. Является одним из первых исследователей, определивших высокую эффективность применения искусственных алмазов в качестве инструментальных абразивных материалов для повышения качества и производительности абразивной обработки на финишных операциях.

В 1970-е годы кафедру возглавлял крупный специалист в области технологии приборо- и машиностроения, канд. техн. наук, доцент Назаров Юрий Федорович. После окончания аспирантуры в Харьковском институте радиоэлектроники в 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему "Исследование качества поверхностей пружинных штырей и совершенствование технологии их изготовления" по специальности 05.11.14 "Технология приборостроения". Эта и все последующие его работы посвящены созданию новых образцов ракетно-космической техники [77; 124; 187]. В последствии он стал доктором технических наук и професором. Работал первым проректором по научной работе Московского государственного открытого университета и заведующим кафедрой, являлся членом ученых советов по защитам докторских диссертаций МВТУ им. Н. Э. Баумана и ФГУП НПО "Техномаш". Активно участвовал в работе Федерации Космонавтики России, являясь членом бюро Президиума. Его научные интересы – обработка поверхностей ответственных деталей объектов новой техники с целью обеспечения их заданными оптическими свойствами. Создал научную

школу по суперпрецизионной обработке и нанотехнологиям, опубликовал свыше 130 научных работ и изобретений.

Затем кафедру возглавлял канд. техн. наук, доцент Неделин Ю. Л., випускник Харьковского политехнического института. В 1971 году он защитил кандидатскую диссертацию на тему: "Исследование процесса алмазного хонингования легированных сталей". Опубликованные им научные работы [79; 80] имели большое теоретическое и практическое значение, поскольку были направлены на разработку и внедрение в производство нового по тому времени прогрессивного технологического процесса алмазного хонингования.

С 1986 по 1997 годы заведующим кафедрой был канд. техн. наук, доцент Алимочкин В. М. – випускник моторостроительного факультета Харьковского авиационного института. Работал на кафедре резания материалов ХАИ. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему "Исследование и внедрение импульсной одноударной расчеканки шипов турбинных лопаток". Подготовил учебные пособия:

Применение станков с числовым программным управлением в авиационной промышленности / В. М. Алимочкин. – Х. : ХАИ, 1982. – 111 с.

Проектирование рациональных технологических процессов обработки деталей на станках с программным управлением / В. М. Алимочкин. – Х. : ХАИ, 1985. – 67 с.

Известен научными работами по обработке металлов давлением и резанием [1; 2]. Его работы по обработке металлов резанием отличались глубокими теоретическими исследованиями физических явлений, происходящих в процессе резания, и важными практическими решениями по совершенствованию конструкций режущих инструментов и выбору оптимальных условий механической обработки, в особенности при резании композиционных материалов сборными лезвийными инструментами с износостойкими покрытиями.

На кафедре на протяжении 30 лет (1976–2006 гг.) работал прекрасный педагог и известный ученый, ветеран Великой Отечественной войны, участник героической обороны Севастополя (1941–1942 гг.) канд. техн. наук, профессор Дудко Петр Дмитриевич. Он преподавал дисциплину "Технология металлов" и внес значительный вклад в развитие кафедры, разработал концепцию подготовки инженеров-экономистов и менеджеров.

Петр Дмитриевич является одним из признанных основателей технологий финишной абразивной обработки, применяемых при изготовлении высокоточных изделий авиационной и космической отраслей. Будучи научным руководителем, через аспирантуру подготовил ряд научных работников, из которых Назаров Юрий Федорович, Невлюдов Игорь Шакирович и Рубан Виктор Михайлович впоследствии стали докторами технических наук, внесли большой вклад в развитие технологий машино- и приборостроения. Среди выполненных научных исследований Петра Дмитриевича имеют особое значение разработки в области финишных процессов для изготовления деталей космической техники и зеркал для лазеров повышенной мощности.

Дудко Петр Дмитриевич родился 7 июля 1919 года в Полтавской области. В 1935 году окончил рабфак в г. Краматорске, а в 1941 году – Рубежанский химико-технологический институт (Луганская область) и получил специальность инженер-механик. В самом начале Великой Отечественной войны − 8 июля 1941 года был призван в Военно-морской флот. Проходил службу в Ленинградском отряде подводного плавания им. С.М. Кирова, а затем с 10 августа – в Севастопольском училище береговой обороны им. ЛКСМУ. С 30 октября 1941 года принимал участие в Героической обороне Севастополя, где был тяжело ранен 14 января 1942 года. После ампутации правой руки был вывезен из Севастополя на Кавказ в Горийский госпиталь. За участие в боевых действиях награжден орденом "Красная звезда" и шестью медалями.

В мае 1942 года после выписки из госпиталя работал начальником штаба МПВО при Рубежанском горисполкоме, а затем перешел на преподавательскую работу в Рубежанский химико-технологический институт на кафедру технологии металлов. После закрытия этого института в сентябре 1949 года был переведен в Харьковский химико-

технологический институт, который в 1950 году вошел в состав Харьковского политехнического института им. В.И. Ленина. 18 марта 1966 года Петр Дмитриевич успешно защитил кандидатскую диссертацию по проблемам доводки точных деталей свободным абразивом (автореферат которой приведен в Приложении Б). С 1961 по 1974 год он работал доцентом, затем заведующим кафедрой технологии приборостроения Харьковского института радиоэлектроники, где подготовил четырех кандидатов технических наук.

В изобилии талант и дарования Петра Дмитриевича как педагога и научного работника раскрылись в Харьковском инженерно-экономическом институте (ныне Харьковском национальном экономическом университете имени Семена Кузнеца). Он всегда был кумиром студентов и преподавателей. Непревзойденный авторитет завоевал, будучи на протяжении многих лет постоянным руководителем научно-технических семинаров при Республиканском Доме научно-технической пропаганды в г. Киеве по проблемам обработки точных деталей свободным абразивом. Большинство участников этих семинаров, не говоря уж о его учениках, постоянно испытывали на себе его отеческую заботу и внимание.

Прошло уже почти 10 лет как ушел из жизни Петр Дмитриевич Дудко – прекрасный человек, видный ученый, педагог, профессор и Учитель, посвятивший себя благородному делу – воспитанию подрастающего поколения и подготовке высококвалифицированных кадров, развитию высшей школы. Петр Дмитриевич прожил большую и трудную, насыщенную разными событиями жизнь. В следующем году ему исполнилось бы 100 лет. Несмотря на преклонный возраст, он буквально до последних дней сохранял бодрость духа, занимал активную жизненную позицию, работал профессором Харьковского национального экономического университета и учил студентов, много времени уделял научной деятельности, писал замечательные книги. И главное, у него все получалось на высшем уровне. Он никогда не унывал, всегда находил выход из самого трудного положения − будь то в мирное или грозное военное время. Написанные им научные книги и статьи отличались актуальностью и практичностью, лаконичностью и глубиной научного познания. Девизом жизни был высочайший профессионализм, честность и порядочность, которые он с честью передал своим ученикам. Ему всегда была присуща неуемная тяга к знаниям, которая

передавалась всем окружающим: студентам, преподавателям, производственникам, с которыми он постоянно был связан.

Петр Дмитриевич − один из организаторов и вдохновителей наших конференций "Физические и компьютерные технологии". Он был их душой и сердцем, считал важным развитие союза науки и производства, популяризировал внедрение научных разработок в производство. Еще при жизни был признан классиком абразивной обработки деталей машин. Его имя стояло в ряду родоначальников современных технологий обработки высокоточных деталей.

Учебные пособия и монографии преподавателей кафедры

Петр Дмитриевич активно участвовал в общественной жизни своего университета и города Харькова. Был членом областного Совета ветеранов Великой Отечественной войны при обществе "Знание". За свою жизнь он подготовил около 200 научных трудов (в том числе ряд монографий и учебных пособий), более 10 авторских свидетельств на изобретения. Заслуживают особого внимания работы, подготовленные с его участием:

1. Пономаренко В. С, Сіроштан М. А., Бєлявцев М. І., Дудко А. Д., Тимонін О. М. Системи технологій: навчальний посібник / Під ред. П. Д. Дудко. − Харків: Око, 2000. − 376 с.

2. Дудко П. Д., Крюк А. Г., Савченко Н. Ф., Чистяк В. Г., Шкурупий В. Г. Основы технологических систем: учебное пособие. − Харьков: Изд. ХГЭУ, 2002. − 248 с.

3. Гринева В. Н., Дудко П. Д., Крюк А. Г., Пономаренко В. С., Чистяк В. Г., Шкурупий В. Г. Проблемы развития современного общества:

культура, инновации, высокие технологии и экология: научное издание. − Харьков: Изд. ХГЭУ, 2003. − 300 с.

4. Гринева В. Н., Дудко П. Д., Пономаренко В. С., Тимонин А. М., Крюк А. Г., Савченко Н. Ф., Чистяк В. Г., Шкурупий В. Г. Системы технологий: учебное пособие / Под ред. П. Д. Дудко, А. Г. Крюка. − Харьков: Изд. ХГЭУ, 2003. − 292 с.

Гринева В. Н., Дудко П. Д., Крюк А. Г., Савченко Н. Ф., Шкурупий В. Г., Браташевский А. Ю. Товароведение: учебное пособие / Под ред. П. Д. Дудко, А. Г. Крюка. − Харьков: ИД ”ИНЖЭК”, 2005. − 456 с.

Петр Дмитриевич относился к той категории воинов-фронтовиков, которые, разгромив злейшего врага человечества – немецкий фашизм, не страшась усталости, смело сели за парты, блестяще овладели знаниями и своим творческим трудом, научными достижениями и успехами в подготовке научных и производственных кадров, внесли огромный вклад в укрепление мощи и обороноспособности нашей страны. Для всех нас Петр Дмитриевич навсегда останется воином, героем-победителем, верным сыном своего Отечества, до конца выполнившим свой священный долг перед Родиной, образцом мужества и силы духа, беззаветного служения народу и развитию научно-технического прогресса на благо человечества.

В 1998 году кафедра "Технология машиностроения" была реорганизована в кафедру "Техника и технологии". В это время количество инженерных дисциплин значительно сократилось, поскольку университет уже стал называться Экономическим и осуществлялась подготовка специалистов лишь экономических направлений. Инженерное образование рассматривалось как важный фактор углубления экономических знаний. Вместе с тем, кафедра по-прежнему занимала ведущую роль в подготовке выпускников университета. На кафедре проводились глубокие научные технологические исследования. С ней связаны многие научно-практические достижения в развитии машиностроительных, авиационно-космических и других наукоемких технологий.

Значительных успехов в научной работе кафедра техники и технологий достигла после 2000 года, когда ее возглавлял канд. техн. наук, доцент Крюк Анатолий Григорьевич (с 1997 по 2011 гг.), а с 2011 года – докт. техн. наук, профессор Новиков Федор Васильевич. В эти годы в состав кафедры входили опытные педагоги и специалисты-технологи: докт. техн. наук, профессор Свидерский Владимир Павло-

вич, кандидаты технических наук, доценты Савченко Николай Федорович, Шкурупий Валентин Григорьевич, Чистяк Владимир Григорьевич, Дитиненко Станислав Александрович, Стрельчук Роман Михайлович, старший преподаватель Демиденко Анатолий Ильич. Это был сплоченный творческий коллектив единомышленников, высококвалифицированных педагогов и специалистов-технологов.

На кафедре преподавались учебные дисциплины: технология машиностроения, технология заготовительного производства, машины и оборудование, обработка металлов резанием, стандартизация, техническая механика, материаловедение, черчение, издательско-полиграфические материалы, системы технологий, основы технологических систем, системы технологий промышленности, системы технологий в машиностроении, системы технологий в строительстве, системы технологий в здравоохранении, системы технологий в торговле, современные технологические системы, системы автоматизированного проектирования технологических процессов, инновационные технологии производства продукции и предоставления услуг, технический аудит предприятий и организаций, товароведение, физика, электротехника и электроника, компьютерная графика и визуализация и др.

Преподаватели кафедры (2003 г.)

Преподаватели кафедры (2009 г.)

Коллектив кафедры (2016 г.)

Преподаваемые на кафедре учебные дисциплины были направлены на формирование у студентов компетентностей: уметь осуществлять планирование и организацию производства современных конкурентоспособных изделий на основе технического и технологического обновления путем объединения технических и экономических знаний; разрабатывать технические и технологические мероприятия по повышению эффективности производства и производительности труда; определять перспективные направления технического перевооружения производства и модернизацию предприятий с целью повышения конкурентоспособности на внутренних и внешних рынках.

Проф. Смирный М. Ф., проф. Новиков Ф. В.,
студент Горбик А. Ю., доц. Гоков А. М. с патентами Украины

Во время встречи преподавателей кафедры
со студентами в общежитии

Прохождение студентами производственной практики
в ООО "Империя металлов"

На кафедре выполнялись фундаментальные научные исследования по проблемам технологии машиностроения, обработки металлов резанием и давлением, физико-технической обработки, разработки технологий высокоскоростного резания материалов и прогрессивных конструкций инструментов; разработки эффективных технологий шлифования труднообрабатываемых материалов алмазными кругами на металлических связках с применением методов электроэрозионной правки; разработки научных основ технологического обеспечения геометрических, физико-химических и оптических характеристик высокоточных поверхностей деталей летательных аппаратов, работающих в условиях действия светового потока; разработки импульсных технологий обработки металлов методами пластического деформирования, в том числе и для изготовления крупногабаритных изделий; разработки теории и технологии изготовления гнутых профилей со специальными эксплуатационными качествами методами валковой формовки.

В 2015 году кафедра была реорганизована в кафедру "Естественные науки и технологии". Состав кафедры расширился, в нее во-

шли докт. физ.-мат. наук, профессор Платков В. Я., докт. техн. наук, профессор Саввова О. В., канд. физ.-мат. наук, доцент Гоков А. М. и канд. техн. наук, доцент Цапко Н. С., а в 2016 году – докт. техн. наук, профессор Смирный М. Ф. (Заслуженный изобретатель Украины, автор около 900 изобретений и патентов Украины).

Каждый из них достиг значительных успехов в научно-педагогической деятельности, о чем свидетельствует достаточно большой перечень изданных монографий, научных статей, учебников, учебных пособий, полученных Авторских свидетельств на изобретения и Патентов Украины. Так, в репозитарии ХНЭУ имени Семена Кузнеца насчитывается около 2000 научных и учебных работ, опубликованных сотрудниками кафедры техники и технологий в разные годы. Из них более 30 монографий и 50 учебных пособий, свыше 1200 научных статей в отечественных и зарубежных изданиях, более 300 авторских свидетельств на изобретения и патентов Украины. За предыдущее десятилетие опубликованы следующие учебные пособия и монографии:

1. Системи технологій: навчальний посібник / В. Г. Шкурупій, Ф. В. Новіков, Ю. В. Шкурупій. − Харків: Вид. ХНЕУ, 2008. – Ч. 1. – 288 с.

2. Системи технологій: навчальний посібник / В. Г. Шкурупій, Ф. В. Новіков, Ю. В. Шкурупій. − Харків: Вид. ХНЕУ, 2008. – Ч. 2. – 480 с.

3. Технология обработки типовых деталей: учебное пособие / Г. П. Кремнев, В. М. Колесник, Ф. В. Новиков, И. А. Рябенков. – Харьков: Изд-во "С.А.М. ", 2014. – 156 с.

4. Системы технологий: учебное пособие / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков, В. М. Колесник. – Днепропетровск: ЛИРА, 2015. – 140 с.

5. Кремнев Г. П. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении: учебное пособие / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков. – Днепропетровск : ЛИРА, 2016. – 297 с.

6. Кремнев Г. П. Типовые технологические процессы механической обработки деталей машин: учебное пособие / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков, В. М. Колесник. – Днепропетровск : ЛИРА, 2017. – 252 с.

7. Иванов И. Е. Высокоэффективная технология изготовления резьбовых отверстий в горловинах баллонов на автоматических линиях: монография / И. Е. Иванов, Ф. В. Новиков, Е. И. Иванов. − Мариуполь: Изд. ПГТУ. − 2011. − 209 с.

8. Новіков Ф. В. Теорія високоякісної обробки деталей машин : монографія / Ф. В. Новіков. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2013. – 390 с.

9. Прогресивні технології механічної обробки: монографія / Новіков Ф. В., Крюк А. Г., Шкурупій В. Г. та ін. ; за заг. ред. докт. техн. наук, професора Новікова Ф. В. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2012. – 372 с.

10. Новіков Ф. В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.

11. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування: монографія / Ф. В. Новіков. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2014. − 412 с.

12. Новіков Ф. В. Основи струминно-абразивної обробки дрібних деталей: монографія / Ф. В. Новіков, О. О. Анділахай. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2014. − 348 с.

13. Новіков Ф. В. Математичне моделювання і оптимізація процесів металообробки: монографія / Ф. В. Новіков. – Харків : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. − 384 с.

14. Механічна обробка великогабаритних деталей зі зносостійкими наплавочними матеріалами : монографія / Ф. В. Новіков, В. О. Анділахай, І. Є. Іванов, Д. Ф. Новіков. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. − 312 с.

15. Новіков Ф. В. Основи обробки металевих виробів з оптичними властивостями : монографія / Ф. В. Новіков, В. Г. Шкурупій. – Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. − 388 с.

16. Новіков Ф. В. Фінішна обробка деталей різанням: монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 270 с.

17. Новиков Ф. В. Современные экологически безопасные технологии производства: монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Днепропетровск : ЛИРА, 2017. − 372 с.

18. Новиков Ф. В. Основы повышения качества и производительности механической обработки: монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Днепропетровск : ЛИРА, 2017. − 452 с.

19. Новиков Ф. В. Оптимальные решения в металлообработке : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Днепропетровск : ЛИРА, 2017. − 476 с.

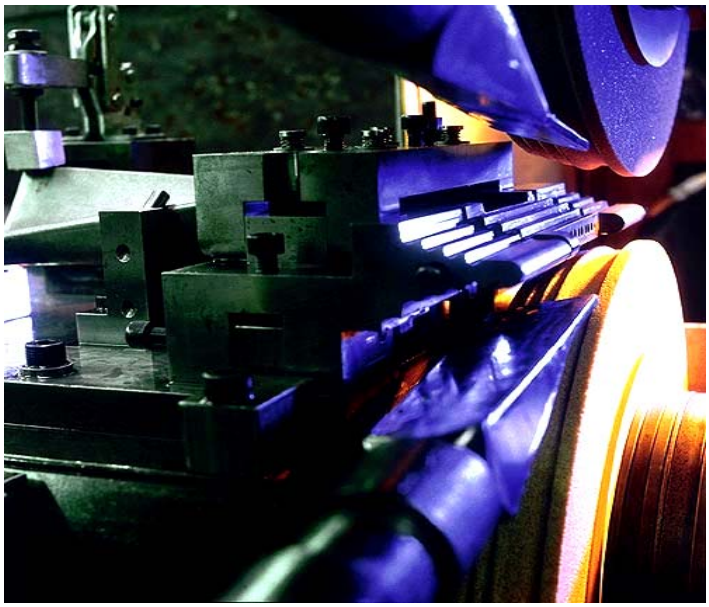
20. Савченко М. Ф. Технологічне забезпечення діяльності малих підприємств : монографія / М. Ф. Савченко, Ф. В. Новіков. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2017. – 272 с.

21. Новиков Ф. В. Оптимальные решения в технологии машиностроения: монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, В. Г. Шкурупий. – Днепропетровск : ЛИРА, 2018. − 424 с.

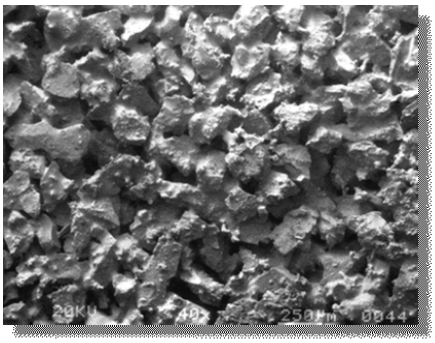
22. Шлифование наноструктурных твердых сплавов : учебное пособие / М. Д. Узунян, Р. М. Стрельчук. – Харьков: Изд-во "Підручник НТУ "ХПІ", 2015. – 182 с.

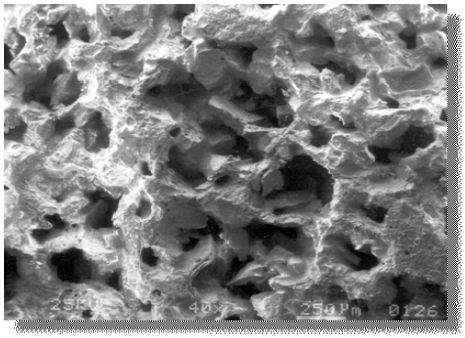
Преподавателями кафедры за время ее существования подготовлено 22 кандидата и 5 докторов технических наук. Выполнялись хоздоговора с машиностроительными предприятиями по тематике разработки и внедрения новых технологий в производство. Это прогрессивные технологии алмазного шлифования деталей из твердых сплавов, высокопрочных сталей и наплавленных материалов, изготовления высокоточных деталей авиационно-космического назначения, лазерных зеркал, деталей двигателей, буровой техники, шахтного и металлургического оборудования, огранки алмазов в бриллианты и обработки технического стекла, керамик и ферритов, изделий из хрусталя, твердых пород камня и других труднообрабатываемых материалов.

Разработанная на кафедре технология глубинного однопроходного шлифования высокопористыми абразивными кругами



Глубинное шлифование замка турбинной лопатки

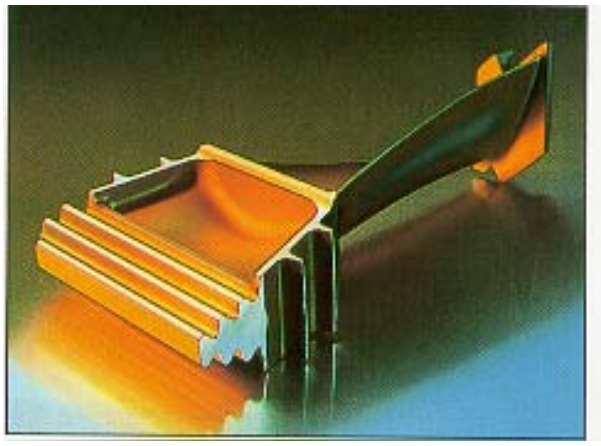




Рабочие поверхности стандартного круга и высокопористого круга, изготовленного по технологии Vortex

Применение глубинного шлифования позволяет съем всего припуска (до 50 мм) осуществлять за один проход круга с высокими показателями производительности и качества обработки, а высокопористые абразивные круги снижают силы и температуру резания.

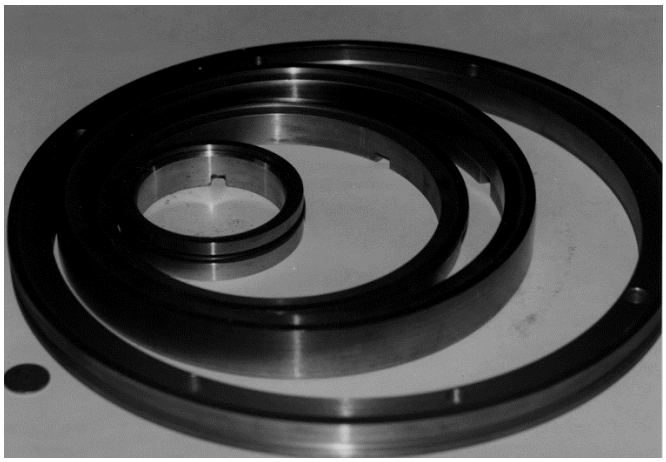
Детали, изготовленные из труднообрабатываемых материалов, после шлифования по разработанным на кафедре технологиям



Турбинная лопатка

Зубчатые колеса

Детали пары трения



Кольца из релита

Технология электроэрозионного шлифования алмазными кругами на высокопрочных металлических связках

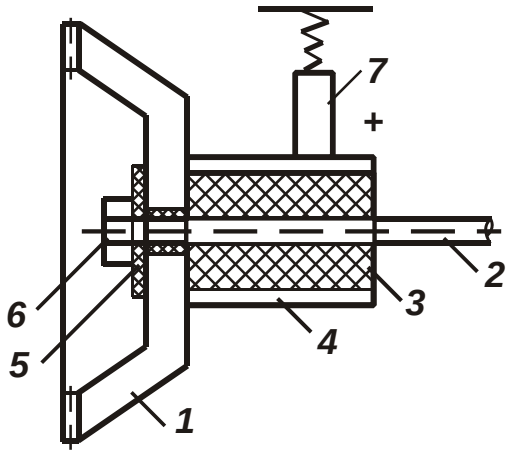


Схема подведения электрического тока к алмазному кругу:
1 – алмазный круг; 2 – шпиндель станка;
3 – электроизоляционная втулка; 4 – бронзовое кольцо;
5 – текстолитовая (электроизоляционная) шайба; 6 – гайка; 7 – щетка

Использование непрерывной или периодической электроэрозионной правки алмазного круга обеспечивает его высокую режущую способность, что приводит к снижению силы и температуры резания, повышению производительности и качества обработки. Появляется возможность совмещения предварительного и окончательного шлифования в одну операцию, что снижает трудоемкость обработки.

Преподаватели кафедры "Техника и технологии"

Крюк Анатолий Григорьевич родился 2.01.1947 года в г. Глухов Сумской обл. В 1970 году окончил Харьковский политехнический институт по специальности "Обработка металлов давлением" и получил квалификацию инженер-механик. После окончания института работал инженером-конструктором II категории, младшим, а затем старшим научным сотрудником Харьковского научно-исследовательского института металлов (УкрНИИМет).

В 1979–1983 гг. обучался в аспирантуре, по окончании которой (в 1983 г.) защитил кан-

дидатскую диссертацию на тему "Исследование и совершенствование технологии производства профилей высокой жесткости способом валковой формовки" по специальности 05.16.06 "Обработка металлов давлением" в Московском институте стали и сплавов.

Работая в УкрНИИМет, при его непосредственном участии была разработана уникальная технология производства профилей высокой жесткости в потоке профилегибочного агрегата 1…5х300…1650, который был изготовлен и установлен на Магнитогорском металлургическом комбинате в 1974 г.

В 1987 г. перешел на работу в Харьковский инженерно-экономический университет на должность доцента кафедры "Технологии машиностроения". В период с 2000 по 2011 годы работал заведующим кафедрой "Техника и технологии", а с сентября 2011 г. работает профессором кафедры. Преподавал учебные дисциплины: технология машиностроения, материаловедение, технология заготовительного производства, системы технологий отраслей народного хозяйства, системы технологий, основы технологических систем, системы технологий в строительстве, инновационные технологии производства продукции и оказания услуг.

Все эти годы был руководителем комплексной научной работы "Повышение эффективности машиностроительного производства в результате разработки и внедрения новой прогрессивной технологии производственных процессов", продолжает заниматься научными разработками по производству профилей повышенной жесткости, имеющими важнейшее народнохозяйственное значение в области экономии металлов.

Профессор Крюк А. Г. – автор 2 монографий, 8 учебных пособий, более 200 научных статей, имеет авторские свидетельства на изобретения и патенты Украины.

Свидерский Владимир Павлович родился 11 сентября 1946 г. в Харькове. В 1969 г. окончил Харьковский институт радиоэлектроники по специальности "Промышленная электроника" и получил квалификацию инженер электронной техники. В 1969 – 1971 гг. служил в армии, был начальником разведки дивизиона. В 1971 – 1973 гг. работал старшим инженером УГПУ "Тяжпромавтоматика", а в 1973 – 1987 гг. – старшим инженером, старшим научным сотрудником Харьковского авиационного института.

В 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию и стал кандидатом технических наук. С 1987 по 2009 гг. работал преподавателем, старшим преподавателем, доцентом и профессором кафедры "Техника и технологии" Харьковского государственного инженерно-экономического института (а в последствии ХНЭУ). Преподавал учебные дисциплины: техническая механика, системы технологий, издательско-полиграфические материалы, инженерно-компьютерная графика. В 1996 – 2001 гг. был деканом факультета "Экономика предприятий и управление трудовыми ресурсами" ХГЭУ.

Активно занимался научной работой, разрабатывал и внедрял высокоэффективные технологии раскатки роликами тонкостенных крупногабаритных корпусных деталей авиационной и ракетно-космичес-кой техники, изготовленных из труднообрабатываемых алюминиевых и титановых сплавов с обеспечением высоких требований по точности и качеству обрабатываемых поверхностей. Технологии были внедрены на заводе "Южмаш" (г. Днепр), Харьковском электроаппаратном заводе и других предприятиях. Разработанные технологии также были внедрены на операциях обработки малогабаритных изделий из магнитных сплавов, используемых в навигационных приборах.

В 2003 г. вышла в свет его монография "Економічна ефективність технологічного забезпечення виготовлення корпусних деталей локальним деформуванням" (Харків: Вид. ХДЕУ, 2003. – 196 с.). В 2006 г. защитил докторскую диссертацию на тему "Разработка технологического обеспечения изготовления тонкостенных крупногабаритных корпусных деталей летательных аппаратов с применением комбинированной деформирующей обработки" по специальности 05.07.02 "Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов", а в 2008 г. получил ученое звание профессора кафедры "Техника и технологии" Харьковского национального экономического университета.

В 1997 году окончил Харьковский государственный экономический университет по специальности "Учет и аудит", а в 2010 году – Харьковский институт управления и получил квалификацию менеджер-

экономист. В 2009–2010 гг. работал проректором по учебно-методической работе Харьковского института управления, в 2010–2017 гг. – проректором по учебно-методичесчкой работе, профессором, заведующим кафедрой финансов и кредита Харьковского института бизнеса и менеджмента. В настоящее время работает профессором кафедры менеджмента Харьковского института финансов КНТЕУ.

Профессор Свидерский В. П. является автором 130 научных трудов, включая 3 монографии, 5 учебных пособий, 15 авторских свидетельств на изобретения.

Шкурупий Валентин Григорьевич родился 23 сентября 1941 г. в Полтавской области. В 1965 окончил Харьковский авиационный институт по специальности "Самолетостроение", получил квалификацию инженер-механик. Обучение совмещал с работой механика специального конструкторского бюро при кафедре прочности Харьковского авиационного института. После окончания института работал технологом и мастером на самолетостроительных предприятиях в г. Арсенев (Приморский край) и в г. Харькове.

С 1970 г. работал младшим научным сотрудником Украинского научно-исследовательского института металлов (г. Харьков), где занимался разработкой технологической системы производства штанг (упругих штырей) систем гравитационной стабилизации летательных аппаратов (спутников специального назначения). С 1976 года работал младшим, а затем старшим научным сотрудником Харьковского инженерно-экономического института.

В 1990 году перешел на преподавательскую работу на кафедру "Технология машиностроения". В период 2000–2007 гг. работал старшим преподавателем кафедры "Техника и технологии" Харьковского национального экономического университета.

В 2006 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: "Повышение эффективности технологии финишной обработки светоотражательных поверхностей деталей из тонкого листа и лент" по специальности 05.02.08 "Технология машиностроения" в Одесском национальном политехническом университете.

С 2007 по 2017 гг. работал доцентом кафедры "Техника и технологии" Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеца. Выполнял обязанности заместителя заведующего кафедрой. Преподавал учебные дисциплины: системы технологий отраслей народного хазяйства, основы технологических систем, технологии производства, системы технологий, системы технологий промышленности, современные технологические системы, технологи фотореестрационных процессов, издательско-полиграфические материалы, системы технологий в здравоохранении. В настоящее время продолжает активно заниматься научными разработками по проблеме повышения качества ответственных деталей летательных аппаратов и создания технологий обеспечения ответственных деталей более гладкими поверхностями.

Доцент Шкурупий В. Г. – автор 6 монографий и 8 учебных пособий, опубликовал более 100 научных статей, имеет 7 авторских свидетельств на изобретения и патентов Украины. Своими работами он внес значительный вклад в технологию машиностроения, теорию и практику финишной абразивной обработки металлоизделий с оптическими характеристиками. Им разработаны и внедрены в производство высокоэффективные технологии и оборудование для абразивного и электрохимического полирования, обеспечивающие высокие показатели качества обработки светоотражательных поверхностей металлоизделий и получившие практическое применение в производстве.

Традиции кафедры "Технологии машиностроения" ИНЖЭКа и постоянное стремление ее коллектива к повышению качества подготовки студентов – будущих высококвалифицированных специалистов, приобретению ими не только знаний, но и умений к всестороннему и гибкому ориентированию в решении сложных вопросов хозяйственной деятельности, продолжились и в 1987 г., когда состав кафедры пополнился новыми сотрудниками. Одним из них стал доцент Савченко Н. Ф., до этого работавший старшим научным сотрудником Проблемной лаборатории по использованию импульсных загрузок в промышленности при Харьковском авиационном институте.

Савченко Николай Федорович родился 23 мая 1946 г. в Донецкой области. В 1969 г. с отличием окончил Харьковский авиационный институт по специальности "Производство летательных аппаратов", получил квалификацию инженер-механик и был зачислен в состав перспективной группы кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения ХАИ. На его становление как специалиста большое влияние оказал первый Наставник и Учитель – докт. техн. наук, профессор Пихтовников Ростислав Вячеславович, основоположник нового направления в науке и технике, которое развилось в научно-технологическое направление мирового масштаба "Обработка материалов импульсными источниками энергии". Именно Пихтовников Р. В. сформулировал проблемные вопросы и задачи, положенные в кандидатскую диссертацию Савченко Н. Ф. "Разработка, исследование и внедрение нового способа гидровзрывной штамповки крупногабаритных тонкостенных деталей летательных аппаратов" по специальности 05.07.04 "Технология производства летательных аппаратов и двигателей", успешно защищенную в 1979 г. В ходе подготовки диссертации проявился особый творческий поход, свойственный Савченко Н. Ф, результатом котрого стала разработка комплекса технологических решений, защищенных 22 авторскими свидетельствами на изобретения, которые демонстрировались на ВДНХ СССР вместе с достижениями сотрудников Проблемной лаборатории и были отмечены бронзовой медалью, а также почетным знаком "Изобретатель СССР". Его разработки в последущем широко использовались и в преподавательской деятельности ХНЭУ имени Семена Кузнеца как примеры конкретных решений в области ресурсо- и энергосбережения в учебных дисциплинах: машины и оборудование, системы технологий, основы технологических систем, системы технологий в торговле, товароведение, технический аудит предприятий и организаций и других.

В сфере научных интересов Савченко Н. Ф. в этот период преобладают работы с использованием импульсных нагрузок, преимущественно вопросы расширения технологических возможностей и безопасности беспрессовой штамповки. Параллельно развивается и направление применения энергии импульсных нагрузок для предупреждения и ликвидации аварий в гибких технологических системах (ГТС ПЛА): в различных энергоемких сооружениях, при добыче полезных ископаемых. Разработанные устройства и технологии, как показы-

вают тенденции техногенного развития общества, могут быть востребованы и при проведении ремонтных работ крупногабаритных сооружений типа резервуаров и танкеров для хранения и транспортировки энергетических ресурсов, а также при обезвреживании вредных и ядовитых веществ.

Особенностью разработок является то, что предлагаются новые технологии и мобильное и универсальное оборудование, преимущества которого в быстродействии и высокой энергонасыщенности. Основное достоинство: возможность встраивания ГТС ПЛА как многофункциональных устройств непосредственно в зоне возникновения аварии с целью ее устранения на ранних стадиях возникновения, что позволяет снизить опасность функционирования современных комплексов для переработки материалов, преобразования одних видов энергии в другие, а также эффективно использовать для повышения безопасности транспортных, информационных и других систем.

Как примеры новых решений, можно привести: способ ремонта обсадных колонн, способ разрушения льда на водоемах, малогабаритный огнетушитель для сейфов и коммуникационных устройств; вакуумные камеры (с возможностью использования и как холодильные устройства ограниченного действия); малогабаритные контейнеры с энергоносителями для создания интенсивных потоков комбинированных сред для тушения пожара или перекрытия разрушенных зон технологического оборудования. Один из возможных вариантов новых компактных огнетушителей с возможностью индивидуального применения приведен на рисунке.

а

б

Модель огнетушителя для тушения возгораний высокоскоростными струями пара: до срабатывания (а); при срабатывании (б)

Доцент Савченко Н. Ф. – автор 2 монографий, 6 учебных пособий.

Он опубликовал свыше 250 научных трудов, среди которых более 80 изобретений, защищенных авторскими свидетельствами на изобретения и 8 патентов Украины. Своими научными работами он внес большой вклад в развитие процессов импульсной обработки материалов, в частности, листовой беспрессовой штамповки деталей типа днищ и параболических антенн.

Чистяк Владимир Григорьевич – родился 3 июня 1949 г. в Днепропетровской области. После окончания средней школы учился в Бердянском машиностроительном техникуме по специальности "Обработка металлов резанием", получил квалификацию техник-технолог. После службы в армии в 1971–1993 гг. работал на кафедре "Производство летательных аппаратов" Харьковского авиационного института старшим лаборантом, инженером, старшим инженером в учебной лаборатории, а с 1986 г. – старшим научным сотрудником научно-исследовательского сектора, был ответственным исполнителем ряда хоздоговорных тем с предприятиями авиационной промышленности.

В 1977 г. окончил вечернее отделение ХАИ по специальности "Самолетостроение", получил квалификацию инженер-механик.

В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему "Исследование процесса, разработка и внедрение технологии пневмоимпульсной клепки самолетных конструкций высокоресурсными заклепками" по специальности 05.07.04 "Технология производства летательных аппаратов и двигателей". В 1992 г. ему присвоено ученое звание старшего научного сотрудника, а в 2009 г. – ученая степень доктора философии технических наук.

В 1994–2009 гг. работал доцентом кафедры "Техника и технологии" Харьковского национального экономического университета, преподавал учебные дисциплины: технология машиностроения, системы технологий и др. Подготовил конспект лекций "Техника и технология

производства" по курсу "Системы технологий" (Харьков: Изд. ХГЭУ, 2003. – 108 с.), который и в настоящее время пользуется большим спросом.

Постоянно активно занимался научной работой. Разрабатывал технологии производства летательных аппаратов, в частности, процессов сборки, обеспечивающих повышение ресурса и герметичности соединений планера, и процессов механической обработки. В результате им разработаны на уровне изобретений:

- способы образования соединений, усовершенствование крепежа, применяемого при сборке конструкций летательных аппаратов из алюминиевых, титановых сплавов и композиционных материалов;
- конструкции ручного импульсного инструмента и технологической оснастки для выполнения процессов клепки, постановки болтов и спецкрепежа с натягом, нанесения информации рельефным способом (клеймением), чеканки, упрочнение отверстий дорнованием, пробивки отверстий, локализации зон усталостного разрушения (развития трещин) и др.;
- технологии поверхностного и комбинированного упрочнения, нанесения комбинированных покрытий на режущий инструмент, повышающие эффективность механической обработки.

Его научные разработки неоднократно экспонировались на ВДНХ СССР и были отмечены почетным знаком "Изобретатель СССР", а также экспонировались на международной выставке в Пловдиве (Болгария), внедрены на ряде авиационных предприятий Украины и России.

Доцент Чистяк В. Г. имеет 132 научных труда, из них 2 монографии, 6 учебных пособий, 70 авторских свидетельств на изобретения и патент Украины, а также научные статьи, опубликованные в профильных научных сборниках и журналах, конспекты лекций и учебно-методические пособия. Своими научными трудами доцент Чистяк В. Г. внес большой вклад в создание новых эффективных технологий импульсной обработки материалов, в частности соединений конструкций при сборке.

Дитиненко Станислав Александрович – родился 7 ноября 1955 г. в Черниговской области. После окончания 8 классов поступил в Харьковский станко-инструментальный техникум, который окончил с отличием в 1975 г. и был направлен на работу на Харьковский машиностроительный завод "ФЭД" технологом инструментального цеха. В цехе изго-

тавливали разнообразные режущие и специальные мерительные инструменты высокой точности, поскольку выпускаемая продукция была предназначена для авиационной промышленности, изготавливалась из высокопрочных материалов и сталей, сложной конфигурации и с высокой точностью и требовала применения прецизионных инструментов.

В этом же году Дитиненко С. А. призвали в армию. После окончания службы он возвратился на завод, работал инженером-технологом в инструментальном цехе и учился на вечернем отделении машиностроительного факультета Харьковского политехнического института. На заводе работал до начала 1994 года и прошел путь от токаря, токаря-расточника, сменного мастера, старшего мастера до начальника технологического бюро цеха.

С 1994 по 2000 г. работал начальником цеха Производственной фирмы "ШАКРИЗ", изготавливающей изделия из стеклянных трубок (ариометры).

С 2000 г. работал старшим преподавателем кафедры "Техника и технологии" Харьковского государственного экономического университета. Под научным руководством профессора Новикова Ф. В. им была подготовлена и в 2005 г. в НТУ "ХПИ" защищена кандидатская диссертация на тему "Повышение эффективности технологии финишной обработки цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий" по специальности 05.02.08 "Технология машиностроения". Экспериментальная часть диссертации была выполнена в инструментальном цехе ГП ХМЗ "ФЭД", где проводились опыты, и была внедрена прогрессивная технология шлифования твердосплавных изделий алмазными кругами на металлических связках с плосковершинными зернами (с применением электроэрозионной правки кругов). Технология обеспечивала получение шероховатости поверхности на уровне 10 класса чистоты, чего ранее не достигалось с применением этих алмазных кругов. Большую помощь в выполнении работ постоянно оказывал главный инженер завода, докт. техн. наук, профессор, Лауреат Государственной премии Украины Фадеев Валерий Андреевич.

Соединение богатого производственного опыта, приобретенного

доцентом Дитиненко С. А. за многие годы работы на заводе "ФЭД", с опытом работы на кафедре оказалось весьма полезным в практическом и научном отношениях и востребовано в учебном процессе.

В настоящее время доцент Дитиненко С. А. работает в ХНЭУ имени Семена Кузнеца. Он автор 2 монографий и более 100 научных работ, имеет патенты Украины. Постоянно поддерживает связи с производственными предприятиями и продолжает разрабатывать и внедрять свои научные разработки. Своими работами он внес значительный вклад в разработку высокоэффективных технологий алмазного шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов, позволяющих объединить предварительную и окончательную обработку в одну операцию и обеспечить высокие показатели производительности, качества и точности обработки.

Новиков Федор Васильевич родился 23 февраля 1954 г. в Черниговской области. В 1977 г. окончил Харьковский политехнический институт по специальности "Динамика и прочность машин" и получил квалификацию инженер-механик-исследователь. По распределению работал инженером на Харьковском инструментальном заводе. В 1979–1982 гг. был аспирантом очной аспирантуры по кафедре "Резание материалов и металлорежущие инструменты" Харьковского политехнического института. В 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему "Механика круглого алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями и пути ее оптимального управления" по специальности "Процессы и машины обработки материалов резанием; автоматические линии" в Институте сверхтвердых материалов (г. Киев). В 1995 г. защитил докторскую диссертацию на тему "Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования" по специальности "Процессы механической обработки, станки и инструменты" в Одесском государственном политехническом университете. В 2007 г. получил ученое звание профессора кафедры "Техника и технологии" Харьковского национального экономического университета.

Вся трудовая деятельность Новикова Ф. В. связана с машиностроением. В 1986–1991 гг. работал главным инженером проекта в Специальном проектном конструкторско-технологическом институте автоматизированных систем (СПКТИ АС) и начальником конструкторско-технологического отдела НПО "Прогресс" (г. Харьков). С 1992 по 2011 гг. руководил научно-технической фирмой НТК "Эльбор", занимался проблемами создания и применения новых технологий механической и физико-технической обработки различных изделий. За это время были разработаны и внедрены более чем на 100 промышленных предприятиях Украины, России и Белоруссии эффективные технологии машиностроения, включая технологии финишной механической обработки, в особенности алмазного шлифования различных изделий, изготовленных из труднообрабатываемых материалов.

С 2001 г. работал по совместительству профессором кафедры "Техника и технологии" ХНЭУ, а с 2011 по 2017 гг. был заведующим этой кафедрой. И в эти годы продолжал активно заниматься научной деятельностью, выполнял хоздоговорные работы с предприятиями, подготовил и издал много научно-популярной литературы по современным технологиям производства, полезной как для науки, так и для студентов, аспирантов и преподавателей инженерных и экономических специальностей ВУЗов, а также для специалистов и руководителей предприятий, повышающих свою квалификацию. Под его редакцией (совместно с профессором Якимовым А. В.) подготовлено 10-томное фундаментальное научное издание под общим названием "Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения".

В настоящее время, работая профессором кафедры, Новиков Ф. В. активно занимается разработкой и внедрением в производство высокоэффективных технологий лезвийной и абразивной обработки нового поколения. Подготовил 14 кандидатов технических наук по специальности 05.02.08 "Технология машиностроения" (Ткаченко В. П., Дитиненко С. А., Шкурупий В. Г., Яценко С. М., Ковальчук А. Н., Иванов И. Е., Рябенков И. А., Кленов О. С., Андилахай В. А., Нежебовский В. В., Бережной Р. М., Полянский В. И., Жовтобрюх В. А., Брижан Т. М.) и одного доктора технических наук – Андилахая Александра Александровича, заведующего кафедрой "Технология машиностроения" Приазовского государственного технического университета (г. Мариуполь).

На Международном Промышленном форуме (г. Киев, 2013 г.)

Многие из его учеников в настоящее время работают руководителями предприятий и научно-производственных фирм, продолжают развивать идеи, заложенные в их кандидатских диссертациях. Так, Жовтобрюх Валерий Алексеевич является директором инжиниринговой фирмы Технический Центр "ВариУс" (г. Днепр), занимается проблемами создания и внедрения в производство высокопроизводительных технологий высокоскоростной механической обработки, современных станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и эффективных сборных твердосплавных керамических лезвийных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства, которые обеспечивают многократное увеличение производительности и высококачественную обработку деталей машин.

Ковальчук Александр Николаевич – Генеральный директор Харьковского машиностроительного завода "Свет шахтера", а Нежебовский Владимир Викторович и Бережной Роман Анатольевич – работают на этом заводе заместителем главного инженера и главным конструктором. Этот завод является ведущим предприятием на мировом рынке по изготовлению шахтного оборудования.

Полянский Владимир Иванович – Генеральный директор ООО "Империя металлов" (г. Харьков), занимается разработкой и внедрением эффективных технологий механической обработки с применением современного зарубежного оборудования и инструментов.

Профессор Новиков Ф. В. – автор 26 монографий, 4 учебников и 20 учебных пособий, опубликовал около 600 научных статей, получил 30 патентов Украины и авторских свидетельств на изобретения. Является сопредседателем ежегодно проводимых в Харькове и Одессе Международных научно-практических конференций "Физические и компьютерные технологии" и "Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении", подготовил и издал до 40 сборников научных трудов конференций. С 1998 г. – член докторского совета по присуждению научных степеней по специальности 05.02.08 "Технология машиностроения" Одесского национального политехнического университета, а с 2017 г. – член кандидатского совета по присуждению научных степеней по специальности 05.13.06 "Информационные технологии" ХНЭУ имени Семена Кузнеца.

Кафедра техники и технологий была признана в Украине и за ее пределами активным популяризатором научных знаний и тесной связи науки с производством. На кафедре было налажено тесное сотрудничество с научно-производственными фирмами: ООО Технический центр "ВариУс" (г. Днепр), ООО "Империя металлов" и "ДиМерус Инженеринг" (г. Харьков), Институтом сверхтвердых материалов имени В. Н. Бакуля НАН Украини, Одесским национальным политехническим университетом, НТУ "ХПИ", Национальным аэрокосмическим университетом имени Н. Е. Жуковского "ХАИ", Харьковским национальным техническим университетом сельского хозяйства имени Петра Василенко, ГВУЗ "Приазовский государственный технический университет" (г. Мариуполь), Луцким национальным техническим университетом, Харьковским национальным университетом имени В. Н. Каразина, Институтом проблем машиностроения НАН Украини, ПАО "ФЭД", ПАО "Свет шахтера", Частным акционерным обществом ХМЗ "ПЛИНФА" и многими другими.

1.4. Некоторые концепции подготовки инженеров–технологов

Современный уровень развития производства, высокие требования к качеству выпускаемой машиностроительной продукции предопределяют необходимость подготовки высококвалифицированных инженеров-технологов, способных самостоятельно ставить и решать

сложные технологические задачи по созданию и эффективному применению новых технологий, оборудования, инструментов, оснастки, автоматизированному проектированию и т.д. Это выдвигает серьезные требования к организации учебного процесса в высших учебных заведениях, основанного на глубоком изучении фундаментальных наук и специальных технологических наук, которые должны базироваться на фундаментальных науках и быть математически формализованы.

Как отмечал профессор Якимов А. В., будущий специалист должен хорошо владеть математическим аппаратом, понимать физику технологических процессов, знать подходы к математическому моделированию, оптимизации и проектированию, уметь рассчитать оптимальные параметры проектируемых технологических систем и т.д.

К сожалению, в настоящее время сложился дисбаланс между общеобразовательной технической и специальной технологической подготовкой студентов. На протяжении первых двух лет обучения в институте студенты получают мощную подготовку по высшей математике и другим общеинженерным дисциплинам. В дальнейшем эти знания используются не в полной мере, так как основные технологические курсы: технология машиностроения, резание материалов и другие мало содержат теоретических решений на уровне высшей математики. Это ограничивает глубокое понимание изучаемых предметов и в конечном итоге – достаточный уровень знаний для создания конкурентоспособной продукции в условиях рыночной экономики.

Чтобы ликвидировать этот дисбаланс профессор Якимов А. В. поставил задачу создания общего теоретического подхода в технологии машиностроения, механической и физико-технической обработке. В результате многолетней работы получены важные научные результаты, разработаны эффективные технологии, используемые в промышленности. Формализованы основные положения курсов технологических дисциплин, выпущен цикл учебных пособий и учебников с грифом Министерство образования Украины, что может стать основой новой концепции подготовки инженеров-технологов.

Так, в выпущенном под общей редакцией Новикова Ф. В. и Якимова А. В. 10-томном издании "Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения" математически увязаны основные элементы технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки. Это позволяет изучать тех-

нологические дисциплины с единых позиций на основе единых теоретических решений, полученных с использованием фундаментальных положений теорий упругости, пластичности, колебаний, теплофизики, математической физики и т.д. Полученные теоретические решения, как частные случаи, содержат традиционные решения (приведенные в курсах технологии машиностроения, резания материалов и других), основанные на эмпирических данных и практическом опыте. Это открывает возможности более качественной подготовки специалистов; широкого применения общеобразовательных технических знаний (высшей математики и т.д.), полученных студентами на первых двух курсах института, при изучении специальных технологических дисциплин.

Становится объективной реальностью широкое использование компьютерной техники и творческое отношение студентов к решению технических задач, требующих сложных математических вычислений, подходов к оптимизации и автоматизированному проектированию. По сути, теоретическая подготовка студентов поднимается до уровня, например, фундаментальной специальности "Динамика и прочность машин". И это естественно, так как процесс механической обработки основан на разрушении поверхностных слоев обрабатываемого материала и его необходимо изучать теми же методами, которыми изучается поведение сложных деформируемых систем (с точки зрения динамики и прочности) под воздействием различных источников энергии.

Важным этапом в решении указанных задач может стать подготовка фундаментальных учебников, монографий, справочников по технологии машиностроения, механической и физико-технической обработке, основанных на теоретических (математических) решениях. Ввиду чрезвычайной сложности, данные научные труды должны быть коллективными, объединяющими теоретические работы различных научных школ в области технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки. Для этого необходимо выработать единый подход к оценке потенциальных возможностей различных технологий, в том числе так называемых высоких технологий (например, по энергоемкости процессов и т.д.), и общий теоретический подход к формализации основных положений технологии машиностроения, провести систематизацию и обобщение имеющихся теоретических решений.

Цель данной концепции – получение и анализ новых теоретических решений с точки зрения повышения эффективности изготовления

деталей и машин. Учебник или учебное пособие должны строиться по принципу алгоритма расчета и оптимизации процессов обработки деталей и сборки машин, состоять из разделов (модулей), охватывающих различные стороны функционирования процессов обработки и сборки. Это позволит изучать учебные дисциплины с помощью компьютера. Выбор того или иного варианта технологии (операционной или маршрутной), прогнозирование условий совершенствования процессов обработки и сборки производить на основе не качественной, а количественной оценки, что отвечает требованиям современного машиностроения и рыночной экономики.

Важно студентов научить применению полученных теоретических (физико-математических) знаний для решения практических задач. Большое значение при этом имеет умение построить физическую и математическую модели исследуемого объекта, корректно поставить задачу, перейти от упрощенного решения к более точному и полному решению, учитывающему более глубокие связи в исследуемых объектах. Важно уметь решить техническую задачу с применением как элементарной, так и высшей математики.

Эти решения необходимы в первую очередь с методической точки зрения, выполняя принцип – от простого к сложному. Более сложному решению должно обязательно предшествовать упрощенное решение с применением школьных знаний по физике и математике. К сожалению, в учебно-методической литературе, посвященной подготовке инженеров-технологов, этим вопросам уделяется недостаточное внимание, что требует новых подходов и методических разработок.

Выводы

1. Организация и проведение ежегодных международных научно-практических конференций "Физические и компьютерные технологии" в Харькове позволили сконцентрировать внимание на разработке и внедрении новых технологий производства, что стало важным фактором создания конкурентоспособной продукции. В особой мере это относится к подъему машиностроительного производства на основе применения новых технологий металлообработки, более широкого использования фундаментальных физико-математических знаний для решения технологических задач и подготовки высококвалифицирован-

ных кадров. Показано, что внедрение разработанных участниками конференций эффективных технологий на заводе "ФЭД" открыло новые возможности интенсификации производства, повышения качества и экономичности выпускаемой продукции.

2. Научная технологическая школа профессора Якимова А. В. и творческий научный коллектив кафедры техники и технологий Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеца являются центрами развития и популяризации научных технологических знаний и активизации участия молодых специалистов в творческой деятельности по созданию эффективных технологий современного производства. Благодаря их разработкам достигнуты значительные успехи в развитии технологии машиностроения и технического перевооружения предприятий, решены проблемы высококачественного и высокопроизводительного изготовления машин и систем. Разработаны теоретические основы технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки с математической формализацией их основных разделов и возможностью параметров оптимизации обработки по критериям наибольшей производительности и наименьшей себестоимости обработки с учетом ограничений по качеству и точности обрабатываемых поверхностей деталей машин. Это позволило научно обоснованно подходить к проектированию технологических процессов и выбору оптимальных условий обработки.

3. Выполнен комплекс научно-исследовательских работ по эффективному внедрению разработанных технологий в производство на предприятиях различных отраслей промышленности, что позволило обеспечить создание конкурентоспособной машиностроительной продукции и занять достойное место на внутренних и внешних рынках.

4. Сформулированы некоторые концепции подготовки инженеров-технологов, состоящие в расширении физико-математических знаний и умении решать технологические задачи с применением современного математического аппарата. Для этого учебники и учебные пособия необходимо готовить как с обобщением последних научно-технических обобщений в области технологии машиностроения, так и с примерами решений технологических задач математическими методами, в особенности это относится к решению оптимизационных задач по выбору оптимальных технологических параметров изготовления деталей машин.

Раздел 2
Научные предпосылки создания и применения эффективных технологий производства

2.1. Подготовка специалистов, обладающих новым мышлением – острейшая проблема времени

Развитие производства в условиях перехода к рыночной экономике возможно на основе инновационных подходов, которые должны обеспечить специалисты, владеющие технологическими знаниями и новым мышлением. В данном случае под технологией подразумевается совокупность приемов и способов обработки и переработки сред и, в первую очередь, информационной среды.

Подготовка специалистов, обладающих новым мышлением, особенно актуальна в области менеджмента. Подтверждением этого является то, что менеджеров в настоящее время готовят не только экономические, но и технические ВУЗы, стремясь устранить дефицит специалистов в этой области.

В современных условиях на менеджмент, как систему принципов, методов и средств управления производством с целью повышения его эффективности и увеличения прибыли любого предприятия оказывает влияние множество факторов, которые делятся на две большие группы – внешние и внутренние. Наиболее значимыми среди внутренних факторов являются такие, как люди и технология. Одна из задач менеджмента заключается в соединении этих двух факторов в единое целое – производственную систему, эффективность которой необходимо непрерывно повышать.

Эффективное использование и развитие технологии требует учета многих других внутренних факторов менеджмента, и среди них, в первую очередь, результатов маркетинговых исследований. Необходимо учитывать требования потребителей и вытекающие из этого характеристики изделия, обеспечивающие его спрос на рынке, а значит, и получение значительной прибыли [13].

При конструировании изделия необходимо учитывать требуемый уровень качества, причем этот уровень, с одной стороны, должен полностью удовлетворять потребителя, а с другой стороны, обеспечивать

достаточно низкую себестоимость продукции, эффективное использование имеющихся на предприятии ресурсов. Это значит, что при конструировании необходимо учитывать квалификацию кадров, работающих на предприятии, возможность и целесообразность использования уже опробованного сырья и материалов, постоянство связей с надежными поставщиками, а также наиболее полное использование производственных мощностей предприятия, каждой группы его оборудования.

В свою очередь технологи, разрабатывая технологию изготовления изделия, должны в максимально возможной степени обеспечить экономию сырья, материалов и трудовых ресурсов, наиболее полное использование оборудования.

При разработке технологии необходимо также предусмотреть резервы, позволяющие в кратчайшие сроки либо резко увеличить выпуск изделий (иногда в два и более раз), либо сократить их выпуск и расширить производство других изделий, выпускаемых параллельно.

Такие требования к конструированию изделия и технологии его изготовления характерны для рыночной экономики и вынуждают разрабатывать несколько альтернативных вариантов с тем, чтобы, учитывая текущее положение на рынке, выбирать наиболее эффективный вариант и при необходимости переходить на другой – запасной.

Технология оказывает большое влияние на экономическую устойчивость предприятия, на прочность его позиций на рынке. Это влияние требует от руководителей фирм и их подразделений повседневного внимания к проблемам конструирования и технологий. Несмотря на это, в рыночных условиях технический и технологический факторы несколько отодвигаются под воздействием других – экономических, финансовых, организационных.

Главная цель любой фирмы в условиях рыночной экономики – прибыль. В соответствии с этой целью руководителями фирм (менеджерами) в большинстве случаев являются люди с подготовкой в области менеджмента, экономики, финансов, иногда и с юридическим образованием.

Готовя инженеров-экономистов (фактически менеджеров) для плановой экономики ВУЗы давали им хорошую техническую и технологическую подготовку. В условиях рыночной экономики такая подготовка должна была бы быть усилена, поскольку менеджеру в рыночной системе отводятся более ответственные должности, и он часто должен

сам решать многие технические и технологические вопросы без привлечения специалистов. Поэтому в учебных планах подготовки менеджеров значителен удельный вес технических дисциплин.

В условиях рыночной экономики техническая подготовка менеджеров должна стать более универсальной, так как теперь менеджер готовится для работы не в одной отрасли (например, машиностроении), а во всех производственных или непроизводственных отраслях.

Рыночная экономика не позволяет готовить узконаправленного специалиста. По окончании обучения менеджер попадает на рынок труда, и чем более он универсален, тем больше шансов у него получить работу.

Таким образом, при подготовке менеджеров приходится, с одной стороны, учитывать необходимость достаточно хорошо знать технику и технологию отрасли, где он будет работать, а с другой стороны, подготовить специалиста-универсала, вполне конкурентоспособного на рынке труда.

При решении этой задачи необходимо учитывать особенность того или иного региона и универсальность определенной отрасли. Так, основу промышленности Харьковского и прилегающих к нему регионов составляет машиностроение. Кроме того, структура машиностроительных предприятий универсальна. Она включает металлургические и химические цехи.

Организация производства, в известной степени, технология машиностроения довольно близки к таким крупным отраслям, как легкая и пищевая промышленность. Поэтому при технологической подготовке менеджеров в производственной сфере в Харьковском регионе за основу целесообразно взять машиностроительную отрасль.

Хорошо подготовленный в области технологии менеджер будет успешно решать проблемы, связанные с увеличением прибыли своего предприятия.

В заключение следует отметить, что высокоразвитые зарубежные страны в последние годы все большее внимание уделяют заключительной стадии инновационного процесса, то есть маркетингу, правомерно считая, что коммерческая реализуемость изделий или услуг является важнейшим вопросом в рыночной экономике, а отсюда становится особенно актуальной задача подготовки и переподготовки специалистов–маркетологов.

2.2. Роль науки и технологий в развитии Украины

Ученые мира вначале XX столетия уверенно прогнозировали, что стремительное развитие науки и индустриального производства обеспечат в ближайшее время человечеству товарное изобилие, всеобщее благоденствие и процветание. Однако вера в науку, как могучую силу радикального и быстрого улучшения жизни, оказалась иллюзией. Более того, многие научные и технические достижения XX столетия были использованы с разрушительной целью или же привели к непредсказуемым экологически вредным последствиям. Сегодня человечество стоит перед безвозвратным загрязнением окружающего пространства и космоса, катастрофическим истощением природных ресурсов, перед медикаментозной деформацией биологического состояния человеческого организма и многими другими отрицательными явлениями [59].

Окончание столетия ознаменовалось разочарованием в научно-техническом прогрессе, что породило мощный всплеск антинаучных настроений в различных странах и слоях общества. Гуманизацию начали рассматривать в противовес научности.

Вместе с тем, переступивши порог XXI века и всесторонне оценивая влияния науки на различные стороны общественного и товарного развития, человечество подошло к четкому осознанию трех наиболее важных положений.

Во-первых, обычный отказ от научно-технического прогресса – шаг более разрушительный, чем предшествующее стихийное развитие. Негативные явления, связанные с предыдущим развитием науки и техники, могут быть частично уменьшены, а во многих случаях полностью подавлены только лишь с помощью рационального социально- и экологически ориентированного применения новых результатов науки к товарному производству в условиях рынка.

Во-вторых, в науке начали происходить глубокие фундаментальные изменения, которые касаются соотношения и доминирования теоретических и прикладных знаний. Значительность приобретает наука о человеке, обществе и вопросах их гуманного существования и развития. Доброе становится основной товарной ценностью.

И, в-третьих, стало очевидным, что освоение окружающего космического пространства, создание информационного сообщества и глобальных информационных сетей требует совершенно иного уровня

интеллектуальной подготовки всего человечества к "новому способу жизни". Эта подготовка должна полностью базироваться не только на естествознании, но, прежде всего, на социально-антропологических и гуманитарных фундаментах как основе для принятия решений, которые обеспечили бы выживание человечества.

С этих позиций можно оценить как полностью положительные последствия научного и технического прогресса, которые дают возможность продлить жизнь людей, сделать рациональным природопользование, улучшить качество жизни, поднять выше уровень культуры, а проще говоря – сберечь и обеспечить развитие цивилизации. На смену коленопреклоненному увлечению наукой и техникой первой четверти XX столетия и противонаучному настроению конца столетия приходит трезвое понимание значения науки и техники как способа организации жизни и управления будущим – способу синхронно безопасного и могущественного и одновременно более эффективного, чем разгул капитала и бряцание ракетами и водородной бомбой.

Сегодня все больше в основе оценки и характеристики стран становится не могущество вооруженных сил и не экономические показатели – деление стран на бедных и богатых, индустриальных и сельскохозяйственных, а способность генерировать и выходить на рынок знаний (через систему образования). Наличие наукоемких и высоких технологий, которые эти знания реализуют [27].

Страны, генерирующие научные знания, наукоемкие и высокие технологии, относятся к экономическим, технологическим, научным и военным лидерам. Поэтому вопросы о перспективе науки и технологий, которые основываются на их достижениях, сегодня представляют интерес не только для научного сообщества, это вопрос высшей государственной политики. Потому что только государства с мощной научной базой могут обеспечить себе устойчивое развитие и могут быть гарантом разумного баланса сил в мире. При этом следует иметь в виду, что установка на то, что наша наука должна решать абсолютно все проблемы, какие стоят перед научным миром сегодня, задача неосуществимая.

Нам необходимо на уровне государственной политики определить оптимальное количество национальных приоритетов, исходя из перспективных заданий, которые стоят перед обществом, а не групповых или ведомственных интересов.

Образовательным технологиям выделяется приоритетное значение, ибо без подготовки надлежащего количества высококвалифицированных специалистов, способных освоить все эти достижения науки и технологии, воплотить их в жизнь, а также изменить социальную среду и культуру, наука и технология существовать не могут. Поэтому они будут предметом ненужных колоссальных материальных и духовных сил общества.

При прогнозировании развития науки в начале XXI века необходимо четко усвоить положение, что это не стихийный рыночный процесс и что он зависит, прежде всего, от политики государства. Коммерческие структуры, располагающие денежными средствами, еще не скоро станут главными потребителями и покупателями научной продукции. Поддерживая их заинтересованность в отечественной науке и передовых технологиях, стимулируя трансфер всего лучшего из-за границы, государственные деятели должны учитывать, что мировое содружество и, в первую очередь, высокоразвитые страны в ближайшие годы должны стать на путь устойчивого развития. Это означает, что механизм рыночной экономики надо будет существенно ограничить, поскольку потребности на товары и услуги постоянно растут, требуют их дорогостоящего производства с огромными затратами, не восстанавливаемыми природными ресурсами [156]. Этот механизм несовместим с экологическим социально-безопасным самообеспечивающим развитием.

Для общества, которое живет в режиме устойчивого развития, необходимы иные технологии, критерии обеспеченности, товарного производства и экономики в целом. Поэтому, прогнозируя состояние науки и технологии в XXI столетии, необходимо уяснить, что они зависят не только от законов рынка, но, прежде всего, от нашей воли, от стремления к настоящему благосостоянию, в котором главной ценностью будет не прибыль, не капитал, а гармоничное развитие личности, прав человека, социальная устойчивость, высокая культура и образованность.

Необходимо помнить еще о том обстоятельстве, что все процессы в современном обществе функционируют и развиваются в условиях глобализации.

Глобализация – продукт постмодерна, перехода от индустриальной к постиндустриальной стадии развития общества, формирования

основ ноосферно-космической цивилизации. Отсюда вытекают количественные и качественные характеристики этого процесса. К важнейшим характеристикам относятся – рост взаимозависимости экономики различных стран, целостность и единство мирового хозяйства.

В результате применения новых, т.е. высоких технологий и систем электронных связей, развиваются глобальные коммуникационные сети (такие, как Интернет, всемирная финансовая система СВИФТ и др.), что приводит к сокращению сферы государственного контроля. Научно-технические достижения позволяют сократить затраты на осуществление межгосударственных и межфирменных контактов.

Формирование глобальной системы товарного производства и соответствующей инфраструктуры, динамическое перемещение ресурсов по всему пространству мирового хозяйства, функционирование всемирных информационных и транспортных коммуникаций свидетельствует о наступлении новой эры экономического и общественного развития. Его сущность состоит в возрастающем значении всемирных факторов и источников хозяйственной динамики. Это обстоятельство в свою очередь создает условия для формирования универсального экономического знания, которое адекватно отражало бы общий процесс хозяйственной эволюции без привязывания к конкретной стране или территории. Такое знание становится основой для правильной постановки и решения ряда наиболее острых глобальных проблем (товарных, экологических, правовых, демографических и др.).

Трансформация экономической системы Украины, переход ее в новое качество – процесс, который определяется социально-экономическими и научно-техническими параметрами XXI столетия. Этот процесс должен базироваться на:

1) общецивилизованных условиях и данных, которые формируют систему координат современного всемирного рыночного хозяйства;

2) национальных приоритетах и особенностях, которые имеют глубокие историко-генетические и ментально-этнические источники;

3) реальном состоянии экономики и общества Украины.

Последнее положение является главным исходным материалом, первоосновой, фундаментом, на котором базируется новая политико-экономическая система. Именно взаимодействие этих трех составляющих даст возможность Украине избежать резких отклонений, смягчить удары переходного периода, ускорить гармонизацию и присоеди-

нение Украины к общецивилизованным процессам и структурам.

В связи с трансформацией индустриальной цивилизации в ноосферно-космическую (постиндустриальную) возникают определенные промежуточные формы. Такой становится информационная модель развития, которая является продуктом индустриальной эпохи и одновременно важнейшим условием формирования цивилизации третьего тысячелетия.

Ноосферно-космическая цивилизация должна не только решить наиболее острые проблемы и устранить противоречия предшествующей эпохи, а и определить пути дальнейшего развития человечества. Естественно, что в ходе развития будут происходить постоянные корректировки намеченных положений, а сейчас мы находимся на пороге революционных подвижек в экономической теории, увязанной с формированием интеллектуально-информационной парадигмы, без чего невозможно управление развитием, отвечающим жизненным потребностям общества XXI века.

2.3. Экологическая культура – один из важнейших вопросов вузовской подготовки

Экологическая культура является главным средством регулирования отношений человека и биосферы. Она включает круг вопросов, увязанных с использованием человечеством природных ресурсов и превращением их в необходимый потребительский продукт. Важнейшим вопросом, входящим в круг экологической культуры, является выяснение последствий воздействия технологических систем на окружающую среду человечества.

Под биосферой понимается живая оболочка Земли, которая является динамично организованным, целостным объектом, функция которого состоит в поглощении, ассимиляции, превращении и перенесении энергии и вещества. Как целое она входит к еще более объемному образованию – собственной геокосмической оболочке, как закономерный этап эволюции материи, исполняя космическую функцию снижения энтропию и повышения организованности сущего.

Не случайно Вернадский В. И. отмечал: "По сути, биосфера может рассматриваться как часть земной коры, которая занята трансформаторами, переводящими космические излучения в действующую

земную энергию: электрическую, химическую, механическую, тепловую и т.д.". Биосфера, в структуре которой появился человек – творец и внедренец различных технологически систем, – знаменует новый геологический век, называемый антропогенным или техногенным. Эта концепция фиксирует такое состояние человечества, которое с помощью технологических систем становится геологической силой, способной изменить вид нашей планеты. Человек может трансформировать биосферу в ноосферу (хотя это может и не произойти).

Термин "ноосфера" предложен в 1925 г. французским философом-биологом Таер де Шарденом, а затем в 1927 г. этот термин и соответствующую концепцию повторил другой французский ученый Е. Ларуа. Характерно, что свои идеи о ноосфере французские ученые сформулировали после прослушивания лекций Вернадского В. И. в Сорбонне в 1923–1924 гг.

Ноосфера – это преобразованная биосфера, в которой царствует разум. В таком контексте оно созвучно тысячелетнему поиску благодатного общества, мечте о "золотом веке" в истории человека. Вернадский В. И. указывал, что для образования ноосферы важны не только научные достижения, образования новых центров познания, расширение и углубление народного образования, а также и формирование в мировом плане социально-демократических организаций, т.е. проведение мероприятий глобального масштаба, достижения всепланетного единства людей.

Ноосфера, в понятии Вернадского В. И., является фактически синонимом той техносферы, которая создается на Земле в настоящее время. Через 50 лет после издания его работ стало ясно, что развитие техносферы приводит к разрушению биосферы, в частности ее разрушению основы, жизненно важных участков для существования людей. Ныне стала реальной угроза гибели цивилизации и полная деградация биосферы.

В соответствии с мыслями современного русского философа Кутарева В. Н., ноосфера, как гармония человека с природой, является типичным примером утопии.

Между тем, идеи Вернадского В. И. оказали огромное влияние на мировое экологическое мышление, и стали особенно актуальными в связи с возросшей угрозой глобальных нарушений в биосфере, вызванных бурным промышленным развитием. Поэтому Экология должна

служить научной базой любых мероприятий по использованию и охране природных ресурсов, по сохранению среды, благоприятной для обитания человека. Познание основных принципов трансформации вещества и энергии в природных экосистемах создает теоретическую основу для разработки практических мероприятий по хозяйственной деятельности общества. Привлекается внимание к прямому и побочному влиянию производственной деятельности на состав и свойства атмосферы, тепловой режим планеты, фон радиоактивности, к загрязнению Мирового океана (к концу XX века его загрязнение достигло 20 %). Появилась проблема, связанная с уменьшением запасов пресной воды. В результате нарушения биологического и гидрохимического режима содержания внутренних водоемов возникает массовое развитие планктонных сине-зеленых водорослей ("цветные воды" Херсонского и других водохранилищ Днепровского района), ухудшается качество воды.

Происходит постоянное уменьшение невозобновляемых сырьевых и энергетических ресурсов, выделение в биосферу неперерабатываемых биохимических и токсичных отходов, экологическое воздействие антропогенных, особенно урбанизированных, ландшафтов.

Экологи с позиций системного похода анализируют природную среду как сложную дифференцированную систему, различные компоненты которой находятся в динамическом равновесии, рассматривают биосферу Земли как экологическую нишу человечества, связывая окружающую среду и деятельность человека в единую систему "природа – общество", раскрывают воздействие человека на равновесие природных экосистем, ставят вопрос об управлении и рационализации взаимоотношений человека и природы в международном масштабе.

Экологическое мышление находит свое выражение в различных выдвигаемых вариантах переориентации технологических систем и производств.

Осознание социальных аспектов Экологии привело к формированию экологической экономики, которая принимает в расчет расходы не только на освоение природы, но и на охрану и восстановление атмосферы, с учетом важности не только критериев прибыльности и производительности, но и экологической обоснованности технических нововведений, экологического контроля над планированием промышленности и природопользования.

Сегодня загрязнять окружающую среду и непомерно использовать природные ресурсы становится экономически невыгодным. И это главный результат проведенных законодательных работ. Бесспорно, эффективность экологических реформ возрастет во много раз при выходе экономики Украины из кризисного состояния. При этом новый подъем производства не будет угрожать потерей высочайшей государственной ценности – экологической чистоты окружающего пространства.

Среди глобальных экологических проблем конца XX века особенно остро стал вопрос, связанный с накоплением на нашей планете такого количества промышленных и бытовых отходов, что они повсеместно стали угрожать здоровью людей и безопасности окружающего пространства. По данным ООН, ежегодно 5,2 млн. человек, в частности 4 млн. детей, умирают от болезней, вызванных токсическим воздействием неправильно удаляемых отходов и сточных вод, особенно в регионах больших городов.

Очень активно увеличивается количество твердых бытовых отходов, примерно, ежегодно они возрастают на 5 – 6 %.

В высокоразвитых странах мира перерабатывается бытовых твердых отходов от 30 – 50 % (в Европе), до 60 – 75 %(в США и Японии). В развивающихся странах этот процент достигает 7 – 10 %, а в Украине – 3 – 5 %. К 2025 г. количество отходов, в соответствии с прогнозами специалистов ООН, увеличится в 4 – 5 раз, а стоимость их переработки и хранения – в 2 – 3 раза. С каждым годом острее становится проблема отходов в Украине.

К концу XX века ежегодное количество отходов на каждого жителя Украины достигло 400 т. Основными источниками образования промышленных отходов являются предприятия горнопромышленных, химико-металлургических машиностроительных, топливно-энергетических, строительных и агропромышленных комплексов. Так, например, на предприятиях горнодобывающих и горнообогатительных отраслей находится отходов примерно 53 млрд. т, на предприятиях металлургической промышленности ежегодно образуется до 15 млн. т металлургических шлаков. Объем накопленных золошлаковых отходов тепловых электростанция Украины к концу XX в. составил свыше 300 млн. т.

Ежегодно на территориях городских населенных пунктов Украины накапливается 38 – 42 млн. т. бытового мусора.

По среднему морфологическому составу бытовой мусор содержит 25 – 30 % бумаги, 35 – 40 % пищевых отходов, 4 – 5 % текстиля, 4 – 6 % полимеров, 4 – 5 % цветных металлов, 5 – 7 % стекла, 2 – 7 % резины, костей, камней и пр. Удельный вес мусора 220 – 250 кг/м, влажность 35 – 40 %, теплотворная способность 800 – 2400 ккал/кг.

Мусорники (полигоны) вокруг больших городов ежегодно поглощают около 1500 га земли, которые становятся опасным источником отравления окружающей среды. Из мусорников в воздух и грунтовые воды попадает много токсичных веществ – тяжелых металлов, резины, пластмасс, лаков и красок. На мусорниках развиваются болезнетворные бактерии, образуются токсичные газы, возникают опасные для окружающего пространства пожары.

Решение этой сложной и ответственной проблемы возможно за счет внедрения безотходных технологий, строительства современных мусороперерабатывающих заводов с эффективными технологиями утилизации, путем высокотемпературного сжигания и получения полезных веществ.

Примером эффективной технологии утилизации является использование отходов черных металлов.

Так, при производстве основного конструкционного машиностроительного материала – стали – удешевление ее стоимости примерно на 70 % достигается за счет использования металлолома. Кроме того, каждая 1000 т металлолома позволяет экономить порядка 1500 т железной руды и до 200 т кокса. При этом отпадает необходимость в геологоразведке, добыче и обогащении руд, а также происходит освобождение промышленных площадей от ненужного оборудования.

Не менее удачным примером является использование макулатуры. Ее рациональный сбор, переработка на бумагу и картон не только предотвращают замусоривание среды нашего обитания остатками бумаги, но и сохраняют ценную древесину и многие гектары леса от вырубки.

В заключение следует отметить, что технологические системы, являясь инструментом созидания, одновременно являются, к сожалению, мощным фактором разрушения среды, в которой они функционируют.

Добывая ежегодного порядка 10 млрд. т горных пород земных недр, человечество тысячами шахт и бурильных установок нарушает

земную поверхность и до неузнаваемости изменяет ее вид, создавая новые ландшафты с карьерами, терриконами, горами отвальных пород, шлаконакопителями и мусорниками. Выплавляя свыше 800 млн. т разных металлов, выбрасывается в воздух и гидросферу огромное количество промышленных отходов, разрушая биосферу (живую оболочку Земли), угрожая всему живому на планете.

В этих условиях особенно актуальным является вопрос пропаганды экологических знаний, в частности, изучение экологии в высших учебных заведениях.

По мнению многих ученых, Экология (хотя она зародилась в биологии и базируется на ней) призвана решать более широкий круг задач, чем задачи биологического содержания. Под воздействием жизненных потребностей Экология стала научной базой, способствующей разрешению природоведческих, социально-политических, технико-технологических, экономических и юридических вопросов.

В настоящее время Экология является одной из главных интегральных междисциплинарных наук.

Экологические знания способствуют формированию экологической культуры, т.е. такого направления человеческого мышления и действий, от которых значительным образом зависит нормальное существование цивилизации и устойчивое ее развитие в будущем.

Известный немецкий философ И. Кант указывал: "Имеется в мире два чуда – звездное небо над нами и моральный закон внутри нас". В реальной жизни человечество стакивается с взаимодействием как минимум трех компонентов, определяющих его поведение: это, во-первых, действия простых биологических и материальных потребностей, толкающих индивидов по грубо эгоистическому пути, во-вторых, это поведение высокой морали, говорящей от лица человечества как целого и нередко от имени Бога. Сложная динамика этих трех составляющих и определяет облик нравственного поведения и внутренних законов конкретных людей. Поэтому гуманитарная подготовка в Вузах должна быть направлена на формирование у студентов внутренних законов высшей морали, которая в настоящий исторический период может базироваться, прежде всего, на основных принципах экологической культуры, на экологически чистых технологических системах, как одном из основных условий сохранения жизни на Земле и развития цивилизации в будущем.

2.4. Инновации в развитии технологии машиностроения

Современное общество использует многочисленные технологии, которые постоянно совершенствуются, усложняются и становятся более наукоемкими, чему способствует конверсия бывших секретных технологий. Изучение временных тенденций позволяет осуществить прогнозирование направлений темпов развития технологий (это направление в науке получило название – технодинамики).

Под технологией в широком смысле следует понимать совокупность приемов и способов целенаправленной переработки (обработки) сред. При этом к перерабатываемым средам относятся не только материальные ресурсы (минеральное сырье, металлы, полимеры, продукты сельского хозяйства), но и нематериальные ресурсы (информация, проектные и научные разработки, здравоохранение, юриспруденция, искусство, финансовые и страховые услуги).

Множественность технологий породила необходимость их классификации по различным признакам.

Прежде всего, технологии классифицируют в зависимости от принадлежности к определенной отрасли народного хозяйства (машиностроительные, металлургические, химические, строительные, информационные, финансовые, образовательные и прочие) и от сущности тех явлений, которые предопределяют технологии (лазерные, электронные, мембранные, импульсные, вакуумно-плазменные и прочие).

Кроме того, технологии можно еще разделить по многим признакам, в частности: областям применения – производственные, образовательные, научные; уровню сложности – простые и сложные; наукоемкости – традиционные, высокие, наукоемкие; состоянию развития – прогрессирующие, развивающиеся, усовершенствованные, устаревшие.

Постоянное совершенствование технологий, применяемых в общественном производстве – непременное условие научно-технического прогресса. Современные технологии относятся к сложным системам, разработку и изучение которых следует проводить, пользуясь правилами информационного подхода.

Под информационным подходом при изучении и разработке технологий, равно как и других объектов, следует понимать преобразова-

ние исходной информации путем систематизированного, т.е., построенного на основе определенного набора правил закодированной информации, в конечный продукт.

Причем, согласно рекомендациям информациологии, целенаправленное преобразование информации производится с обязательным участием электронно-вычислительных устройств.

Важнейшими факторами развития новых технологий, которые базируются на высших мировых научно-технических достижениях, являются нововведения, переходящие в многоступенчатом сложном процессе в инновацию [55].

Термин "инновация" стал активно использоваться в технической и экономической литературе с переходом Украины на рыночные отношения. В бывшем СССР проблематика нововведений на протяжении многих лет использовалась в рамках исследований научно-технического прогресса.

В настоящее время в литературе имеется множество определений термина "инновации", анализ которых показывает, что специфическое содержание этих определений составляют изменения.

Еще в 1911 году австрийский ученый Шумпетер И. выделил пять типичных изменений, касающихся новшеств [150]:

1) использование новой техники, новых технологических процессов или нового рыночного обеспечения производства (купля-продажа);
2) внедрение продукции с новыми свойствами;
3) использование нового сырья;
4) изменения в организации производства;
5) появление новых рынков сбыта.

Позднее в 1930-е годы Шумпетер И. ввел понятие инновации. Методология системного описания инноваций в условиях рыночной экономики базируется на международных стандартах.

Для координации работ по сбору, обработке и анализу информации о научных разработках и инновациях в рамках Международной организации экономического сотрудничества и развития была образована Группа национальных экспертов, которые в 1963 году приняли в городе Фраскати (Италия) первую версию рекомендаций ("Предлагаемая стандартная практика для обследований исследований и экспериментальных разработок"). Этот документ получил название "Руководство Фраскати", последняя редакция которого утверждена в 1993 году.

Второй важнейший документ по методике сбора данных о технологических инновациях базируется на рекомендациях, принятых в Осло в 1992 г. и получил название "Руководство Осло".

В соответствии с международными документами инновация определяется как конечный результат инновационной деятельности, получивший воплощение в виде нового или усовершенствованного продукта, внедренного на рынке, нового или усовершенствованного технологического процесса, используемого в практической деятельности, либо в новом подходе к социальным услугам [145].

Таким образом, непременными свойствами инновации являются научно-техническая новизна, производственная применяемость и коммерческая реализуемость.

На практике нередко отождествляют понятия "новшество", "нововведение" и "инновация", хотя между ними имеются различия.

Новшество – это новый метод, изобретение, новый порядок, новая идея. Нововведение означает, что новшество уже используется. С момента принятия к распространению новшество приобретает новое качество и становится инновацией [73].

Для успешного управления процессом создания инноваций необходимо выработать классификацию инноваций и критерии оценки степени их новизны. С учетом сферы деятельности предприятия инновации можно разделить на технологические, производственные, экономические, экологические, торговые, интеллектуальные, юридические, социальные и управленческие.

По технологическим признакам инновации разделяют на продуктовые (например, новые продукты, материалы, сырье, комплектующие) и процессные (новые технологии и новые организационные структуры).

Новизна инноваций оценивается по технологическим характеристикам и условиям коммерческой реализуемости (т.е. рынка). По типу новизны на рынке с целью удовлетворения текущего спроса и увеличения доходов предприятия (фирмы), инновации делят на новые в международном плане, новые для страны и новые для предприятия (хотя известные на рынке).

Инновацию как результат необходимо рассматривать неразрывно с инновационным процессом, развитие которого протекает по следующим трем стадиям: создание, освоение и распространение инно-

ваций. Каждая из стадий требует значительных финансовых затрат. Процесс финансирования инновационного процесса зависит от структуры инновационной группы, национальных особенностей, включая рыночные отношения.

Так, например, практика организации поисковых исследований в США породила своеобразную форму предпринимательства – рисковый (венчурный) бизнес, который представляется небольшими фирмами, специализирующимися на исследованиях, разработках, производстве новой продукции.

Венчурные фирмы создают ученые-исследователи, изобретатели, инженеры, стремящиеся с расчетом на материальную выгоду воплотить в жизнь новейшие достижения науки и техники. Рынок венчурного (рискового) капитала в США в 1987 г. составлял 29 млрд. дол., из которых до 70 % финансировались такие приоритетные направления развития отраслей как информационная технология, производство новых материалов и биотехнология.

Венчурный капитал формировался за счет вложения средств крупных компаний, банков государства, страховых, пенсионных и других фондов, а также личных сбережений основателей фирмы.

При выделении средств на финансирование инновационных проектов, как показал опыт венчурного капитала 1980-х годов, в первую очередь учитывался профессионализм работников фирмы, а затем последовательно с ослабляющим влиянием учитывались: наличие рыночной ниши, технические возможности фирмы, время окупаемости вложений, доля участия в финансируемой фирме [192].

Одна из технических систем инновационного процесса товарного производства может быть представлена в виде сочетания следующих элементов: эскизной проработки с изготовлением макета или опытного образца, рабочего проектирования, промышленного внедрения, маркетингового исследования, сбыта товара.

На стадии фундаментальных исследований разрабатывается теория вопроса, которая составляет фундамент инновации. Из практики известно, что только небольшая часть (менее 10 %) фундаментальных исследований воплощается в новых продуктах или технологиях, значительно больше они проявляются в потенциальном росте научно-технического прогресса, в повышении восприимчивости общества к инновациям.

В процессе прикладных исследований составляется техническое задание, которое через эскизный и рабочие проекты доводится до промышленного производства, при этом значительное внимание уделяется технической подготовке производства.

На завершающей стадии инновационного процесса обеспечивается коммерческая реализация инновации, либо новый подход к социальным услугам.

Инновационная маркетинговая деятельность включает изучение патентов (и ноу-хау), служащих источником информации о новейших научно-технических достижениях, знание которых позволяет определить новизну инноваций и прогнозировать направления и темпы развития определенных технологий.

Касаясь конкретных результатов развития инновационных процессов в современной технике, можно привести следующие примеры.

Фундаментальные исследования в области теории синтеза и техники высоких температур и давлений позволили получить новый, известный в природе, материал – нитрид бора, который применяется на финишных операциях металлообработки. Аналогично из графита был получен синтетический алмаз – материал высокого спектра промышленного применения, вплоть до ювелирного производства. На стадии прикладных исследований находится техника промышленного производства третьей аллотропической формы углерода – фуллеренов. Фуллерены, без преувеличения, могут быть признаны высокоэффективными материалами ближайшего будущего, как полупродукт для получения алмазов, как инструментальный материал и как новый вид термостойкого полупроводника.

Фундаментальные исследования плазмы обеспечили получение износостойких покрытий в виде нитрида титана и других композиций для режущих инструментов. Расширение исследований в этой области позволяют получать композиционные покрытия с различными свойствами для повышения эксплуатационных характеристик – например, для таких ответственных деталей как лопатки турбин. Применение нанотехнологии позволяет создавать тончайшие слои покрытий, материал которых находится в состоянии, приближающемся к теоретической прочности.

Значительным достижением в области технологии машиностроения явилось создание комбинированных методов обработки. Так, в ре-

зультате длительных исследований процессов шлифования и электрического разряда в газах и жидкостях был разработан метод алмазно-искрового шлифования, успешно применяемый при финишной обработке деталей из труднообрабатываемых материалов. При этом способе используются алмазные, кубонитовые или шлифовальные круги на металлической связке. Стабильность процесса резания достигается за счет устранения засаливания шлифовального круга, поскольку электроэрозия, вызываемая электрическими искрами, разрушает стружку (которая образуется под действием алмазных зерен), а также обеспечивает предразрушение обрабатываемого материала в зоне резания.

В зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала, связки зернистости круга, требований шероховатости обрабатываемой поверхности, интенсивность электроискрового процесса регулируется характеристиками электрической энергии, подаваемой в зону обработки.

Алмазно-электроискровый процесс является ярким примером использования наукоемких технологий наряду с традиционными процессами обработки резанием, причем возник он в результате фундаментальных исследований в области новых инструментальных материалов и инноваций в металлообработке.

Новыми инструментальными материалами являются синтетические алмазы определенного качества и кубический нитрид бора или эльбор.

Новыми в металлообработке явились прикладные исследования регулируемых электроразрядных процессов разрушения обрабатываемой поверхности. В данном случае, изменяя режим электроразрядного процесса, можно осуществлять грубую обработку и обработку с предельным сглаживанием шероховатости путем электролитического полирования.

Фундаментальные исследования в области квантовой оптики привели к созданию лазерной техники, которая успешно применяется для резки, упрочнения и сварки металлов, получения отверстий малого диаметра в сверхтвердых материалах. Лазерный луч и луч другой природы породили ряд новых направлений научно-технического развития в медицине, биологии и военном деле.

В заключении следует отметить, что инновационные процессы в

настоящее время являются ключевым вопросом развития научно-технического прогресса, который воплощается в новых продуктах, технологиях и достижениях в социальных и информационных сферах.

2.5. Обеспечение выхода на рынок промышленной и интеллектуальной продукции

Выход на рынок новых технологий и другой продукции осуществляется с помощью охранных документов. Охранными документами на новшества являются патенты, ноу-хау, товарные знаки и другие авторские права, коммерческая передача которых оформляется лицензионным соглашением. На товарную продукцию составляется сертификат [145].

Лицензирование осуществляется путем принятия заинтересованными сторонами лицензионного соглашения – договора, в соответствии с которым собственник изобретения, технологических знаний, опыта и секретов производства выдает своему контрагенту лицензию на использование интеллектуальной собственности. В соглашении определяются производственная сфера и территориальные границы использования предмета лицензии.

Последние годы в условиях глобализации последовательная интеграция государств в мировое экономическое сообщество требует целенаправленной политики по созданию государственной системы сертификации, стандартизации и метрологии. Эти системы обязаны отвечать основным принципам межгосударственных, а также международных, региональных и национальных систем. Стандартизация и сертификация, обеспеченные способами и методами измерений, являются неотъемлемыми частями общественного производства и одновременно эффективным механизмом управления качеством и номенклатурой продукции [57].

Сертификация в настоящее время стала мощным средством как в международной, так и во внутренней торговле. Сертификация перерастает в норму торговых взаимоотношений любого уровня, но главным образом – в норму торговых сделок. Широкому развитию и внедрению сертификации способствуют две ее основные возможности – она является средством информации потребителей и может стать одним из наиболее эффективных средств правового регулирования тор-

говых отношений, поскольку опирается на четко сформулированные и легко доступные для контроля нормативные документы. Объем работ и исследований, касающихся сертификации товаров, в последние годы растет лавинообразно.

Пристальное внимание проблемам сертификации уделяют такие организации, как Международная организация по стандартизации (ИСО), Международная электротехническая комиссия по сертификации соответствия электрооборудования (СЕЕ), Европейская экономическая комиссия ООН (ЕЭК ООН) и др.

Системы сертификации в зависимости от статуса могут быть обязательными и факультативными. В Украине различают обязательную и добровольную сертификацию. Системы сертификации, носящие обязательный характер, имеют место в тех случаях, когда стандарты в законодательном порядке становятся обязательными к применению. В связи с тем, что область обязательных к использованию стандартов в большинстве развитых капиталистических стран ограничена требованиями охраны окружающей среды, безопасности людей и сохранности имущества, здравоохранения и т.д., рамки систем сертификации с обязательным статусом этим и определяются. Конечно, область распространения обязательной сертификации выходит за рамки указанных требований. Это, например, вопросы удельного потребления электроэнергии для бытовых электрохолодильных установок, взаимозаменяемость и техническая совместимость некоторых видов продукции и пр. Очевидно, что с течением времени номенклатура и характеристики продукции, подлежащие обязательной сертификации, будут расширяться.

Маркетинг новых технологий должен обеспечивать не только продвижение на рынок новых продуктов или дополнительное количество прежнего продукта, которое может быть выпущено при использовании более производительных технологий, но и продвижение на рынок самих новых технологий, имея в виду в первую очередь продажу лицензий на изобретения и ноу-хау, заложенные в новый продукт или в технологический процесс, а также оборудование и инструменты для его изготовления и т.д.

Маркетинг новых технологий сводится к маркетингу продукции, которая может быть выпущена с их использованием. Так, наилучшим способом убедить потенциального покупателя лицензии на приобре-

тение новой технологии является проведение маркетингового исследования спроса на продукт, изготовленный по этой технологии, и предоставление положительных документированных результатов такого исследования покупателю технологии.

Конечно, при этом возможно намеренное преувеличение ожидаемого спроса на рассматриваемый продукт с целью обеспечения продажи лицензии, если ее оплата предусматривается в виде паушальных (единовременных, не зависящих от объема продаж продукта по лицензии) платежей. Такого не произойдет, если оплата лицензии будет осуществляться посредством регулярных (в течение длительного, до 5 – 7 лет) платежей, зависящих от объема продаж лицензионной продукции [142].

Новые технологии, служащие предметом маркетинга, могут быть как профильными (для инновационных предприятий, не способных мобилизовать достаточные инвестиции для занятия всех потенциальных для новой промышленной продукции рынков и поэтому допускающих для себя продажу исключительных, с дележом рынков, лицензий на новые технологии), так и побочными (в этом случае вероятна продажа простых, без каких-либо взаимных ограничений, или полных, с сохранением лишь права на использование технологии в дальнейших своих разработках и лицензирования).

Важнейшей составляющей маркетинга является реклама. В передовых странах мира рекламной деятельности уделяется большое внимание и ею занимается специализированная отрасль экономики со значительным ассигнованием.

Реклама способствует улучшению качества товара, расширению производства (организации массового производства), реализации товара, процессу превращения товара в деньги, а также ускоренному и успешному завершению процесса оборота средств, т.е. процессу воспроизводства на уровне предприятия. И, наконец, реклама является самым экономичным способом формирования и стимулирования спроса.

В заключение следует отметить, что выход на рынок продуктов, в том числе и новых технологий, осуществляется с обязательным их лицензированием. Причем, новые технологии могут быть представлены в конечном пути их внедрения, то есть когда они приобретают новое качество и являются инновацией.

2.6. Некоторые особенности доводочного шлифования свободным абразивом

В современном машиностроении доводка поверхностей деталей машин производится абразивными брусками и свободным абразивом. При доводке деталей абразивными брусками, особенно с прерывистыми поверхностями, нередко отмечается интенсивный износ брусков, их выкрашивание и образование на обработанных поверхностях глубоких царапин. В этом случае более приемлемой является доводка свободным абразивом, так как при правильном подборе материала притира и режима обработки в первую очередь изнашиваются сами абразивные зерна, а притир продолжительное время сохраняет форму, что повышает точность обработки [75; 78; 113; 200].

Процесс доводки металлов свободным абразивом является чрезвычайно сложным процессом резания, имеющим свои особенности, которыми он отличается как от процессов резания металлическим инструментом с определенной геометрией, так и от шлифования. Сложность процесса и свободное перемещение абразивных зерен в зоне резания создают большие трудности при экспериментальном и теоретическом его исследовании. Это является причиной многих противоречивых результатов исследований, приведенных в литературе, что затрудняет выбор оптимального режима обработки при доводке металлов свободным абразивом [25].

С целью установления условий повышенного съема металла и достижения высокой чистоты поверхности было проведено исследование процесса доводки цилиндрических деталей свободным абразивом с осциллированием притира и непрерывной подачей абразивной смеси в зону резания.

Исследование проводилось на образцах из широко применяемых в машиностроении марок сталей: 20Х, 40Х и 45, диаметром 25 мм и длиной 80 мм, с двумя кольцевыми канавками шириной 2 мм. Перед доводкой образцы подвергались термической обработке: из стали 20Х до твердости R_c = 51 – 54. После шлифования образцы имели высоту микронеровностей R_z = 2,6 – 3 мкм.

Доводка образцов производилась абразивными смесями, состоящими из порошков белого электрокорунда зернистостью от № 100 до М7, и жидкости. В качестве жидкости применялись керосин, керосин с

добавкой олеиновой кислоты и смесь керосина с веретенным маслом № 2. Соотношение абразива и жидкости во всех опытах составляло 60 г/л. Доводка образцов производилась на специальной установке.

Основные опыты проводились на предварительно установленном режиме: удельное давление притира 2 кГс/см^2, окружная скорость изделия 25 м/мин; частота осциллирования притира 800 дв. ход/мин при длине хода 5 мм; число медленных возвратно-поступательных движений притира 60 дв. ход/мин при длине хода 15 мм. В качестве жидкости применялся керосин. Обработка во всех опытах продолжалась в течение 5 минут. Притиры изготовлялись из серого чугуна твердостью НВ 150 с перлито-ферритовой структурой.

Из результатов опытов выяснилось, что повышение удельного давления притира до 2 кГс/см^2 способствует значительному росту съема металла. Дальнейшее повышение давления вызывает незначительное повышение съема металла, а для крупнозернистого абразива № 100 съем металла даже уменьшается из-за усиления процесса дробления абразивных зерен.

Шероховатость поверхности с увеличением удельного давления притира улучшается. Однако при повышенном давлении под действием крупных зерен высокой прочности на поверхности образуются отдельные глубокие царапины.

Увеличение окружной скорости детали интенсифицирует съем металла, так как увеличивается путь, проходящий абразивными зернами относительно обрабатываемой поверхности. Между съемом металла и окружной скоростью детали нет прямолинейной зависимости. С повышением окружной скорости происходит падение интенсивности съема металла.

Увеличение окружной скорости детали при доводке повышает нагрев обрабатываемой поверхности и способствует неравномерному распределению абразивной смеси в зоне резания, что приводит к ухудшению шероховатости поверхности.

Процесс доводки цилиндрических деталей свободным абразивом с осциллирующим движением притира имеет сложную кинематику. Для данного случая, когда деталь совершает вращательное движение, а притир – одновременно возвратно-поступательное движение вдоль оси детали и осциллирующее движение в том же направлении, траекторией абразивных зерен, шаржированных на рабочей поверхности

притира, будет синусоида с большим периодом от возвратно-поступательного движения притира, на которую накладывается синусоида, с меньшим периодом от осциллирующего движения притира. Однако учитывая, что при непрерывной подаче абразивной смеси большая часть зерен, находящихся в зоне резания, не шаржирует рабочую поверхность притира, а свободно перекатывается, траектория их движения значительно отличается от синусоиды в сторону неопределенности (хаотичности).

Сложный характер траектории движения абразивных зерен при доводке металлов с осциллирующим движением притира оказывает положительное действие на процесс обработки. При этом более полно используются режущие свойства абразивных зерен, что способствует увеличению съема металла. Кроме того, изменение направления движения зерен обеспечивает пересекание микроцарапин и интенсивное обламывание острых царапающих элементов зерен, что улучшает шероховатость обрабатываемой поверхности.

Высказанное положение находит экспериментальное подтверждение. При проведении опытов притир совершал в первом случае одно медленное движение вдоль оси детали – 60 двойных ходов в минуту при длине хода 15 мм. Во втором случае два движения: одно – медленное вдоль оси детали и второе – быстрое осциллирующее движение в том же направлении – 800 колебаний в минуту при длине хода 5 мм.

Введением осциллирующего движения притира при доводке абразивным микропорошком М7 съем металла увеличивается почти в два раза. Однако с увеличением размера зерен эффект, получаемый за счет осциллирующего движения, ослабевает. Это объясняется меньшей относительной динамической прочностью более крупных зерен, что приводит к интенсивному их дроблению в процессе доводки, трудностью шаржирования на поверхности притира, а также худшим проникновением крупных зерен в зазор между притиром и обрабатываемой поверхностью.

При осциллирующем движении притира за счет развития микрощелей в обрабатываемом поверхностном слое металла усиливается действие поверхностно-активных веществ на процесс доводки.

Как показывают результаты опытов, при доводке без осциллирования притира применение вместо керосина смеси керосина с веретенным маслом № 2 способствовало повышению в среднем съема ме-

талла на 20 %, а для доводки с осциллированием притира – на 27 % (в данном случае имеется в виду, что веретенное масло № 2 содержит активные добавки). Применение керосина, активированного добавкой 2 % олеиновой кислоты, вместо керосина при доводке без осциллирования притира, способствовало повышению съема металла в среднем на 19 %, а при осциллировании притира – на 33 %.

Повышение съема металла при применении жидкостей, содержащих поверхностно-активные вещества, для крупнозернистых абразивов несколько выше, чем для мелкозернистых, вследствие различия в характере и интенсивности напряженного состояния в срезаемом слое металла.

В условиях резания-царапания мелкозернистыми абразивами, имеющими относительно высокие радиусы закругления царапающих элементов и малое углубление в металл, в поверхностном слое создаются значительные сжимающиеся напряжения. Это препятствует развитию слабых мест (микрощелей), а, следовательно, и действию адсорбционного эффекта. С увеличением размера абразивных зерен возрастает углубление их в металл, что усиливает возникновение в поверхностном слое растягивающих напряжений, благоприятных для развития адсорбционного эффекта.

Анализ стружки, полученной при доводке и отработанной при помощи магнита, показал о наличии в ней абразивных частиц с приваренным металлом, что свидетельствует о наростообразовании.

Содержание в стружке абразивных частиц с наростом зависит от жидкости, входящей в состав абразивной смеси. При доводке с керосином содержание абразивных частиц достигало 24 %, а при доводке с керосином, активированным добавкой 2 % олеиновой кислоты, – 15 %. Это свидетельствует о том, что поверхностно-активные вещества в процессе резания-царапания понижают коэффициент трения абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью и, тем самым, способствуют уменьшению наростообразования.

Касаясь особенностей геометрии абразивных зерен, следует отметить следующее. Обычно при финишной обработке зеркальных поверхностей деталей из меди и других металлических материалов возникают дефекты в виде царапин и мест интенсивного шаржирования, которые ухудшают эксплуатационные свойства деталей. Причиной этого является обработка микропорошками синтетических алмазов

марки АСМ (ГОСТ 9206-80), в состав которых входят острые игольчатые зерна. Поэтому для обработки рабочих поверхностей оптических деталей с высокой отражательной способностью следует применять алмазные микропорошки скругленной или так называемой овализованной формы зерен.

Полирование оптических деталей микропорошками скругленной формы резко уменьшает шаржирование их в обрабатываемую поверхность, что уменьшает серость обработанной поверхности и тем самым повышает отражательную способность. Скругление может производится различными методами: механической овализацией, гидравлической, термохимической и др. Одним из основных недостатков этих методов является значительное дробление алмазных зерен и трудность или невозможность получения микропорошков с размерами зерен на уровне 1 мкм и менее.

Изменять конфигурацию исходных частиц позволяет также ультразвуковая обработка алмазных микропорошков в воде. Для активизации процесса разрушения остроугольных фрагментов алмазных частиц, в частности, фракций размером 3 мкм, ультразвуковая обработка микропорошков производилась в водном растворе хлористого калия. В указанных условиях острые кромки алмазов разрушаются в результате кавитации и эрозии под воздействием кристаллов хлористого калия.

Ультразвуковую обработку микропорошков из алмазов АСМ зернистостью 5/3, 3/2, 1/0 (табл. 2.1) в перенасыщенном водном растворе хлористого калия осуществляли на установке УЗВД-6 в течение 6 часов. При наличии большого количества зерен удлиненной формы и повышенного содержания крупной фракции время обработки увеличивается.

Навески микропорошка массой 100 кар загружали в охлаждаемую емкость установки, заполненную 300 см^3 раствора соли. По истечении заданного времени установку включали, а микропорошок промывали вначале дистиллированной водой для удаления соли, а затем 10 %-м раствором соляной кислоты с целью отделения металлических примесей (железа, никеля и др.).

В качестве обрабатываемого материала использовали бескислородную листовую медь марки МОБ, из которой изготавливали образцы диаметром 80 и толщиной 10 мм. Образцы предварительно протачивали на сферо-фрезерном станке, после чего производили термическую обработку (отжиг).

Таблица 2.1

Характеристики поверхностей, полированных исходными и модифицированными алмазными порошками

Зернистость алмазного микропорошка	Отражательная способность R_S, %			Шероховатость поверхности R_z, мкм, после отработки		
	исходного микропорошка (ГОСТ 9206-80)	после ультразвуковой обработки в воде	после ультразвуковой обработки в КС1	исходным микропорошком	после ультразвуковой обработки в воде	после ультразвуковой обработки в КС1
5/3	98,6	98,6	98,7	0,042	0,038	0,036
3/2	98,7	98,7	98,9	0,038	0,037	0,030
1/0	98,8	98,9	99,0	0,030	0,030	0,028

Температуру термообработки материала выбирали такую, чтобы не успела произойти собирательная рекристаллизация, т.е. не более 872 К, охлаждение проводили вместе с печью. Шероховатость поверхности после обработки составляла R_a = 0,38 – 0,40 мкм.

Образцы полировали на станках типа ЗПД-320 методом свободного притира с помощью абразивной суспензии, содержащей исследуемый порошок и 1 %-й раствор поливинилового спирта в дистиллированной воде, при следующих режимах полирования: частота вращения шпинделя – 20 – 25 мин$^{-1}$, рабочее давление – 200×10^3 Па, число двойных ходов каретки в минуту – 10 – 15.

Качество полированной поверхности определяли по ее шероховатости и отражательной способности. Шероховатость измеряли с помощью профилографа–профилометра модели 252 с погрешностью измерений, не превышающей $\pm$10%, а отражательную способность – на специальном стенде на длине волны 10,6 мкм с погрешностью измерений не более 0,02 % при доверительной вероятности P= 95 %.

Определение гранулометрического состава микропорошков зернистостью 5/3 и 3/2 показало, что после ультразвуковой обработки размер частиц резко не изменяется. В то же время, как было установлено при изучении морфологии алмазных частиц, в процессе ультразвуковой обработки разрушаются остроугольные фрагменты поверхности с размером не более 0,1 мкм, что приводит к овализации острых кромок после ультразвуковой обработки в воде и в перенасыщенном водном

растворе хлористого калия. Более крупные фрагменты при указанных условиях обработки не разрушаются.

Полученные результаты (приведенные в табл. 2.1) свидетельствуют о том, что ультразвуковая обработка в перенасыщенном водном растворе хлористого калия позволяет получать модифицированные (т.е. скругленные) микропорошки, улучшающие эксплуатационные характеристики поверхности медных изделий после полирования.

2.7. Повышение эффективности метода непрерывного профилирования давлением листовых материалов

В настоящее время широкое развитие получил один из прогрессивных методов обработки металлов давлением – метод непрерывного профилирования листового металла на профилегибочных агрегатах. Продукцией, получаемой данным способом, являются гнутые профили. Этот метод позволяет получать профили не только различной и сложной конфигурации поперечного сечения, в том числе замкнутых круглых и прямоугольных, листовых с большим числом мест изгиба, разделенных прямолинейными или иной формы участками, но и профили со специальными служебными свойствами. Они могут изготавливаться из сталей повышенной и высокой прочности, термоупрочненных, с просечкой и перфорацией, с продольными и поперечными ребрами жесткости, с элементами двойной толщины, сварные, завитые по дуге, покрытые пластиками, антикоррозийными металлическими покрытиями и др. [120; 157; 158]. Профилирование полосы разделяется на ряд отдельных операций, при осуществлении которых каждая из пар валков выполняет оптимальную частичную деформацию.

Выбор числа операций, равных числу валков профилегибочного агрегата, зависит в основном от сложности конфигурации профиля и его размеров, а также от требуемых допусков на размеры, от соотношения толщины и ширины заготовки и отдельных участков профиля, механических свойств материала, требуемых радиусов закругления мест изгиба, допускаемого утонения заготовки и характеристики профилегибочного оборудования [58]. К достоинствам процесса профилирования можно отнести следующее:

- возможность изготовления профилей минимальной толщины с минимальной металлоемкостью, которую невозможно получить дру-

гими способами металлообработки, а также гнутых профилей самой различной конфигурации толщиной 0,1 – 20 мм и шириной исходной заготовки до 2000 мм;

- получение профиля, позволяющего заменить сочетание нескольких профилей в конструкциях, что дает возможность создавать новые типы конструкций, обеспечивает экономию металла и устраняет операции сборки и соединения отдельных элементов;
- незначительные отходы металла (коэффициент использования металла достигает 99,5 – 99,8 %);
- приспосабливаемость к материалам: профилировать можно самые разнообразные материалы: горячекатанную и холоднокатанную листовую, ленточную и полосовую углеродистую сталь, конструкционную и легированную стали, титан, алюминий, медь, цинк, латунь, бронзу и другие металлы и сплавы, допускающие холодную обработку давлением, а также плакированные биметаллические материалы и специальные пластмассы;
- хорошее качество поверхности гнутых профилей проката, что обеспечивает широкое применение их для различных отделочных и декоративных элементов конструкций;
- возможность формообразования профилей из заготовок с предварительно обработанной поверхностью или поверхностью с покрытием без нарушения ее качества;
- высокую точность размеров профилей, обеспечивающую их взаимозаменяемость и возможность соединения профилей между собой и скользящими соединениями сопряженных элементов;
- сравнительно высокую производительность труда;
- высокую степень механизации и автоматизации производства;
- приспосабливаемость к масштабам производства: оборудование для профилирования менее сложно, более легко и просто в обслуживании и дешевле в изготовлении, чем прокатное и прессовое, в связи с этим высокая производительность профилегибочного оборудования позволяет эффективно устанавливать его не только для массового производства профилей, но и для серийного;
- высокую стойкость инструмента и возможность изготовления на одном комплекте валков большого числа профилеразмеров;
- возможность получения различных и оптимальных механических свойств на различных участках профиля;

• совмещение профилирования с другими производственными процессами, например: с автоматической шовной или точечной сваркой, пайкой, резкой, предварительной надрезкой полос перед профилированием, штамповкой, клеймением, перфорированием, гофрированием, правкой, гибкой по дуге, плакированием, окрашиванием, травлением, термообработкой, лужением, оцинкованием, хромированием и др.

Другие способы получения фасонных профилей (горячая прокатка, штамповка, выдавливание, волочение), несмотря на некоторое сходство с процессом профилирования, принципиально отличаются от него. Так, при профилировании площадь поперечного сечения заготовки практически не изменяется, формуемая заготовка подвержена продольным деформациям и напряжениям, деформация металла начинается значительно раньше, чем участок заготовки войдет в контакт с валками, перемещение заготовки производится тянущими усилиями, прикладываемыми со стороны вращающихся валков, в то время как при прокатке и прессовании площадь поперечного сечения заготовки изменяется, деформирование производится в пределах соприкосновения заготовки с рабочим инструментом, лишь незначительно выходя за пределы очага деформации; при гибке в штампах заготовка и рабочий инструмент перемещаются поступательно; при волочении заготовка подвержена тянущим усилиям со стороны захватов.

Совершенствование технологии профилирования и применяемого оборудования привело к тому, что гнутые профили проката изготавливают самых разнообразных конфигураций и размеров. Тем не менее, наблюдается тенденция все более интенсивного совершенствования способов формовки валков и оборудования, применяемых для профилирования. Создаются новые способы профилирования, например, с применением специальных приемов, направленных на повышение пластических свойств металла в процессе профилирования, формообразование отдельных участков профиля за счет местной вытяжки заготовки, увеличение толщины отдельных участков профиля путем создания поперечного сжатия и локального разупрочнения заготовки и др.

В этих условиях особенно актуальной становится задача разработки научных основ построения рациональных технологических процессов, обеспечивающих минимальные трудоемкость и себестоимость изготовления гнутых профилей заданной конфигурации при наилучшем их качестве и минимальном числе технологических переходов.

2.8. Комбинированная технология изготовления гнутых профилей настилов с поверхностью противоскольжения

В настоящее время в различных строительных конструкциях и промышленных сооружениях типа эстакад, переходных площадок, лестниц, переходов, покрытий полов производственных помещений и т.д. применяют настил из рифленых стальных листов или плоские плитовины с приваренными к ним ребрами противоскольжения. Такие рифленые листы обычно имеют толщину 4 – 5 мм, тогда как по условиям прочности вполне достаточна толщина 1,5 – 2,5 мм. Однако горячей прокаткой рифленые листы толщиной менее 3 – 4 мм технологически трудно изготовить. Таким образом, завышается масса и стоимость конструкций, выполненных с применением настилов из рифленых листов. Кроме того, узкие канавки на рифленых листах быстро засоряются, что резко уменьшает сопротивление трению и приводит к необходимости частой их очистки.

Применяемые иногда просечные облегченные настилы наряду с достоинствами обладают и существенными недостатками: повышенной трудоемкостью и низкой производительностью способа изготовления, ограниченными габаритами по длине (не более 3 м), что вызывает дополнительные трудности при монтаже и обусловливает необходимость применения сварочных операций. Кроме того, просечные настилы нельзя класть на перекрытия, находящиеся над другими рабочими площадками. Предъявляемым требованиям лучше всего удовлетворяют гнутые профили, несущая поверхность которых усилена поперечными периодически повторяющимися гофрами жесткости небольшой высоты, которые повышают несущую способность настила и в то же время обеспечивают нужную степень противоскольжения.

В данной работе разработаны принципиально новые конструкции панельных настилов, представляющие собой сортаментный ряд гнутых корытных и С-образных профилей толщиной 2,5 мм, у которых для обеспечения требуемой поверхности противоскольжения на стенках нанесены поперечные периодически повторяющиеся гофры трапецеидальной формы высотой до 7 мм с шагом 60 мм (рис. 2.1). Из разработанных профилей можно изготовлять настилы для отдельных переходных площадок и набирать ряд профилей в производственные площадки большей площади [56].

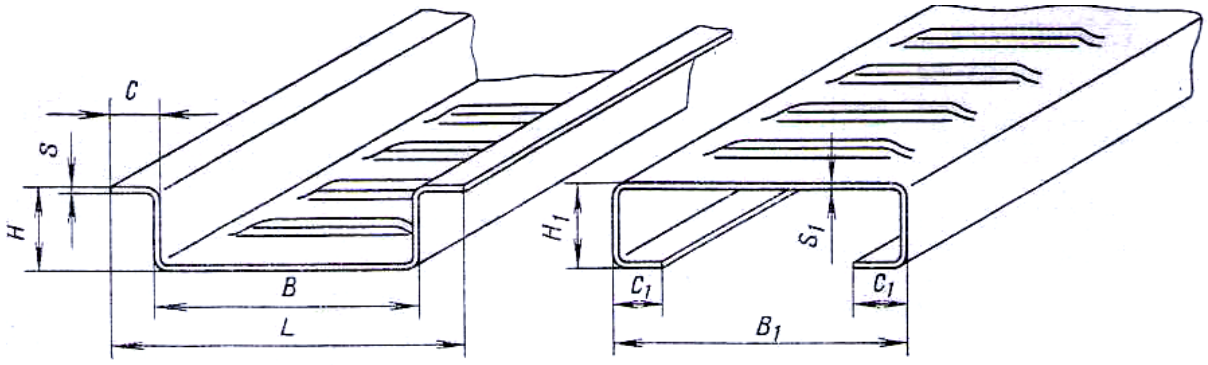


Рис. 2.1. Гнутые профили настила с периодически повторяющимися гофрами противоскольжения

Выбором соответствующего профиля из разработанного сортамента можно обеспечить перекрытие пролетов длиной до 12 м. При толщине S = S_X = 2,5 мм новые профили (рис. 2.1) имеют следующие основные размеры, мм:

H	B	L	C	H_1	B_1	C_1
120	417	460	30	120	600	40
120	500	600	50	120	800	40
200	500	600	50	160	600	40
120	700	800	50	160	800	40
200	700	800	50	200	800	40

Необходимое профилегибочное оборудование для изготовления по новой технологии требуемого профиля из разработанного сортамента выбирается на основании величин суммарных давлений металла на валки и крутящих моментов на валках, определенных по известным зависимостям [159].

Для определения возможности формовки в клети профилегибочного стана выбранного типа периодически повторяющихся гофров противоскольжения при определении усилия формовки P можно воспользоваться приближенной формулой $P = k \cdot L / S \cdot \sigma_в$, где L – длина формуемого гофра, мм; S – толщина заготовки, мм; $\sigma_в$ – временное сопротивление формуемого металла, Н/мм^2; k – коэффициент, учитывающий различие протекания процессов штамповки ребер жесткости на прессах и рельефной валковой формовки гофров при профилировании (0,25 – 0,40). На основании проведенных расчетов для изготовления корытного равнополочного профиля настила размером 417×120×30×2,5 выбрали профилегибочный стан 1–5×30–730. Для изготовления этого профиля с поперечными гофрами использовали сис-

тему калибровки с переменными величинами радиусов закруглений и постоянными расстояниями между центрами дуг мест изгиба. Такая система калибровки обеспечивает свободный доступ металла к местам изгиба. Разработанный режим формовки профиля настила предусматривает получение его в 10 клетях профилегибочного стана, из которых: клети 1 и 2 являются закрытыми формующими, 3 – 7 и 9 – 10 – открытыми формующими, а в клети 8 формуются поперечные гофры.

Валковая формовка поперечных периодических гофров представляет собой сложный процесс формообразования, при котором вытяжка участков полосы осуществляется непосредственно в осевой плоскости валков; при этом в ряде случаев возможно возникновение волнистости на боковых прямолинейных участках профиля, для устранения которой применяются различные способы. В целях предотвращения волнистости на стенке корытного профиля формовать поперечные гофры предполагалось в клети 8, так как полоса, выходящая из клети 7, в основном уже отформована, а боковые стенки вследствие полученной при профилировании жесткости препятствуют возникновению волнистости. В клетях 9 и 10 осуществляется доформовка корытного профиля с одновременной правкой плоских участков его стенки.

При валковой формовке поперечных периодических гофров для обеспечения синхронизации вращения формующих валков на рабочих валках стана необходима установка пары специальных синхронизирующих шестерен. Конструкция валков стана 1–5$\times$30–730 не позволяет разместить шестерни с внешней стороны клети за стойкой. Ширина формуемой в первых клетях стана полосы такова, что эти шестерни нельзя разместить и между стойками, и только при подгибке элементов профиля примерно на 80^0 (т.е. в клети 8) на валу освобождается место для их установки. В соответствии с разработанной технологией гофры на профиле формуются выступами нижнего валка в полостях верхнего. С учетом передаточного отношения шестеренной клети стана i = 2,5 основной диаметр верхнего валка принят равным 372,5 мм, нижнего – 149 мм.

Для размещения целого числа периодов гофров на бочках валков шаг между гофрами был откорректирован и составил T = 58,48 мм; при этом основной диаметр валка с выпуклыми формующими элементами может быть рассчитан: $D_н = n_1 \cdot T / \pi = 8 \cdot 58{,}48 / 3{,}14 = 149$ мм, где $n_1 = 8$ – число выпуклых формующих элементов на окружности бочки валка.

Основной диаметр валка с вогнутыми формующими элементами определяется:

$$D_в = D_н \cdot i = 149 \cdot 2,5 = 372,5 \text{ мм.}$$

Диаметры делительных окружностей сопряжения формующих элементов обоих валков с учетом толщины профилируемой полосы:

$$D_н = D_н + S = 149 \cdot 2,5 = 151,5 \text{ мм;}$$

$$D'_в = D_в + S = 372,5 + 2,5 = 375 \text{ мм.}$$

При длине шага Т между гофрами и числе выпуклых формующих элементов на валке n_1 число соответствующих им впадин на другом валке составляет $n_2 = in_1 = 2,5 \cdot 8 = 20$. Шаговые углы выпуклых φ_x и вогнутых φ_2 профильных элементов при этом равны 45 и 18^0; межцентровое расстояние между валками составляет 263,25 мм.

Разработанная калибровка валков для формовки на стенке корытного профиля клети 8 профилегибочного стана поперечных периодически повторяющихся гофров противоскольжения приведена на рис. 2.2.

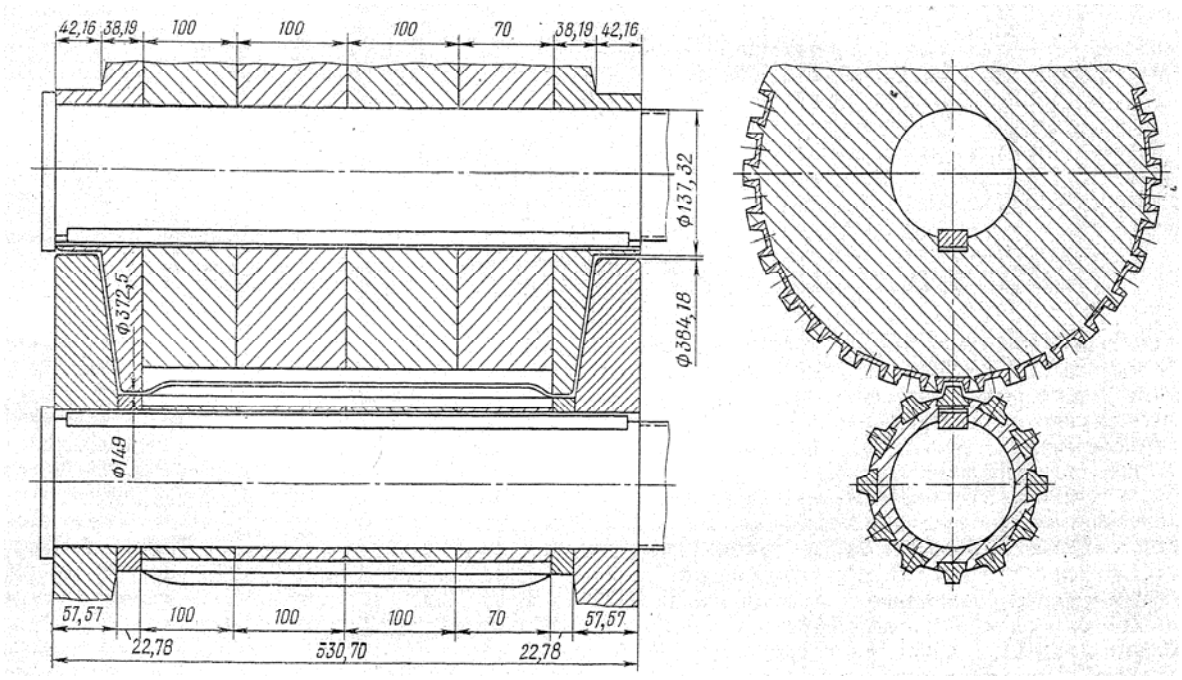


Рис. 2.2. Конструкция валков клети 8 профилегибочного стана, где формуются поперечные гофры противоскольжения

Конструкция валков для формовки поперечных гофров получается сложной и трудоемкой в изготовлении, поскольку требуются дополнительные операции по выполнению пазов по окружности бочек рабочих шайб, а также самих формующих элементов и их взаимная подгонка.

В целях унификации комплектов формующих валков и обеспечения возможности изготовления на одних валках профилей нескольких типоразмеров была запроектирована новая конструкция валков, отличительной особенностью которой является разборное исполнение не только шайб, но и формующих элементов – вставок. Заменяя на валках ряд формующих шайб со вставками цилиндрическими дистанционными, можно настроить комплект рабочих валков на формовку поперечных гофров любой требуемой ширины.

Размещать такую унифицированную рабочую клеть целесообразно перед клетями профилегибочного стана так, чтобы возможные при валковой формовке поперечных гофров дефекты плоских боковых участков полосы можно было устранить в процессе дальнейшей подгибки этих участков при формовке сортовых профилей различной конфигурации. Анализ размеров готового корытного профиля настила позволил установить, что предельные отклонения их от номинала не превышают допускаемых по ГОСТу на гнутые стальные профили.

Для проверки ряда характеристик получаемых профилей провели экспериментальные исследования деформированного состояния и механических свойств готовых профилей.

Анализ искажений координатной сетки, нанесенной на поверхности заготовки перед профилированием, позволил установить, что по внутренней поверхности в местах изгиба у оснований гофров наблюдалась деформация растяжения, максимальная величина которой составляла 16,5 % (рис. 2.3,а). На плоских участках между гофрами она уменьшалась до нуля, а на плоских боковых участках гофров постепенно переходила в деформацию сжатия, достигая 4 % в зоне сжатых волокон на участке мест изгиба у вершины гофров.

На плоском участке вершины гофра наблюдалась незначительная деформация растяжения.

По внешней поверхности (рис. 2.3,б) деформация растяжения увеличивалась от 2 % (на плоском участке) и достигала максимума (14 %) у вершины гофра в месте изгиба основания гофра и плоского бокового участка, а затем она резко понижалась и в месте изгиба у основания гофра переходила в деформацию сжатия с максимумом 5 %. На плоских участках между гофрами деформация была равна нулю. Такое различие в распределении деформации по сечению поперечных гофров можно объяснить влиянием изгиба при их формовке.

Так, вследствие изгиба профильными формующими элементами участка полосы в зоне формовки гофров, участки сопряжения вершин гофра и его боковых стенок с внутренней стороны сечения подвергаются деформации сжатия. Наложение этой деформации на противоположную по знаку деформацию растяжения приводит к резкому уменьшению общей деформации растяжения, которая на этих участках переходит в деформацию сжатия. Наружные же слои поперечного сечения гофра в местах сопряжения его вершины с боковыми стенками под влиянием того же изгиба испытывают дополнительную деформацию растяжения, при наложении которой на деформацию растяжения от вытяжки общая деформация увеличивается.

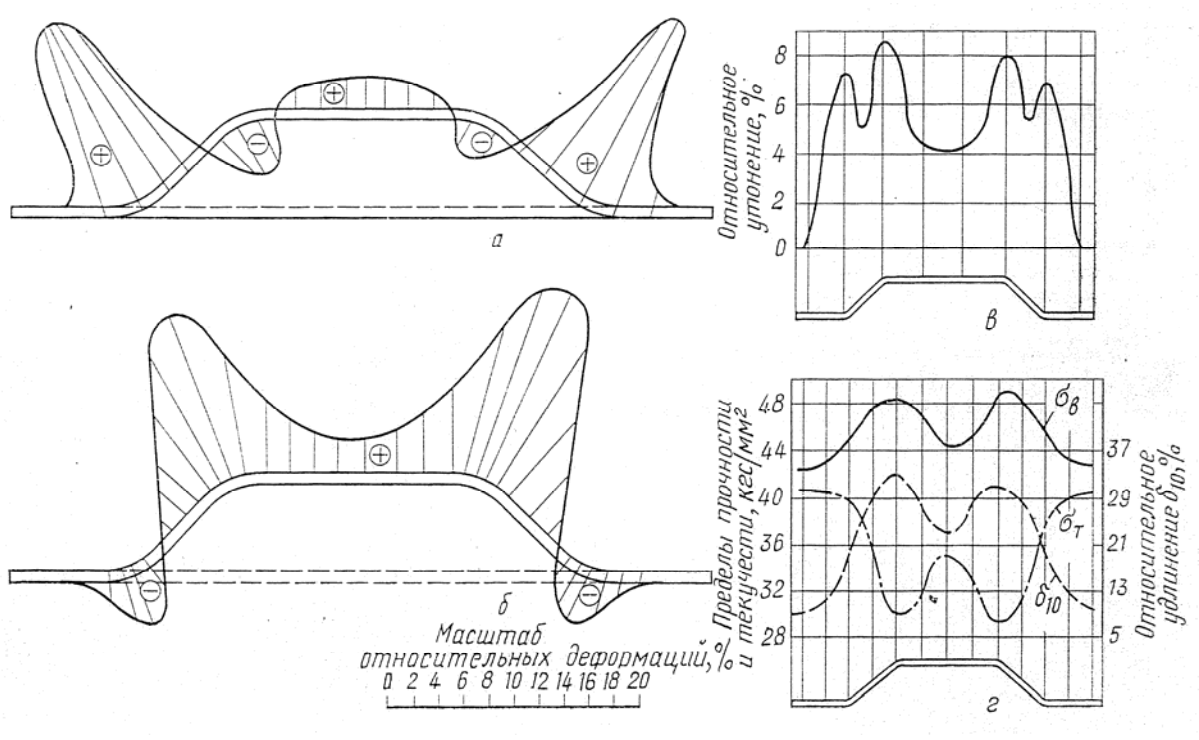


Рис. 2.3. Результаты исследования деформированного состояния и механических свойств гнутых профилей проката:
а и б – распределение поверхностных деформаций внутреннего и наружного слоев поперечного сечения гофров; в – изменение относительного утонения по поперечному сечению гофров;
г – изменение механических свойств по сечению гофра

На вырезанных из профиля темплетах измерили толщину формуемой полосы в поперечном направлении (рис. 2.3,в). Наибольшее относительное утонение наблюдается вблизи радиусов перехода вер-

шины гофра на плоские боковые участки и достигает 8,5 %. Другой максимум распределения утонения по исследуемому сечению приходится на участок сопряжения основания гофра с плоским боковым участком. Величина утонения здесь составляет 7 %. Утонение на вершине гофра и на плоских боковых участках достигает 4 – 5 %. На плоских участках между гофрами утонение отсутствует.

Анализ распределения утонения по поперечному сечению трапецеидальных гофров показал, что наиболее интенсивно процесс формообразования гофров происходит на криволинейных участках основания вершины гофра, а также на плоском наклонном участке между гофрами. Отсутствие утонения на прямолинейных участках, смежных с гофрами, свидетельствует о том, что гофры получены только в результате местной вытяжки на участках гофров.

Проведенные испытания на разрыв, а также определение твердости темплетов, вырезанных из гофров готовых профилей, показали, что по механическим свойствам готовые профили значительно отличаются от исходной заготовки. На участках отформованных гофров наблюдается явно выраженное упрочнение металла. В местах изгиба как у оснований, так и на вершине гофра временное сопротивление повышается на 13 % по сравнению с его уровнем для исходной заготовки (рис. 2.3,г*)*.

На плоских боковых участках и на вершине гофра прочность снижается, а на плоских участках между гофрами остается такой же, как и до профилирования. Предел текучести изменяется по поперечному сечению по такому же закону.

Относительное удлинение δ_{10} уменьшается до 8 % вблизи криволинейных участков вершины гофра и повышается до 19 % на плоских участках вершины. На промежутках между гофрами δ_{10} повышается до первоначальных значений.

Твердость изменяется аналогично изменению механических свойств: максимальное упрочнение металла наблюдается в местах изгиба на вершине и у основания гофров. На плоских участках между гофрами твердость остается такой же, как у исходной заготовки. Твердость измеряли на внутренней и на внешней поверхности гофров. Было установлено, что в зоне сжатых волокон твердость несколько выше, чем в зоне растянутых.

Таким образом, исследования по определению механических свойств готовых профилей позволили установить увеличение временного сопротивления предела текучести и твердости готовых профилей по сравнению с их уровнем для исходной заготовки; иными словами, в результате упрочнения, полученного при формовке, общая несущая способность всего профиля увеличивается.

В результате приведенных исследований по созданию панельных настилов для типовых лестниц и площадок промышленных зданий и сооружений разработаны сортамент специальных гнутых профилей и комбинированная технология их изготовления, по которой в одной непрерывной технологической линии совмещается процесс профилирования сортовых профилей с периодической валковой формовкой поперечных гофров противоскольжения. Приведенные экспериментальные исследования подтвердили возможности практического применения разработанной технологии.

Выводы

1. Показано, что в условиях рыночной экономики техническая подготовка менеджеров должна стать более универсальной. Поэтому в учебных планах их подготовки необходимо увеличить удельный вес технических дисциплин. Хорошо подготовленный в техническом отношении менеджер – залог решения проблемы увеличения прибыли предприятия.

2. Все процессы в современном обществе функционируют и развиваются в условиях глобализации, т.е. перехода от индустриальной к постиндустриальной стадии развития общества, формирования основ ноосферно-космической цивилизации.

3. Технологические системы, являясь инструментом созидания, одновременно являются, к сожалению, мощным фактором разрушения среды, в которой они функционируют. Гуманитарная подготовка в высших учебных заведениях должна быть направлена на формирование у студентов внутренних законов высшей морали, которая базируется на основных принципах экологической культуры и экологически чистых технологических системах, как одном из основных условий сохранения жизни на Земле и развития цивилизации в будущем.

4. Показано, что инновационные процессы в настоящее время являются ключевым вопросом развития научно-технического прогресса, который воплощается в новых продуктах, технологиях и достижениях в социальных и информационных сферах.

5. Показано, что выход на рынок продуктов, в том числе и новых технологий, осуществляется с обязательным их лицензированием. Причем новые технологии могут быть представлены в конечном пути их внедрения, то есть когда они приобретают новое качество и являются инновацией.

6. Проведен анализ наиболее существенных научных достижений в области финишной механической обработки материалов. Показано, что прогрессивный метод ультразвуковой обработки в перенасыщенном водном растворе хлористого калия позволяет получать модифицированные (т.е. скругленные) микропорошки, существенно улучшающие эксплуатационные характеристики поверхности медных изделий после их абразивного полирования.

7. Теоретически и экспериментально доказано, что повышение эффективности метода непрерывного профилирования листовых материалов – актуальная задача обработки металлов давлением, состоящая в разработке научных основ построения рациональных технологических процессов, обеспечивающих минимальные значения трудоемкости и себестоимости изготовления гнутых профилей заданной конфигурации при наилучшем их качестве и минимальном числе технологических переходов.

8. На основе проведенных исследований по созданию панельных настилов для типовых лестниц и площадок промышленных зданий и сооружений разработаны сортамент специальных гнутых профилей и комбинированная технология их изготовления, по которой в одной непрерывной технологической линии совмещается процесс профилирования сортовых профилей с периодической валковой формовкой поперечных гофров противоскольжения. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили приемлемость разработанной технологии.

Раздел 3
Современные технологии машиностроения

3.1. Высокоэффективные технологии фрезерования материалов

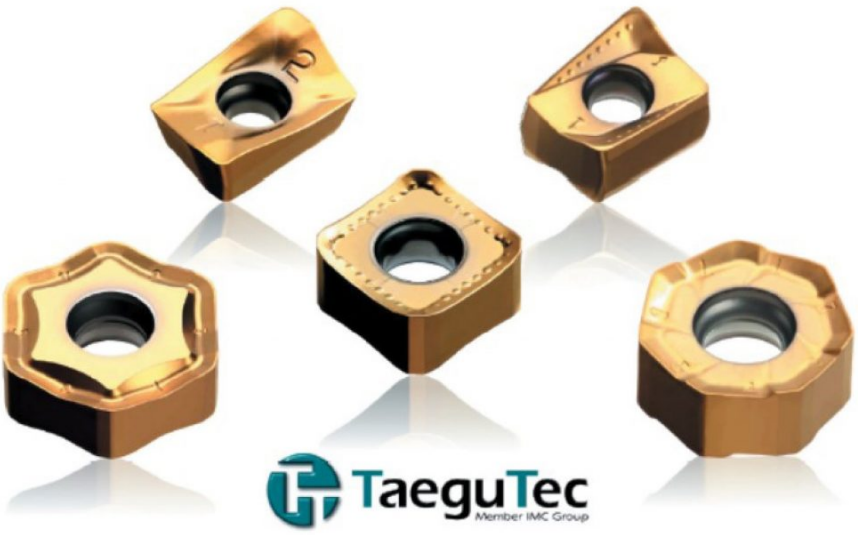
В последние годы на машиностроительных предприятиях широко используются современные металлорежущие высокооборотные станки с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и сборные режущие твердосплавные и керамические инструменты с износостойкими покрытиями зарубежного производства, которые обеспечивают значительное повышение производительности и качества выпускаемой продукции. Наибольший эффект от их применения достигается при обработке высокоточных деталей машин, изготавливаемых из материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Поэтому поиск новых эффективных условий их применения имеет большое научное и практическое значение.

В Техническом Центре "ВариУс" (г. Днепр) накоплен большой практический опыт внедрения на предприятиях Украины эффективных технологических процессов высокоскоростного резания на современных металлорежущих станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" производства компании Doosan (Южная Корея) с применением сборных высокопроизводительных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями производства одной из крупнейших металлообрабатывающих компании мира TaeguTec (Южная Корея) [30 – 35].

Тесно сотрудничая с компаниями Doosan и TaeguTec и работая на промышленном рынке Украины, Технический Центр "ВариУс" стал наибольшей компанией, специализирующейся на обеспечении предприятий оборудованием, инструментами, запасными частями и т.д. Его специалисты предоставляют полный комплекс работ по разработке и внедрению технологий механической обработки, а также поставке и сервису металлообрабатывающего оборудования практически для всех работающих предприятий машиностроительной, металлургической и других отраслей промышленности, включая многие подразделения железных дорог. Директором Технического Центра "ВариУс" является кандидат технических наук Жовтобрюх В. А. – один из авто-

ров настоящей монографии. В связи с этим, ниже приведены новые технологические разработки, предлагаемые Техническим Центром "ВариУс", которые могут быть полезны для предприятий Украины.

3.1.1. Эффективность применения нового инструментального износостойкого сплава от компании TaeguTec для высокоскоростного фрезерования чугунов



Современные требования к эффективности металлообработки ставят производственные компании перед выбором: повышать производительность или уходить с рынка. Увеличение производительности достигается исключительно повышением скоростных характеристик оборудования и применением соответствующего задаче инструмента. Это вынуждает инструментальные компании всего мира создавать все более совершенные сплавы, покрытия и формы режущих инструментов, особенно если речь идет об обработке сложных материалов.

В настоящее время качество и новые технологии производства чугунных заготовок позволяют изготавливать из чугуна изделия достаточно сложных форм, что накладывает определенные обязательства на производителей режущих инструментов, как в части режущих инструментальных материалов, так и в смысле новых геометрий режущей кромки.

Содержание углерода в чугуне определяет его характеристики, придает сплавам железа твердость, снижая пластичность и вязкость. В зависимости от формы графита и количества цементита выделяют

белый, серый, ковкий и высокопрочный чугуны. Чугуны содержат постоянные примеси (Si, Mn, S, P), а в некоторых случаях – и легирующие элементы (Cr, Ni, V, Al и др.), влияющие на степень его твердости.

Несмотря на то, что каждый технолог знает об относительной легкости обработки чугуна резанием (графит в составе чугуна способствует получению рассыпчатой короткой стружки, обладая при этом смазывающим свойством), для специалиста, занимающегося механической обработкой, весьма важно понимать преобладание абразивного типа износа режущей кромки инструмента при резании чугуна. Поэтому к применению, как правило, рекомендуются режущие пластины с износостойкими покрытиями.

Чугунные заготовки чаще всего получают путем литья, что приводит к неравномерному припуску на отливках, наличию литейной корки и песка, попадающего из литейной формы, а это вызывает значительные сложности при фрезеровании, интенсифицирует абразивный износ инструмента.

Продолжая непрерывный процесс совершенствования инструментальных материалов, компания TaeguTec выпустила новый сплав TT7515 с улучшенной подложкой, обеспечивающей повышенную твердость и прочность в сочетании с максимальной износостойкостью – благодаря применению новейшей технологии нанесения CVD-покрытия (TiCN-Al_2O_3-TiN) (рис. 3.1). Слой TiCN придает новому сплаву повышенную твердость, что положительно сказывается на износостойкости. Оксид алюминия Al_2O_3 представляет собой нейтральный слой, имеющий низкую теплопроводность, и служит, таким образом, в качестве теплового барьера, улучшая стойкость режущей кромки к пластической деформации.

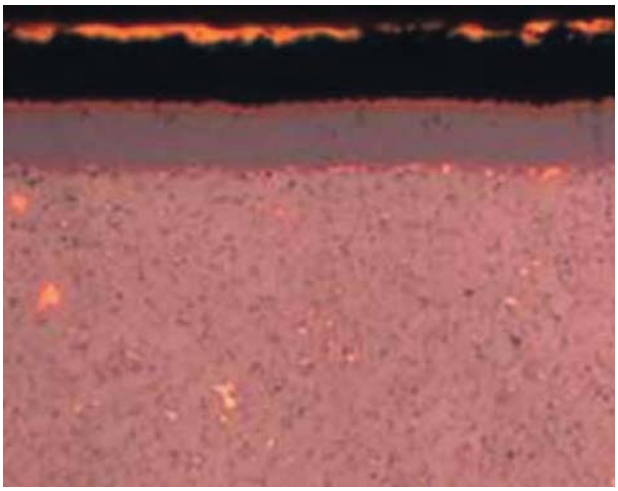


Рис. 3.1. Структура сплава TT7515

В свою очередь, слой нитрида титана TiN дополнительно удлиняет жизненный цикл инструмента и позволяет своевременно выявить критичный износ. Кроме того, улучшенная твердосплавная подложка,

специально разработанная южнокорейским исследовательским центром TaeguTec, обеспечивает повышенную стойкость на излом, благодаря более однородному и жесткому уплотнению, в то время как высокие адгезионные свойства покрытия препятствуют расслаиванию сплава.

Сплав TT7515 демонстрирует превосходное и стабильное резание чугуна на высоких скоростях, предотвращая внезапный скол кромки даже в условиях нестабильной обработки. Другим преимуществом новейшего покрытия от TaeguTec является повышение сопротивляемости инструмента к абразивному стиранию. Созданный инновационный сплав TT7515 дополняет уже существующий сплав TT6800, покрывая аналогичный диапазон применения (рис. 3.2), но с еще более высокой эффективностью (K05-K25 и H05-H25).

Рис. 3.2. Область применения сплавов TT7515 и TT6800

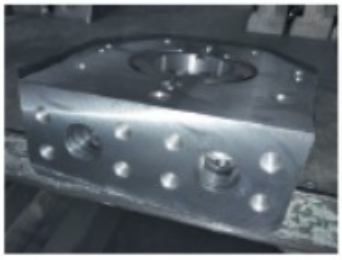
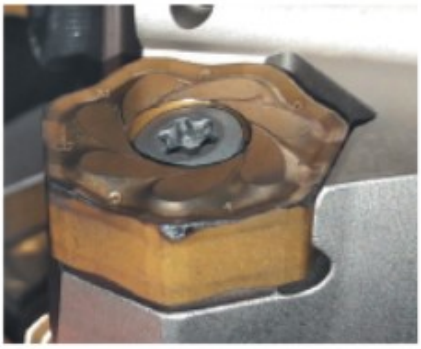
Поэтому существующий сплав TT6800 будет в скором будущем полностью заменен на сплав TT7515. Преимущества нового сплава TT7515 в течение 2017 года смогли опробовать на своих производственных участках несколько предприятий Украины, выпускающих серийно изделия из различных видов чугуна.

Один из таких интересных случаев внедрения нового сплава TT7515 позволил сэкономить заказчику значительные средства за счет высокой стойкости нового инструмента и повышения производи-

тельности участка, несмотря на низкое качество применяемой заготовки (табл. 3.1).

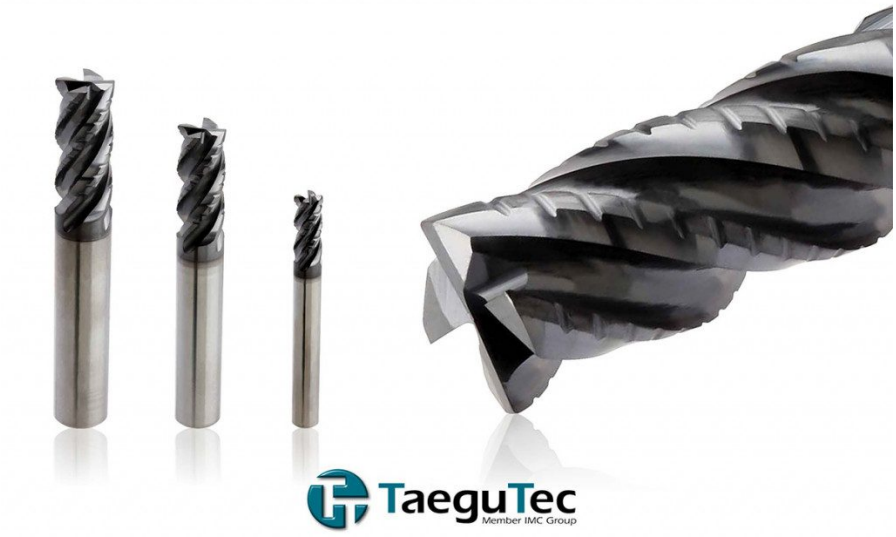
Таблица 3.1

Результаты испытаний пластин из сплава TT7515

Параметр	
Деталь	Крышка задняя
Материал и твердость	Высокопрочный чугун ВЧ 450 170…207 HB (литье)
Фреза	D80Z7 14D-F45XN 780-27R-09
Пластина	XNHU 0906 ANTN-MM **TT7515**
Скорость резания / обороты	200 м/мин / 796 об/мин
Глубина резания	2-3 мм
Ширина фрезерования	67 мм
Подача	835 мм/мин
Стойкость	50 мин
Заготовка / Обработанная деталь	
Износ пластины	

Таким образом показано, что применение нового износостойкого сплава TT7515 с улучшенной подложкой, обеспечивающего повышенную твердость и прочность в сочетании с максимальной износостойкостью – благодаря применению новейшей технологии нанесения CVD-покрытия (TiCN-Al_2O_3-TiN), позволяет осуществлять высокоскоростное фрезерование чугунов и обеспечивает существенное повышение производительности и качества обработки.

3.1.2. Новые монолитные фрезы STARMILL для фрезерования труднообрабатываемых материалов



К труднообрабатываемым материалам относятся жаропрочные сплавы, которые способны работать в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение относительно длительного промежутка времени, а также нержавеющие стали, обладающие высоким сопротивлением к коррозии в агрессивных средах (пары воды, кислоты). Для обеспечения таких характеристик данные материалы обладают особыми свойствами: высокие показатели прочности, жаропрочности и теплостойкости. Но есть и высокая цена, которую приходится платить за такие полезные характеристики, – обрабатываемость этих материалов чрезвычайно низкопроизводительная.

Инструментальные компании всего мира считают эту задачу одной из самых приоритетных на протяжении многих десятилетий. Компания TaeguTec выпустила новый тип монолитных фрез серии STARMILL с кромкой "Splitter" для черновой обработки труднообрабатываемых материалов. Был разработан дизайн кромки "Splitter" (рис. 3.3), который при обработке жаропрочных сталей способен разделять стружку на несколько мелких частей и легко выводит ее из зоны резания. При этом значительно снижаются нагрузка на инструмент и выделение тепла в зоне резания даже в условиях подачи воздуха или СОЖ под низким давлением.

Дополнительным преимуществом фрез данной серии является неравномерно расположенные зубья (рис. 3.4) относительно оси инструмента. Это способствует дополнительному снижению вибраций и

шума во время обработки, а, следовательно, приводит к более стабильному процессу резания в сравнении со стандартными инструментами при обработке нержавеющих сталей.

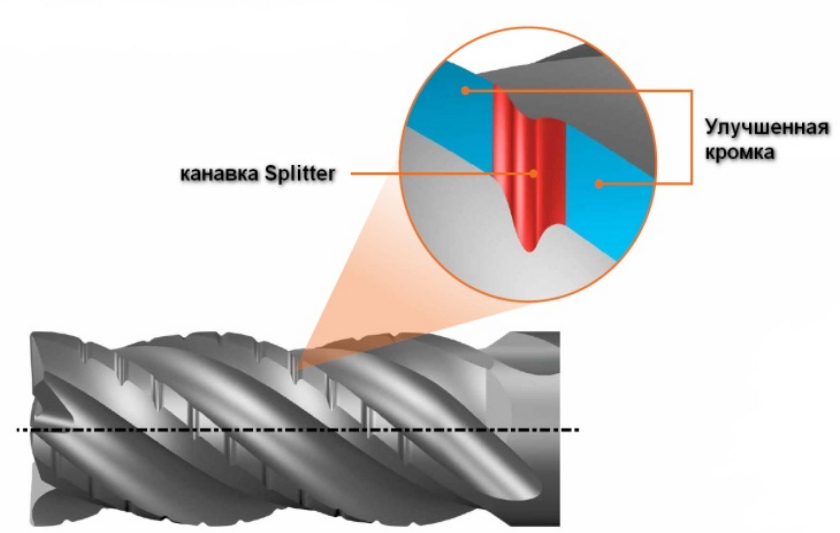


Рис. 3.3. Геометрия Splitter

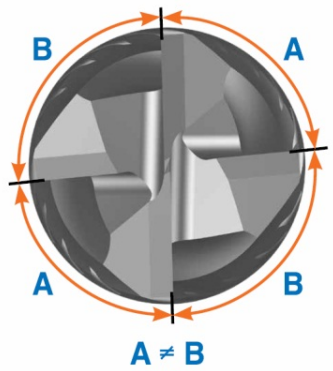


Рис. 3.4. Неравно расположенные зубья

За счет нестандартного расположения канавок (рис. 3.5) фрезы TaeguTec обеспечивают отличное качество поверхности в широком диапазоне операций: от черновых до получистовых, а в некоторых случаях – позволяют уйти от дополнительных чистовых операций, сократив, таким образом, время обработки деталей.

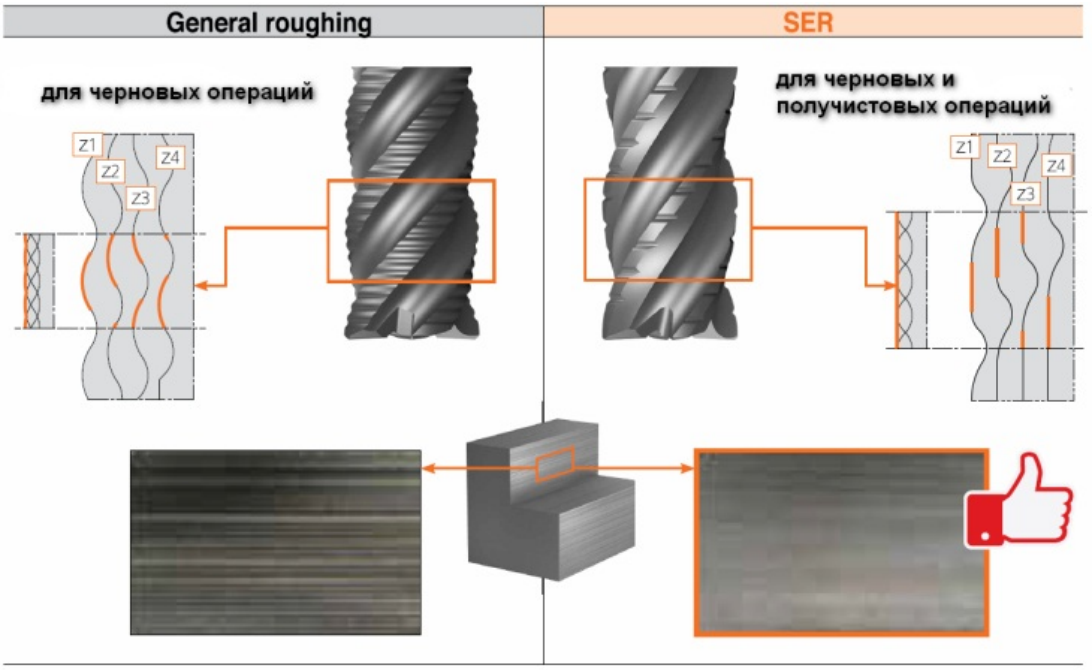


Рис. 3.5. Расположение канавок на фрезах

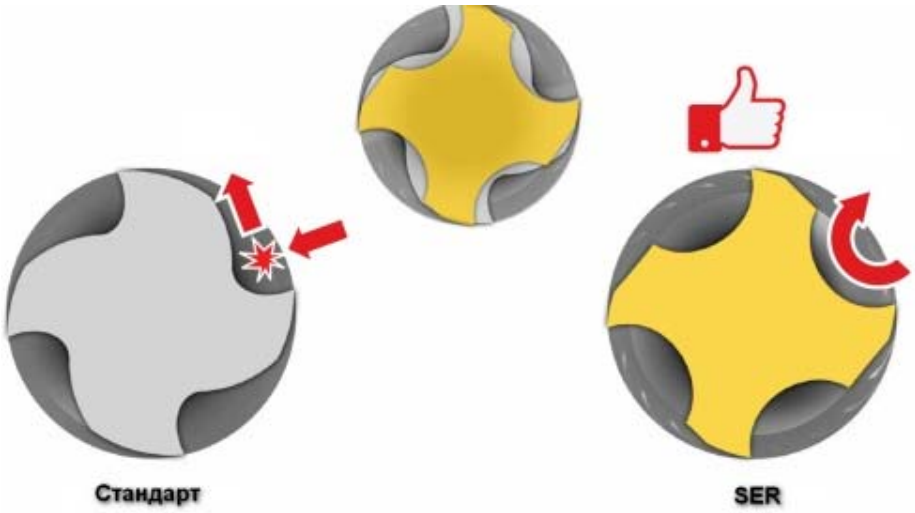


Рис. 3.6. Стружечные канавки

Модернизированные стружечные канавки увеличенного размера (рис. 3.6) позволяют концевым фрезам выполнять высококачественную обработку: как уступов, так и фрезерование пазов.

3.1.3. Повышение производительности обработки при фрезеровании на оборудовании с недостаточной мощностью

Для снижения затрат на режущий инструмент и, как результат, повышения экономической эффективности производства за счет снижения прямых расходов, компания TaeguTec выпустила и несколько раз обновила известную серию торцевых фрез CHASE2HEPTA, в том числе и по заявкам машиностроительных предприятий Украины. На

многих предприятиях Украины парк оборудования состоит не только из современных мощных и жестких обрабатывающих центров, оснащенных системами ЧПУ, на которых возможно в полной мере использовать потенциал современного инструмента, но и из маломощного оборудования, как правило, изношенного советского или эконом-класса тайваньского происхождения, с конусом шпинделя 30 или 40. Инженеры TaeguTec провели анализ данной ситуации, результатом которого стала разработка и выход в свет новой серии фрез CHASEHEPTA для рынка восточной Европы.

Серия CHASEHEPTA – это фрезы с углом в плане 45^0, оснащенные семигранными односторонними пластинами 7EMT 0604 (рис. 3.7) с задним углом 20^0. Данная пластина имеет 7 режущих кромок с передним углом 5^0.

Рис. 3.7. Семигранная односторонняя пластина 7EMT 0604

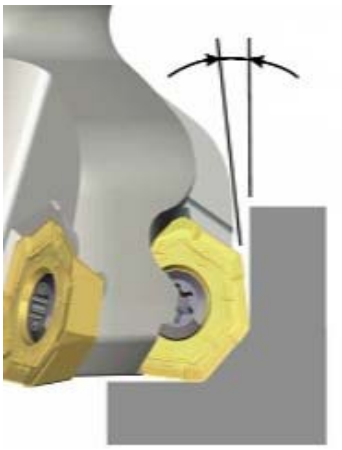


Рис. 3.8. Расположение пластины на фрезе под углом 45^0

Обновленные пластины имеют повышенную толщину, что позволяет значительно повысить производительность за счет увеличения подачи на зуб, не опасаясь сколов. Благодаря семигранной концепции режущей пластины и двум боковым опорным поверхностям, расположенным друг к другу под острым углом, гарантируется жесткая фиксация пластин в кармане. На корпус фрезы новые пластины устанавливаются под углом в плане 45^0. При установке пластин на фрезу образуется позитивный передний угол 18^0, который положительно влияет на силы резания в процессе фрезерования в сторону их уменьшения. При этом максимальная глубина резания составляет 3,2 мм за один проход, что является важным показателем при работе на маломощном

оборудовании. Кроме того, специальная конфигурация и расположение пластин на фрезе под углом 45^0 позволяют защитить нерабочие кромки от столкновения с заготовкой при спиральном фрезеровании и обработке уступов (рис. 3.8).

Отечественным машиностроителям приходится иметь дело с большим спектром обрабатываемых материалов. В каждом случае для максимально эффективной обработки необходимо правильно выбрать стружколомающую геометрию режущей пластины в зависимости от материала и в соответствии с качеством заготовки.

В арсенале новой серии фрез CHASEHEPTA присутствуют два варианта стружколомов: геометрия M (рис. 3.9), предназначенная для обработки сталей и чугуна, и острая ML-геометрия (рис. 3.9), как идеальное решение для фрезерования нержавеющих и труднообрабатываемых сталей и работы в нестабильных условиях, таких как нежесткое закрепление заготовки или работа с большим вылетом инструмента.

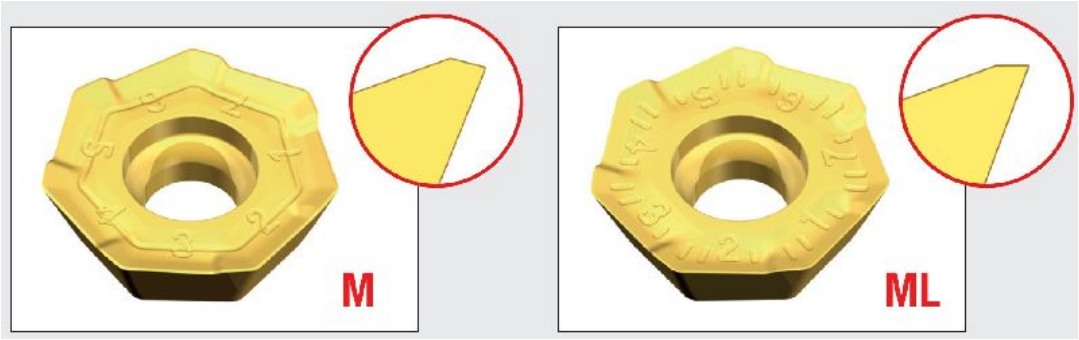


Рис. 3.9. Две геометрии пластины

Рис. 3.10. Серия фрез CHASEHEPTA

Область применения серии фрез CHASEHEPTA (рис. 3.10) достаточно широка за счет увеличения спектра выполняемых операций (концевое и торцевое фрезерование), таких как обработка пазов, фасок по контуру и профильного фрезерования. Как результат, инструмент серии CHASEHEPTA стал основным инструментальным решением для более чем 40 предприятий Украины и продолжает проходить испытания на десятках других предприятий.

3.1.4. Обработка закаленных сталей фрезами HardMill

Детали из закаленных сталей являются самыми труднообрабатываемыми и, соответственно, трудоемкими в машиностроении. Чем тверже обрабатываемый материал, тем значительнее требования к режущему инструменту и к квалификации технолога, занимающегося отработкой режимов резания.

HARDMILL С целью уменьшения расходов предприятий на режущий инструмент, а также для возможности снижения машинного времени обработки, компания TaeguTec представила новые твердосплавные монолитные фрезы серии HARDMILL, предназначенные для высокоскоростной обработки закаленных сталей.

Учитывая жесткие требования к инструменту в аэрокосмической промышленности, а также для обработки пресс-форм и штампов, бы-

ло применено для линейки фрез серии HARDMILL передовое покрытие и получен новый сплав TT5505 (рис. 3.11). На сегодняшний день это, пожалуй, наиболее совершенное решение среди существующих предложений на рынке для производительной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов.

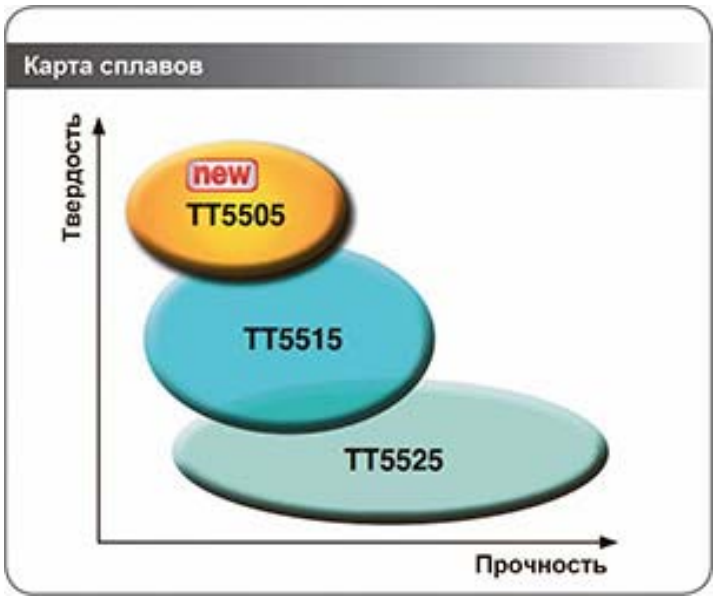


Рис. 3.11. Свойства сплавов для фрез серии HARDMILL

Непревзойденная стойкость инструмента обусловлена уникальными свойствами твердого сплава из ультрамелкого зерна (рис. 3.12), что в совокупности с новым покрытием обеспечивает высокие показатели шероховатости обрабатываемой поверхности.

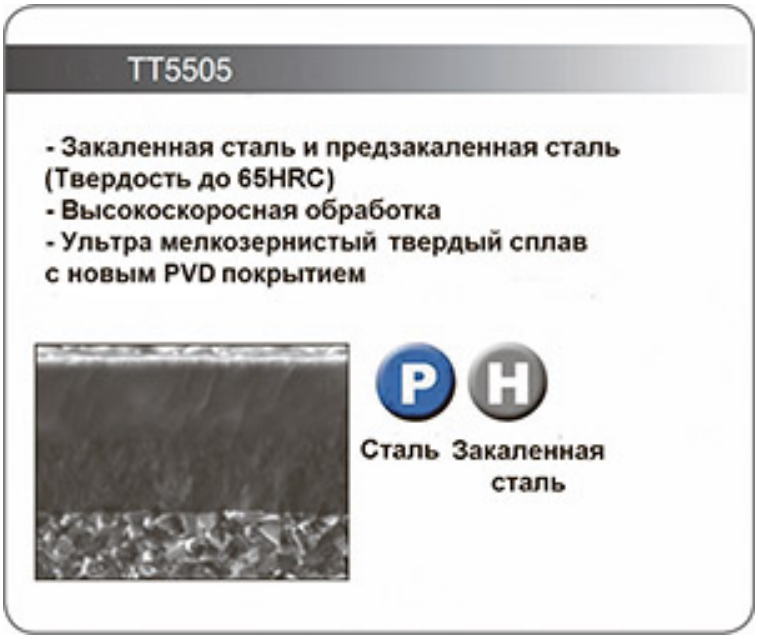


Рис. 3.12. Условия применения и свойства сплава TT5505

Линейка твердосплавных концевых фрез HARDMILL предназначена исключительно для высокоскоростной обработки закаленных деталей. Оптимальная форма режущей части фрез обеспечивает высокий уровень сопротивления к износу, что позволяет увеличить производительность и, следовательно, высокую эффективность обработки. В то же время, высокая точность радиуса и минимальное биение инструмента позволяет его применять для высокоточных чистовых операций.

Новые концевые фрезы имеют весьма широкую номенклатуру (рис. 3.13), насчитывая 645 стандартных позиций. Также фрезы изготавливаются в 3-х конфигурациях: с плоским торцом, с радиусом при вершине и сферической формы.

Серия HARDMILL включает фрезы с различными длинами, перекрывая широкий диапазон операций обработки пресс-форм и штампов, а также инструментальных задач в аэрокосмической отрасли и общего машиностроения.

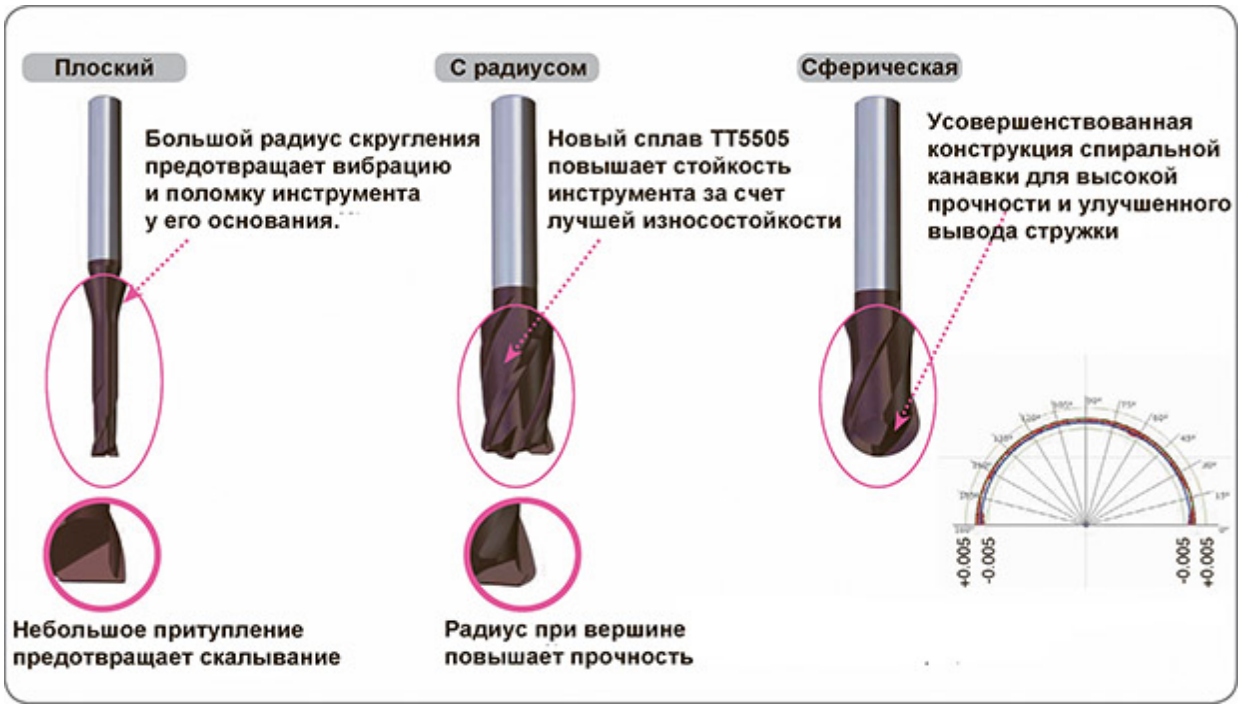


Рис. 3.13. Основные типы концевых фрез серии HARDMILL

Сравнительные испытания на предприятиях Украины показали, что концевые фрезы TaeguTec HARDMILL существенно увеличивают стойкость инструмента даже при повышении ранее применявшихся режимов обработки.

3.1.5. Антикризисные решения от компании TaeguTec для фрезерования

Чтобы понять, насколько технологически развито конкретное производство режущего инструмента, необходимо, прежде всего, изучить предлагаемые решения в области фрезерования. Именно при фрезеровании сталкиваются желания снять наибольший объем материала за короткий промежуток времени, с одной стороны, и возможности имеющегося оборудования, с другой стороны. Здесь находят наиболее эффективное практическое применение знания, опыт и смелые инновационные решения конструкторов и технологов ведущих мировых производителей.

Рис. 3.14. Серия фрез CHASEMILL PLUS

Компания TaeguTec обновила несколько серий выпускаемого ею фрезерного инструмента. Одна из этих серий – CHASEMILL PLUS (рис. 3.14) – это фрезы нового поколения с двусторонними пластинами общего применения увеличенной толщины. С помощью этой серии фрез выполняются такие операции, как торцевание, выполнение пазов и уступов с углом 90^0, наклонное и спиральное фрезерование. Применение двусторонних пластин позволяет существенно сократить затраты на металлорежущий инструмент.

Пластины серии фрез CHASEMILL PLUS имеют суперпозитивную геометрию (рис. 3.15) передней поверхности, что способствует уменьшению усилий резания и температурных нагрузок. Передний положительный угол на первой и второй стороне пластины разный,

что позволяет обеспечить обработку без вибраций и увеличить стойкость инструмента.

Рис. 315. Пластина ANHX 160708R-M

Пластина спиралевидного типа ANHX 160708R-M имеет 4 режущие кромки, каждая из которых имеет зачистную кромку Wiper большего радиуса. Максимальная глубина резания – до 15 мм. Существует три радиуса при вершине режущей кромки: 0,4 мм; 0,8 мм; 1,6 мм.

Изготавливаются следующие типы фрез: концевые (с диапазоном диаметров от 32 мм до 50 мм) и торцевые (от 50 мм до 200 мм).

Следующая серия – фрезы LS-MILL PLUS – это прогрессивные торцевые фрезы (рис. 3.16) с мощными двусторонними пластинами и с высоконадежной системой их крепления типа "винт под углом" (рис. 3.17) для многоцелевого применения.

Рис. 3.16. Серия фрез LS-MILL PLUS

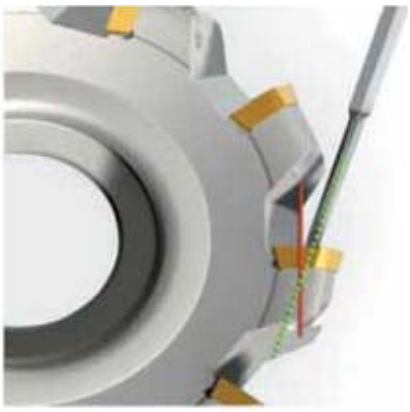


Рис. 3.17. Система крепления пластин "Винт под углом"

Двусторонние пластины серии фрез LS-MILL PLUS (рис. 3.18 и рис. 3.19) имеют суперпозитивную геометрию передней поверхности, что способствует уменьшению усилий резания и температурных нагрузок. В результате получен надежный инструмент с высокой стойкостью. Благодаря уникальной системе винтового крепления удалось увеличить количество пластин на фрезе, что позволяет производить обработку при больших подачах и повышает производительность.

В отличие от серии LS-MILL PLUS, торцевые фрезы ISO с обычной системой клинового зажима, а также фрезы с обычным винтовым зажимом для пластин не обеспечивают такой производительности

из-за недостатка свободного пространства на корпусе. Кроме того, такое уникальное крепление приводит к уменьшению затрат на приобретение дополнительных комплектующих, а также к экономии времени на переустановку пластин.

Рис. 3.18. Пластина TNGX

Рис. 3.19. Пластина SNGX

Диапазон диаметров серии фрез LS-MILL PLUS – от 50 мм до 250 мм. Существует три угла в плане: 45^0, 75^0, 90^0. Все вышеуказанные преимущества способствуют эффективному применению этой серии фрез не только в мире, но и на предприятиях Украины.

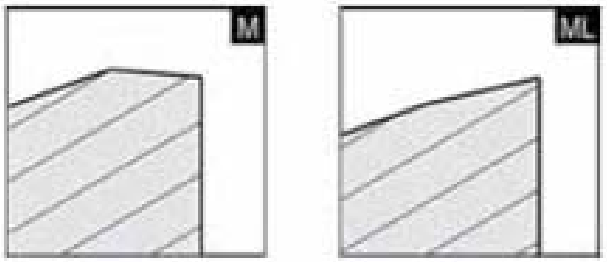
Пластины серии фрез LS-MILL PLUS представляют собой экономически выгодное решение для фрезерной обработки благодаря наличию 6-ти и 8-ми режущих кромок, имеющих квадратную и треугольную форму с длиной режущей кромки 12 мм и 22 мм соответственно. Увеличенная толщина двусторонней пластины (без значительного увеличения стоимости) и надежное крепление к трем плоскостям посадочного места на фрезе позволяет использовать все режущие кромки без риска преждевременной поломки пластины в условиях прерывистого резания.

Серия фрез Z-MILL PLUS (рис. 3.20) является экономически выгодным решением для обработки сталей с утолщенными двусторонними пластинами (толщина 6,35 мм) и надежной системой винтового крепления пластин "винт под углом".

Рис. 3.20. Серия фрез Z-MILL PLUS

Отличительная особенность пластин серии фрез Z-MILL PLUS состоит в наличии 12 (!!!) режущих кромок (рис. 3.21) с двумя типами стружколомающей геометрии – M и ML (рис. 3.22).

Рис. 3.21. Пластина HNHX ANTN-M/ML



а б

Рис. 3.22. Стружколомающая геометрия пластины M (а) и ML (б)

Геометрия M предназначена для универсального фрезерования сталей и чугунов, а стружколомающая геометрия ML – для обработки чугунов на низких и средних подачах и для обработки низкоуглеродистых и нержавеющих сталей.

Эта серия фрез имеет три исполнения корпусов:

- торцевые фрезы с углом в плане 45^0, диапазон диаметров – от 63 мм до 250 мм, максимальная глубина обработки – до 6,1 мм;
- торцевые фрезы с углом в плане 15^0(фрезерование при больших подачах на зуб – от 0,5 мм/зуб до 2,5 мм/зуб), диапазон диаметров от 80 мм до 125 мм, максимальная глубина обработки до 2 мм;
- торцевые фрезы с углом в плане 45^0 (черновая обработка чугунов, система крепления пластин – клином), диапазон диаметров от 80 мм до 400 мм, максимальная глубина фрезерования – до 6,1 мм.

Все корпуса вышеперечисленных серий фрез CHASEMILL PLUS, LS-MILL PLUS и Z-MILL PLUS покрыты антипригарным покрытием NICKOTEC на никелевой основе, что существенно увеличивает срок службы инструмента.

3.1.6. Обновленная серия торцевых фрез

Серия фрез CHASE2QUAD – это торцевые фрезы (рис. 3.23) с углом в плане 45^0 и 75^0, оснащенные восьмигранными режущими пластинами уникальной конструкции, позволяющими достигать высокой экономичности и производительности при черновой и чистовой обработке всех видов сталей, чугунов и цветных металлов.

Рис. 3.23. Серия торцевых фрез CHASE2QUAD

В фрезах применена уже известная механообработчикам Украины квадратная твердосплавная пластина SNGX 1205 (рис. 3.24), но с увеличенной до 13 мм длиной режущей кромки и большей толщиной. Пластина SNGX 1306 также является двухсторонней с 8-ю режущими

кромками. В то же время значительно расширилась линейка геометрических конфигураций передней режущей поверхности (рис. 3.25), так называемых стружколомов, что позволяет обрабатывать все типы материалов, включая алюминий.

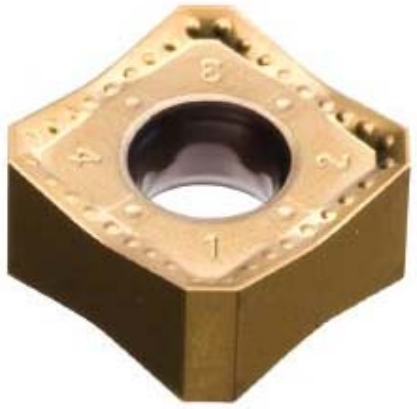


Рис. 3.24. Квадратная твердосплавная пластина серии SNGX 1205

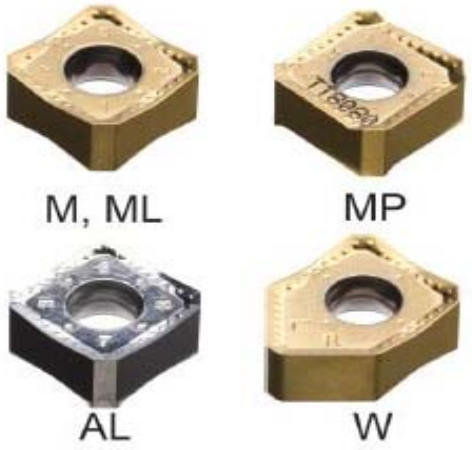


Рис. 3.25. Геометрические конфигурации передней режущей поверхности

К стандартному стружколому M, который является лучшим выбором для обработки сталей и чугунов, добавились несколько новых геометрий: ML – используется для фрезерования нержавеющих сталей и других вязких материалов; MP – обладает спиралевидной режущей кромкой и спроектирован для менее нагруженной работы при значительной глубине резания; пластина со стружколомом AL представляет собой шлифованную по периметру и полированную по передней поверхности пластину с острой кромкой, которая "заточена" для обработки алюминия и цветных металлов. Кроме того, для чистовых операций, при необходимости достижения высокой чистоты поверхности, можно использовать специальную пластину с геометрий Wiper (обозначение стружколома- W).

Повышение экономических показателей новой пластины SNGX 1306 по сравнению с ранее применявшейся пластиной SNGX 1205 обусловлено повышением стойкости (рис. 3.26) на одну режущую кромку до 30% при незначительном увеличении стоимости. К тому же, применение пластины с геометрией Wiper позволяет улучшить чистоту обрабатываемой поверхности (рис. 3.27) по сравнению с предыдущим решением с Ra = 0,25 мкм до Ra = 0,22 мкм.

Материал: серый чугун СЧ30

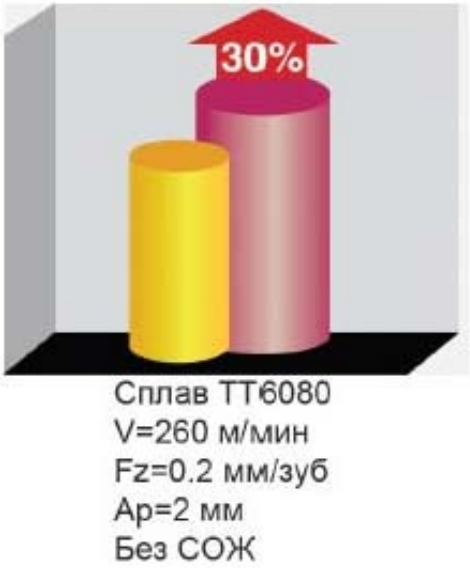


Рис. 3.26. Показатели повышения стойкости пластины SNGX 1306

Материал: легированная сталь

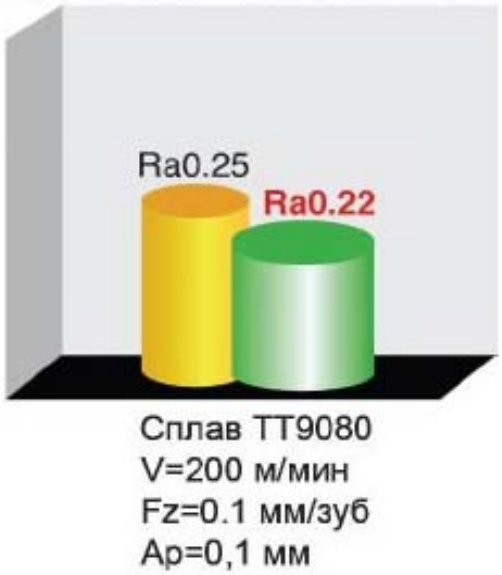


Рис. 3.27. Показатели чистоты обрабатываемой поверхности

В новых корпусах фрезы CHASE2QUAD конструктивно реализована возможность подачи СОЖ к каждой режущей пластине для достижения максимальных режимов резания и, соответственно, высокой производительности при фрезеровании труднообрабатываемых материалов. Улучшена также и эвакуация стружки из зоны резания.

Для того чтобы максимально использовать возможности оборудования по мощности и крутящему моменту рекомендуется использовать различные по шагу зубьев корпусы фрез в зависимости от условий обработки (вылета инструмента, жёсткости станка, режимов резания). Практически для всей номенклатуры диаметров фрез существует три шага: крупный, нормальный, мелкий. Мелкий шаг, как правило, применяется для обработки чугунов, а крупный шаг – для маломощных станков или при большом вылете инструмента.

Стандартная линейка корпусов данной серии фрез выпускается с диаметрами от 50 мм до 200 мм. Все они покрыты антипригарным и износостойким покрытием NICKOTEC на никелевой основе, которое защищает корпус от коррозии и дополнительных физикохимических воздействий в процессе обработки.

Существует два исполнения корпусов с различными углами в плане:

• 45^0 – используется для общего фрезерования плоскостей и способствует более эффективному удалению стружки из зоны резания за счет формирования более тонкой стружки. При таком расположении пластин максимальная глубина резания составляет 7 мм;

• 75^0 – используется для фрезерования материалов с повышенной глубиной снимаемого слоя – до 9,5 мм.

3.1.7. Новые разработки компании TaeguTec для фрезерования

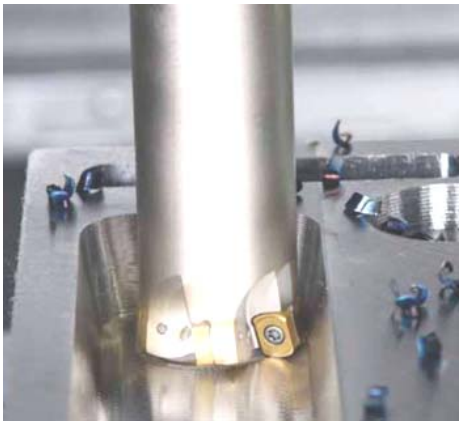


Рис. 3.28. Фреза серии ChaseFeedPlus Mini NEW

Серия фрез ChaseFeedPlus Mini NEW (рис. 3.28) предназначена для работы на высоких подачах при черновой обработке пресс-форм и штампов. С ее помощью можно выполнять торцевое фрезерование, обработку уступов, врезание под углом и по спирали. Эти фрезы могут оснащаться большим количеством пластин за счет уменьшения их размеров, что способствует увеличению производительности (увеличению подачи).

Серия ChaseFeedPlus Mini NEW дополняет известную модель Chase Feed Plus за счет расширения линейки диаметров корпуса с 32,00 мм до 16,00 мм. В ней используется новая утолщенная двухсторонняя пластина BLMP 0603R-M с габаритом 6,00 мм (рис. 3.29). Она имеет режущие кромки величиной 4,00 мм, что способствует уменьшению затрат на приобретение инструмента благодаря более высокой стойкости.

Рис. 3.29. Пластина BLMP 0603R-M

С помощью уникальной геометрии режущей кромки и положительной геометрии передней поверхности можно производить обработку при максимальной подаче 1 мм/зуб и глубине резания 1,00 мм. Данные пластины изготавливаются из сплавов: TT9080, TT7800 и TT8030. Сплав TT7800 применяется для обработки углеродистых и легированных сталей, сплав TT8030 предназначен для фрезерования нержавеющих сталей, а сплав TT9080 является

универсальным сплавом, охватывающим все типы обрабатываемых материалов, включая закаленные стали с твердостью до HRC 50.

Для изготовления пресс-форм и штампов, в зависимости от габарита обрабатываемой детали, применяют различные типы фрез TaeguTec, оснащенные пластинами BLMP 0603R-M:

- концевые фрезы – для обработки небольших и "узких" деталей;
- торцевые фрезы – для обработки крупногабаритных деталей и при фрезеровании плоскостей;
- модульные головки с удлинителями серии T-Flextec – для получения глубоких полостей, пазов, уступов, которые невозможно обработать с помощью стандартного концевого инструмента.

Как и в других сериях фрез TaeguTec, корпус фрезы Chase Feed Plus Mini NEW покрывается износостойким и антипригарным покрытием NickoTec на основе никеля и имеет каналы для подачи СОЖ (для улучшения удаления стружки из зоны резания). Результаты испытаний фрезы этой серии приведены в табл. 3.2.

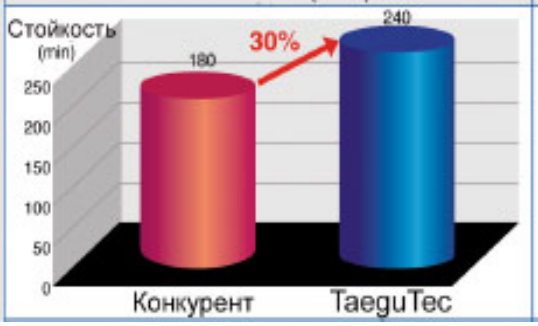
Таблица 3.2

Результаты испытаний фрезы Chase Feed Plus Mini NEW

Акт испытаний

	Конкурент	TaeguTec
Применение	Высокоскоростная обработка	Высокоскоростная обработка
Фреза	Dia 33	TEBL 532-32-06-S
Пластина	JXXX 09	New BLMP 0603R-M
Сплав	PVD	TT9080
Колич-во пластин	3	5
Материал		
Скорость резания	207	130
Обороты (об/мин)	2000	1294
Подача на зуб	0.3	0.7
Подача (мм/мин)	1800	4528
Глубина (мм)	0.5	0.5
Ширина (мм)	Различная	Различная
Стойкость (мин)	180	240
Объем материала	29.70	72.45

Стойкость (мин)



Объем снимаемого материала (см2/мин)

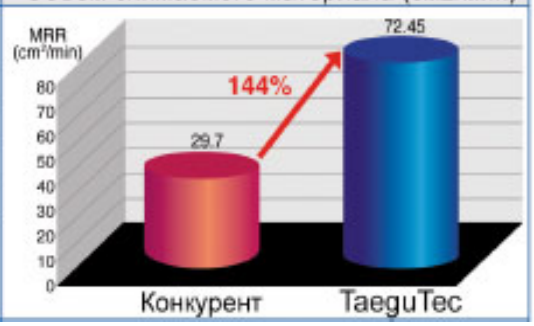


Рис. 3.30. Фреза серии ChaseQuad

Серия фрез ChaseQuad Plus NEW (рис. 3.30) предназначена для тяжелого чернового фрезерования: обработки привалочных поверхностей, снятия большого слоя металла за один проход, снятия упрочненной корки, песка и включений с поковок. Она является логическим продолжением серий фрез LS-Mill Plus с пластиной SNGX 1205 (угол в плане 45^0 и 75^0) и ChaseQuad Plus с пластиной SNGX 1306 (угол в плане 88^0 и 90^0).

В данной серии также используются два новых типа двухсторонних квадратных пластин с восемью режущими кромками. Они обладают повышенной стойкостью при больших подачах на зуб за счет увеличенной толщины – 7,8 мм и 6,35 мм.

Пластина модели SNMX 1607 ANTN-M (рис. 3.31) предназначена для обработки всех видов сталей, титановых и жаропрочных сплавов. За счет так называемой "высокопозитивной" геометрии передней части пластины резание происходит с минимальной нагрузкой на кромку и понижается температура в зоне контакта с материалом детали.

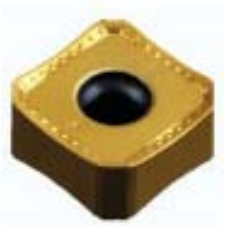


Рис. 3.31. Пластина модели SNMX 1607 ANTN-M

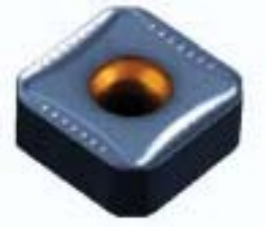


Рис. 3.32. Пластина модели SNHX 1606 ANN-MM

В свою очередь, пластина модели SNHX 1606 ANN-MM (рис. 3.32) предназначена для обработки всех видов чугунов. Ее режущая кромка имеет упрочненную геометрию, что положительно отражается на стабильности обработки чугуна. Пластины устанавливаются на корпуса принципиально новой конструкции с износостойким и антипригарным покрытием NickoTec и углом в плане 45^0, что позволяет защитить вершину пластины от преждевременного износа. Максимальная глубина резания при таком исполнении корпуса увеличивается до 8,8 мм. На рис. 3.33 изображены 4 возможные варианта исполнения корпусов фрез.

а б в г

Рис. 3.33. Новые типы исполнения корпусов фрез TaeguTec

Тип 1 – крепление с помощью запатентованной системы "винт под углом" (рис. 3.33,а). Эти корпуса могут выполняться для пластин, используемых при обработке как стали, так и чугуна. Диапазон диаметров составляет 63 – 250 мм, а исполнение с подачей СОЖ через инструмент применяется при диаметре корпуса 63 – 125 мм.

Тип 2 применяется, когда существует вероятность поломки корпуса по какой-либо причине (рис. 3.33,б). При этом, как правило, изменяются лишь поврежденные картриджи, а не корпус целиком, что минимизирует затраты на восстановление работоспособности инструмента. Эти корпуса также могут быть выполнены для пластин, используемых при обработке как стали, так и чугуна. Линейка диаметров – 125,00 – 315,00 мм.

Тип 3 имеет крепление пластин с помощью клина (рис. 3.33,в). Этот тип корпуса используется с пластиной SNHX 1606 ANN-MM для фрезерования чугуна. Диапазон диаметров – 80,00 – 200,00 мм.

Тип 4 представляет собой быстросменный корпус большого диаметра (от 200,00 до 400,00 мм), который применяется с пластинами для обработки чугуна (рис. 3.33,г).

3.1.8. Обновленные треугольные пластины Mill2Rush для тяжелой черновой обработки

Тяжелое машиностроение, как одна из наиболее материалоемких отраслей промышленности, требует не только тщательно разработанной технологии изготовления ответственных изделий и узлов для данной отрасли, но и применения эффективного металлорежущего инструмента и оснастки, позволяющих сократить цикл производства, и, как следствие, снизить затраты. В связи с этим, расширена линейка

существующих фрез Mill2Rush пластинами TNMX 18-го габарита и соответствующими фрезами для тяжелой черновой обработки с обеспечением уступа в 90^0, являющегося важным параметром при изготовлении крупногабаритных изделий для тяжелого машиностроения.

Рис. 3.34. Пластина TNMX 1806

Обновленные двусторонние пластины TNMX 1806 (рис. 3.34) с шестью режущими кромками созданы на основе предыдущего поколения линейки пластин TNGX 2207, применяемых на предприятиях Украины. Благодаря максимально возможному количеству режущих кромок, данный тип пластин является наиболее экономичным решением для нагруженного фрезерования уступов и пазов.

Одним из основных преимуществ пластины является прогрессивная геометрия передней поверхности, которая, по сравнению с традиционной для черновых операций фрезерования отрицательной геометрией пластин, значительно снижает силы резания. Отличительными особенностями обновленной геометрии TNMX 1806 являются также длина режущей кромки – 18 мм, позволяющая снимать до 13 мм металла за один проход, и толщина пластины – 8 мм, что положительно сказывается на ее прочности при обработке на повышенных подачах на зуб. Система крепления винтом "под углом" обеспечивает

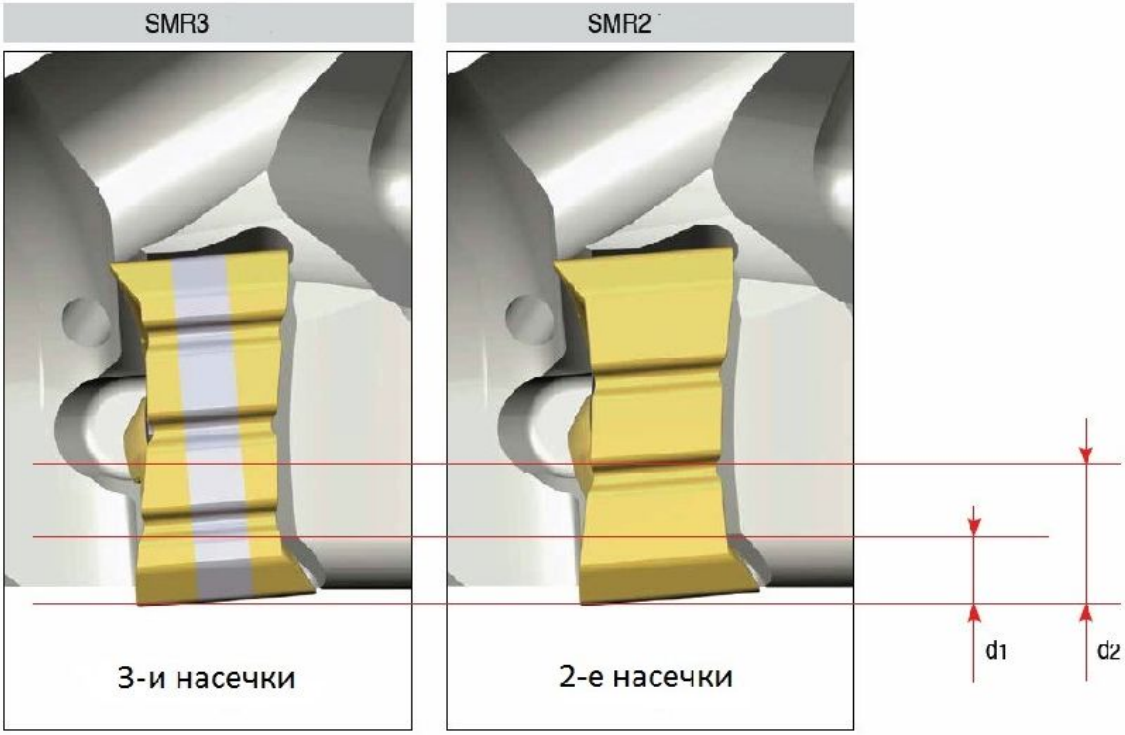
надежную многовекторную фиксацию пластин в корпусе фрезы. Таким образом, производительная линейка фрез Mill2Rush выходит на новый уровень возможностей, становясь наилучшим выбором для черновой обработки при больших съемах металла за один проход на агрегатных и универсальных станках с высокой мощностью главного привода. Серия фрез Mill2Rush также была расширена номенклатурой фрез кукурузного типа и серией пластин с кромкой типа Splitter.

Рис. 3.35. Геометрия Splitter

Высокопроизводительные пластины Splitter (рис. 3.35) обладают уникальной стружколомающей геометрией с насечками на режущей кромке, которые при большой глубине резания дробят стружку на несколько частей. Такое решение позволяет дополнительно снижать силы резания, вибрацию и шум при нагруженных и нестабильных условиях обработки, таких как, большой вылет инструмента или слабый зажим заготовки.

Благодаря канавкам на режущих кромках, новые пластины TNMX 1806 рекомендуется использовать на фрезах кукурузного типа, причем практически без увеличения нагрузки на шпиндель станка. Для достижения максимально эффективной обработки пластинами Splitter необходимо соблюдать правило минимальной глубины фрезерования: $d_1 \geq 2{,}7$ мм (рис. 3.36).

Новые пластины TNMX 18-го габарита представлены несколькими типами стружколома Splitter – с двумя и тремя насечками на режущих кромках. Для дополнительного дробления стружки и получения требуемой шероховатости поверхности, пластины необходимо устанавливать на корпуса фрез по методу "через одну", чередуя три и две сплиттер-канавки (рис. 3.37). Для безошибочной установки пластин с чередованием типа стружколома, на задней поверхности режущей пластины с тремя канавками нанесен специальный черный маркер. Обновленная серия фрез Mill2Rush может быть использована для обработки широкого диапазона материалов: легированных, инструментальных, нержавеющих, низко- и высокоуглеродистых сталей, алюминия и серого чугуна, а также для обеспечения фрезерования металла под прямым углом на операциях торцевания, при обработке уступов и пазов.



Глубина резания	TNMX 18
d_1 (mm)	2.7
d_2 (mm)	6.9

Рис. 3.36. Глубина резания для пластин с геометрией Splitter

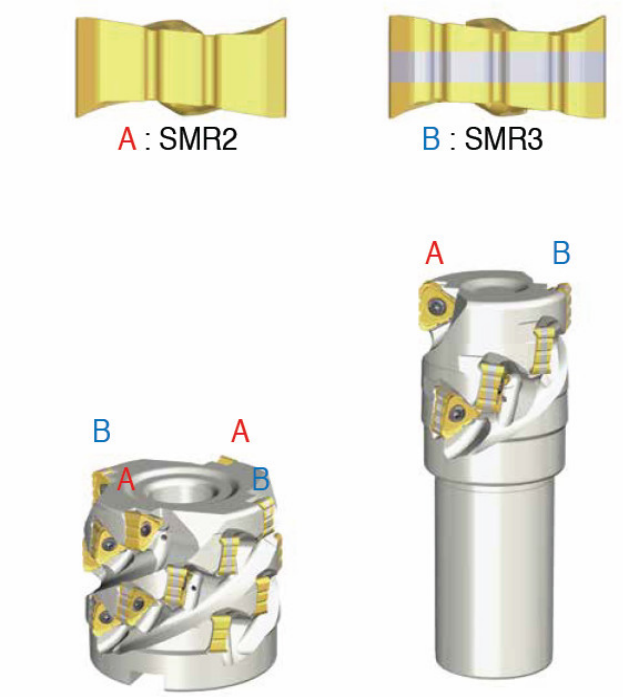


Рис. 3.37. Схема крепления пластин с двумя и тремя насечками

Результаты проведенных испытаний показали преимущества новой серии пластин TNMX 1806. Так, при обработке заготовки из серого чугуна было достигнуто не только увеличение стойкости инструмента на 85 %, но и повышение производительности на 100 %. При обработке заготовки из легированной стали линейка кукурузных фрез с пластинами TNMX 1806 с геометрией Splitter превзошла ближайших конкурентов по производительности на 39 % и позволила увеличить стойкость инструмента на 50 %.

3.2. Высокоэффективные технологии металлообработки на токарных операциях

3.2.1. Эффективность применения рациональных конструкций режущих инструментов на токарных операциях

Компания TaeguTec является одним из мировых лидеров в разработке и производстве самой совершенной металлообрабатывающей продукции. Результатом многолетнего опыта инженеров "Центра Разработок и Развития" (R&D) являются стабильные поставки широкой номенклатуры как стандартного (по ISO), так и нестандартного металлорежущего инструмента на мировой промышленный рынок. Как успешный лидер, заинтересованный в развитии и мотивации своих партнеров и клиентов, команда TaeguTec готова делиться секретами эффективной работы. Идея проста – затраты на металлообработку могут быть ощутимо сокращены практически в любой производственной задаче.

Станочный парк предприятий Украины разнообразен по огромному диапазону решаемых задач, степени износа оборудования и достигаемой производительности труда. Основную долю оборудования, используемого на промышленных предприятиях, все еще занимают отечественные токарные станки (16К20, 6Р13, 2А622…), но в то же время все большую долю занимают современные представители той же "весовой категории" – обрабатывающие центры ведущих произво-

дителей оборудования, таких как DOOSAN, MAZAK, DMG и др. Поэтому специалисты компании ТАЕГУТЕК УКРАИНА систематически анализируют и учитывают все потребности рынка, предлагая все более совершенный инструмент, который позволяет не тратить время и средства на поиск оптимального решения, с учетом конкретных задач, используемого станочного парка на предприятии и уровня профессиональной подготовки специалистов.

Рис. 3.38. Инструменты и пластины RhinoRush

Например, достаточно универсальным решением для большинства рядовых задач украинских производств оказалось новое поколение токарного режущего инструмента, воплощенное в линейке пластин RhinoRush (рис. 3.38).

Пластины этой серии имеют меньший габарит в сравнении с ISO пластинам, но по техническим характеристикам ничем не уступают стандартным аналогам. Заказчик снижает затраты на инструмент уже в момент его закупки: стойкость системы "державка + пластина" фактически не изменяется, а сокращение расходов происходит за счет меньшей стоимости пластины, что имеет особый экономический эффект при использовании не самого производительного оборудования, например, не оснащенного системой ЧПУ.

Следует отметить, что сплавы и стружколомающие геометрии, с использованием которых выполнены пластины серии RhinoRush, обеспечивают обработку всех видов материалов и показывают хорошие результаты при работе на удар либо в условиях повышенной вибрации при работе на изношенном оборудовании.

В случае же использования современного оборудования с ЧПУ, класса DOOSAN и др., более значимым, чем цена, является параметр "стоимость станко-часа", регулируемый путем достижения максимальной производительности. Иными словами, чем быстрее будет изготовлена деталь, тем меньше затрачивается ресурсов и тем больше такая работа сможет принести прибыли для предприятия. И здесь уже

не столь важно, какова стоимость и стойкость инструмента (в разумных пределах, естественно). Показательным примером является линейка инструмента TOPFeed, которая включает в себя инновационную державку и специальную пластину, способную работать на сверхвысоких подачах (до 2,5 мм/об.).

В табл. 3.3 приведены результаты экспериментальных исследований обработки детали типа "Вал" (заготовка – прокат, Ø80; деталь – Ø60, Ø70, Ø75 мм). Эти результаты демонстрируют высокие показатели: время черновой обработки детали можно сократить в 2,5 раза, снижая, соответственно, себестоимость ее изготовления в разы. Криволинейная поверхность пластин минимизирует усилия резания при точении. Применение пластины серии TOPFeed BNMX 150720 на вышеописанных режимах нагружает токарный станок всего на 38 % при мощности главного привода 22 кВт.

Таблица 3.3

Результаты экспериментальных исследований обработки детали типа "Вал"

Пластина	CNMG 120408	BNMX 150720 HF
V, м/мин	120	120
Ap, мм	3,0	1,5
f	0,3	2,0
Длина точения, мм	600	600
Время обработки	5 мин 25 с	2 мин 20 с

Значительное влияние на производительность и надежность инструмента оказывает форма пластины и количество ее режущих кромок. Максимальное число режущих кромок имеют пластины токарной серии HEXTurn. Это решение не имеет аналогов ни у одного из производителей металлообрабатывающего инструмента. Эта уникальная пластина HNMG 050408 с 12 режущими кромками идеально подходит для операций торцевания и наружной обработки детали при съеме металла до 3,5 мм и подаче до 0,6 мм/об.

Безупречная замена стандартным квадратным пластинам благодаря углу при вершине в 120^0 продемонстрировала высокую прочность на операциях обработки на удар и при высоких подачах. Инструмент серии HEXTurn хорошо зарекомендовал себя на предприятиях Украины при продольном точении поковок.

Рис. 3.39. Инструмент с пластиной серии QuadRush

Последние разработки специалистов TaeguTec коснулись также инструментальных решений для отрезки и нарезания канавок. Пластины серии QuadRush имеют 4 режущие кромки (рис. 3.39). При этом преждевременный износ одной из них полностью исключает вероятность поломки остальных кромок. Благодаря уникальной конструкции державок с защитным карманом, можно просто заменить рабочую кромку пластины и уйти от новой настройки станка. Три вида стружколомающей геометрии (предназначенной для решения различных задач) обеспечивают многофункциональность линейки, а различная ширина пластин (от 0,5 до 8 мм) позволяет выполнять канавки за одно врезание, сокращая при этом время обработки.

Как известно, современное технологическое оснащение позволяет выполнять на токарном станке операции внеосевого сверления и фрезерования. Для этих задач у компании TaeguTec также имеются специальные решения, ориентированные на достижение максимального экономического эффекта.

Еще недавно сверление отверстий диаметром до 12,5 мм рекомендовалось выполнять исключительно с помощью монолитных сверл. В настоящее время появилась возможность получать высококачественные отверстия с помощью сборных сверл, начиная с диаметра 7 мм. Именно с такой целью разработаны инструменты серии DrillRush (рис. 3.40). Номенклатура сверл со сменными коронками с диапазоном диаметров ∅ (7 – 25,9) мм и шагом 0,1 мм позволяет выполнять отверстия с глубиной до 12×D. Упрощенная конструкция серии не предусматривает никаких крепежных элементов: комплект состоит только из корпуса и головки. Максимальная эффективность сверл проявляется при работе на высоких подачах.

Использование стандартных комбинированных сверл позволяет выполнять ГОСТированные отверстия под резьбу, формируя одновременно заходную фаску и сокращая время обработки. Номенклату-

ра режущих головок серии DrillRush включает в себя 4 различные геометрии с углом в плане 140^0 под все виды обрабатываемых материалов.

а б

Рис. 3.40. Инструменты серии DrillRush

Удачным примером демонстрации производственной экономии являются операции обработки отверстий с плоским дном, где, как правило, требуется применение двух типов инструмента: сверла и торцевого зенкера. Применение сверл серии DrillRush позволяет сэкономить на операциях доработки дна отверстия (рис. 3.40,б).

Линейка инструмента DrillRush обеспечивает реализацию 95 % задач по сверлению для всех видов обрабатываемых материалов на станках любого уровня автоматизации или мощности. При необходимости эффективного сверления отверстий от ∅12,5 мм и выше, положительно зарекомендовали себя сверла серий T-Drill и TOP-Drill, оснащенные сменными пластинами, рассчитанными на скоростное резание. Максимальный стандартный диаметр свёрл может достигать 80 мм.

Существенным преимуществом современных токарных обрабатывающих центров является возможность также выполнять и фрезерные операции. Мощность приводного инструмента на таких станках не позволяет использовать фрезы больших габаритов, поэтому лучшим выбором для фрезерования на токарном станке до недавнего времени были монолитные фрезы, что не всегда выгодно. Современ-

ные же разработки производителей металлорежущего инструмента позволяют применять фрезы с пластинами, начиная от ∅8 мм.

В частности, таким преимуществом обладают фрезы серии ChaseMill mini с пластинами AXMT 0602PER-EM, которые имеют 2 режущие кромки, а также более экономичное решение – серия MillRush с получившей применение на предприятиях Украины пластиной 3PKT 060304 R-M с тремя режущими кромками, но с минимальным диаметром фрезы от ∅12 мм.

3.2.2. Новые сплавы Life+ продлевают стойкость инструмента

Повышение стойкости металлорежущего инструмента, работающего в тяжелых условиях резания – важная задача для разработчиков инструментов. Благодаря новейшим достижениям в технологии нанесения покрытий, специалистам Центра развития и разработок TaeguTec удалось достичь существенного повышения стойкости твердосплавных материалов без снижения режимов резания в реальных производственных условиях сотен предприятий в мире, воплотив свои лучшие идеи в новой серии инструментальных сплавов для обработки сталей.

В данную прогрессивную линейку инструмента серии Life+ вошли усовершенствованные сплавы TT8115, TT8125 и TT8135 (рис. 3.41), но уже с новой технологией покрытия режущей кромки. Технические характеристики сплавов Life+ на несколько шагов опережают применявшиеся ранее покрытия, а также являются существенным улучшением популярной серии GoldRush (покрытия золотистого цвета благо-

даря дополнительной обработке верхнего слоя). Новые сплавы Life+ являются идеальным выбором для профессионального применения в любой отрасли машиностроения, где ставится задача снижения количества проходов без изменения требований к качеству обработанной поверхности, т.е. достижения высоких показателей шероховатости поверхности при существенном повышении производительности. Сплавы TT8115, TT8125 и TT8135 отличаются высокой износостойкостью при обработке жаропрочных сталей, стабильностью работы на высоких подачах и скоростях, сводя к минимуму эффект налипания вязких материалов на режущую кромку. Применение режущих пластин в сплавах TT8115, TT8125 и TT8135 даже в экстремальных условиях обработки показывает более высокую эффективность металлорежущих операций по сравнению с традиционными сплавами. Например, улучшенная технология покрытия режущей кромки предотвращает скол инструмента на широком диапазоне операций в случаях прерывистого резания. Так, во время обработки легированных сталей и высокопрочных материалов, где инструмент подвергался воздействию высоких температур и повышенному давлению, специальная технология покрытия Life+ эффективно компенсировала удары. Это особенно важно при автоматизированной обработке с минимальным уровнем контроля со стороны оператора. Новые улучшенные сплавы TT8115, TT8125 и TT8135 продемонстрировали увеличение стойкости инструмента в среднем на 100 %.

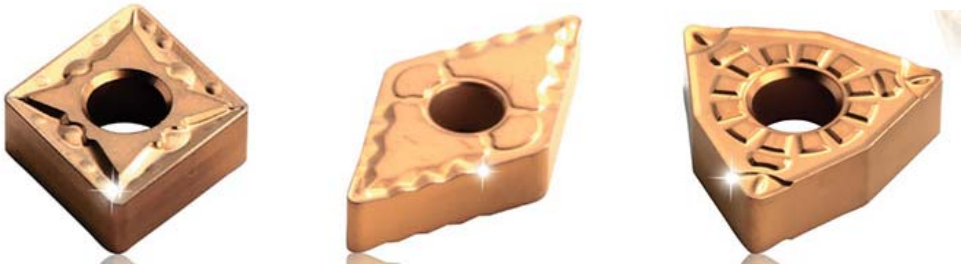


Рис. 3.41. Усовершенствованные сплавы Life+

В процессе тестовых и опытно-промышленных испытаний обрабатывался широкий диапазон легированных сталей и высокопрочных материалов на различных механических операциях. Но, наиболее значительным оказался результат во время серийной обработки автомобильных узлов из легированной стали в тяжелых условиях пре-

рывистого резания. При подаче 0,15 мм/об. и скорости резания 250 мм/мин наибольший эффект (с результатом + 120 %) был достигнут при испытании улучшенного сплава Life+ TT8125 в сравнении как с серийным инструментом TaeguTec, так и с каждым конкурирующим производителем.

При обработке отливок на скорости резания 310 м / мин и подаче 0,3 мм/об. стойкость пластин с покрытием Life+ TT8125 была увеличена в 2 раза. Во время обработки зубчатого венца из подшипниковой стали (операция внутреннего точения) стойкость вращения шпинделя увеличилась на 66 %, что привело к повышению производительности на 13 %. При увеличении скорости резания до 160 м/мин и постоянных значениях подачи 0,35 мм/об. и глубины резания 1 мм новое покрытие Life+ сплава TT8125 сумело обеспечить увеличение показателей стойкости инструмента на 33 % с одновременным повышением производительности на 22 %.

Для расширения возможностей выпускаемой продукции компания TaeguTec пополнила линейку своего инструмента Life+ также обновленным сплавом TT8105 (рис. 3.42), предназначенным для высокоскоростной токарной обработки изделий из стали.

Рис. 3.42. Пластины в сплаве TT8105

Сплав TT8105 показывает высокие результаты благодаря уникальному покрытию: специальный слой, обеспечивающий повышенную прочность инструмента и улучшенную шероховатость обрабатываемой поверхности. К примеру, в процессе тестовой обработки направляющей крышки из легированной стали при одинаковых условиях резания в сравнении с аналогичными предложениями лучших конкурирующих производителей инструмента, обновленные пластины TaeguTec показали увеличение стойкости от 30 % до 50 %.

3.3. Высокоэффективная серия сверл TOPDRILL

Основной задачей руководителя производственного предприятия или участка, связанного с механической обработкой, является снижение себестоимости изделия при сохранении заданного качества. Достаточно популярным методом снижения себестоимости производственного процесса является уменьшение затрат на металлорежущий инструмент. Одним из затратных, сложных и, в то же время, интересных процессов в металлообработке является операция сверления, к которой предъявляются повышенные требования для достижения лучших результатов по качеству производимых изделий и с целью экономии в целом.

Используя многолетний опыт и знания технологии обработки отверстий, компания TaeguTec разработала экономически выгодную серию сверл TOPDRILL (рис. 3.43) для высокопроизводительного сверления самых разнообразных отверстий. Инструмент представляет собой сверло с механическим креплением твердосплавных пластин.

Рис. 3.43. Сверла TOPDRILL

Корпус сверла серии TOPDRILL имеет ряд преимуществ по сравнению с любым аналогом. Например, таких как внутренняя подача СОЖ в виде разнесенных от оси инструмента спиральных каналов, за счет которых канавки для отвода стружки приобрели увеличенный размер. На корпус сверла устанавливаются две пластины: центральная, которая перекрывает ось вращения инструмента, и периферийная, формирующая необходимый диаметр отверстия. Основной особенностью серии является применение абсолютно одинаковых пластин, устанавливаемых на корпус, в отличие от похожих решений других производителей, применяющих два и более типов пластин на одном корпусе. Режущая часть сверла полностью покрыта обновленным износостойким покрытием, которое значительно увеличивает срок службы корпуса инструмента.

Сменная режущая пластина (рис. 3.44) представляет собой квадрат с 4-мя режущими кромками. Каждая режущая кромка имеет уникальную геометрию, которая позволяет достичь наилучшего формирования стружки и снижения силы резания в процессе сверления по сравнению с инструментами конкурентов и даже с существующей серией сверл TaeguTec T-DRILL. На все пластины нанесено обновленное покрытие по технологии GOLDRUSH, способствующее еще более гладкому отводу стружки и увеличивающее срок службы пластин на 25 – 30 %.

Рис. 3.44. Сменная режущая пластина

Очевидно, что в процессе сверления периферийная пластина работает на повышенной скорости резания, в сравнении с центральной, и по этой причине быстрее изнашивается. Чтобы избежать разности в показателях стойкости и уровнять жизненный цикл периферийной и центральной пластин, рекомендуется всегда применять периферийную пластину с более износостойким покрытием – TT9300. Этот сплав легко отличим за счет комбинированного цвета: передняя поверхность пластины золотистого цвета, а задняя – черного (рис. 3.44).

С помощью инструмента TOPDRILL возможна обработка отверстий диаметром от 14 мм до 50 мм с градацией в 0,5 мм (после Ø31 по 1 мм). По вылету режущей части различают несколько типоразмеров

сверл: длиной 2, 3, 4, и 5 диаметров. С помощью сверл TOPDRILL обрабатывают все виды материалов.

Стружколомающая геометрия (рис. 3.45) является ключевым элементом для большинства режущих инструментов, улучшающим дробление и отвод стружки, снижая при этом усилия резания, что в итоге предоставляет возможность технологам увеличивать производительность за счет повышения режимов резания.

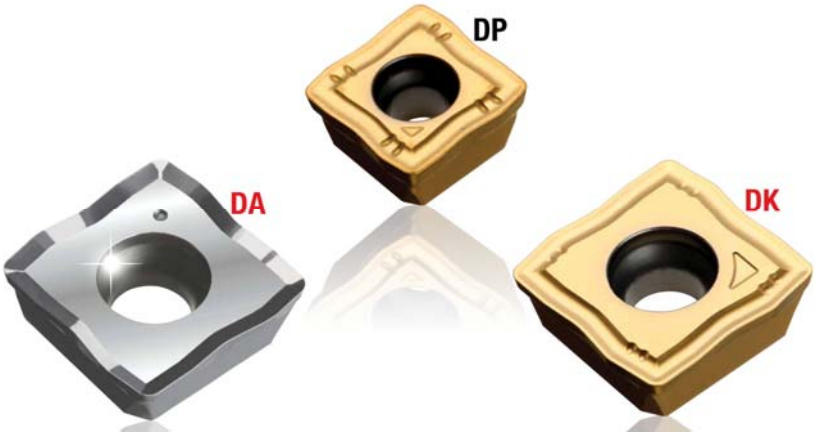


Рис. 3.45. Стружколомающие геометрии пластин

Геометрия DP пластин серии TOPDRILL была разработана для общих операций обработки отверстий в стальных заготовках, в то время как геометрия DK, которая выпускается в сплаве TT6080, способствует повышенной износостойкости при обработке всех видов чугунов. Оба варианта позволяют сократить производственные расходы, замедляя процесс износа инструмента, что улучшает его эффективность.

Основной особенностью геометрии DA является специальная шлифованная передняя поверхность и наличие острых кромок. Это позволяет минимизировать усилия резания и избежать налипания материала на кромках во время сверления заготовок из алюминия и других цветных металлов, что приводит к прямой экономии предприятий на закупках режущего инструмента за счет пониженного показателя сколов и трещин на режущих кромках.

Во время проведения нескольких испытаний при сверлении алюминиевых заготовок на украинских производственных участках, пластины с геометрией DA в 100 % случаев формировали сегментную стружку, которая быстро и эффективно выводилась из зоны резания через увеличенный размер каналов.

Во время тестов при обработке заготовок из ковкого чугуна – DK-стружколом, как новейшее предложение популярной серии TOPDRILL, продемонстрировал увеличение стойкости инструмента на 88 % в сравнении с предыдущей серией.

Одной из часто обсуждаемых специалистами тем является вопрос о гарантированной стойкости инструмента. Опытным путем установлено, что ресурс 1 режущей кромки пластины серии TOPDRILL составляет 12 – 15 метров при обработке стали. Выше перечисленные преимущества позволили внедрить большое количество сверл серии TOPDRILL на отечественных производственных предприятиях. Одним из таких интересных случаев является сверление 8-ми отверстий в технологически сложном изделии на предприятии в г. Днепр (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Результаты применения сверла серии TOPDRILL при сверлении 8-ми отверстий

Обрабатываемый материал	Сталь 40Х
Твердость	HB 180
Сверло	TOP 4218-25T2-07
Пластина	SOMT 070306 DP TT9080
Скорость резания / обороты	140 м/мин / 2045 об./мин
Подача	0,08 мм/об. / 165 мм/мин
Глубина сверления	60 мм
Стойкость	15,4 метра (256 отв.)
Вид износа	

Таким образом установлено, что предлагаемая серия сверл TOPDRILL с механическим креплением твердосплавных пластин обеспечивает высокопроизводительное и экономически выгодное сверление самых разнообразных отверстий. При этом достигается существенное повышение стойкости сверл.

3.4. Применение эффективной CAM-системы для управления осью B на токарно-фрезерных операциях

При покупке и вводе в эксплуатацию многоцелевых станков, оснащенных осью B, главной производственной задачей является использование дорогостоящего оборудования с максимальной эффективностью. Это значит, что необходимо в кратчайшие сроки задействовать весь технический потенциал сложного токарно-фрезерного обрабатывающего центра. Помощь в решении данного вопроса предлагает американская компания DP Technology с флагманским продуктом – CAM системой ESPRIT (рис. 3.46), которая имеет представительство и полноценный сервис в Украине.

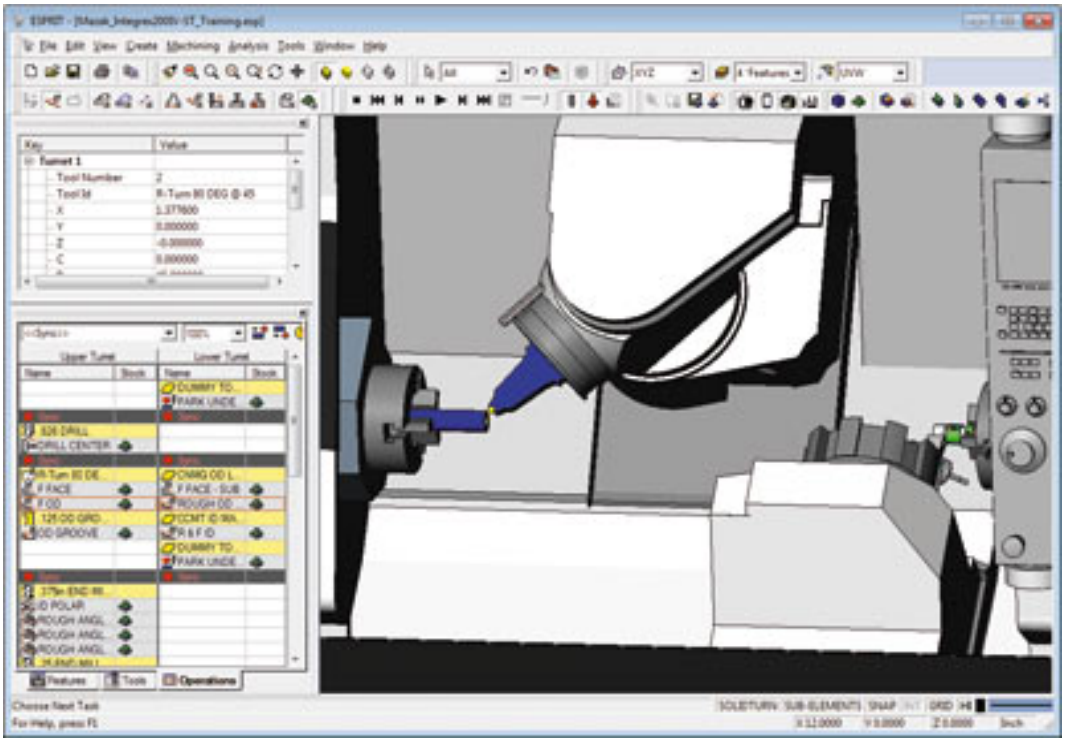


Рис. 3.46. Визуализация токарно-фрезерного оборудования в CAM-системе ESPRIT

Пятиосевые стратегии обработки в ESPRIT – это надежные и проверенные в заводских условиях решения для многозадачных станков, разработанные в тесном сотрудничестве с ведущими производителями металлорежущего оборудования. ESPRIT позволяет реализовать все преимущества такого дорогостоящего средства производства, как многозадачный обрабатывающий центр (ОЦ), включая использование управляемой оси B при токарно-фрезерной обработке, за счет программных решений для станков этого типа.

Полная интеграция оси B с токарно-фрезерными функциями

Так же как и традиционные токарно-фрезерные станки, оборудование, оснащенное осью B, обеспечивает контроль над осями Z и X при токарной обработке, над осью C при поворотном фрезеровании и осью Y при торцевом фрезеровании с эксцентриситетом. Однако технологические возможности, доступные при задействовании оси B, выделяют такие станки в отдельную группу среди оборудования, предназначенного для непрерывной токарно-фрезерной обработки.

Поворотная головка с осью B может быть использована не только как фрезерный шпиндель, но и как держатель для токарного или расточного инструмента. Ось B определяется вращением вокруг оси Y, что делает возможной обработку со сложными углами наклона, изменяющимися по отношению к основной оси вращения, поддерживая обработку самых сложных поверхностей. Если такой ОЦ имеет два шпинделя, то использование оси B позволяет производить фрезерную и токарную обработку заготовки с двух сторон одновременно.

Точение плюс 5-осевое позиционирование

На станках с осью B, как правило, изготавливают детали типа тел вращения, геометрия которых содержит несколько граней и элементов, расположенных под различными углами к оси вращения. Оборудование такого класса может применяться для изготовления валов с пазами и канавками различного типа (прямыми, косыми), а также корпусов и державок режущего инструмента.

ESPRIT позволяет программировать неперпендикулярные к поверхности обработки многокоординатные перемещения инструмента, необходимые для обработки труднодоступных зон и углов перехода в медицинских компонентах, деталях сложной формы гидро- и газодинамического оборудования, каналов охлаждения режущего инструмента и т.д. Примеры работы станков с осью B представлены на рис. 3.47 – рис. 3.50.

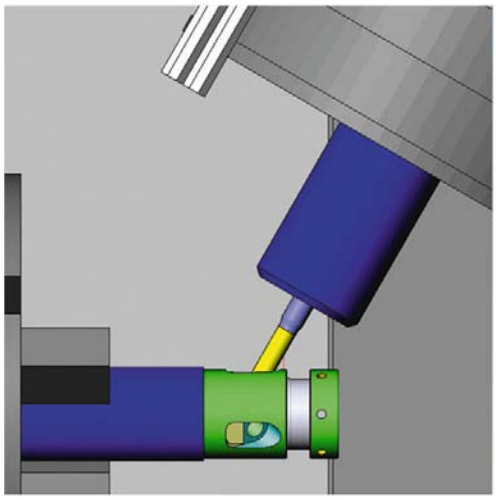


Рис. 3.47. Наклон оси B для фрезерования и сверления в зонах с углом, изменяющимся по отношению к оси вращения

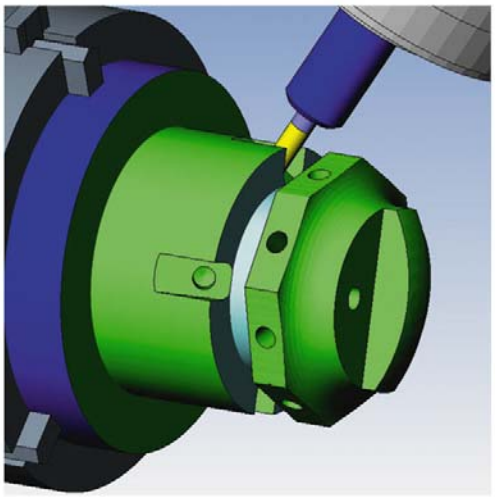


Рис. 3.48. Возможность обработки многогранных деталей несколькими способами

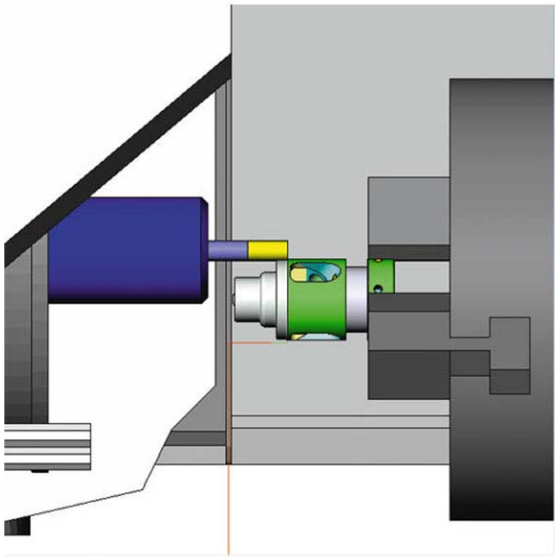


Рис. 3.49. Использование двух шпинделей при обработке передней и задней сторон заготовки

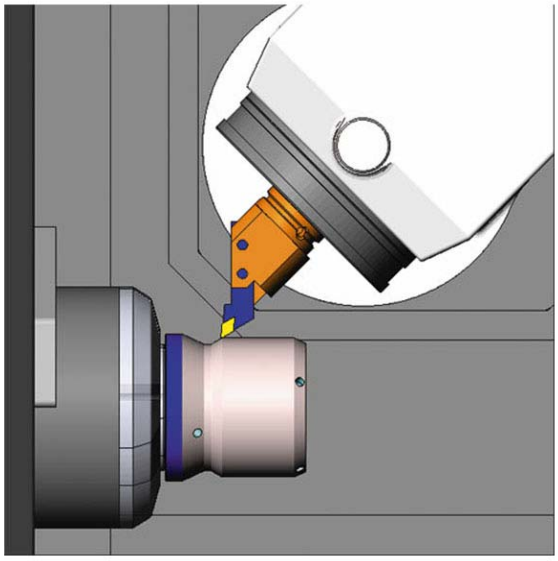


Рис. 3.50. Универсальность крепления токарного и фрезерного инструмента в голове с осью B

Точение плюс 5-осевая одновременная обработка

Поначалу работа станка с осью B может выглядеть немного пугающе вследствие сложной конфигурации самого оборудования, а также неперпендикулярного к обрабатываемой поверхности перемещения инструмента с одновременным задействованием нескольких

осей координат. ESPRIT обладает полностью интегрированной средой программирования токарно-фрезерных операций, позволяющей упростить процесс подготовки управляющей программы (УП) и обеспечивающей производственную гибкость, необходимую для эффективного изготовления деталей с заданными параметрами точности.

Для успешного программирования оси B – в CAM-системе необходимо поддерживать набор станочных циклов фрезерной обработки с одновременным использованием от двух до пяти управляемых осей координат, включая 3-х и 5-осевую обработку сложных поверхностей, а также поддерживать такие циклы токарной обработки, как торцевание, расточка, обработка канавок и нарезание резьбы.

ESPRIT реализует гибкость в использовании токарных и фрезерных циклов в любых комбинациях при обработке сложной заготовки за один установ – на главном шпинделе или на субшпинделе с применением верхней головки с управляемой осью B или нижней револьверной головки.

Примеры методов обработки представлены на рис. 3.51 – рис. 3.54.

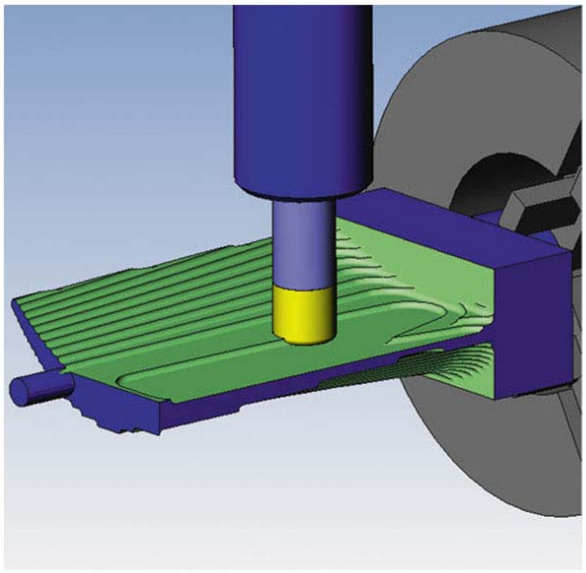


Рис. 3.51. Стратегии 3-осевой обработки постоянно отслеживают оставшийся материал для более эффективной черновой обдирки

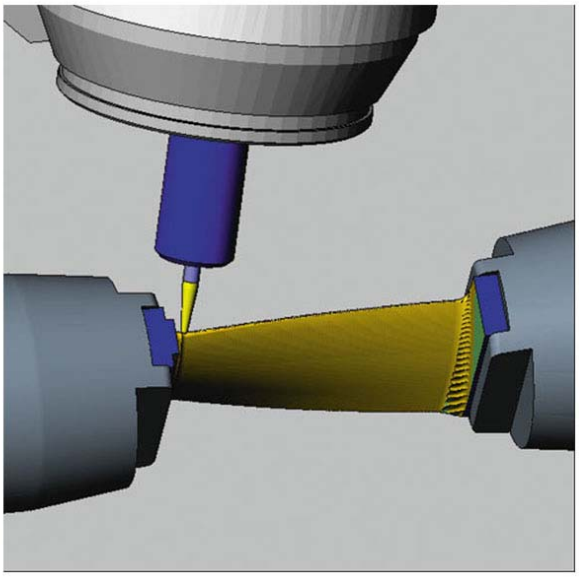


Рис. 3.52. Поддержка многоосевой ориентации инструмента во время 5-осевой обработки

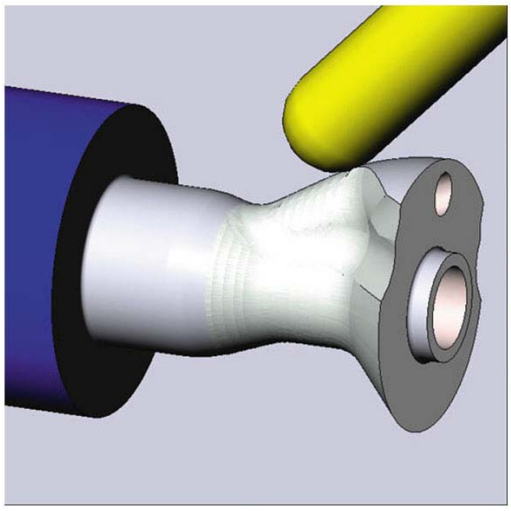


Рис. 3.53. Комбинирование токарных, фрезерных и 5-осевых операций за один установ

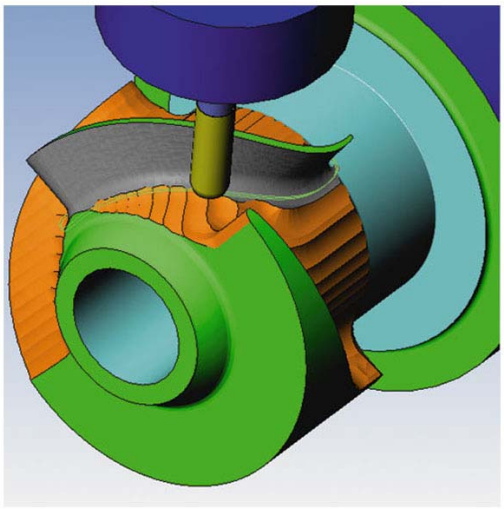


Рис. 3.54. Помимо стандартных 5-осевых функций ESPRIT поддерживает специальные стратегии обработки колес и лопаток турбин

Рабочие плоскости для позиционирования оси B (рис. 3.55)

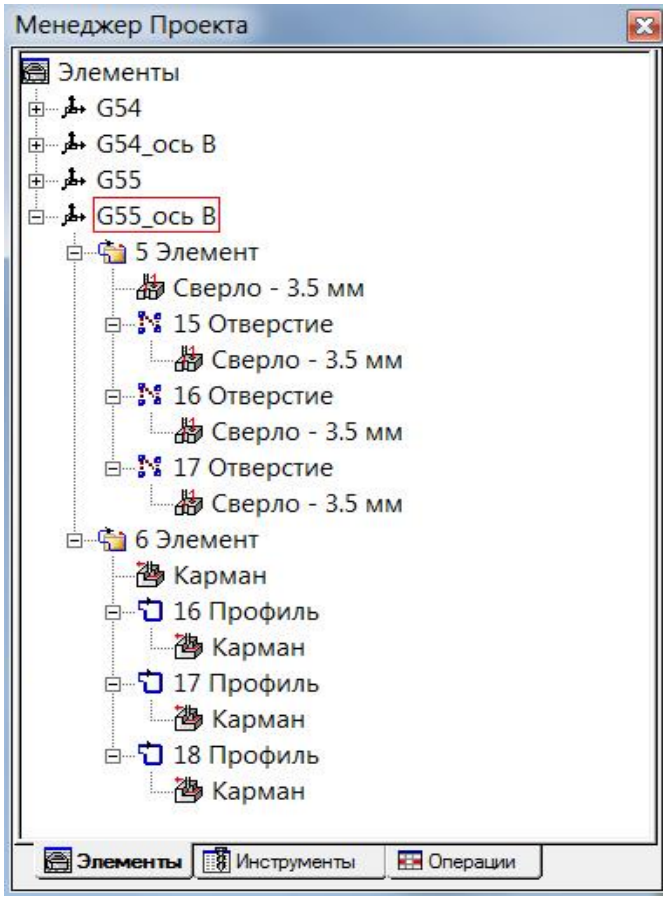


Рис. 3.55. Стратегии и элементы обработки автоматически добавляются к активной системе координат сразу после их создания

Рабочие плоскости – очень важное средство при программировании оси B. ESPRIT использует ориентацию осей UVW для контроля позиционирования поворота заготовки, а также для контроля ориентации оси инструмента. Рабочие плоскости определяют ориентацию осей C и B, что позволяет легко проводить обработку зон с углом, переменным к оси вращения. Как только программист определяет обрабатываемый элемент в ESPRIT, каждая зона элемента автоматически ассоциируется с соответствующей рабочей плоскостью (рис. 3.55).

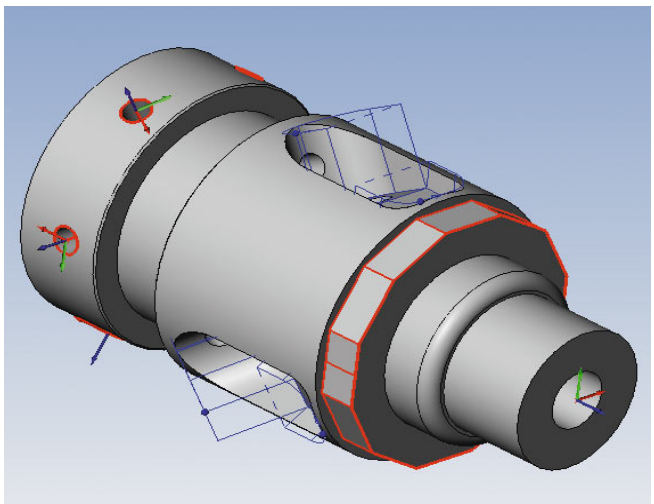


Рис. 3.56. Функция распознавания элементов обработки автоматически определяет рабочие плоскости, исходя из особенностей выбранной геометрии

При многогранном фрезеровании и сверлении автоматическое определение рабочих плоскостей сокращает сроки и упрощает процесс программирования (рис. 3.56). Пример: программист может применять рабочую плоскость определенного угла поворота осей C и B для обработки отверстия. Таким образом, автоматическое вращение системы координат ZX требует от программиста лишь управления осью Z.

Непрерывное точение с осью B

Специальные токарные циклы чистовой обработки способны производить непрерывную обработку на внутреннем и внешнем диаметрах одним инструментом за один проход, исключая необходимость использования нескольких инструментов с различной геометрией.

Циклы контурной обработки с осью B применяют эффективные перемещения подвода инструмента с помощью непрерывного вращения оси B на протяжении следования режущего инструмента по обрабатываемому контуру. Это позволяет инструменту достичь зон, которые было бы невозможно обработать из-за геометрии инструмента (рис. 3.57). Такие циклы обработки уменьшают количество используемого инструмента и сокращают время обработки, в то время как обрабатываемая поверхность удовлетворяет заданным требованиям.

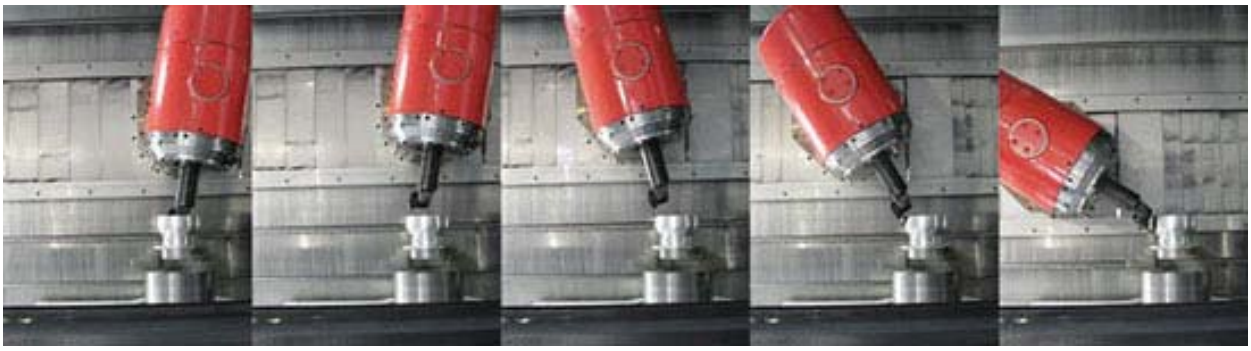


Рис. 3.57. Непрерывная финишная обработка с использованием оси B без смены инструмента

Циклы обработки с применением оси B основаны на технологиях ESPRIT для традиционной токарной обработки. Главным отличием технологий оси B является полный контроль перемещения головки вокруг оси B в течение всего цикла обработки. Кроме того, на этапе расчета траектории исключаются все столкновения между режущим инструментом и заготовкой. Программист не нуждается в создании нескольких программ, построенных по традиционным методикам. Применение одной стратегии контурной обработки с осью B позволит произвести чистовую обработку всего контура без остановов и смены инструмента. Исключение смены инструмента сохраняет драгоценные секунды машинного времени и обеспечивает отсутствие следов смены инструмента на детали в виде рисок.

Методы ориентации оси B

Пользователи могут использовать две стратегии ориентации инструмента при выполнении операции.

Первой стратегией является поддержание постоянного угла опережения между инструментом и обрабатываемой поверхностью. С помощью этой стратегии инструмент всегда сохраняет первоначальный угол опережения по отношению к обрабатываемому профилю. В дополнение к возможности ESPRIT автоматически отслеживать столкновения детали с инструментом, пользователь может ограничить наклон инструмента, задав определенный диапазон возможных углов. Подобный метод реализует оптимальные условия обработки за счет применения оптимального угла наклона между инструментом и обрабатываемой поверхностью.

Вторая стратегия ориентации оси B минимизирует количество поворотов инструмента за счет поворота головки только в тех случаях,

когда это действительно необходимо. Данная стратегия сохраняет первоначальное положение инструмента до тех пор, пока он не достигнет поверхности, которая не может быть обработана с его текущим положением. Только после этого инструмент поворачивается на необходимый угол, учитывая определенный пользователем диапазон углов наклона инструмента вокруг оси B. Данная стратегия ограничивает поворот вокруг оси B только на тех участках поверхности, которые не могут быть обработаны под заданным углом наклона инструмента. Каждая стратегия поддерживает визуальную верификацию. Пользователь может отобразить на экране вектор инструмента, чтобы выбрать оптимальную стратегию обработки на данном участке геометрии детали.

Твердотельная верификация обработки

Настройки станка в ESPRIT включают интерфейс, позволяющий определять все необходимые параметры револьверных головок и шпинделей оборудования для гарантированного обеспечения точной верификации обработки (рис. 3.58).

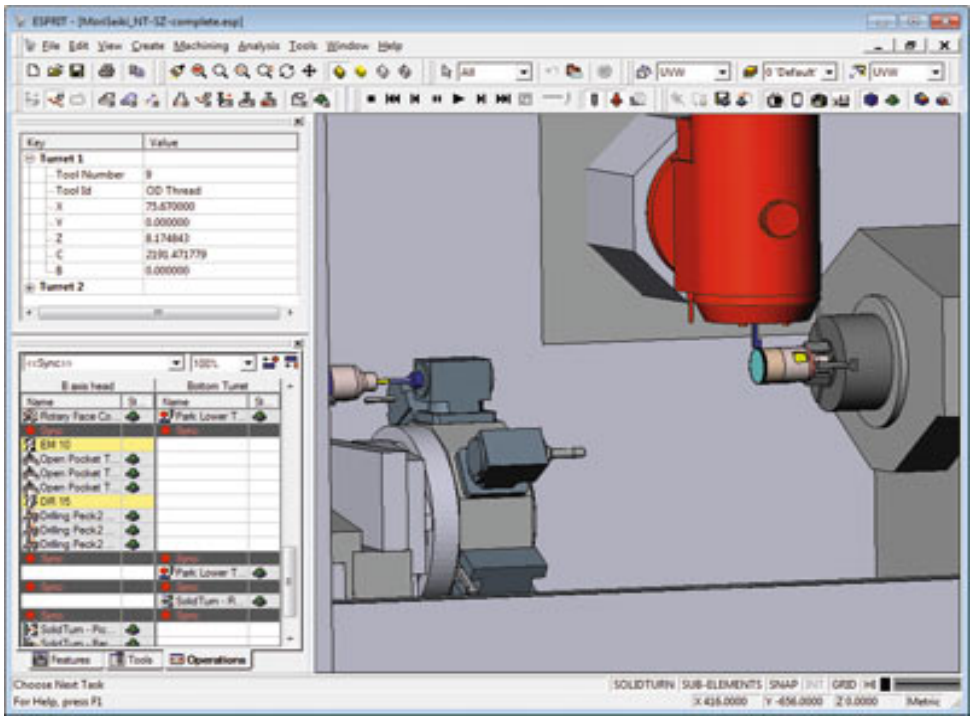


Рис. 3.58. ESPRIT показывает заготовку на экране совместно с исполнительными органами станка (шпиндели, револьверные головки, головы с осью B, инструментальные магазины), чтобы исключить потенциальные столкновения во время синхронной обработки (при использовании двух каналов) или при передаче заготовки с главного шпинделя на субшпиндель

Настройки станка позволяют импортировать твердотельные модели любых компонентов станка в формате STL. Каждому компоненту может быть назначен вид движения (линейный или вращательный) для достоверной динамической симуляции операций обработки.

После того как стратегия обработки создана и проверена в симуляторе, постпроцессор генерирует G-код для всех фрезерных и токарных операций. Это дает преимущества перед CAM-системами, где пользователь вынужден генерировать управляющие программы для фрезерных и токарных операций отдельно, а потом объединять их в одну программу для отправления на стойку ЧПУ.

Повышение эффективности за счет применения средств автоматизации

Известно, что ключевым фактором повышения эффективности работы является использование средств автоматизации. Автоматизированная CAM-система может быть настроена либо так, чтобы выбор оптимального решения для обработки осуществлял программист, либо чтобы выбор наилучшего решения выполняла сама система. Уровень автоматизации должен быть всегда настраиваемым (гибким).

Для облегчения процесса автоматизации программирования ESPRIT реализует механическую обработку, основанную на базе знаний ESPRIT (KBM). KBM позволяет задействовать заранее определенные методики обработки, которые автоматически применяются и адаптируются на распознанной геометрии детали. С помощью технологии KBM-система ESPRIT предлагает необходимый инструмент и процессы обработки, основанные на заранее определенных методиках.

ESPRIT способна, проанализировав твердотельную модель, создать элемент обработки из геометрии. Далее программист может сам назначить операции обработки на этот элемент или позволить базе знаний ESPRIT назначить подходящую технологию, выбранную из уже отработанных на производстве. С течением времени программист увеличивает и оптимизирует "базу знаний" механической обработки, основанную на обратной связи с производством. Технологический опыт производства закладывается в программу и включает только лучшие решения, реализованные на производстве. Чем более автоматизирован процесс программирования, тем больше времени и внимания программист может уделить оптимизации программы и повышению эффективности обработки.

Партнерство для успеха

DP Technology имеет крепкие партнерские отношения с производителями токарно-фрезерного оборудования для решения любых вопросов пользователей.

Такое сотрудничество между компаниями – производителями станков и компанией – разработчиком программного обеспечения позволяет предприятиям, закупающим сложное оборудование, сократить время запуска станков в производство и начать незамедлительно применять весь доступный функционал станков.

Например, заказчик всегда уверен в работоспособности поставленного постпроцессора, так как он был разработан при поддержке сотрудников компании – изготовителя оборудования и протестирован на реальном образце в цехе того же производителя. Кроме того, конфигурации моделей станков, уже вышедших на рынок, определены в настройках ESPRIT и доступны для оперативного использования.

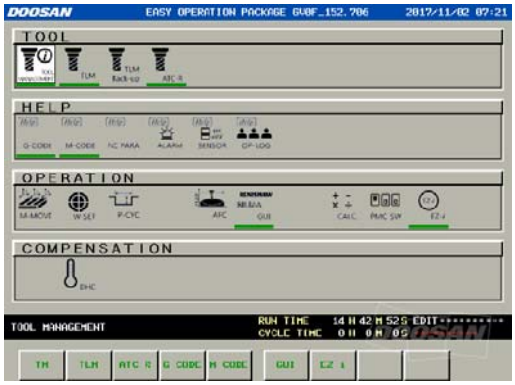
Потенциал многозадачных станков с осью B – это веская причина для любого современного предприятия инвестировать деньги в приобретение токарно-фрезерного оборудования.

3.5. Эффективность использования программного обеспечения Doosan Easy Operation Package (EOP)

Основная задача эксклюзивной разработки компании Doosan (Южная Корея): поместить все в удобной, современной оболочке, сократить время настройки, упростить общие задачи, и самое главное снизить вероятность ошибок.

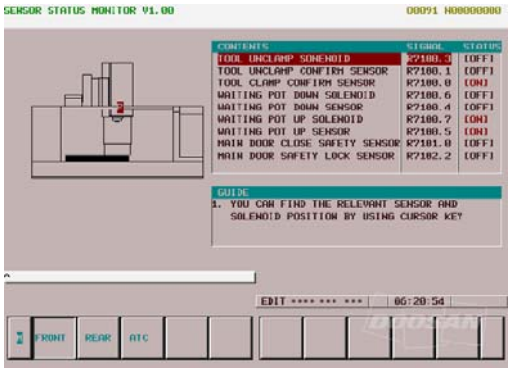
Во время разработки этого уникального продукта были добавлены полезные функции, позволяющие сократить время работы, защитить оборудование и инструмент, улучшить качество обработки и ускорить техническое обслуживание. Функционал данного программного обеспечения (ПО) стал интуитивно понятным как для опытных пользователей, так и для нового поколения операторов, которые выросли на смартфонах и прочих современных гаджетах. Это в конечном итоге должно привести к значительному снижению вспомогательного времени.

Work Coordinate Utility – Инструмент рабочих координат



Данная утилита совмещает все системы привязки координат (заготовки и инструмента) в одну, выводит всю информацию на одном экране – придавая наглядность и, тем самым, позволяет экономить оператору время наладки, а также вероятность роковой ошибки.

New Operation Status Monitor – Новый экран статуса режима работы



Утилита для отображения на экране одного дисплея всех важных состояний. Больше нет необходимости перескакивать с монитора на монитор для сбора информации во время обработки. Кроме того, удобная в применении приборная панель еще больше упростит работу оператора.

Alarm Guidance – Руководство по сигналам

Руководство по сигналам EOP не только сообщает номер соответствующей ошибки, но и отображает графически ту часть оборудования, которая требует внимания. Для получения дополнительной информации о тревожном сигнале предусмотрена кнопка с подробным описанием. Таким образом, специалист по техническому обслуживанию сразу переходит к источнику проблемы, не затрачивая время на поиски руководства и не просматривая список неисправностей для идентификации ошибки. В результате – ликвидация поломки занимает минимум времени, и работа участка мгновенно восстанавливается.

Adaptive Feed Control – Адаптивное управление скоростью подачи

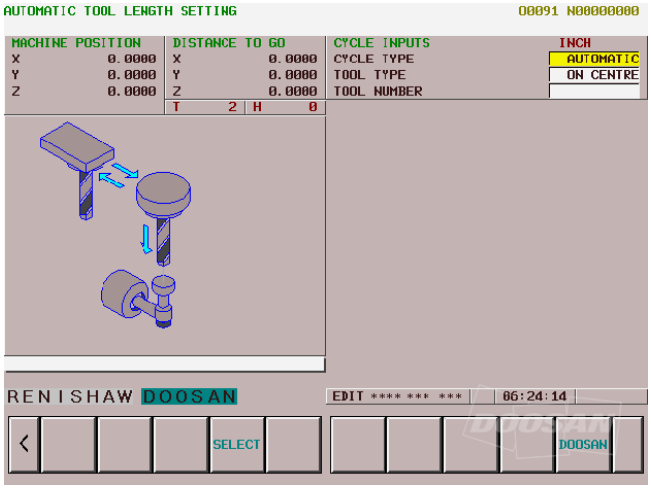
Утилита устанавливает оптимальную скорость, основываясь на результатах проверки нагрузки на шпиндель в реальном времени. Например, скорость подачи автоматически снижается при работе инструмента в углах, уменьшая риск его повреждения. И, наоборот, на ровных поверхностях скорость подачи увеличивается, сокращая, тем самым, время обработки. Все, что вам нужно для повышения произ-

водительности – это потратить немного времени на разработку исходных данных для обрабатываемых деталей.

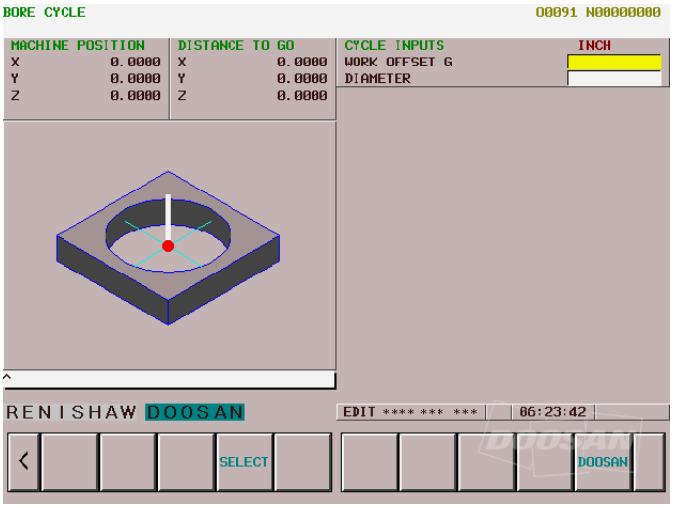
Данное патентованное программное обеспечение простое в использовании и включено в пакет EOP* в качестве стандартной опции.

DOOSAN Renishaw GUI – Датчики Renishaw

Приложение DOOSAN Renishaw GUI позволяет быстро и с высокой точностью выполнять измерения инструмента и нахождения нулевой точки детали. Данное приложение выглядит в виде диалоговых окон, в которые вводятся основные параметры функций измерений, а расширенные настройки позволяют выполнить практический любой вид измерения и "обкатывать" любую геометрию заготовки, что упрощает и сокращает время наладки оборудования. Все функции сосредоточены в одном месте и не требуется перескакивать из нового окна в другие.



После всех измерений данные автоматически заносятся в соответствующие привязки и наладчику не требуется тратить дополнительное время для внесения полученных данных. В итоге достигается удобство и сокращение времени наладки / переналадки.



Существует два основных датчика: щуп и стилус. Первый предназначен для измерения заготовки (отверстий, бобышек, плоскостей, граней, пазов и другие), а второй для измерения длины и диаметра инструмента.

Необходимо отметить, что большая часть, однако, не все, фрезерные станки Doosan поставляются с патентованным программным обеспечением.

3.6. Почему выгодно объединять станки в локальную сеть Ethernet

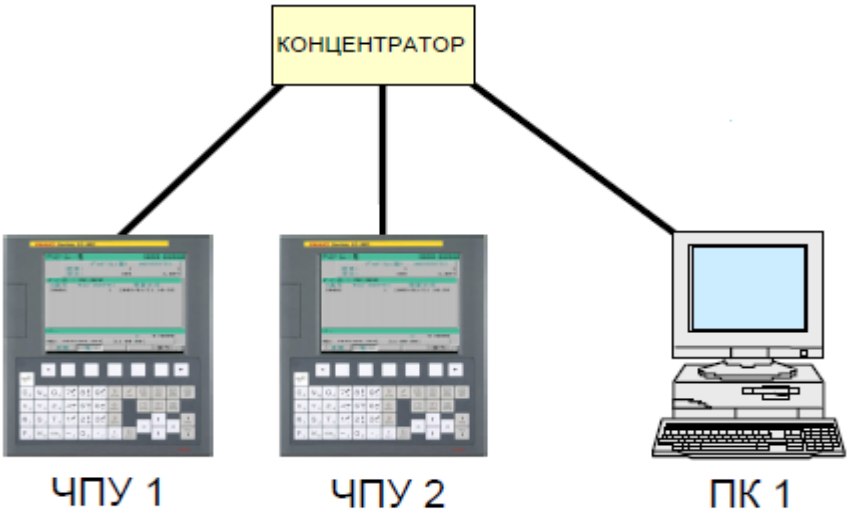
Качественнее, быстрее и дешевле

В решении этих производственных задач не последнее место занимает правильная организация производства. От слаженности и четкости действий персонала зависит вспомогательное время выпуска продукции и, соответственно, показатели прибыльности предприятия. Объединение станков, оснащенных системой ЧПУ, в локальную сеть (ЛС), либо включение их в уже существующую, может качественно повысить уровень организации производства.

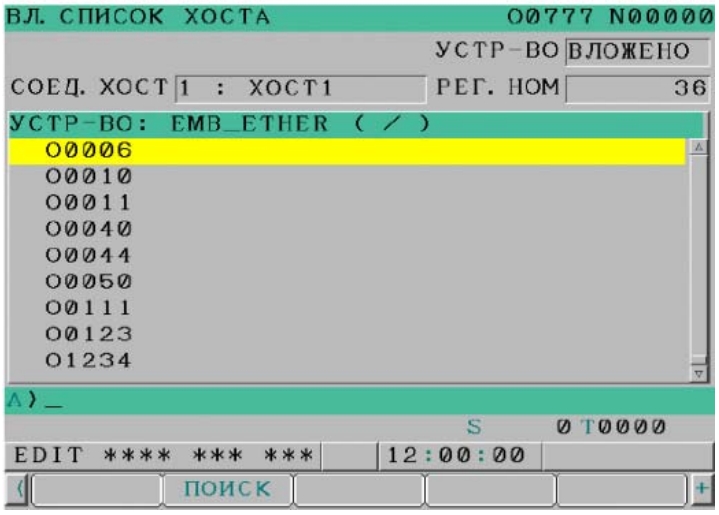
Современные станки компании DOOSAN оснащаются функцией подключения к сети Ethernet и не требуют дополнительного оборудования для выхода в сеть. Если Вы уже используете в производстве оборудование DOOSAN, остается только "включить вилку в розетку" либо направить соответствующий запрос в Сервисный Центр компании в Украине. Преимущества, которые получает пользователь DOOSAN, подключивший станки к сети Ethernet:

- После создания и проверки управляющей программы технологом-программистом возникает необходимость передачи ее на станок. ЛС Ethernet позволяет перебрасывать УП с рабочего компьютера технолога-программиста на стойку станка, не затрачивая время на физическую доставку карты памяти в цех. Это позволяет снизить непроизвод-

ственную потерю времени. Возникает возможность быстрой корректировки УП, не отходя от рабочего места технолога, что значительно улучшает обратную связь между оператором станка и технологом.



- С помощью ЛС ETHERNET возможно создание архива УП как для сети станков, так и для отдельного станка. У оператора появляется доступ ко всем, ранее написанным и отработанным УП, в любое время суток, что влияет на гибкость и скорость переналадки оборудования.
- Улучшение коммуникации со службой технического обслуживания станков. ЛС Ethernet предоставляет доступ к экрану системы ЧПУ прямо с компьютера сервисного инженера, тем самым упрощая использование возможностей удаленного обслуживания. Быстрое выявление неполадки и, соответственно, более эффективное ее устранение значительно снижает время простоя оборудования. У заводской службы механиков появляется возможность отслеживать период времени между техническим обслуживанием станка.



• Возможность контроля работы станков и производственного персонала в режиме реального времени, выполнения классификации и анализа простоев оборудования, может значительно повысить эффективность всех производственных процессов.

Таким образом, мониторинг станочного парка при помощи ЛС является одним из важнейших ее достоинств.

В результате подключения к сети Ethernet, пользователи станков DOOSAN автоматически улучшают организацию производства, повышая эффективность производства и, соответственно, увеличивая прибыль предприятия.

Выводы

1. Предложены новые конструкции режущих инструментов с механическим креплением твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями для осуществления высокопроизводительных процессов фрезерования. Так, показано, что применение нового износостойкого сплава TT7515 с улучшенной подложкой, обеспечивающего повышенную твердость и прочность в сочетании с максимальной износостойкостью – благодаря применению новейшей технологии нанесения CVD-покрытия (TiCN-Al_2O_3-TiN), позволяет осуществлять высокоскоростное фрезерование чугунов и обеспечивает существенное повышение производительности и качества обработки.

2. Предложены новые монолитные фрезы STARMILL для фрезерования труднообрабатываемых материалов; инструменты, обеспечивающие повышение производительности обработки при фрезеровании на оборудовании с недостаточной мощностью; новые конструкции фрез HardMill для обработки закаленных сталей; обновленная серия торцевых фрез; обновленные треугольные пластины Mill2Rush для тяжелой черновой обработки. Предложены также антикризисные решения от компании TaeguTec для фрезерования, связанные с увеличением количества режущих кромок на пластине и др.

3. Обоснованы возможности создания высокоэффективных технологий металлообработки на токарных операциях на основе применения рациональных конструкций режущих инструментов, включая резцы и сверла. Показаны возможности новых сплавов Life+, обеспечивающих повышение стойкости инструмента.

4. Показано, что серия сверл TOPDRILL обеспечивает высокопроизводительное и экономически выгодное сверление самых разнообразных отверстий при достижении высокой стойкости сверл.

5. Предложена эффективная CAM-система ESPRIT для управления осью B на токарно-фрезерных операциях, позволяющая в кратчайшие сроки задействовать весь технический потенциал сложного токарно-фрезерного обрабатывающего центра. ESPRIT реализует все преимущества дорогостоящего средства производства, каким является многоцелевой обрабатывающий центр, за счет программных решений для станков этого типа, обеспечивающих: полную интеграцию оси B с токарно-фрезерными функциями; точение плюс 5-осевое позиционирование; точение плюс 5-осевая одновременная обработка; формирование рабочих плоскостей для позиционирования оси B; непрерывное точение с осью B; методы ориентации оси B; твердотельную верификацию обработки; повышение эффективности за счет применения средств автоматизации.

6. Предложено для практического использования программное обеспечение Doosan Easy Operation Package (EOP), включающее полезные функции, позволяющие сократить время работы, защитить оборудование и инструмент, улучшить качество обработки и ускорить техническое обслуживание. В конечном итоге это приводит к значительному снижению вспомогательного времени.

7. Показано, что объединение станков, оснащенных системой ЧПУ, в локальную сеть Ethernet позволяет повысить уровень организации производства и увеличить прибыль предприятия. Это достигается за счет того, что локальная сеть Ethernet позволяет перебрасывать управляющие программы с рабочего компьютера технолога-программиста на стойку станка, не затрачивая время на физическую доставку карты памяти в цех; появляется возможность создания архива управляющих программ как для сети станков, так и для отдельного станка; улучшаются коммуникации со службой технического обслуживания станков; появляется возможность контроля работы станков и производственного персонала в режиме реального времени, выполнения классификации и анализа простоев оборудования.

Раздел 4
Оптимизация технологических процессов механической обработки деталей машин

4.1. Выбор оптимальных вариантов технологических процессов механической обработки по критерию наименьшей себестоимости

Создание конкурентоспособной машиностроительной продукции требует применения эффективных высокопроизводительных и малоэнергозатратных технологических процессов металлообработки, обеспечивающих высокое качество изготавливаемых изделий и снижение технологической себестоимости и цены готовой продукции [48; 64; 70; 74; 110; 114; 137; 160; 161; 178]. В связи с этим выбор наилучших вариантов технологических процессов механической обработки следует производить по критерию наименьшей себестоимости обработки [89]. Рассматривая две статьи затрат, связанные с заработной платой рабочего и затратами на инструменты, себестоимость обработки выражается:

$$C = N \cdot t_H \cdot S_{час} \cdot k + \frac{N \cdot t_н}{T} \cdot Ц, \qquad (4.1)$$

где N – количество обрабатываемых деталей;

t_H – норма времени на обработку детали, мин;

$S_{час}$ – часовая тарифная ставка рабочего, грн/мин;

k – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на тарифную ставку рабочего;

T – стойкость режущего инструмента, мин;

Ц – цена инструмента, грн.

Как следует из зависимости (4.1), уменьшить себестоимость обработки C можно уменьшением параметров t_H, Ц и увеличением T. Общеизвестно, что параметры t_H и T связаны между собой условиями обработки (режимом резания, характеристиками инструмента и т.д.). Поэтому для обоснования путей уменьшения себестоимости обработки C необходимо знать функциональные связи между параметрами t_H и T, установленные аналитическим или эмпирическим путем. Обычно в

расчетах эти связи не рассматривают, сравнивают по себестоимости лишь отдельные варианты обработки для вполне конкретных значений t_H и Т. В результате приходят к частным решениям, далеко не оптимальным. Для того чтобы получить более общие оптимальные решения, необходимо подчинить экономическую зависимость себестоимости обработки С технологическим закономерностям в виде функциональной связи t_H и Т, т.е., по сути, соединить экономические и технологические знания. Этот путь открывает принципиально новые возможности в проектировании технологических процессов и технологической подготовки производства.

Например, подставляя в зависимость (4.1) известную эмпирическую формулу для расчета стойкости инструмента Т [11], выраженную через t_H, можно определить экстремум (минимум) себестоимости обработки С и реализующие его оптимальные значения параметров t_H и Т. Это позволяет с единых позиций сравнивать различные схемы обработки на разном оборудовании, режимы резания, характеристики режущих инструментов, обосновывать способы увеличения Т и уменьшения t_H и Ц (за счет применения износостойких покрытий инструментов, прогрессивных технологий обработки, новых конструкций инструментов и т.д.) [20; 61; 62; 63; 68; 76; 88; 194].

Необходимо отметить, что в настоящее время проблемам механической обработки деталей машин уделяется чрезвычайно большое внимание. Однако не достаточно математически описаны технологические параметры обработки, которые входят в зависимость для определения себестоимости обработки [36; 40; 125; 136; 202]. В связи с этим нами разработаны новые математические модели различных технологических процессов обработки, позволившие установить аналитические связи между основным временем обработки, стойкостью инструмента, параметрами качества обработки и на этой основе провести анализ себестоимости обработки, выбрать лучшие варианты и разработать практические рекомендации по совершенствованию действующих технологий механической обработки. Исходя из этого, разработаны и внедрены эффективные процессы алмазного шлифования с применением высокопроизводительных схем глубинного шлифования, маршрутно-операционной технологии финишной обработки материалов повышенной твердости с обеспечением высоких показателей точ-

ности и качества обработанных поверхностей и т.д. Например, в 2004 году разработан и внедрен на ГП "Харьковский машиностроительный завод "ФЭД" эффективный технологический процесс круглого наружного шлифования твердосплавных изделий алмазными кругами на металлических связках с плосковершинными зернами (рис. 4.1), обеспечивающий повышение производительности обработки при одновременном улучшении шероховатости поверхности до уровня $R_a = 0{,}1$ ... 0,2 мкм [168]. Это позволило предварительное и окончательное шлифование совместить в одну операцию и исключить из технологического процесса трудоемкую операцию притирки абразивным порошком, что резко снизило технологическую себестоимость обработки.

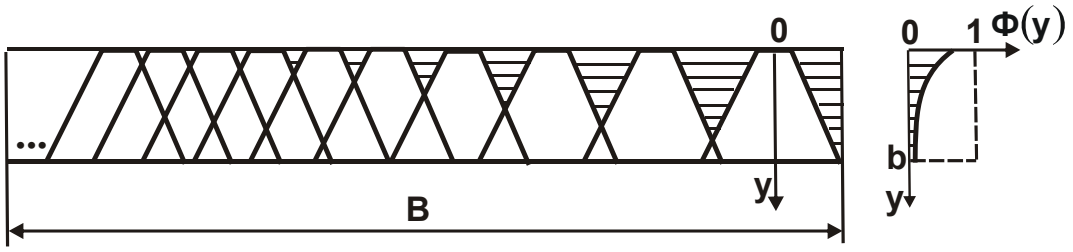
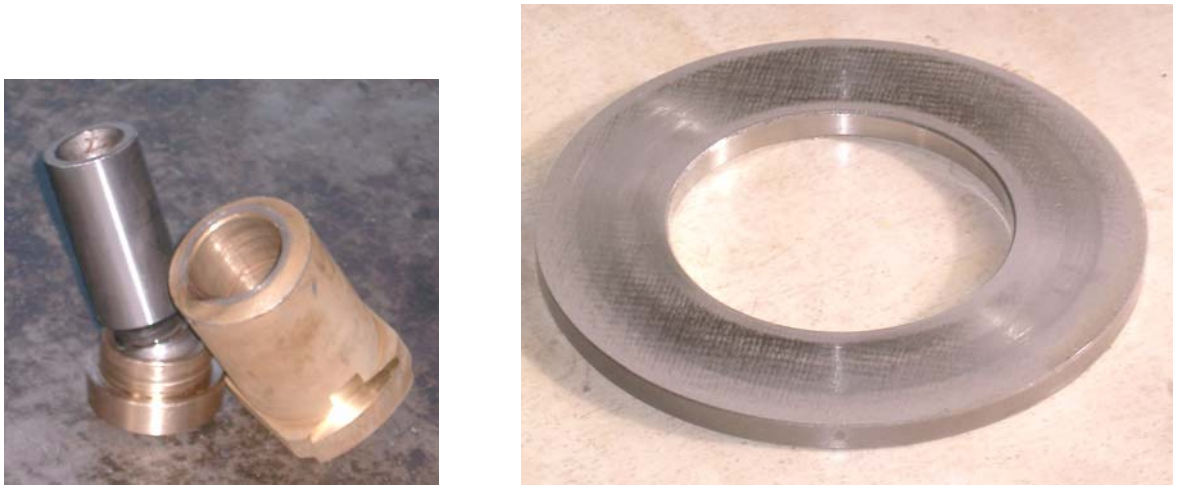


Рис. 4.1. Схема формирования шероховатости поверхности плосковершинными зернами алмазного круга



а б

Рис. 4.2. Детали пары трения "поршень – цилиндр (втулка корпуса) " (а) и диск накладной (б)

В ОАО "Харьковский завод "Гидропривод" были внедрены разработанные эффективные технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов (рис. 4.2), исключающие прижоги и другие температурные дефекты на обрабатываемых поверхностях [107]. Это

позволило существенно уменьшить потери от брака и снизить технологическую себестоимость обработки. Эффект достигнут, в частности, на ряде операций за счет перехода от шлифования к тонкому (алмазному) точению, позволяющему снизить тепловую и силовую напряженности процесса резания и повысить качество обработки.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований произведен выбор наилучшего варианта технологического процесса механической обработки герметичных резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства ОАО "Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича" [103; 37]. Он основан на теоретически обоснованном выборе прогрессивной схемы базирования заготовок баллонов, на новых технических решениях по созданию специальной инструментальной головки для одновременной обработки наружной и внутренней цилиндрических поверхностей и торцовой поверхности горловины баллона (рис. 4.3), системы автоматизированной подналадки останова рабочего хода инструментальной головки, кондуктора для повышения жесткости технологической системы и специального приспособления для точной установки инструментальной головки. В результате внедрения нового варианта технологического процесса потери от брака продукции по качеству нарезания конической резьбы снизились от 15,5 до 1,3 %. Благодаря этому, достигнут значительный экономический эффект, связанный также с концентрацией технологических переходов за счет применения специальной инструментальной головки.

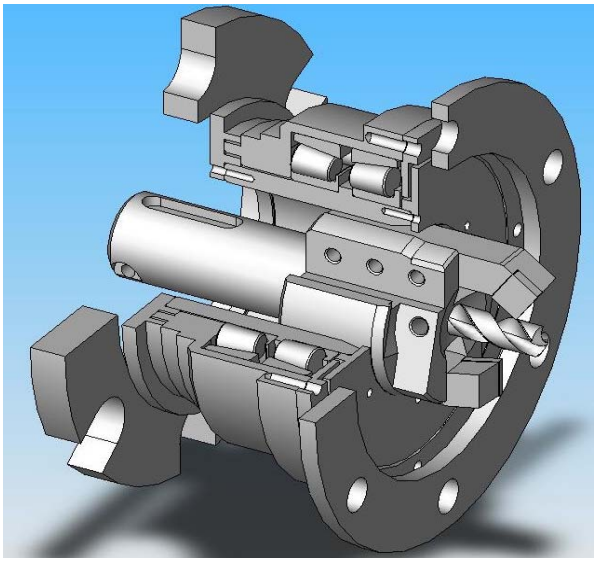


Рис. 4.3. Инструментальная головка с кондуктором

На основе выполненных исследований произведен выбор наилучших вариантов операций круглого наружного шлифования валов приводов шахтных конвейеров (рис. 4.4) [90]. Их применение в ОАО "Харьковский машиностроительный завод "Свет шахтера" позволило повысить производительность и снизить себестоимость обработки при

обеспечении требуемой точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей. Для решения этих задач был разработан новый теоретический подход к оптимизации структуры и параметров операций круглого наружного шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Это позволило определить оптимальное количество переходов, значения скоростей подач и величин снимаемых припусков. В частности, теоретически и экспериментально доказана возможность существенного повышения эффективности шлифования за счет применения схемы шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами.

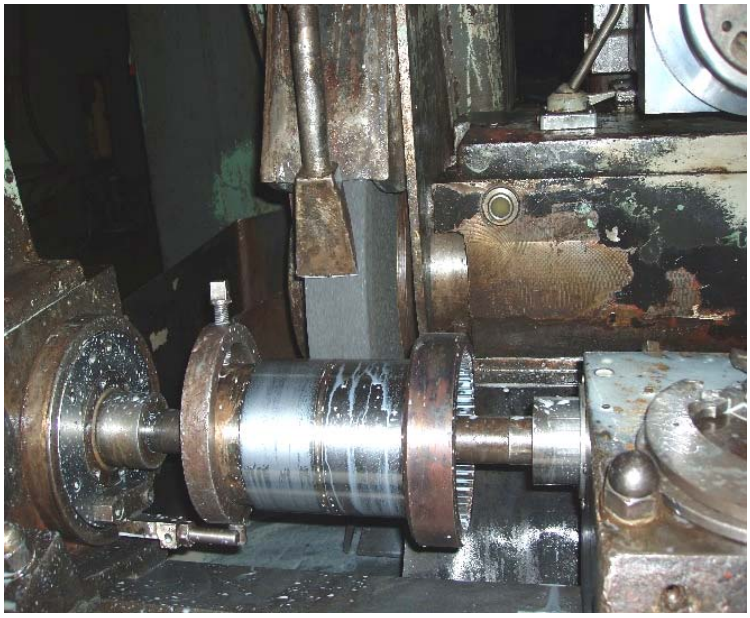


Рис. 4.4. Шлифование вала привода шахтного конвейера

На Харьковском заводе "Потенциал" разработана и внедрена эффективная маршрутно-операционная технология финишной абразивной обработки торцовых уплотнительных колец из труднообрабатываемого композиционного материала на основе релита [95]. Технология включает черновое плоское шлифование колец абразивным или алмазным кругом на металлической связке, получистовое шлифование торцовой поверхности вращающегося кольца торцом алмазного круга на внутришлифовальном станке и притирку торцовой поверхности кольца на доводочном станке с помощью алмазного порошка (рис. 4.5). В итоге технология обеспечивает высокие требования по точности и шерохова-

тости обработки ($R_a = 0{,}05$ мкм). Данный вариант финишной обработки торцовых уплотнительных колец признан наилучшим по критериям себестоимости, производительности, качества и точности обработки.

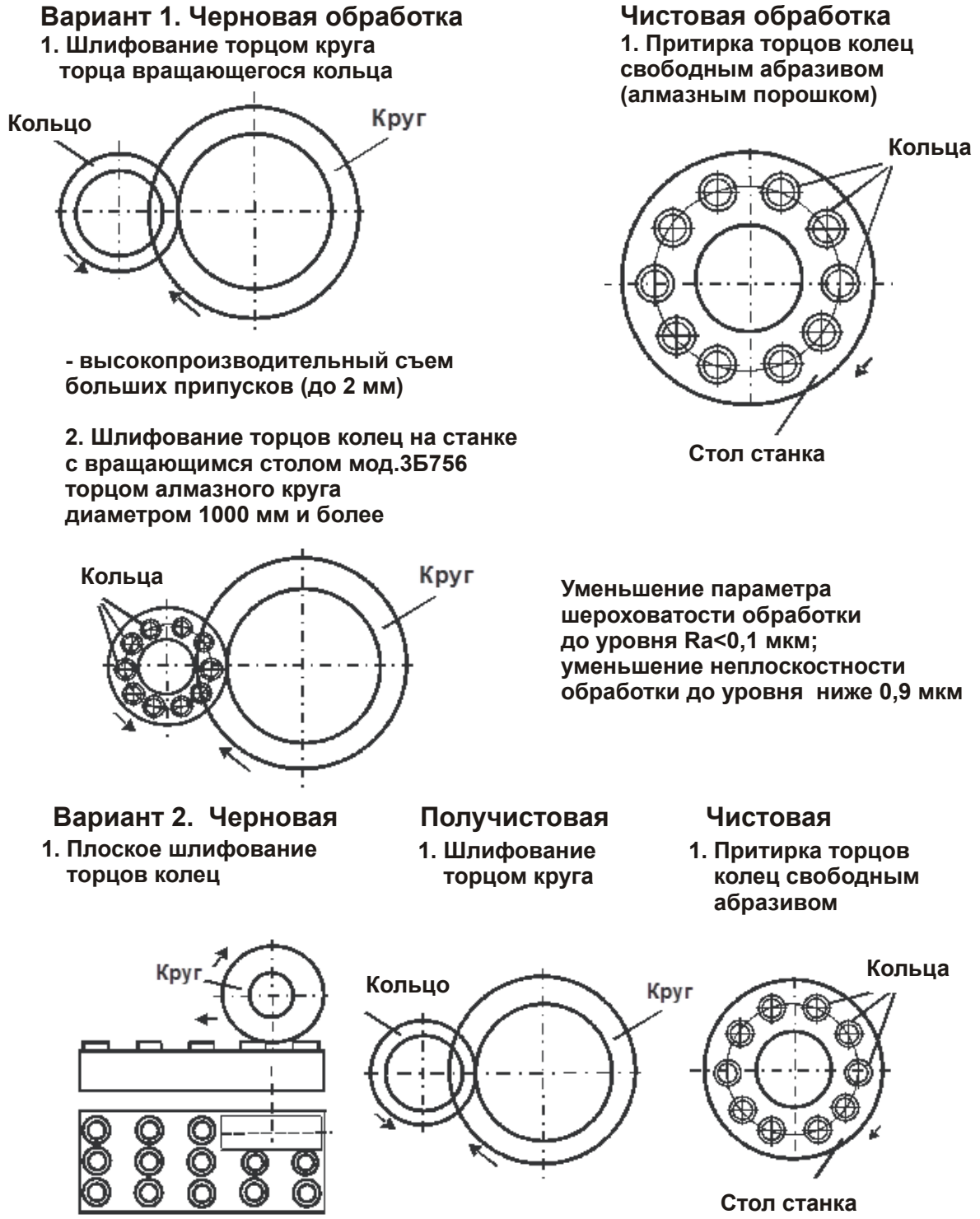


Рис. 4.5. Варианты технологий абразивной обработки торцовых уплотнительных колец из труднообрабатываемого композиционного материала на основе релита

4.2. Концепции повышения производительности и снижения технологической себестоимости механической обработки деталей машин

Вопросы эффективного применения современных технологий и режущих твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства отражены в работах [30 – 34; 98], в которых приведены примеры перехода от традиционно применяемых отечественных инструментов к современным зарубежным режущим твердосплавным инструментам с износостойкими покрытиями с технико-экономическим обоснованием эффективности такого перехода. Установлено, что производительность обработки при этом может быть увеличена до 10 раз и более при одновременном уменьшении технологической себестоимости обработки. Однако решить проблему обеспечения требуемого срока окупаемости приобретенного дорогостоящего зарубежного оборудования (металлорежущих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр") весьма сложно. В связи с этим возникает необходимость проведения теоретического анализа условий уменьшения технологической себестоимости обработки на основе разработки математических моделей.

В работах [31; 34] теоретически установлено, что при продольном точении с увеличением производительности обработки Q технологическая себестоимость $C = C_{з/п} + C_{инстр}$ (определяемая двумя статьями затрат: заработной платой рабочего $C_{з/п}$ и стоимостью режущих инструментов $C_{инстр}$) изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума (рис. 4.6). Расчетами установлено, что левая ветвь зависимости C–Q (рис. 4.6) достигается при условии, когда первая статья затрат (заработная плата рабочего) больше второй статьи затрат (стоимости режущих инструментов). Правая ветвь зависимости C–Q (рис. 4.6), наоборот, достигается при условии, когда вторая статья за-

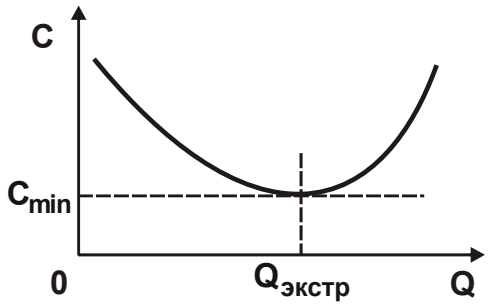


Рис. 4.6. Зависимость технологической себестоимости обработки C от производительности обработки Q

трат (стоимость режущих инструментов) больше первой статьи затрат (заработной платы рабочего).

Значения C_{min}, $Q_{экстр}$ и экстремальной стойкости инструмента $T_{экстр}$ в точке минимума технологической себестоимости обработки выражаются зависимостями:

$$C_{min} = \frac{N \cdot \vartheta \cdot S_{час} \cdot k}{Q_{экстр}} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)}\right]; \qquad (4.2)$$

$$Q_{экстр} = \left[\frac{S_{час} \cdot k \cdot C_4}{(t_c \cdot S_{час} \cdot k + Ц) \cdot (m_1 - 1)} \cdot S^{m_1 - p} \cdot t^{m_1 - q}\right]^{\frac{1}{m_1}} =$$

$$= \left[\frac{C_4}{T_{экстр}} \cdot S^{m_1 - p} \cdot t^{m_1 - q}\right]^{\frac{1}{m_1}}; \qquad (4.3)$$

$$T_{экстр} = \frac{(t_c \cdot S_{час} \cdot k + Ц) \cdot (m_1 - 1)}{S_{час} \cdot k}, \qquad (4.4)$$

где $Q = V \cdot t \cdot S$ – производительность обработки, м^3/мин;

V – скорость резания, м/мин;

t – глубина резания, м;

S – подача, м/об.;

ϑ – объем металла, снимаемого с одной детали, м^3;

t_c – время, затрачиваемое на снятие затупившегося инструмента, мин;

$T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}$ – стойкость режущего инструмента, мин [11];

C_4, m_1, q, p – постоянные для определенных условий обработки ($m_1 > p > q$; $m_1 > 1$).

Как следует из зависимости (4.2), минимум технологической себестоимости обработки C_{min} определяется суммой двух статей затрат: заработной платой рабочего $C_{з/п}$ и стоимостью режущих инструментов $C_{инстр}$. Уменьшить технологическую себестоимость обработки C_{min} можно главным образом увеличением экстремального значения производительности обработки $Q_{экстр}$, что достигается различными путями:

1) уменьшением экстремального значения стойкости инструмента $T_{экстр}$ за счет уменьшения цены инструмента Ц и параметра m_1, который тем меньше, чем выше работоспособность инструмента в условиях повышенной температуры резания;

2) увеличением параметра C_4, который в отличие от параметра m_1 увеличивается с увеличением работоспособности инструмента в условиях повышенной температуры резания;

3) увеличением подачи S за счет увеличения прочности и твердости режущей кромки инструмента [31]. В этом случае экстремальное значение скорости резания

$$V_{экстр} = \frac{Q_{экстр}}{S \cdot t} = \left[\frac{S_{час} \cdot k \cdot C_4}{(t_c \cdot S_{час} \cdot k + Ц) \cdot (m_1 - 1)} \cdot \frac{1}{S^p \cdot t^q} \right]^{\frac{1}{m_1}} \qquad (4.5)$$

может быть уменьшено или увеличено, или оставаться постоянным в зависимости от степени уменьшения параметра m_1 и увеличения отношения $C_4 / (T_c \cdot S_{час} \cdot k + Ц)$. Из зависимости (4.2) вытекает важный вывод: в точке минимума технологической себестоимости обработки C_{min} первое слагаемое, определяемое затратами на заработную плату рабочего, в $(m_1 - 1)$ раз больше второго слагаемого, определяемого затратами на режущий инструмент, т.е. отношение $C_{з/п} / C_{инстр} = m_1 - 1$.

На рис. 4.7 и в табл. 4.1 показан характер изменения отношения $C_{з/п} / C_{инстр} = m_1 - 1$ от параметра m_1. Как видно, чем больше параметр m_1, тем больше отношение $C_{з/п} / C_{инстр} = m_1 - 1$.

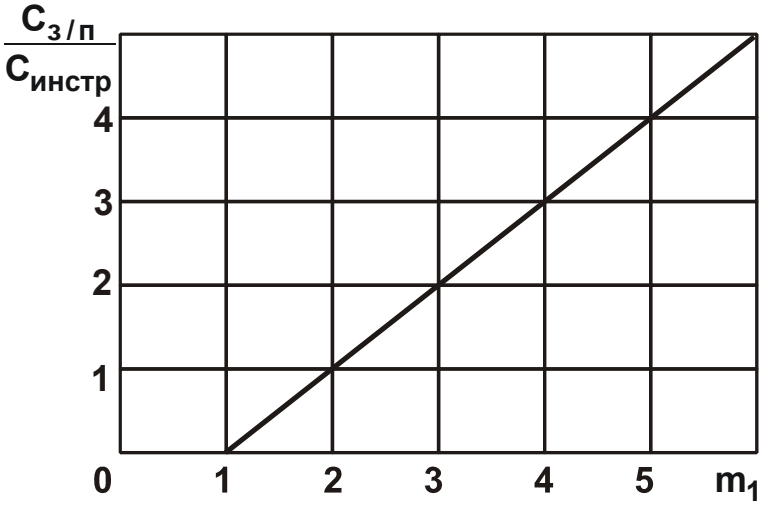


Рис. 4.7. Зависимость отношения $C_{з/п} / C_{инстр}$ от параметра m_1

Таблица 4.1

Расчетные значения отношения $C_{з/п} / C_{инстр}$

m_1	1	2	3	4	5	6	7
$C_{з/п} / C_{инстр}$	0	1	2	3	4	5	6

С целью оценки достоверности полученного теоретического решения в табл. 4.2 приведены суммарные затраты (технологическая себестоимость) $C = C_{инстр} + C_{оборуд} + C_{з/п} + П_{расх}$ на обработку одной детали, установленные экспериментально при выполнении токарной операции отрезки (пруток из стали 45 диаметром D = 50 мм) традиционным инструментом – твердосплавным резцом (применяемым на предприятии, т.е. базовым) и сборным твердосплавным резцом с износостойким покрытием фирмы Iscar (т.е. внедряемым) [45].

Таблица 4.2

Расчет суммарных затрат (технологической себестоимости) C на выполнение токарной операции отрезки

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов,%	
				базовый	внедряемый
Трудоемкость обработки T	час.	0,090	0,037		
Затраты на инструмент $C_{инстр}$	грн	0,72	0,08	8,65	1,97
Затраты на оборудование $C_{оборуд}$	грн	1,73	0,70	20,74	17,52
Затраты на заработную плату $C_{з/п}$	грн	1,91	1,04	22,89	26,1
Прочие расходы $П_{расх}$	грн	3,97	2,18	47,72	54,42
Суммарные затраты (технологическая себестоимость) C	грн	**8,33**	**4,00**	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн		4,33	или	51,94

Режим резания традиционным (базовым) инструментом: скорость резания V = 62,8 м/мин; обороты шпинделя n = 400 об./мин; подача на оборот S_0 = 0,15 мм/об.; подача $S_{мин}$ = 60 мм/мин; глубина резания t = 5 мм; количество проходов – 1; суммарное линейное перемещение инструмента – 25 мм.

Режим резания внедряемым инструментом: скорость резания V = 117,8 м/мин; обороты шпинделя n = 750 об./мин; подача на оборот S_0 = 0,15 мм/об.; подача $S_{мин}$ = 112,5 мм/мин; глубина резания t = 5 мм; количество проходов – 1; суммарное линейное перемещение инструмента – 25 мм.

Как следует из табл. 4.2, применение внедряемых инструментов позволяет более чем в 2 раза уменьшить трудоемкость обработки T и суммарные затраты C. При этом отношение затрат на заработную плату и затрат на инструмент $C_{з/п}/C_{инстр}$ при обработке традиционными (базовыми) инструментами равно 2,65 (точка A′ на рис. 4.8), а при обработке внедряемыми инструментами равно 13 (точка B′ на рис. 4.8).

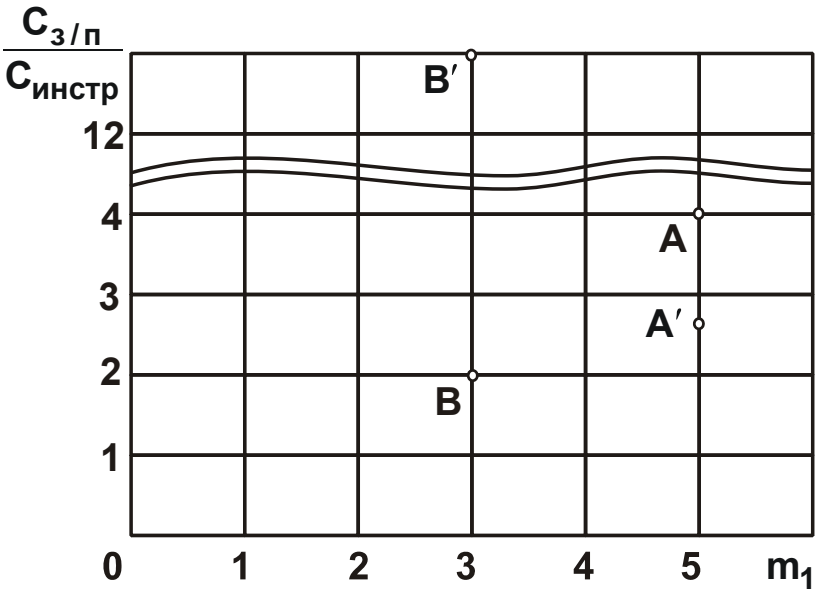


Рис. 4.8. Характер расположения значений $C_{з/п}/C_{инстр}$, согласно данным, приведенным в табл. 4.2

Экспериментально установлено, что при обработке традиционными (базовыми) инструментами параметр $m_1 \approx 5$, а при обработке внедряемыми инструментами параметр $m_1 \approx 3$. Тогда в точке минимума технологической себестоимости обработки C_{min} при обработке ба-

зовыми инструментами отношение $C_{з/п}/C_{инстр} = m_1 - 1$, равно 4 (точка А на рис. 4.3), а при обработке внедряемыми инструментами отношение $C_{з/п}/C_{инстр} = m_1 - 1$ равно 2 (точка В на рис. 4.3). Следовательно, при обработке базовыми инструментами отношение $C_{з/п}/C_{инстр}$=2,65 меньше значения 4, достигаемого в точке минимума технологической себестоимости обработки C_{min}. В этом случае значение отношения $C_{з/п}/C_{инстр}$ расположено на правой ветви зависимости C–Q (рис. 4.6), что соответствует условию $Q > Q_{экстр}$.

При обработке внедряемыми инструментами отношение $C_{з/п}/C_{инстр}$=13 больше значения 2, достигаемого в точке минимума технологической себестоимости обработки C_{min}. Поэтому оно расположено на левой ветви зависимости C–Q (рис. 4.6), что соответствует условию $Q < Q_{экстр}$. Следовательно, для рассматриваемых условий обработки минимум технологической себестоимости обработки C_{min} не достигается, поскольку реализуется левая ветвь зависимости $C - Q$ (рис. 4.6). Согласно зависимости (4.2), уменьшить технологическую себестоимость обработки до минимального значения C_{min} можно, главным образом, за счет увеличения производительности обработки Q, т.е. ужесточения режимов резания. Это позволит дополнительно уменьшить себестоимость и повысить себестоимость обработки, что указывает на существование значительных резервов механической обработки внедряемыми инструментами.

В табл. 4.3 приведены суммарные затраты на обработку одной детали $C = C_{инстр} + C_{оборуд} + C_{з/п} + П_{расх}$, установленные экспериментально при выполнении операции точения вала из стали 20Х2Н4А диаметром D_{max} = 180 мм, D_{min} =150 мм твердосплавным резцом (применяемым на предприятии, т.е. базовым) и внедряемым сборным твердосплавным резцом с износостойким покрытием фирмы Iscar. Режим резания базовым инструментом: скорость резания $V = 56{,}5$ м/мин; обороты шпинделя $n = 100$ об./мин; подача на оборот $S_0 = 0{,}6$ мм/об.; подача $S_{мин} = 60$ мм/мин; глубина резания t = 5 мм; количество проходов – 3; суммарное линейное перемещение инструмента – 6103 мм. Режим резания внедряемым инструментом: скорость резания

$V = 113{,}0$ м/мин; обороты шпинделя $n = 200$ об./мин; подача на оборот $S_0 = 0{,}8$ мм/об.; подача $S_{мин} = 160{,}0$ мм/мин; глубина резания t = 5 мм; количество проходов – 3; суммарное линейное перемещение инструмента – 6103 мм.

Таблица 4.3

Расчет суммарных затрат (технологической себестоимости) С на выполнение операции точения вала

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов, %	
				базовый	внедряемый
Трудоемкость обработки Т	час.	2,112	0,986		
Затраты на инструмент $C_{инстр}$	грн	47,68	38,36	22,96	29,62
Затраты на оборудование $C_{оборуд}$	грн	59,25	27,65	28,53	21,36
Затраты на заработную плату $C_{з/п}$	грн	44,56	28,08	21,46	21,7
Прочие расходы $П_{расх}$	грн	56,17	35,40	27,05	27,34
Суммарные затраты (технологическая себестоимость) С	грн	**207,66**	**129,48**	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн		78,18	или	37,65

Следуя табл. 4.3, как и в предыдущем случае, при обработке внедряемыми инструментами трудоемкость обработки Т и суммарные затраты С уменьшаются более чем в 2 раза. При этом отношение $C_{з/п}/C_{инстр}$ = 0,93 (точка А′ на рис. 4.9) при обработке базовыми инструментами и $C_{з/п}/C_{инстр}$ = 0,73 (точка В′ на рис. 4.9) при обработке внедряемыми инструментами. Это означает, что в двух рассматриваемых случаях технологическая себестоимость обработки превышает минимальное значение C_{min}, однако реализуется правая ветвь зависимости $C - Q$ (рис. 4.6), т.е. производительность обработки $Q > Q_{экстр}$.

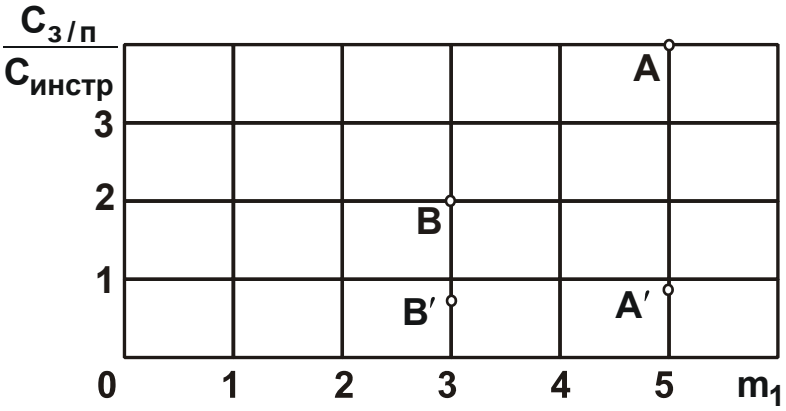


Рис. 4.9. Характер расположения значений $C_{з/п}/C_{инстр}$, согласно данным, приведенным в табл. 4.3

В табл. 4.4 приведены суммарные затраты (технологическая себестоимость) $C = C_{инстр} + C_{оборуд} + C_{з/п} + П_{расх}$ на обработку 1 детали, установленные экспериментально при выполнении операции точения вала из стали 12Х18Н10Т диаметром $D = 75$ мм твердосплавным резцом (применяемым на предприятии, т.е. базовым) и внедряемым сборным твердосплавным резцом с износостойким покрытием. Режим резания базовым инструментом: скорость резания $V = 47{,}1$ м/мин; обороты шпинделя $n = 200$ об./мин; подача на оборот $S_0 = 0{,}2$ мм/об.; подача $S_{мин} = 40$ мм/мин; глубина резания t = 2 мм; количество проходов – 1; суммарное линейное перемещение инструмента – 180 мм.

Режим резания внедряемым инструментом: скорость резания $V = 146{,}0$ м/мин; обороты шпинделя $n = 620$ об./мин; подача на оборот $S_0 = 0{,}2$ мм/об.; подача $S_{мин} = 124{,}0$ мм/мин; глубина резания t = 2 мм; количество проходов – 1; суммарное линейное перемещение инструмента – 180 мм.

Следуя табл. 4.4, как и в двух предыдущих случаях (табл. 4.2, табл. 4.3), применение внедряемых инструментов позволяет уменьшить трудоемкость обработки T и суммарные затраты C более чем в 2 раза. Отношение $C_{з/п}/C_{инстр}$ = 69,38 (точка A′ на рис. 4.5) при обработке базовыми инструментами и $C_{з/п}/C_{инстр}$ = 8,63 (точка B′ на рис. 4.10) при обработке внедряемыми инструментами. В этом случае применение внедряемых инструментов приближает технологическую себестоимость обработки к минимальному значению C_{min}, что и предопределяет эффективность обработки.

Таблица 4.4

Расчет суммарных затрат (технологической себестоимости) С на выполнение операции точения вала

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов, %	
				базовый	внедряемый
Трудоемкость обработки Т	час.	0,158	0,058		
Затраты на инструмент $C_{инстр}$	грн.	0,49	0,19	3,57	2,94
Затраты на оборудование $C_{оборуд}$	грн.	3,03	1,10	21,89	17,34
Затраты на заработную плату $C_{з/п}$	грн.	3,34	1,64	24,16	25,8
Прочие расходы $П_{расх}$	грн.	6,97	3,42	50,38	53,88
Суммарные затраты (технологическая себестоимость) С	грн.	**13,83**	**6,34**	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн.		7,49	или	54,14

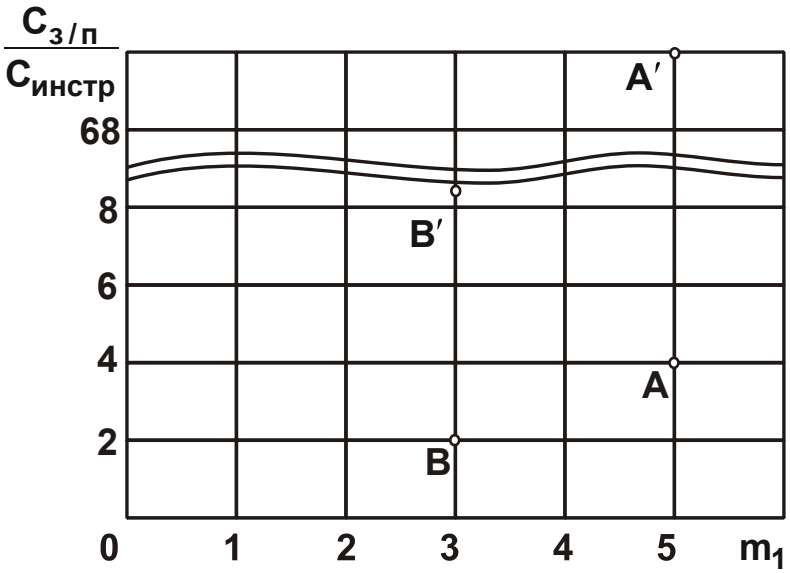


Рис. 4.10. Характер расположения значений $C_{з/п} / C_{инстр}$, согласно данным, приведенным в табл. 4.4

Для сравнения в табл. 4.5 приведены суммарные затраты (технологическая себестоимость) $C = C_{инстр} + C_{оборуд} + C_{з/п} + П_{расх}$ на обработку одной детали, установленные экспериментально при выполнении

операции фрезерования детали "корпус" из стали 3Л базовым инструментом – твердосплавной фрезой D = 100 мм и внедряемой сборной твердосплавной фрезой D = 100 мм с износостойким покрытием.

Таблица 4.5

Расчет суммарных затрат (технологической себестоимости) С на выполнение операции фрезерования детали "корпус"

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов, %	
				базовый	внедряемый
Трудоемкость обработки Т	час.	0,45	0,10		
Затраты на инструмент $C_{инстр}$	грн	**4,63**	**6,14**	14,94	46,87
Затраты на оборудование $C_{оборуд}$	грн	11,85	2,57	38,27	19,59
Затраты на заработную плату $C_{з/п}$	грн	6,06	1,84	19,59	14,04
Прочие расходы $П_{расх}$	грн	8,42	2,55	27,20	19,50
Суммарные затраты (технологическая себестоимость) С	грн	**30,96**	**13,10**	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн		17,86	или	57,69

Режим резания базовым инструментом: скорость резания $V = 39{,}9722$ м/мин; обороты шпинделя $n = 127{,}2$ об./мин; количество зубьев фрезы z = 5; подача на зуб $S_z = 0{,}06$ мм/зуб; подача на оборот $S_0 = 0{,}3$ мм/об.; подача $S_{мин} = 38{,}19$ мм/мин; глубина резания t = 4 мм; ширина резания B = 40 мм; количество проходов – 2; суммарное линейное перемещение инструмента – 800 мм.

Режим резания внедряемой сборной твердосплавной фрезой с износостойким покрытием: скорость резания $V = 149{,}9978$ м/мин; обороты шпинделя $n = 477{,}7$ об/мин; количество зубьев фрезы z = 5; подача на зуб $S_z = 0{,}2$ мм/зуб; подача на оборот $S_0 = 1$ мм/об.; подача $S_{мин} =$ 477,7 мм/мин; глубина резания t = 4 мм; ширина резания B = 40 мм; количество проходов – 1; суммарное линейное перемещение инструмента – 400 мм.

При фрезеровании внедряемыми инструментами трудоемкость обработки T и суммарные затраты C уменьшаются еще значительнее, чем при точении. При этом отношение $C_{з/п}/\ C_{инстр} = 1{,}31$ (точка A′ на рис. 4.11) при обработке базовыми инструментами и $C_{з/п}/C_{инстр} = 0{,}3$ (точка B′ на рис. 4.11) при обработке внедряемыми инструментами. Следовательно, реализуется правая ветвь зависимости $C - Q$ (рис. 4.6) и производительность обработки $Q > Q_{экстр}$.

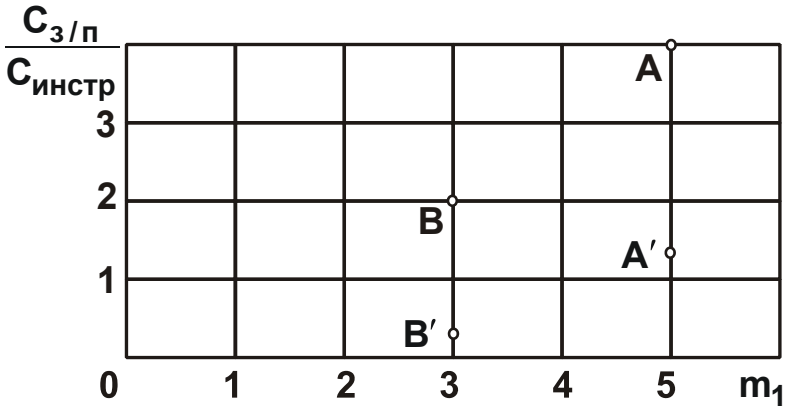


Рис. 4.11. Характер расположения значений $C_{з/п}/C_{инстр}$, согласно данным, приведенным в табл. 4.5

Если учесть в расчетной зависимости (4.2) для определения технологической себестоимости обработки третью составляющую – статью затрат на оборудование $C_{оборуд}$, то она примет вид:

$$C_{min} = \frac{N \cdot \vartheta \cdot \left(S_{час} \cdot k + C_{с-ч}\right)}{Q_{экстр}} \cdot \left[1 + \frac{1}{\left(m_1 - 1\right)}\right], \qquad (4.6)$$

где $C_{с-ч}$ – стоимость станко-часа, грн/час.

В этом случае вместо отношения $C_{з/п}/C_{инстр}$ необходимо рассматривать отношение $\left(C_{з/п} + C_{оборуд}\right)/C_{инстр}$. Тогда, согласно табл. 4.5, при обработке базовыми инструментами отношение $\left(C_{з/п} + C_{оборуд}\right)/C_{инстр} = 3{,}87$, а при обработке внедряемыми инструментами отношение $\left(C_{з/п} + C_{оборуд}\right)/C_{инстр} = 0{,}82$. Это приближает значения технологической себестоимости обработки к минимальным значениям C_{min} и указывает на то, что применяемые режимы резания близки к оптимальным. При обработке внедряемыми инструментами значение C_{min} меньше, а экстремальное значение производительности

обработки $Q_{экстр}$, наоборот, больше, что согласуется с теоретическими результатами, вытекающими из зависимостей (4.2) и (4.3).

Аналогично можно учесть в зависимости (4.6) для определения технологической себестоимости обработки четвертую составляющую – прочие расходы $П_{расх}$. Тогда вместо отношения $(C_{з/п} + C_{оборуд})/C_{инстр}$ необходимо рассматривать отношение $(C_{з/п} + C_{оборуд} + П_{расх})/C_{инстр}$. Согласно табл. 4.5, в случае обработки базовыми инструментами отношение $(C_{з/п} + C_{оборуд} + П_{расх})/C_{инстр} = 5{,}69$, а при обработке внедряемыми инструментами отношение $(C_{з/п} + C_{оборуд} + П_{расх})/C_{инстр} = 1{,}13$.

Как видно, применяемые режимы резания базовыми и внедряемыми инструментами в первом приближении можно рассматривать оптимальными, поскольку значения технологической себестоимости обработки становятся приблизительно равными минимальным значениям. Этим показано, что при фрезеровании по сравнению с точением больше возможностей осуществления оптимального режима резания, хотя и при точении, исходя из табл. 4.3, может быть реализован режим резания, при котором выполняется условие обработки $Q > Q_{экстр}$ и реализуется правая ветвь зависимости $C - Q$ (рис. 4.6). Тогда при обработке базовыми инструментами $(C_{з/п} + C_{оборуд})/C_{инстр} = 2{,}18$ и $(C_{з/п} + C_{оборуд} + П_{расх})/C_{инстр} = 3{,}36$, а при обработке внедряемыми инструментами отношение $(C_{з/п} + C_{оборуд})/C_{инстр} = 1{,}45$ и $(C_{з/п} + C_{оборуд} + П_{расх})/C_{инстр} = 2{,}37$. Это указывает на то, что реализуется режим резания, близкий к оптимальному режиму резания, при котором достигается минимум технологической себестоимости обработки C_{min} при учете четырех статей затрат (табл. 4.3).

Следует отметить, что отношение $(C_{з/п} + C_{оборуд} + П_{расх})/C_{инстр}$ позволяет в большей степени оценить экономическую эффективность механической обработки, поскольку учитывает наибольшее количество статей затрат. Если в точке минимума технологической себестоимости обработки C_{min} выполняется условие $Q < Q_{экстр}$, то необходимо увеличивать производительность обработки за счет увеличения скорости резания и подачи путем применения режущих инструментов, характеризующихся большими значениями C_4 и меньшими значениями m_1,

т.е. применением инструментов, обладающих большей износостойкостью в условиях повышенной температуры резания, что вытекает из зависимостей (4.2) и (4.3).

4.3. Эффективное применение современных технологий механической обработки

Современные режущие лезвийные инструменты представляют собой сборные конструкции, в которых используются режущие пластины из твердых сплавов с износостойкими покрытиями производства ведущих инструментальных фирм европейских государств, Израиля, Японии, Южной Кореи и т.д. Эти инструменты отличаются высокой износостойкостью и производительностью, обеспечивают высококачественную обработку изделий, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами (различные стали и чугуны, высокотвердые наплавочные материалы, цветные металлы, высокотвердые труднообрабатываемые неметаллические материалы и т.д.). Высокая твердость и износостойкость инструментов позволяет эффективно их использовать в условиях высокоскоростного резания со скоростью 1000 м/мин и более, а это приводит к существенному увеличению производительности обработки при обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей деталей [42; 96].

Особенно эффективно применение этих инструментов на современных высокооборотных металлорежущих станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр", реализующих высокоскоростное резание для различных видов механической обработки: точения, растачивания, сверления, зенкерования и развертывания отверстий, фрезерования, шлифования и т.д. В этом случае обработка деталей сложной геометрической формы производится фактически с одного установа, что резко повышает точность и качество обрабатываемых поверхностей. При этом многократно снижается трудоемкость обработки, поскольку не приходится обрабатывать деталь на разных станках при выполнении различных операций различными инструментами, что типично для традиционного машиностроения.

Благодаря концентрации операций также резко сокращается их количество и количество применяемых инструментов. Так, установле-

но, что в результате внедрения современных металлорежущих станков с ЧПУ и сборных твердосплавных режущих инструментов, работающих в условиях высокоскоростного резания, удалось при обработке сложнопрофильных агрегатов авиационной техники сократить количество технологических операций с 200 до 100, а режущих инструментов – с 50 до 20 позиций. В связи с этим, в настоящее время значительная часть ответственных высокоточных деталей, обработка которых характеризовалась высокой трудоемкостью и себестоимостью, обрабатываются по новым технологиям высокоскоростного резания на современных высокооборотных металлорежущих станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр". Эффект обработки достигается еще и за счет того, что на твердосплавные пластины нанесены многослойные покрытия, характеризующиеся высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения. Это снижает силы и температуру резания и, соответственно, повышает показатели точности, качества и производительности обработки. Кроме того, применяемые твердые сплавы выдерживают более высокие температуры без снижения режущих свойств, что на порядок и более повышает стойкость инструментов по сравнению с традиционно применяемыми инструментами, изготовленными из отечественных твердых сплавов. Таким образом, переход в область высокоскоростной обработки открывает новые технологические возможности высококачественного изготовления деталей машин и систем.

Проведенные обобщенные расчеты экономической эффективности внедрения режущих инструментов зарубежного производства показали, что в среднем 22 % себестоимости изготовленного изделия составляет стоимость сырья и материалов, 3 % – затраты на инструмент, 75 % – затраты на оборудование, заработную плату и накладные расходы [31]. Если же цену инструмента, закупаемого предприятием, уменьшить на 20 %, то суммарная экономия составит лишь 0,6 %. При увеличении срока службы инструмента на 50 % суммарная экономия составит 1,5 %, а если с помощью этого инструмента увеличить производительность на 20 %, то затраты на оборудование, заработную плату и накладные расходы в себестоимости изделия уменьшатся на 15 %. Поэтому при увеличении стоимости инструмента на 50 % произойдет увеличение производительности и суммарная экономия производства составит 13,5 %. Из этого можно заключить, что, например,

снижение на 10 % трудоемкости обработки экономически выгоднее, чем экономия на 10 % стоимости инструмента.

Необходимо отметить, что в настоящее время накоплен значительный опыт применения таких инструментов. По каталогам можно произвести выбор оптимальной по форме твердосплавной пластины и оправки инструмента для каждого конкретного случая обработки. Предлагаются также новые режимы резания, обеспечивающие повышение технологических показателей обработки. В связи с этим, в настоящем параграфе проведен анализ результатов исследований и внедрений этих инструментов в производство и обоснованы условия их эффективного использования [100].

На рис. 4.12 и в табл. 4.6 приведены суммарные затраты (технологическая себестоимость) $C = C_{инстр} + C_{оборуд} + C_{з/п} + П_{расх}$ на обработку 1 детали, установленные экспериментально при выполнении операции точения деталей из стали 45 базовым инструментом и внедряемым инструментом фирмы Tungaloy с применением оптимальных режимов резания.

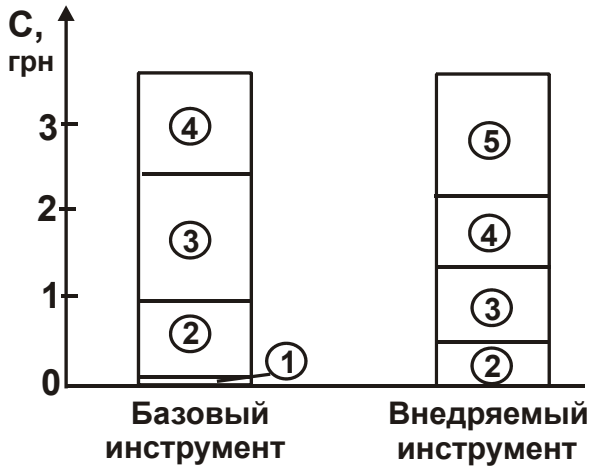


Рис. 4.12. Суммарные затраты С на выполнение операции точения базовым и внедряемым инструментами: 1 – $C_{инстр}$; 2 – $C_{оборуд}$; 3 – $C_{з/п}$; 4 – $П_{расх}$; 5 – экономия Э

Диаметр детали D: максимальный 55 мм и минимальный 25 мм; скорость резания $V = 431{,}8$ м/мин; обороты шпинделя $n = 2500$ об./мин; подача на оборот $S_0 = 0{,}25$ мм/об.; подача $S_{мин} = 625$ мм/мин; глубина резания t = 3 мм; количество проходов – 1; суммарное линейное перемещение инструмента – 60 мм.

Как следует из табл. 4.6, трудоемкость обработки внедряемым инструментом приблизительно в 2 раза меньше трудоемкости обработки базовым инструментом. Поэтому и суммарные затраты С на выполнение операции точения (приходящиеся на одну деталь) внедряемым инструментом меньше.

Затраты на инструмент $С_{инстр}$ и на оборудование $С_{оборуд}$ при обработке внедряемым инструментом соответственно в 3,5 раза и в 1,87 раза меньше аналогичных затрат при обработке базовым инструментом. Экономия затрат на 1 деталь в размере 1,32 грн (или 40 %) достигнута за счет применения внедряемых инструментов, изготовленных из более износостойких твердых сплавов с покрытием.

Таблица 4.6

Расчет суммарных затрат (технологической себестоимости) С на выполнение операции точения

Статьи расходов на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов,%	
				базовый	внедряемый
Трудоемкость обработки Т	час.	0,0175	0,009		
Затраты на инструмент $С_{инстр}$	грн	0,07	0,02	2,12	1,01
Затраты на оборудование $С_{оборуд}$	грн	0,86	0,46	26,07	23,24
Затраты на заработную плату $С_{з/п}$	грн	1,20	0,76	36,36	38,38
Прочие расходы $П_{расх}$	грн	1,17	0,74	35,45	37,37
Суммарные затраты (технологическая себестоимость) С	грн	3,30	1,98	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн		1,32		

Согласно табл. 4.6, наибольшими затратами являются затраты на заработную плату рабочего $С_{з/п}$, составляющие соответственно 36,36 % и 38,38 % для обработки базовым и внедряемым инструментами. Поэтому уменьшить суммарные затраты на обработку одной детали С можно, прежде всего, за счет уменьшения этой статьи затрат,

которая прямо пропорционально связана с временем обработки детали. Следовательно, чем меньше время обработки детали и, соответственно, больше производительность обработки, тем меньше затраты на заработную плату рабочего $C_{з/п}$. Исходя из этого, производительность обработки необходимо увеличивать до максимально возможного значения, определяемого режущими свойствами инструмента. В работе [31] приведена аналитическая зависимость для определения себестоимости обработки с учетом двух статей затрат: на заработную плату рабочего $C_{з/п}$ и инструмент $C_{инстр}$:

$$C = \frac{1}{S^{1-\frac{p}{m_1}} \cdot t^{1-\frac{q}{m_1}}} \cdot \left[\frac{\alpha_2 \cdot (m_1 - 1)}{\alpha_1}\right]^{\frac{1}{m_1}} \cdot \alpha_1 \cdot \left[\frac{1}{z} + \frac{z^{m_1-1}}{(m_1 - 1)}\right], \qquad (4.7)$$

где $\alpha_1 = N \cdot \vartheta \cdot S_{час} \cdot k$;

$\alpha_2 = N \cdot \frac{\vartheta \cdot Ц}{C_4}$;

ϑ – объем металла, снимаемого с одной детали, м^3;

S – подача, м/об;

t – глубина резания, м;

C_4, m_1, q, p – постоянные, характеризующие стойкость инструмента, для определенных условий обработки ($m_1 > p > q$; $m_1 > 1$);

$z = Q / Q_{экстр}$;

$Q = V \cdot t \cdot S$ – производительность обработки (при продольном точении), м^3/с;

V – скорость резания, м/с;

$Q_{экстр}$ − производительность обработки, соответствующая точке минимума себестоимости обработки C.

Установлено, что с увеличением производительности обработки Q (или $z = Q/Q_{экстр}$) относительная себестоимость обработки $\overline{C} = C / C_{min}$ изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума (рис. 4.13), где C_{min} – минимальное значение себестоимости обработки. Экстремальность зависимости $C - z$ обусловлена тем, что первое слагаемое (определяющее $C_{з/п}$) уменьшается с увеличением z, а второе (определяющее $C_{инстр}$), наоборот, увеличивается (рис. 4.13).

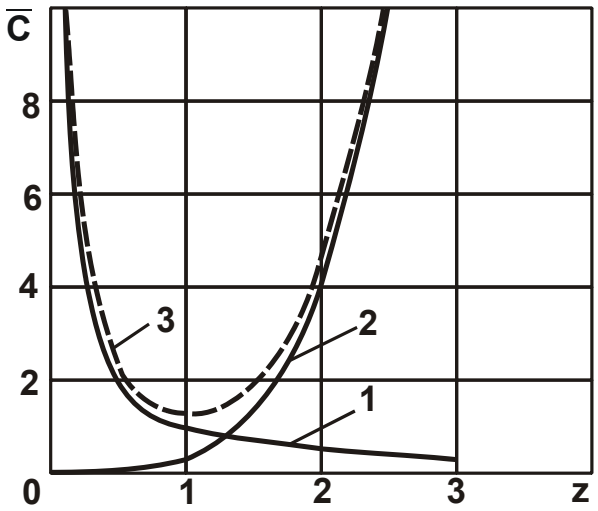


Рис. 4.13. Характер изменения относительных затрат на заработную плату рабочего (1), относительных затрат на инструмент (2) относительной себестоимости обработки $\overline{C}$ (3) для m_1=5

Минимальное значение C_{min} определяется из условия $z=1$ зависимостью [31]:

$$C = \frac{1}{S^{1-\frac{p}{m_1}} \cdot t^{1-\frac{q}{m_1}}} \cdot \left[\frac{\alpha_2 \cdot (m_1 - 1)}{\alpha_1}\right]^{\frac{1}{m_1}} \cdot \alpha_1 \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)}\right]. \qquad (4.8)$$

В точке минимума себестоимости обработки отношение затрат $C_{з/п} / C_{инстр} = (m_1 - 1)$.

Согласно экспериментальным данным, при обработке традиционными твердосплавными и быстрорежущими инструментами $m_1 = 5 \ldots 8$, а при обработке твердосплавными инструментами с износостойкими покрытиями зарубежного производства $1 < m_1 < 4$. Следовательно, в точке минимума себестоимости обработки отношение затрат $C_{з/п} / C_{инстр}$ соответственно равно 4 … 7 и $0 < C_{з/п} / C_{инстр} < 3$.

Исходя из табл. 4.6, отношение затрат $C_{з/п} / C_{инстр}$ для варианта 1 (базового) равно 17, а для варианта 2 (внедряемого) равно 38. Это указывает на то, что имеет место значительное недоиспользование возможностей инструментов с точки зрения производительности обработки, поскольку себестоимость обработки значительно больше минимального значения. В связи с этим, производительность обработки необходимо увеличивать за счет увеличения скорости резания V до

значения, при котором себестоимость обработки уменьшится до точки минимума, т.е. когда отношение затрат $C_{з/п}/C_{инстр}$ примет указанные выше значения.

Подтверждением правильности сделанного вывода могут служить экспериментальные данные, полученные при исследовании операции фрезерования деталей из стали Х2ГСНВМ-ВД [31], согласно которым отношение затрат $C_{з/п}/C_{инстр}$ равно 4,5 (при обработке монолитной фрезой $\varnothing 40$ мм из быстрорежущей стали Р18) и 3,5 (при обработке сборной фрезой $\varnothing 42$ мм с пластинами из твердого сплава TT9030 с износостойким покрытием производства Южно-Корейской фирмы TaeguTec). В этом случае обработка производится с режимами резания, приближающимися к оптимальным режимам резания, полученным из условия минимума себестоимости обработки. Таким образом, в работе предложен новый достаточно простой подход к определению оптимальных условий лезвийной обработки на основе заданного отношения затрат $C_{з/п}/C_{инстр}$.

Для сравнения в табл. 4.7 приведены суммарные затраты (технологическая себестоимость) $C = C_{инстр} + C_{оборуд} + C_{з/п} + П_{расх}$ на обработку одной детали, установленные экспериментально при выполнении операции фрезерования деталей из стали 45 традиционным (базовым) инструментом и внедряемым инструментом фирмы Tungaloy с применением оптимальных режимов резания. Соответственно, скорость резания $V = 100{,}48$ и 200,96 м/мин; обороты шпинделя $n = 1000$ и 2000 об/мин; количество зубьев фрезы: 4 и 3; подача на зуб $S_z =$ 0,1 и 0,3 мм/зуб; подача на оборот $S_0 =$ 0,4 и 0,9 мм/об.; подача $S_{мин} =$ 400 и 1800 мм/мин; глубина резания t : 4 и 6 мм; ширина резания B : 60 мм; количество проходов: 3 и 2; диаметр фрезы D = 32 мм.

В отличие от операции точения (табл. 4.6), на операции фрезерования трудоемкость обработки T и суммарные затраты (технологическая себестоимость) C значительно больше. Однако, как и на операции точения, на операции фрезерования применение внедряемого инструмента приводит к уменьшению в 2 раза трудоемкости обработки T и суммарных затрат (технологической себестоимости) C в 1,77 раз по сравнению с традиционно применяемым (базовым) фрезерным инструментом.

Таблица 4.7

Расчет суммарных затрат (технологической себестоимости) С на выполнение операции фрезерования

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов, %	
				базовый	внедряемый
Трудоемкость обработки Т	час.	0,37	0,16		
Затраты на инструмент $С_{инстр}$	грн.	5,64	2,24	5,69	4,0
Затраты на оборудование $С_{оборуд}$	грн.	27,18	13,26	27,44	23,73
Затраты на заработную плату $С_{з/п}$	грн.	29,18	17,81	29,46	31,85
Прочие расходы $П_{расх}$	грн.	37,05	22,6	37,41	40,42
Суммарные затраты (технологическая себестоимость) С	грн.	99,05	55,91	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн.		43,14		

Затраты на инструмент $С_{инстр}$ и на оборудование $С_{оборуд}$ при обработке внедряемым инструментом также меньше, чем при обработке базовым фрезерным инструментом. В результате достигнута экономия затрат на одну деталь в размере 43,14 грн, что составляет 43,55 %. Как и на операции точения, основной эффект фрезерования – уменьшение суммарных затрат (технологической себестоимости) С – достигается за счет уменьшения затрат на заработную плату рабочего $С_{з/п}$, т.е. за счет увеличения производительности обработки на основе применения инструментов, обладающих высокой режущей способностью.

Исходя из табл. 4.7, отношение затрат $С_{з/п}/С_{инстр}$ для варианта 1 (базового) равно 5,17, а для варианта 2 (внедряемого) равно 7,95. Следовательно, в отличие от операции точения (табл. 4.6), на операции фрезерования отношение затрат $С_{з/п}/С_{инстр}$ значительно меньше и приближается к значениям, соответствующим минимуму себестоимости обработки (рис. 4.13). Поэтому в этом случае максимально используются режущие возможности инструментов.

Для сравнения в табл. 4.8 также приведены суммарные затраты $C = C_{инстр} + C_{оборуд} + C_{з/п} + П_{расх}$ на обработку одной детали при выполнении операции сверления отверстий в деталях из стали 45 традиционным инструментом (базовым) и внедряемым инструментом с применением оптимальных режимов резания. Диаметр сверла D = 16,5 мм; $V = 181{,}34$ м/мин; $n = 3500$ об./мин; $S_0 = 0{,}14$ мм/об.; $S_{мин} = 500$ мм/мин; количество проходов – 1; суммарное линейное перемещение инструмента – 30 мм.

Таблица 4.8

Расчет суммарных затрат C на выполнение операции сверления

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов,%	
				базовый	внедряемый
Трудоемкость обработки T	час.	0,18	0,18		
Затраты на инструмент $C_{инстр}$	грн.	0,98	4,16	0,87	3,44
Затраты на оборудование $C_{оборуд}$	грн	7,38	7,73	6,57	6,4
Затраты на заработную плату $C_{з/п}$	грн	18,20	19,05	16,19	15,77
Прочие расходы $П_{расх}$	грн	85,85	89,86	76,37	74,39
Суммарные затраты (технологическая себестоимость) C	грн	112,41	120,80	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн		8,39		7,46

Как и на операциях точения и фрезерования, на операции сверления трудоемкость обработки T меньше при использовании внедряемого инструмента. Однако снижение трудоемкости и, соответственно, повышение производительности обработки незначительно, тогда как суммарные затраты значительно больше, чем на операциях точения и фрезерования. Это связано, прежде всего, со значительным увеличением прочих расходов $П_{расх}$.

Из переменных статей затрат наибольшими являются затраты на заработную плату рабочего $C_{з/п}$.

Отношение затрат $C_{з/п}/C_{инстр}$ в данном случае для варианта 1 (базового) равно 18,6, а для варианта 2 (внедряемого) равно 4,58. Это указывает на то, что внедряемый инструмент позволяет максимально использовать режущие свойства, в результате чего себестоимость обработки приближается к минимальному значению (рис. 4.13). Уменьшение отношения затрат $C_{з/п}/C_{инстр}$ при обработке внедряемым инструментом предопределяет более высокие значения затрат на инструмент $C_{инстр}$, которые согласно табл. 4.8, составляют 4,16 грн или 3,44 %. Вместе с тем, на операции сверления экономия затрат на 1 деталь меньше, чем на операциях точения и фрезерования и составляет всего 8,39 грн или 7,46 %.

4.4. Повышение эффективности высокоскоростной обработки на основе температурного фактора

Тепловой процесс, возникающий при лезвийной обработке, определяет качество и производительность, стойкость режущего инструмента и другие технологические параметры обработки. Поэтому его изучению в научно-технической литературе уделяется большое внимание. Однако и до настоящего времени недостаточно раскрыты закономерности формирования температуры резания и распределения тепла в зоне обработки, например, с увеличением скорости резания и переходом в область высокоскоростной обработки. Это ограничивает возможности научно обоснованного выбора оптимальных условий высокоскоростной обработки, особенно при использовании современных сборных твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства, обладающих повышенной теплостойкостью. В связи с этим поставлена задача теоретического определения основных закономерностей формирования температуры резания при лезвийной обработке в условиях высокоскоростного резания с целью повышения качества и производительности обработки.

В работах [29; 121; 152; 196] приведены аналитические решения определения температуры резания и других параметров теплового процесса при механической обработке материалов с использованием классического дифференциального уравнения теплопроводности, ко-

торые положены в основу создания теории резания материалов. Однако в силу сложности выполнения расчетов, их практическое применение для решения конкретных технологических задач не всегда возможно. Это требует разработки новых упрощенных теоретических подходов, позволяющих достаточно просто аналитически оценить тепловой баланс при резании материалов и определить влияние различных технологических факторов на изменение температуры резания, глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали и других параметров теплового процесса.

Основной особенностью высокоскоростной обработки является то, что выделяющееся при резании тепло концентрируется главным образом в образующейся стружке, а в обрабатываемую деталь и режущий инструмент уходит небольшая часть тепла. Это позволяет повысить качество и производительность обработки вследствие снижения температуры в поверхностном слое обрабатываемой детали.

Температура резания определяется силой резания P, возникающей в процессе стружкообразования:

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2} = \frac{P_z}{\sin 2\beta}, \qquad (4.9)$$

где P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;

$P_y = P_z / K_{рез}$;

$K_{рез} = tg2\beta$ – коэффициент резания [162];

β – условный угол сдвига обрабатываемого материала в градусах.

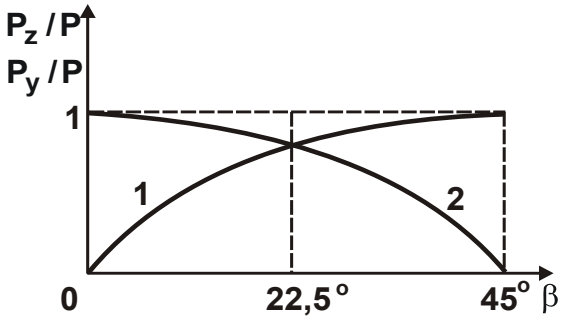


Рис. 4.14. Характер изменения отношений P_z / P (1) и P_y / P (2)

Из зависимости (4.9) вытекает отношение $P_z / P = \sin 2\beta$ и, соответственно, отношение $P_y / P = \cos 2\beta$. Следовательно, отношение P_z / P с увеличением угла β увеличивается по закону $\sin 2\beta$, принимая максимальное значение, равное единице, при условии $\beta = 45^0$ (рис. 4.14). Отношение P_y / P, наоборот, с увеличением угла β уменьшается по закону $\cos 2\beta$, принимая нулевое значе-

ние при условии $\beta = 45^0$. При выполнении условия $\sin 2\beta = \cos 2\beta$, т.е. при угле $\beta = 22{,}5^0$, отношения P_z / P и P_y / P равны между собой. Следовательно, во всем возможном диапазоне изменения угла $\beta = 0 \ldots 45^0$ силу резания P необходимо рассматривать с учетом двух ее составляющих P_z и P_y. Тогда работа резания A может быть представлена уравнением:

$$A = P_z \cdot V \cdot \tau + P_y \cdot V_{стр} \cdot \tau, \qquad (4.10)$$

где $P_z = \sigma \cdot S$;

σ – условное напряжение резания, Н/м^2;

S – площадь поперечного сечения среза, м^2;

V, $V_{стр}$ – скорость резания и скорость схода стружки с передней поверхности инструмента, м/с;

τ – время обработки, с.

Определить скорость $V_{стр}$ можно из условия сплошности обрабатываемого материала в зоне стружкообразования при резании, т.е. из условия перехода от сплошного материала к стружке: $a \cdot в \cdot V = a_{стр} \cdot в \cdot V_{стр}$, где a, $в$ – толщина и ширина среза, м; $a_{стр}$ – толщина стружки, м. Тогда $V_{стр} = V \cdot a / a_{стр} = V / K_L$, где $K_L = a_{стр} / a$ – коэффициент усадки стружки.

После преобразований уравнение (4.10) принимает вид:

$$A = \frac{\sigma \cdot S \cdot V \cdot \tau}{c \cdot \rho} \cdot \left(1 + \frac{1}{K_L \cdot K_{рез}}\right). \qquad (4.11)$$

Учитывая, что все выделяющееся при резании тепло уходит в образующуюся стружку, работа резания A определяется:

$$A = c \cdot m \cdot \theta, \qquad (4.12)$$

где c − удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);

$m = \rho \cdot \vartheta = \rho \cdot S \cdot l$ – масса образующейся стружки, кг;

ρ − плотность обрабатываемого материала, кг/м^3;

$\vartheta = S \cdot l$ – объем снятого материала, м^3;

$l = V \cdot \tau$ – длина среза, м;

θ – температура резания, К.

С физической точки зрения температура резания θ в данном случае определяет максимально возможную температуру резания в связи

с тем, что все выделяющееся при резании тепло уходит на нагрев лишь стружки. С учетом тепла, уходящего дополнительно в обрабатываемую деталь и режущий инструмент, температура резания будет меньше. Сравнивая зависимости (4.11) и (4.12), имеем:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \left(1 + \frac{1}{K_L \cdot K_{рез}}\right). \qquad (4.13)$$

На основании известной формулы профессора Тиме А. Н. $tg\beta = \cos\gamma / (K_L - \sin\gamma)$, определяется коэффициент усадки стружки $K_L = \cos\gamma / tg\beta + \sin\gamma$, где γ – положительный передний угол инструмента. Тогда с учетом преобразования $K_{рез} = tg2\beta = 2tg\beta / \left(1 - tg^2\beta\right)$ зависимость (4.13) примет вид:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \left[1 + \frac{\left(1 - tg^2\beta\right)}{2 \cdot (\cos\gamma + \sin\gamma \cdot tg\beta)}\right]. \qquad (4.14)$$

Для обеспечения высококачественной обработки, исключающей образование на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов, максимально возможная температура резания θ должна принимать значения, которые меньше критического значения. Это достигается за счет уменьшения условного напряжения резания σ (энергоемкости обработки) [164; 169; 176], которое оказывает наибольшее влияние на θ. Передний угол инструмента γ неоднозначно влияет на максимально возможную температуру резания θ, поскольку входит в зависимость (4.14) тригонометрическими функциями $\cos\gamma$ и $\sin\gamma$. Однако угол γ изменяется незначительно и поэтому непосредственно не оказывает существенного влияния на максимально возможную температуру резания θ: он влияет на θ главным образом за счет изменения условного угла сдвига обрабатываемого материала β.

Как следует из зависимости (4.14), с увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала β максимально возможная температура резания θ уменьшается. Это связано с уменьшением силовой напряженности процесса резания.

Согласно известной формулы профессора Зворыкина К. А., увеличение условного угла сдвига обрабатываемого материала $\beta = 45^0 + (\gamma - \psi)/2$ предполагает увеличение положительного переднего

угла инструмента γ и уменьшение условного угла трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ψ (соответственно, $\mathrm{tg}\psi = \mathrm{f}$ – коэффициента трения). Поэтому для уменьшения максимально возможной температуры резания θ необходимо применять эффективные технологические среды; износостойкие инструментальные материалы, обеспечивающие высокую остроту режущей кромки инструмента; наносить на рабочие поверхности инструмента износостойкие покрытия и т.д.

При нулевом переднем угле инструмента ($\gamma = 0^0$) зависимость (4.14) упростится и примет вид:

$$\theta = \frac{\sigma}{\mathrm{c} \cdot \rho} \cdot \left(1 + \mathrm{f} \cdot \mathrm{tg}\beta\right). \qquad (4.15)$$

Очевидно, второе слагаемое меньше первого слагаемого, т.е. максимально возможная температура резания θ определяется в основном действием тангенциальной составляющей силы резания $\mathrm{P_z}$.

Условное напряжение резания σ можно представить в виде [162]: $\sigma = \sigma_{\text{сж}} / \mathrm{tg}\beta$, где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м^2. Тогда зависимость (4.15) выразится:

$$\theta = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\mathrm{c} \cdot \rho} \cdot \left(\mathrm{ctg}\beta + \mathrm{f}\right). \qquad (4.16)$$

Из зависимости (4.16) вытекает, что основными условиями уменьшения максимально возможной температуры резания θ следует рассматривать увеличение условного угла сдвига обрабатываемого материала β и уменьшение коэффициента трения f.

Как известно, увеличить условный угол сдвига обрабатываемого материала β и уменьшить коэффициент трения f, а также одновременно уменьшить поступление образующегося при резании тепла в обрабатываемую деталь можно увеличением скорости резания V. В результате с увеличением скорости резания V (после превышения определенного значения) фактически все образующееся при резании тепло будет уходить в стружку, и максимально возможная температура резания θ будет определяться зависимостью (4.16). Несомненно, это приведет к существенному уменьшению тепла, уходящего в обрабатываемую деталь. Очевидно, реализация максимально возможной температуры резания θ будет отрицательно сказываться на работоспособности ин-

струмента в связи с уменьшением его стойкости, однако увеличение скорости резания V позволит повысить качество и производительность обработки в результате существенного уменьшения глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали [148]: $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{h}{V}}$, где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; h – длина зоны стружкообразования при резании, м.

Исходя из сказанного, основным условием осуществления высокоскоростной обработки следует рассматривать условия уменьшения условного напряжения резания σ и увеличения скорости резания V с целью достижению максимально возможной температуры резания θ и перевода всего выделяющегося при резании тепла в образующуюся стружку, существенно уменьшая тепло, уходящее в обрабатываемую деталь и режущий инструмент. Подтверждением тому являются результаты экспериментальных исследований (рис. 4.15 [138]).

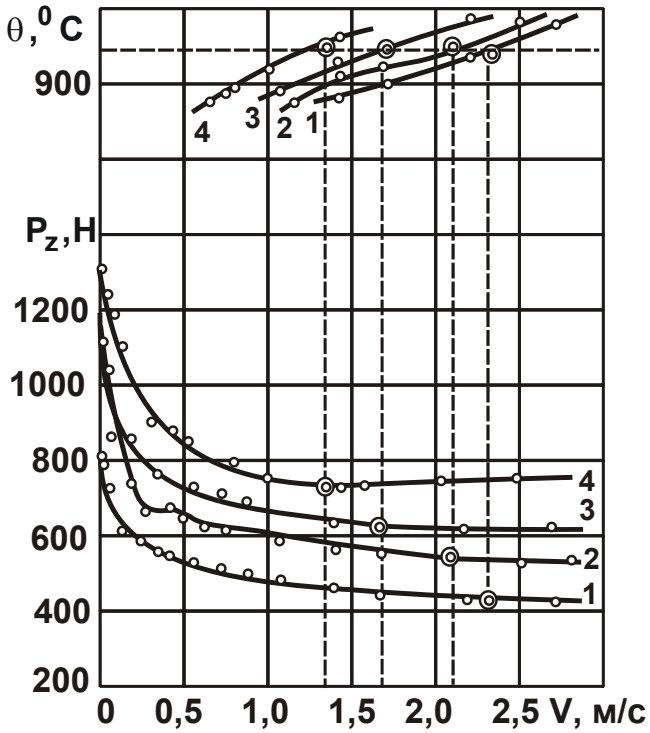


Рис. 4.15. Температурно-силовые зависимости при обработке стали ХН30ВМТ резцами из твердого сплава ВК8:
V = 0,014 … 2,72 м/с; $t = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $\varphi = 45^0$; $\varphi_1 = 45^0$; $\gamma = 12^0$; $\alpha = 12^0$; $r = 1 \cdot 10^{-3}$ м) для различных значений подачи: 1 – $s = 0{,}15 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $s = 0{,}195 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $s = 0{,}26 \cdot 10^{-3}$ м; 4 – $s = 0{,}34 \cdot 10^{-3}$ м [138]

Как следует из рис. 4.15, с увеличением скорости резания V тангенциальная P_z составляющая силы резания первоначально уменьшается, затем остается постоянной, а температура резания θ непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимально возможному значению, определяемому зависимостью (4.16). Чем больше подача S (при точении), тем меньше условное напряжение резания $\sigma = P_z/(S \cdot t)$, где t – глубина резания (м) и, соответственно, меньше максимально возможная температура резания θ, определяемая зависимостью (4.16).

Данная закономерность обусловлена тем, что, согласно зависимостям [148]: $\beta = \sqrt[3]{\frac{a}{R} \cdot \frac{\tau_{сдв}}{4 \cdot HV}}$ и $\sigma = 3{,}2 \cdot \sqrt[3]{\frac{R}{a} \cdot HV \cdot \tau_{сдв}^2}$, условный угол сдвига обрабатываемого материала β увеличивается, а условное напряжение резания σ уменьшается с увеличением отношения толщины среза a к радиусу округления лезвия инструмента R (где $\tau_{сдв}$, HV – предел прочности на сдвиг и твердость обрабатываемого материала, Н/м^2).

Выполненные расчеты параметров $\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{tg\beta}$ и $\theta = \frac{\sigma_{сж}}{c \cdot \rho} \cdot (ctg\beta + f)$, на основе экспериментально установленных значений P_z [138], показали, что расчетные значения условного напряжения резания σ больше $\sigma_{сж}$, а расчетные значения θ больше экспериментально установленных значений температуры резания. Это указывает на то, что в рассматриваемом случае резание осуществлялось со скоростью резания меньше предельной, при которой справедлива зависимость (4.16). Следовательно, в этом случае не все выделяющееся при резании тепло уходит в образующуюся стружку, значительная часть тепла уходит также в обрабатываемую деталь и режущий инструмент.

Установлено, что применение современных импортных сборных режущих лезвийных твердосплавных и керамических инструментов с износостойкими покрытиями, согласно зависимости (4.16), позволяет уменьшить максимально возможную температуру резания θ и, соответственно, обеспечить перевод основной части выделяющегося при резании тепла в образующуюся стружку. В обрабатываемую деталь и режущий инструмент будет уходить лишь небольшая часть тепла. Кроме того, в этом случае имеет место повышение стойкости режущего ин-

струмента по сравнению с традиционно применяемыми твердосплавными и быстрорежущими лезвийными инструментами отечественного производства. Это открывает новые технологические возможности осуществления высокоскоростной обработки с большими скоростями резания V и небольшими значениями условного напряжения резания σ.

4.5. Теплонапряженность процесса шлифования

Как известно, процесс шлифования характеризуется более высокой теплонапряженностью, чем процессы резания лезвийными инструментами, что приводит к снижению качества обработки – появлению на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. Для уменьшения теплонапряженности процесса применяют шлифовальные круги, характеризующиеся высокой режущей способностью, эффективные технологические среды с целью снижения интенсивности трения в зоне резания и т.д. [29; 121; 138; 140; 170; 196]. Вместе с тем, добиться необходимого уменьшения теплонапряженности процесса шлифования и, соответственно, температуры резания удается не всегда. Поэтому важно знать закономерности процесса шлифования, связанные с уменьшением температуры резания, что требует разработки математической модели формирования температуры резания при шлифовании с учетом распределения тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки [196]. Такой теоретический подход, в отличие от известных подходов, основанных, как правило, на экспериментальном установлении долей тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки, позволит более объективно оценить технологические возможности уменьшения температуры резания при шлифовании и разработать рекомендации по их практической реализации.

В расчетной схеме (рис. 4.16) снимаемый припуск с обрабатываемой детали представлен в виде бесконечного множества адиабатических стержней длиной $l_1 + l_2$ и площадью поперечного сечения S, расположенных по нормали к обрабатываемой поверхности [192; 148; 196]. При глубинном шлифовании необходимо учитывать перерезание шлифовальным кругом части адиабатического стержня (длиной $l_1 = t$) со скоростью:

$$V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}, \qquad (4.17)$$

где $V_{дет}$ – скорость детали, м/с;

t – глубина шлифования, м;

$D_{кр}$ – диаметр круга, м;

l_2 – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м [96].

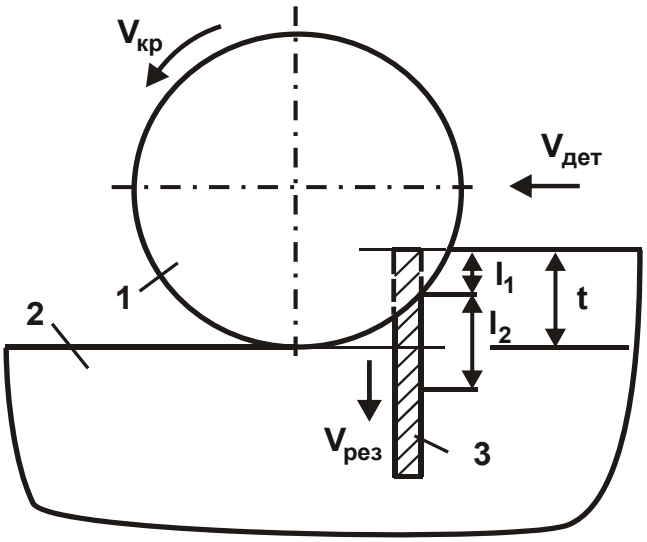


Рис. 4.16. Расчетная схема температуры резания при плоском глубинном шлифовании: 1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатический стержень

Это эквивалентно перемещению теплового источника по нормали к обрабатываемой поверхности (т.е. вдоль адиабатического стержня) со скоростью $V_{рез}$.

Количество тепла Q_1, затрачиваемое на нагревание адиабатического стержня длиной $l_1 + l_2$, равно

$$Q_1 = c \cdot \rho \cdot S \cdot t \cdot \theta + 0{,}5 \cdot c \cdot \rho \cdot S \cdot l_2 \cdot \theta. \qquad (4.18)$$

Коэффициент 0,5 учитывает неравномерность нагрева нижней части адиабатического стержня по длине l_2.

Количество тепла Q_2, затрачиваемое на нагревание части адиабатического стержня длиной l_2 вследствие теплопроводности обрабатываемого материала, выражается:

$$Q_2 = \lambda \cdot S \cdot \frac{\theta}{l_2} \cdot \tau_2, \qquad (4.19)$$

где τ_2 – время действия теплового источника при нагревании части адиабатического стержня длиной l_2, с.

Количество тепла Q_2 также выражается зависимостью $Q_2 = q \cdot S \cdot \tau_2$. Тогда, разрешая зависимость (4.19) относительно длины l_2, имеем:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \theta}{q}, \qquad (4.20)$$

где $q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{F} = \frac{\sigma \cdot Q}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}}$ – плотность теплового потока, Вт/м^2;

$P_z = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}}$ – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

$Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ – производительность обработки, м^3/с;

$V_{кр}$ – скорость круга, м/с;

$F = B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}$ – площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемым материалом, м^2;

B – ширина шлифования, м;

$D_{кр}$ – диаметр круга, м.

Принимая $Q_1 = q \cdot S \cdot \tau_1$ и подставляя зависимость (4.20) в (4.18), получено квадратное уравнение относительно температуры резания при шлифовании θ:

$$\theta^2 + \frac{2 \cdot q \cdot t}{\lambda} \cdot \theta - \frac{2 \cdot q^2 \cdot \tau_1}{\lambda \cdot c \cdot \rho} = 0 \ , \qquad (4.21)$$

где $\tau_1 = t / V_{рез}$ – время контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем, равное времени его перерезания кругом, с.

Решение квадратного уравнения:

$$\theta = \frac{2 \cdot q}{c \cdot \rho \cdot V_{дет}} \cdot \sqrt{\frac{D_{кр}}{t}} \cdot \frac{1}{\left[\sqrt{1 + \frac{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{D_{кр}}}{c \cdot \rho \cdot V_{дет} \cdot t^{1,5}}} + 1\right]}. \qquad (4.22)$$

С учетом выражения $q = \frac{\sigma \cdot Q}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}}$ температура резания при шлифовании θ, описываемая зависимостью (4.22), принимает вид:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{2}{\left[\sqrt{1 + \frac{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{D_{кр}}}{c \cdot \rho \cdot V_{дет} \cdot t^{1,5}}} + 1\right]}. \qquad (4.23)$$

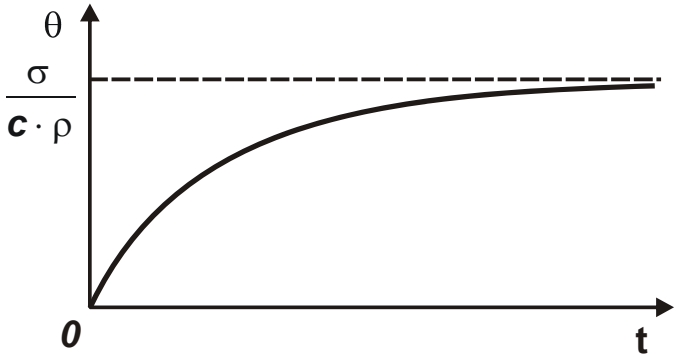


Рис. 4.17. Общий вид зависимости температуры резания θ от глубины шлифования t

Как видно, температура резания при шлифовании θ с увеличением скорости детали $V_{дет}$ и глубины шлифования t непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению $\sigma/(c \cdot \rho)$, рис. 4.17, определяемому температурой нагревания части адиабатического стержня длиной t. В этом случае все тепло, выделяющееся в процессе шлифования, уходит в образующиеся стружки. Это идеальный случай шлифования с точки зрения обеспечения высококачественной обработки, поскольку в поверхностный слой обрабатываемой детали фактически не будет уходить выделяющееся при шлифовании тепло, которое, как правило, приводит к образованию температурных дефектов на обрабатываемой поверхности. Однако выполнить это условие при шлифовании сложно вследствие относительно небольших диапазонов изменения параметров режима резания $V_{дет}$ и t. Это условие выполнимо при высокоскоростной обработке лезвийными инструментами. Собственно этим и определяется эффективность практического использования высокоскоростной обработки, которая широко применяется на финишных операциях, например, взамен операции шлифования, для обеспечения высокого качества обработки (исключения образования на обрабатываемых поверхностях температурных дефектов).

Зависимость (4.23) можно выразить через производительность обработки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t = const$:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{2}{\left[\sqrt{1 + \frac{2 \cdot B \cdot \lambda \cdot \sqrt{D_{кр}}}{c \cdot \rho \cdot Q \cdot t^{0,5}}} + 1\right]}. \qquad (4.24)$$

Очевидно, при заданном значении производительности обработки Q эффективно уменьшать глубину шлифования t с точки зрения уменьшения температуры резания при шлифовании θ. Однако глубина шлифования t незначительно влияет на θ, поэтому фактически с одинаковой эффективностью шлифование можно осуществлять по многопроходной и глубинной схемам.

Наибольшее влияние на температуру резания при шлифовании θ оказывает условное напряжение резания (энергоемкость обработки) σ: чем меньше σ, тем меньше θ. Уменьшить условное напряжение резания (энергоемкость обработки) можно за счет повышения режущей способности шлифовального круга и снижения интенсивности трения в зоне резания.

В работе [46] установлено, что при шлифовании σ описывается аналитической зависимостью:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\text{tg}\left[45^0 - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right]}, \qquad (4.25)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м^2;

ψ – условный угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом;

γ – отрицательный передний угол режущего зерна.

Как видно, уменьшить условное напряжение резания (энергоемкость обработки) σ можно уменьшением углов ψ и γ, т.е. уменьшением интенсивности трения режущего зерна с обрабатываемым материалом и повышением остроты режущего зерна.

Необходимо отметить, что аналитическая зависимость (4.25) получена без учета трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом, которая по мере износа и затупления зерен и в целом круга, как правило, определяет интенсивность трения в зоне шлифования и, соответственно, температуру резания при шлифовании θ. Однако аналитически установить эту составляющую трения сложно, она может быть определена лишь экспериментально для конкретных условий шлифования. Поэтому при анализе силовой и тепловой напряженностей процесса шлифования можно ограничиться первоначально рассмотрением лишь интенсивности трения режущего зерна с обрабатываемым материалом, которое углом ψ учтено в зависимости (4.25).

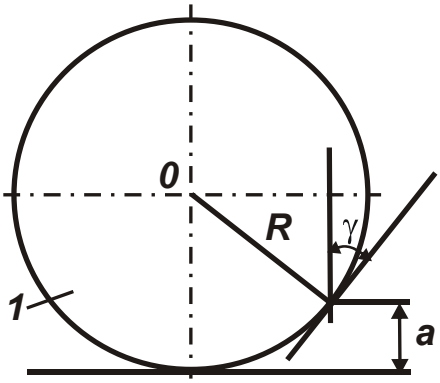


Рис. 4.18. Расчетная схема параметров процесса микрорезания единичным зерном 1

Если рассматривать режущее зерно в форме сферы (рис. 4.18), то отрицательный передний угол режущего зерна γ определяется:

$$\sin\gamma = 1 - \frac{a}{R}, \qquad (4.26)$$

где a – толщина среза, м;

R – радиус режущего зерна, м.

С увеличением отношения a/R угол γ уменьшается, что приводит к уменьшению условного напряжения резания (энергоемкости обработки) σ и повышению эффективности процесса стружкообразования при резании. В результате уменьшается силовая и тепловая напряженности процесса шлифования.

В табл. 4.9 приведены расчетные значения угла γ и отношения $\sigma/\sigma_{сж}$, полученные на основе использования зависимостей (4.26) и (4.25), с увеличением отношения a/R.

Таблица 4.9

Расчетные значения угла γ и отношения $\sigma/\sigma_{сж}$

a/R	0	0,1	0,2	0,3	0,5
γ, ^{0}	90	65	54	45	30
$\sigma/\sigma_{сж}$ для ψ=0	∞	4,54	3,08	2,44	1,75
$\sigma/\sigma_{сж}$ для ψ=10^0	–	7,4	4,34	3,12	2,14
$\sigma/\sigma_{сж}$ для ψ=20^0	–	25	7,14	4,54	2,75

Как видно, с увеличением отношения a/R отношение $\sigma/\sigma_{сж}$ уменьшается, принимая значения, большие единицы. С увеличением условного угла трения ψ режущего зерна с обрабатываемым материалом отношение $\sigma/\sigma_{сж}$ увеличивается. Следовательно, учет трения режущего зерна с обрабатываемым материалом приводит к значительному увеличению отношения $\sigma/\sigma_{сж}$, а учет трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом приведет к еще большим значениям отношения $\sigma/\sigma_{сж}$, что согласуется с практикой шлифования [67].

Для упрощения расчетов и удобства использования зависимости (4.25), она может быть преобразована к виду [105]:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\left(\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} - tg\frac{\psi}{2}\right)}. \qquad (4.27)$$

В табл. 4.10 приведены расчетные значения отношения $\sigma / \sigma_{сж}$, полученные на основе использования зависимости (4.27), с увеличением отношения a/R.

Таблица 4.10

Расчетные значения отношения $\sigma / \sigma_{сж}$

a/R	0	0,1	0,2	0,3	0,5
$\sigma / \sigma_{сж}$ для ψ =0	∞	4,54	3,125	2,56	2,0
$\sigma / \sigma_{сж}$ для ψ =10^0	–	7,35	4,37	3,33	2,42
$\sigma / \sigma_{сж}$ для ψ =20^0	–	22,73	6,94	4,67	3,09

Сравнение расчетных значений отношения $\sigma / \sigma_{сж}$, приведенных в табл. 4.9 и табл. 4.10, показывает на их незначительное расхождение (в пределах 8 %), что указывает на правильность преобразованной зависимости (4.27). При этом расчеты отношения $\sigma / \sigma_{сж}$ необходимо производить обязательно с учетом условного угла трения ψ режущего зерна с обрабатываемым материалом, который оказывает значительное влияние на отношение $\sigma / \sigma_{сж}$.

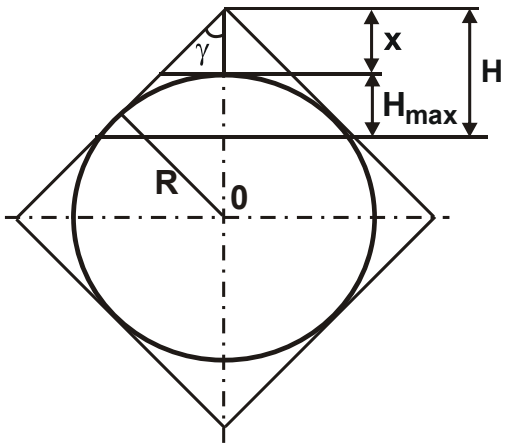


Рис. 4.19. Расчетная схема параметров процесса шлифования

Приведенные расчетные значения отношения $\sigma / \sigma_{сж}$ справедливы при микрорезании единичным зерном. Для анализа условного напряжения резания (энергоемкости обработки) σ и отношения $\sigma / \sigma_{сж}$ при алмазном шлифовании в качестве параметра а следует рассматривать максимальную вероятностную (приведенную) толщину среза H_{max}, которая для формы зерна, показанной на рис. 4.19, определяется зависимостью [162]:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \overline{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho} \cdot (1-\eta)^2}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot (1+\eta)}}, \qquad (4.28)$$

где $\overline{X}$ – зернистость круга, м;

m – объемная концентрация зерен в круге;

$\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дет}$;

$R_{кр}$, $R_{дет}$ – радиусы круга и детали, м;

$\eta = x/H$ – безразмерный коэффициент, определяющий степень затупления зерна (для острозаточенного зерна $\eta = 0$, для затупленного зерна $\eta \to 1$);

x – величина линейного износа зерна, м;

H – максимальная условная глубина внедрения зерна в обрабатываемый материал, отсчитывается от вершины исходного неизношенного максимально выступающего над уровнем связки зерна, м.

Если рассматривать режущее зерно в форме сферы радиусом R, то следует в зависимости (4.27) безразмерный коэффициент η выразить через радиус R. Для этого из условия $\frac{R}{R+x} = \sin\gamma$ определяется величина $x = \frac{R}{\sin\gamma} - R$, которая в данном случае равна расстоянию от вершины квадрата до вписанной окружности радиусом R. Для условия $\gamma = 45^0$ имеем $x = 0{,}414 \cdot R$. Из условий $H = \frac{x}{\eta}$ и $H = x + H_{max}$ определяется $H_{max} = 0{,}414 \cdot R \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)$. Откуда $\frac{H_{max}}{R} = 0{,}414 \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)$ или

$$\eta = \frac{1}{\left(1 + 2{,}415 \cdot \frac{H_{max}}{R}\right)}. \qquad (4.29)$$

В табл. 4.11 приведены рассчитанные по зависимости (4.29) значения безразмерного коэффициента η.

Таблица 4.11

Расчетные значения безразмерного коэффициента η

H_{max}/R	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6
η	1	0,8	0,674	0,58	0,45	0,41

Как видно, с увеличением отношения H_{max}/R безразмерный коэффициент η уменьшается, принимая значения, меньше единицы. Согласно известным экспериментальным данным профессоров Крагельского И. В. и Богомолова Н. И., при $H_{max}/R<0{,}2$ (соответственно, при $0{,}7<\eta<1$) имеет место процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала без образования стружки, а при $H_{max}/R>0{,}2$ (соответственно, при $\eta<0{,}7$) – процесс стружкообразования при резании.

С учетом зависимости (4.29) отношение $\frac{(1-\eta)^2}{(1+\eta)}$, входящее в зависимость (4.28), принимает вид:

$$\frac{(1-\eta)^2}{(1+\eta)}=\frac{5{,}83\cdot\left(\frac{H_{max}}{R}\right)^2}{\left(1+2{,}415\cdot\frac{H_{max}}{R}\right)\cdot\left(2+2{,}415\cdot\frac{H_{max}}{R}\right)}. \qquad (4.30)$$

При условии $H_{max}/R<1$ зависимость (4.30) можно упростить:

$$\frac{(1-\eta)^2}{(1+\eta)}=2{,}915\cdot\left(\frac{H_{max}}{R}\right)^2. \qquad (4.31)$$

Подставляя зависимость (4.31) в (4.28), имеем:

$$\frac{H_{max}}{R}=\frac{1836{,}45\cdot\pi\cdot\overline{X}^3\cdot V_{дет}\cdot\sqrt{t\cdot\rho}}{m\cdot V_{кр}\cdot R^3}. \qquad (4.32)$$

В отличие от аналогичной зависимости (4.28), полученной для конусообразной формы зерна, при шлифовании кругом с зернами, имеющими форму сферы, параметры шлифования, входящие в зависимость (4.32), в значительно большей степени влияют на отношение H_{max}/R. При этом зависимость (4.32) упрощается, поскольку не содержит неопределенного безразмерного коэффициента η.

Для вновь заправленного алмазного круга справедливо условие $\overline{X}<2\cdot R$, поскольку параметр R в данном случае определяет радиус округления режущей кромки алмазного зерна, который, как правило, меньше радиуса зерна. После приработки алмазного круга можно принять условие $\overline{X}=2\cdot R$, тогда зависимость (4.32) упрощается, так как в ней отсутствуют параметры $\overline{X}$ и R:

$$\frac{H_{max}}{R} = \frac{14{,}7 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр}}. \qquad (4.33)$$

Исходя из зависимости (4.32), для исходных данных: $V_{кр} / V_{дет} = 60$; $m = 100$; $t = 20 \cdot 10^{-6}$ м; $\overline{X} / R = 2$; $R_{кр} = 0{,}4$ м; $R_{дет} = 0{,}05$ м отношение $H_{max} / R = 0{,}175$. В этом случае, согласно известным экспериментальным данным профессоров Крагельского И. В. и Богомолова Н. И., имеет место процесс стружкообразования при резании. При меньших значениях H_{max} / R процесс стружкообразования переходит в процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала без образования стружки и, соответственно, без осуществления съема материала. Поэтому с целью повышения эффективности процесса резания при шлифовании отношение H_{max} / R необходимо увеличивать. Это достигается в первую очередь за счет выполнения условия $\overline{X} < 2 \cdot R$ путем осуществления правки алмазного круга и обеспечения его высокой режущей способности.

Исходя из зависимости (4.32), увеличить отношение H_{max} / R можно увеличением скорости детали $V_{дет}$ и глубины шлифования t. Например, при увеличении $V_{дет}$ и t в 2 раза отношение $H_{max} / R = 0{,}5$, что соответствует устойчивому процессу стружкообразования.

Зависимость (4.27) для определения условного напряжения резания (энергоемкости обработки) σ при шлифовании с учетом зависимости (4.32) и условия $a = H_{max}$ принимает вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\left(\sqrt{\frac{918{,}25 \cdot \pi \cdot \overline{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot R^3}} - tg\frac{\psi}{2} \right)}. \qquad (4.34)$$

Уменьшить σ можно увеличением параметров $V_{дет}$, t и уменьшением m и $V_{кр}$, так как при шлифовании кругом с неизношенными режущими зернами выполняется условие $\overline{X} < 2 \cdot R$. Несомненно, в связи с износом зерен и увеличением радиуса их округления существенное влияние на характер изменения отношения H_{max} / R оказывает величина R.

При условии $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t = const$ зависимость (4.34) выразится:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\left(\sqrt{\frac{918{,}25 \cdot \pi \cdot \overline{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot R^3 \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}}} - tg\frac{\psi}{2}\right)}. \qquad (4.35)$$

В этом случае глубина шлифования t незначительно влияет на σ, а увеличение производительности обработки Q приводит к уменьшению σ. Однако с увеличением Q, очевидно, увеличивается и величина R, что приведет к лишь незначительному уменьшению σ. Поэтому в зависимости (4.24) с увеличением производительности обработки Q будет преобладать второй множитель, вызывающий увеличение температуры резания при шлифовании θ с увеличением Q [163].

Как следует из зависимости (4.35), наибольшее влияние на условное напряжение резания σ оказывает радиус округления режущей кромки зерна R: чем он меньше, тем меньше условное напряжение резания и, соответственно, температура резания. Это согласуется с практическими данными. Таким образом, используя зависимости (4.24) и (4.35), появляется возможность теоретически анализировать закономерности изменения температуры резания при шлифовании θ и производить научно обоснованный выбор рациональных условий обработки.

Полученные теоретические решения можно использовать для совершенствования технологии предварительного шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов алмазными кругами на металлических связках, работающих в режиме периодической электроэрозионной правки. Эта технология обеспечивает повышение производительности и качества обработки вследствие снижения теплонапряженности процесса шлифования, однако требует научно обоснованного определения рациональных режимов шлифования на основе приведенной ранее аналитической зависимости для определения температуры резания при шлифовании.

4.6. Проблемы решения технологических задач с применением компьютерной техники

Мы все являемся свидетелями того, как стремительно насыщаются предприятия компьютерной техникой. Еще недавно мы испытывали огромные трудности при внедрении в производство инженер-

ных задач, связанных с использованием вычислительной техники, по причине нехватки машинного времени. Например, внедрение эффективных систем автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ стало возможным лишь благодаря появлению в конце 1980-х годов на предприятиях настольной вычислительной машины "Искра-226". Сейчас ситуация изменилась. В технологических и конструкторских отделах появилась компьютерная техника, с помощью которой можно решать инженерные задачи. Проблема состоит в насыщении и освоении программного обеспечения. К сожалению, приходится иметь дело в основном с иностранными пакетами прикладных программ, которые являются дорогостоящими и используются не на полную мощность.

В связи с этим, чрезвычайно актуальны проблемы создания и внедрения отечественных программных продуктов, особенно для конструкторской и технологической подготовки производства, автоматизированного проектирования технологических процессов и т.д. Однако для этого необходимы формализованные физико-математические теории, с помощью которых можно решать инженерные задачи. С этой точки зрения конструирование опережает технологию машиностроения. Если при конструировании деталей и машин можно пользоваться более общими и фундаментальными физико-математическими решениями, то при проектировании технологических процессов – лишь частными эмпирическими решениями, поскольку общей физико-математической теории процессов обработки материалов на сегодня не существует.

И при конструировании, и при изготовлении конкретного изделия приходится оценивать его напряженно-деформированное состояние, однако с использованием различных подходов. Если в конструкторских расчетах можно пользоваться общеизвестными и общепризнанными понятиями, такими как напряжения и деформация, то в теории механической обработки такие понятия фактически не используются.

Казалось бы, основополагающая технологическая дисциплина "Резание металлов" должна начинаться и заканчиваться расчетом и анализом напряжений и деформации, возникающих при обработке. В действительности, сложное напряженно-деформированное состояние зоны резания оценивается весьма упрощенно – производной ве-

личиной – усадкой стружки, что свидетельствует о недостаточной изученности физики процесса обработки. Рассмотрим пример [148].

Основоположником науки о резании металлов профессором Зворыкиным К. А. (одним из создателей Харьковского технологического института, а позднее, политехнического института) более 100 лет назад предложена формула для расчета основного параметра резания – угла сдвига обрабатываемого материала β:

$$\beta = 45^0 + \frac{(\gamma - \varphi)}{2}, \qquad (4.36)$$

где γ – передний угол инструмента (резца);

$\mathrm{tg}\varphi = \mathrm{f}$ – коэффициент трения обрабатываемого материала с передней поверхностью резца.

Эта формула не утратила своей значимости и в настоящее время. Она приводиться во всех учебниках по резанию металлов. Формула включает передний угол инструмента γ и угол трения φ. Чем меньше угол трения, тем больше угол сдвига β и эффективнее процесс резания. Если подставить в формулу экспериментальное значение угла β, то получим значение коэффициента трения f значительно больше единицы (f > 3 ... 5). Очевидно, это лишено физического смысла, так как коэффициент трения должен быть меньше единицы. Однако, другого, более точного толкования механизма процесса резания в настоящее время нет. Для того чтобы разобраться, в чем же дело и почему такое большое расхождение теории и практики, необходимо обратиться к основам теории резания.

В результате исследований, базирующихся на фундаментальных методах теории упругости, удалось прийти к определенным выводам. Установлено, что в формировании угла сдвига β участвует не вся тангенциальная составляющая силы резания (как принято считать), а лишь часть ее. Оставшаяся часть силы резания затрачивается на преодоления трения образующейся стружки с передней поверхностью инструмента. При таком подходе параметр f, входящий в формулу, не является коэффициентом трения, а имеет иную физическую природу и действительно может принимать значения больше единицы. Из этого можно заключить, что процесс стружкообразования при резании металлов чрезвычайно сложен и может быть раскрыт с позиций фундаментальных наук: теории упругости, теории пластичности и т. д.

В теории пластичности материалов существует множество решений технологических задач, однако они касаются обработки металлов давлением. Процессы резания с фундаментальных позиций механики в полной мере не описаны и не проанализированы, что, на наш взгляд, является существенным ограничением развития технологии машиностроения, как прикладной науки.

В связи с этим, для решения технологических задач необходимо шире привлекать специалистов-механиков (способных ставить и решать задачи методами математической физики), в частности, студентов специальности "Динамика и прочность машин" при выполнении ими курсовых и дипломных проектов и т. д. Решения технологических задач на высоком научном уровне сейчас очень актуальны, и молодые специалисты могут найти достойное применение своим знаниям в этой области. Здесь большое поле деятельности, поскольку, образно говоря, все производство машиностроительной продукции держится на лезвии инструмента, технологические возможности которого изучены недостаточно.

При проектировании технологических процессов важно выбрать оптимальный вариант обработки на основе экономических критериев [171]. Применение компьютеров открывает новые возможности в решении оптимизационных задач. Для этого необходимо соединить механические и экономические закономерности обработки, получить решение на стыке двух наук (совместными усилиями ученых технологов и экономистов). Основа для этого есть – мощные экономические теории и элементы формализованной теории технологии машиностроения.

Традиционно выбор оптимальных вариантов (маршрутно-операционной технологии) производится по приведенным затратам (себестоимости обработки) с использованием экспериментальных данных. Как известно, данное решение ограничено пределами изменения параметров обработки. Для того чтобы получить более общее решение в широких пределах изменения варьируемых параметров, необходимо аналитически описать себестоимость обработки. Причем, составляющие себестоимости (статьи затрат) должны быть аналитически описаны с единых позиций и взаимоувязаны. Это требует создания единой математической модели различных процессов механической и физико-технической обработки. Реализуя данный подход, удалось решить ряд важных практических задач, в частности, разработать

новые схемы и высокопроизводительные процессы алмазно-абразивной обработки, алмазного шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов, включая инструментальные материалы, износостойкие покрытия, различные керамики, стекло, хрусталь, природные алмазы и т. д. Эти процессы широко внедрены в производство.

Решена задача научно обоснованного разделения энергии резания и трения при механической обработке. Установлено, что трение в обычных процессах шлифования составляет до 90 %, тогда как в комбинированных процессах шлифования алмазными кругами на металлических связках с введением в зону резания дополнительной электрической энергии (для обеспечения высокой режущей способности алмазного круга) – до 30 % и менее. Уменьшение трения в процессе резания – важнейшее условие повышения производительности и качества обработки.

С целью вооружения специалистов и ученых-технологов новыми знаниями, выработки фундаментальных решений по созданию наукоемких технологий, нами ежегодно в Харькове проводятся Международные научно-практические конференции "Физические и компьютерные технологии". В рамках проводимых конференций изданы коллективные научные труды в 10-ти томах под общим названием "Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения" и другие монографии, учебники и учебные пособия. В них на основе новых физико-математических подходов решены многие важные проблемы механической, физико-технической обработки и технологии машиностроения, в том числе обеспечивающие скорейший переход от традиционных упрощенных эмпирических моделей к аналитическим моделям, основанным на глубоких фундаментальных физико-математических знаниях. Полученные на этой основе результаты имеют важное научное и практическое значение при создании новой техники и подготовке специалистов.

Выводы

1. В работе обобщен опыт разработки и внедрения в производство эффективных технологических процессов механической обработки на основе оптимизации условий обработки по критерию наименьшей себестоимости. Приведены примеры применения разработанных

прогрессивных технологических процессов шлифования труднообрабатываемых материалов и лезвийной обработки, которые указывают на возможность повышения производительности, качества и точности обработки. Эффект достигается за счет применения оптимальных режимов резания и характеристик инструментов, в особенности за счет применения инструментальных материалов повышенной твердости.

2. Теоретически определены основные условия уменьшения технологической себестоимости обработки и повышения производительности за счет применения современных режущих лезвийных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями производства ведущих зарубежных инструментальных фирм. Теоретически установлено, что с увеличением производительности технологическая себестоимость обработки изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Уменьшить минимальное значение технологической себестоимости обработки можно за счет увеличения экстремального значения производительности, применяя режущие лезвийные инструменты, характеризующиеся высокой работоспособностью в условиях повышенной температуры резания. Критерием оценки достижения на практике минимума технологической себестоимости обработки принято использовать отношение затрат на заработную плату рабочих к затратам на режущий инструмент, которое принимает вполне конкретное значение для различных условий обработки. Для анализа возможностей практического использования предложенного критерия проведен комплекс экспериментальных исследований производительности и технологической себестоимости обработки сборными твердосплавными лезвийными режущими инструментами с износостойкими покрытиями зарубежного производства. Установлено, что их применение позволяет более чем в два раза уменьшить трудоемкость обработки и суммарные затраты по сравнению с традиционно применяемыми отечественными лезвийными твердосплавными инструментами. Показано, что эффект обработки достигается за счет увеличения скорости резания и подачи вследствие повышения износостойкости и теплостойкости инструментов зарубежного производства.

3. Приведены экспериментальные данные трудоемкости обработки и суммарных затрат на операциях точения, фрезерования и сверления инструментами зарубежного производства и показано их

преимущество по сравнению с традиционно применяемыми на предприятиях твердосплавными инструментами. Установлено, что отношение затрат на заработную плату и на инструмент на операции точения принимает значительно большие значения, чем на операции фрезерования. Это указывает на то, что на операции фрезерования максимально используются режущие возможности инструментов, т.е. при фрезеровании больше возможностей реализации минимума технологической себестоимости обработки, чем при точении. Причем это условие выполняется также с учетом всех основных статей затрат, включая затраты на заработную плату рабочих, режущий инструмент, оборудование и прочие затраты, что позволяет более полно оценить экономическую эффективность механической обработки, т.к. учитывает наибольшее количество статей затрат. Экспериментально установлено, что основным условием уменьшения технологической себестоимости обработки до ее минимального значения является увеличение производительности обработки за счет применения более износостойких и теплостойких твердосплавных режущих инструментов.

4. Аналитически определены условия уменьшения максимально возможной температуры резания, при достижении которой все выделяющееся при резании тепло уходит в образующуюся стружку, что является существенным фактором повышения качества и производительности обработки. Показано, что добиться выполнения этих условий можно за счет уменьшения условного напряжения резания, в особенности применяя высокоскоростную обработку, так как с увеличением скорости резания уменьшается количество тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, а фактически все выделяющееся при резании тепло уходит в образующуюся стружку. Установлено, что полученное теоретическое решение согласуется с результатами экспериментальных исследований. Это позволяет эффективно использовать на предприятиях Украины современные сборные твердосплавные инструменты с износостойкими покрытиями зарубежного производства, характеризующиеся высокой теплостойкостью в условиях высокоскоростной обработки.

5. В работе приведена аналитическая зависимость для определения температуры резания при шлифовании, согласно которой с увеличением глубины резания (и, соответственно, производительности обработки) температура резания первоначально увеличивается, а за-

тем асимптотически приближается к постоянному значению, определяемому тепловым насыщением поверхностного слоя обрабатываемой детали. Это решение открывает новые технологические возможности снижения теплонапряженности процесса шлифования, так как после достижения определенной производительности обработки появляется возможность ее увеличения фактически без увеличения температуры резания. Реализовать данное решение можно применением высокопроизводительного глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали.

6. Теоретически установлено, что уменьшить максимальное значение температуры резания при шлифовании можно главным образом уменьшением условного напряжения резания (энергоемкости обработки) за счет повышения режущей способности шлифовального круга и снижения интенсивности трения в зоне резания. Для реализации данного условия получена аналитическая зависимость для определения условного напряжения резания, которая содержит основные параметры режима шлифования, характеристики круга и обрабатываемой детали. Показано, что наибольшее влияние на условное напряжение резания оказывает радиус округления режущей кромки зерна: чем он меньше, тем меньше условное напряжение резания и, соответственно, температура резания. Это согласуется с практическими данными. Также установлено, что условное напряжение резания уменьшается с увеличением отношения толщины среза к радиусу округления режущей кромки зерна в связи с переходом от упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала к устойчивому процессу резания, вызывая при этом уменьшение температуры резания.

7. Сформулированы основные направления решения технологических задач с применением компьютерной техники. Это открывает новые возможности создания высокоэффективных технологических процессов механической обработки на основе выполнения оптимизационных расчетов по критериям наименьшей себестоимости и наибольшей производительности обработки с учетом технологических ограничений по качеству и точности обрабатываемых поверхностей.

Раздел 5
Высокопроизводительные технологии алмазного шлифования

5.1. Существующие подходы к оптимизации структуры и параметров технологических процессов финишной механической обработки

В фундаментальном труде профессора Маталина А. А. [71] указывается, что при изготовлении ответственных деталей массового производства обработку наиболее важных поверхностей следует осуществлять за несколько черновых и чистовых операций. При этом в процессе черновых (предварительных) операций снимают основную часть припусков на механическую обработку и обеспечивают минимально необходимую и постоянную величину припусков на окончательную обработку. Разделение процесса обработки на предварительную и окончательную операции имеет большое значение для повышения точности размеров и геометрической формы обрабатываемых заготовок, на нем базируются все существующие подходы структурно-параметрической оптимизации технологических процессов обработки.

К сожалению, общее аналитическое решение, касающееся характера съема припуска и основанное на оптимизации условий обработки по критерию производительности (или себестоимости обработки) с учетом требований по точности, шероховатости и другим параметрам качества обработки, до настоящего времени не получено. Иными словами, отсутствует аналитическое решение, определяющее условие расчленения обработки на черновые и чистовые операции, предложенное профессором Маталиным А. А. и описанное выше. Это связано в первую очередь с отсутствием аналитических моделей, описывающих закономерности съема припуска с течением времени обработки. Поэтому при решении задач структурно-параметрической оптимизации технологических процессов исходят их частных упрощенных расчетных схем. Например, при выборе оптимального маршрута обработки и определении оптимальных параметров технологических операций (при съеме заданного припуска) на основе производственного

опыта рассматривается несколько вариантов технологических процессов. При этом используются эмпирические формулы для расчета режимов обработки, характеристик инструментов и других параметров операций, входящих в каждый из рассматриваемых технологических процессов. Это позволяет формализовать рассматриваемые технологические процессы. Затем, выбирая функцию цели (целевую функцию), технические ограничения и математически описывая их, с помощью определенного численного метода оптимизации решаются задачи выбора наилучшего варианта технологического процесса. Поэтому в настоящем параграфе проведен анализ подходов к структурно-параметрической оптимизации финишной механической обработки.

Основы структурно-параметрической оптимизации технологических процессов достаточно обстоятельно изложены в фундаментальном труде [141], подготовленном под руководством профессора Корчака С. Н. Данный подход к решению оптимизационных задач получил применение в работах профессора Тимофеева Ю. В. и его учеников [154] при анализе, синтезе и оптимизации условий обработки на агрегатных станках. Необходимо отметить, что полученные таким образом решения являются оптимальными лишь в пределах рассматриваемых вариантов технологических процессов, т.е. полученные решения являются частными решениями. Более общие оптимальные решения можно получить в результате выполнения оптимизации на основе разработанных аналитических моделей технологических процессов.

Учитывая важность получения аналитических решений, за последние 40 лет достигнуты значительные успехи в этом направлении, подготовлено и защищено достаточно большое количество докторских диссертаций, посвященных разработке теории финишной механической обработки и в первую очередь абразивной и алмазно-абразивной обработки. Это явилось своего рода прорывом в познании процессов финишной механической обработки.

Так, в работе [69] профессора Маслова Е. Н. впервые в обобщенном виде с применением упрощенных расчетных схем дано описание физических и технологических закономерностей процесса шлифования, обоснованы его технологические возможности. Большой вклад в изучение процессов абразивной обработки (в особенности процессов шлифования) внес профессор Корчак С. Н. [141]. Разработанные им

аналитические модели параметров шлифования позволили с различных сторон оценить возможности процессов шлифования труднообрабатываемых материалов, теоретически обосновать условия повышения производительности и точности обработки, в частности, при шлифовании на станках с числовым программным управлением, где используются автоматизированные циклы шлифования.

Общепризнанной является научная технологическая школа профессора Якимова А. В. [196]. Разработанный им эффективный процесс прерывистого шлифования открыл новые возможности интенсификации производства и обеспечения высококачественной обработки ответственных изделий. В настоящее время трудно представить абразивную обработку высокопрочных сталей и сплавов, твердых пород камня и других труднообрабатываемых металлических и неметаллических материалов без применения кругов с прерывистой рабочей поверхностью.

Применение прерывистого шлифования обеспечивает уменьшение температуры резания и энергоемкости обработки, фактически в процессе шлифования производится эффективная правка круга в результате его ударного взаимодействия с обрабатываемым материалом. Пожалуй, ни один из известных методов шлифования не обладает таким двойным физическим эффектом обработки.

Важные теоретические решения в области теплофизики и механики процесса шлифования получены профессорами Евсеевым Д. Г. и Сальниковым А. Н. [28; 29]. Ими, во-первых, глубоко и всесторонне изучены тепловые процессы при шлифовании, во-вторых, установлена связь геометрических параметров режущего рельефа шлифовального круга с основными физическими и технологическими параметрами шлифования. Это позволило научно обосновать новые технологические возможности процесса шлифования и расчетным путем определить оптимальные условия обработки с учетом ограничений по температуре шлифования, шероховатости обрабатываемой поверхности и т.д.

Заслуживают особого внимания результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния различных составов технологических сред на показатели абразивной и алмазно-абразивной обработки (шлифования), полученные профессором Худобиным Л. В. и его учениками [143]. В своих работах они убедительно обосновали эффективность использования технологических сред на финишных операци-

ях механической обработки. Ими разработаны важные математические модели параметров обработки с применением различных технологических сред, позволяющие рассчитывать оптимальные режимы шлифования и другие параметры, выявлять новые физические эффекты обработки.

Среди работ, посвященных математическому моделированию процессов финишной механической обработки, следует выделить многочисленные работы по созданию методов расчета параметров шероховатости при абразивной обработке. В первых работах в этом направлении исходили из упрощенных геометрических и кинематических схем, в которых пользовались понятиями средних значений величин (например, средняя толщина среза, среднее число работающих абразивных зерен и т.д.).

По мере развития теории шлифования появились работы, основанные на вероятностном представлении и расчете параметров процесса шлифования. Сформировалось новое направление в теории шлифования, получившее название "теоретико-вероятностный подход". Его становление связано с работами известных ученых: профессоров Королева А. В. [53], Новоселова Ю. К. [109], Якимова А. В. [195; 196], Евсеева В. И. и Сальникова А. И. [28; 29], Резникова А. Н. [4; 121] и других ученых. Суть данного подхода состоит в том, что процесс формирования шероховатости обработки подчиняется вероятностным законам в связи, во-первых, с беспорядочным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга (главным образом по причине их разновысотного выступания над уровнем связки круга), во-вторых, с вероятностным характером участия зерен в резании при шлифовании.

Дальнейшее развитие теоретико-вероятностный подход, применительно к процессам алмазного шлифования, получил в совместных работах Якимова А. В., Новикова Ф. В., Новикова Г. В., Якимова А. А. [5; 149]. В этих работах приведены аналитические зависимости для расчета основных параметров шероховатости обработки при шлифовании с учетом износа зерен круга, а также аналитические зависимости для расчета других физических и технологических параметров шлифования. Так, расчетная зависимость для определения параметра шероховатости обработки R_a принимает вид [149]:

$$R_a = 2 \cdot \sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \overline{X}^3 \cdot V_{дет}}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр}}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}\right)}, \qquad (5.1)$$

где $\overline{X}$ – зернистость круга, м;

m – объемная концентрация зерен в круге;

2γ – угол при вершине конусообразного зерна;

$R_{кр}$, $R_{дет}$ – радиусы круга и детали, м;

η – безразмерный параметр, учитывающий степень затупления зерен круга, изменяется в пределах 0 … 1 ($\eta \to 0$ – для острого зерна, $\eta \to 1$ – для затупленного зерна).

Как видно, зависимость (5.1) содержит параметры режима шлифования, характеристики круга, в том числе важнейший безразмерный параметр η, который определяет остроту режущего рельефа круга. Следовательно, зависимость (5.1) содержит все параметры, необходимые для расчета шероховатости обработки при шлифовании.

Используя данный подход, разработаны методики расчетов параметров точности и производительности обработки, температуры и силы резания при шлифовании, что открывает возможности определения путей повышения эффективности шлифования теоретическим путем. Необходимость создания новых математических моделей параметров шлифования чрезвычайно актуальна, поскольку традиционных эмпирических знаний о физике процессов обработки явно не достаточно для решения задач существенного повышения производительности, качества и точности обрабатываемых поверхностей. Благодаря теоретико-вероятностному подходу авторам удалось получить новые решения по выявлению, обоснованию и реализации условий существенного повышения эффективности обработки.

5.2. Аналитическое определение шероховатости поверхности при шлифовании

Одним из основных направлений эффективного применения процессов шлифования в технологии изготовления деталей машин является обеспечение высоких показателей шероховатости поверхности. Это достигается за счет участия в резании большого количества абра-

зивных зерен шлифовального круга и снижения толщин срезов, приходящихся на каждое режущее зерно. Однако, в связи с разновысотным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности круга, износом круга и другими технологическими факторами, как показывает практика, фактическое количество зерен, участвующих в процессе резания, значительно меньше номинального, что не всегда позволяет достичь требуемой шероховатости поверхности. Поэтому приходится прибегать к более трудоемким процессам доводки, хонингования и т.д. Исходя из этого, актуальной задачей машиностроения является определение новых технологических возможностей снижения шероховатости поверхности на операциях шлифования, что требует проведения теоретического анализа шероховатости поверхности и установления условий ее уменьшения.

Необходимо отметить, что вопросам исследования шероховатости поверхности при шлифовании посвящены работы [69; 165; 201], в которых теоретически и экспериментально определены количественные значения шероховатости поверхности, достигаемые при различных условиях шлифования, включая режимы шлифования, характеристики кругов, технологические среды и т.д. Установлено, что основным условием снижения шероховатости поверхности является поддержание в процессе высокой режущей способности круга, уменьшения зернистости круга, применение кругов из синтетических сверхтвердых материалов, обеспечивающих тончайшие срезы за счет высокой остроты зерен, уменьшение разновысотного расположения вершин зерен на рабочей поверхности круга, например за счет создания плосковершинных зерен, и т.д.

Важные результаты получены на основе математического моделирования закономерностей формирования шероховатости поверхности [109; 173]. Однако в полном объеме эти задачи в силу их сложности не решены, что требует разработки новых подходов к их решению.

Поэтому в настоящем параграфе теоретически определены условия уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании на основе равномерного и вероятностного участия зерен круга в резании и разработана упрощенная методика расчета оптимальных параметров шлифования для заданной шероховатости поверхности.

Как известно, шероховатость поверхности при шлифовании формируется в результате наложения и перекрытия большого количества

срезов, образуемых абразивными зернами, имеющими различную форму, размеры и различное расположение на рабочей поверхности круга. Поэтому, чтобы учесть эти факторы, необходимо расчеты шероховатости поверхности, образуемой при шлифовании, производить с использованием положений теории вероятностей [109]. Однако, полученные аналитические зависимости справедливы, как правило, для отдельных схем шлифования и не позволяют с единых позиций (в общем случае) решить задачу определения оптимальных условий шлифования по критерию наименьшей шероховатости поверхности. Особо это относится к выбору наиболее рациональной кинематической схемы шлифования, обеспечивающей наименьшую шероховатость поверхности для условий, когда требуется достичь высоких показателей шероховатости поверхности, близких к условиям обработки свободным абразивом. В частности, это относится к шлифованию отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах, где требуется обеспечить шероховатость поверхности на уровне $R_a = 0{,}04$ мкм. Очевидно, добиться практически такого высокого уровня шероховатости поверхности шлифованием сложно, даже применяя мелкозернистые круги. В связи с этим, важно теоретически оценить технологические возможности шлифования с точки зрения достижения таких высоких показателей шероховатости поверхности.

Для этого может быть предложена расчетная схема, которая основана на приближенном определении шероховатости поверхности при шлифовании исходя из условия, что все зерна, проконтактировавшие с обрабатываемой поверхностью в пределах базовой длины B, оставили свои полные проекции в поперечном сечении (без пересечения) и сформировали полный профиль, соответствующий шероховатости поверхности с максимальной высотой микронеровностей R_{max}.

Согласно рис. 5.1, полный съем обрабатываемого металла режущими зернами круга происходит на уровне $y = R_{max}$, где y – координата, отсчитываемая от вершины зерна (высоты выступания зерен над уровнем связки круга приняты одинаковыми).

Для определения параметра шероховатости поверхности R_{max} следует ввести новый параметр $\overline{B}$, который равен сумме длин несрезанных участков металла на уровне $y < R_{max}$. Очевидно, на уровне

$y = R_{max}$ справедливо условие $\overline{B} = B$, а при $y < R_{max}$ – условие $\overline{B} < B$. Поэтому необходимо оценить характер изменения отношения $\overline{B}/B$ для различных условий обработки.

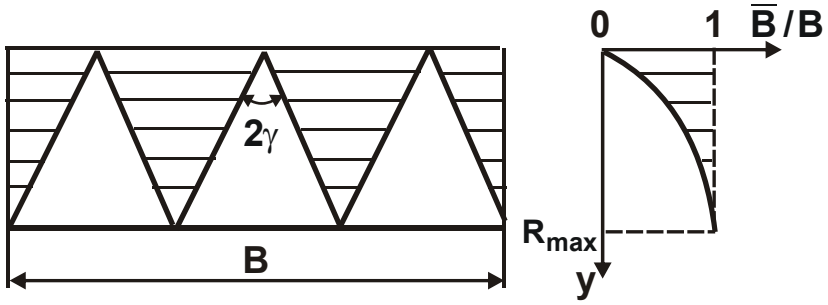


Рис. 5.1. Расчетная схема определения отношения $\overline{B}/B$

В общем случае при круглом внутреннем шлифовании

$$\overline{B} = 2tg\gamma \cdot y \cdot n = 2tg\gamma \cdot y \cdot k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau, \qquad (5.2)$$

где n – общее количество зерен круга, участвующих в формировании шероховатости поверхности;

k – поверхностная концентрация зерен круга, шт./м^2;

$\tau = l / V_{дет}$ – время, в течение которого зерна шлифовального круга могут контактировать с фиксированным поперечным сечением обрабатываемой детали, с;

$l = \sqrt{2t/\rho}$ – длина дуги контакта круга с деталью [101], м;

t – глубина шлифования, м;

$\rho = 1/R_{дет} - 1/R_{кр}$ – приведенный радиус, м$^{-1}$;

$\overline{B} = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau$.

Параметр k при шлифовании алмазным кругом определяется [4]:

$$k = \frac{3m \cdot (1-\varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \overline{X}^2}, \qquad (5.3)$$

где m – объемная концентрация зерен круга (например, для 100 %-й концентрации $m = 100$);

$\overline{X}$ – зернистость круга, м;

$(1-\varepsilon)$ – коэффициент, учитывающий высоту выступания зерен над уровнем связки круга.

Физически коэффициент $(1-\varepsilon)$ может быть выражен: $(1-\varepsilon) = y/\overline{X}$. Тогда с учетом всех преобразований $\overline{B}/B$ определится:

$$\frac{\overline{B}}{B} = \frac{3m \cdot tg\gamma \cdot y^2}{100 \cdot \pi \cdot \overline{X}^3} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{\left(\frac{1}{R_{кр}} - \frac{1}{R_{дет}}\right)}}. \qquad (5.4)$$

Как видно, с увеличением y отношение $\overline{B}/B$ увеличивается и при условии $y = R_{max} = 1$ мкм, поскольку в принятой расчетной схеме (рис. 5.1) в пределах базовой длины B отсутствует наложение проекций срезов отдельными зернами. Выполнение данного условия обеспечивается за счет равномерного участия зерен в резании и правильного выбора параметров шлифования, входящих в зависимость (5.4). В связи с этим определим значение $\overline{B}/B$ для исходных данных: $m = 100$; $\overline{X} = 0{,}1$ мм; $2\gamma = 90^0$; $V_{кр} = 30$ м/с; $V_{дет} = 30$ м/мин; $t = 0{,}01$ мм; $R_{кр} = 0{,}04$ м; $R_{дет} = 0{,}05$ м; $y = R_{max} = 1$ мкм. В результате $\overline{B}/B = 0{,}12$.

Полученное значение $\overline{B}/B$ меньше единицы. Следовательно, на уровне $y = R_{max} = 1$ мкм полный профиль от наложения проекций зерен не образуется. Очевидно, полный профиль для тех же исходных данных может быть образован при условии $y = R_{max} = 2{,}9$ мкм, т.е. при значительно большем значении параметра шероховатости поверхности R_{max}. Чтобы добиться требуемого значения $R_{max} = 1$ мкм, необходимо, например, уменьшить зернистость круга $\overline{X}$, которая входит в зависимость (5.4) с наибольшей степенью и поэтому в наибольшей мере влияет на отношение $\overline{B}/B$. В табл. 5.1 приведены расчетные значения отношения $\overline{B}/B$ для различных значений зернистости круга $\overline{X}$. Как видно, при $\overline{X} = 50$ мкм фактически обеспечивается условие $\overline{B}/B = 1$, т.е. в этом случае образуется полный профиль от наложения проекций зерен в поперечном сечении обрабатываемой детали в пределах базовой длины B, а параметр $R_{max} = 1$ мкм.

Таблица 5.1

Расчетные значения отношения $\overline{B}/B$

$\overline{X}$, мкм	20	30	40	50	100
$\overline{B}/B$	15	4,43	1,88	0,96	0,12

Для удобства выполнения расчетов зернистости круга $\overline{X}$, при которой выполняется условие $\overline{B}/B = 1$, а параметр R_{max} принимает за-

данное значение, необходимо зависимость (5.4) разрешить относительно зернистости круга:

$$\overline{X} = \sqrt[3]{\frac{3m \cdot tg\gamma \cdot R_{max}^2}{100\pi} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{\left(\frac{1}{R_{кр}} - \frac{1}{R_{дет}}\right)}}}. \qquad (5.5)$$

Из полученной зависимости (5.5) следует, что при заданной шероховатости поверхности R_{max} зернистость круга $\overline{X}$ тем больше, чем больше параметры m, $V_{кр}$, t и меньше $V_{дет}$. Зависимость (5.5) является приближенной, поскольку не учитывает вероятностный характер участия зерен в резании, в результате которого происходит наложение проекций зерен в поперечном сечении обрабатываемой детали (рис. 5.1) и поэтому полный профиль может быть образован при условии $\overline{B}/B > 1$, например при $\overline{B}/B = 5$ и т.д. В связи с этим, в зависимости (5.5) необходимо учитывать отношение $\overline{B}/B > 1$. Тогда, разрешая зависимость (5.4) относительно зернистости круга $\overline{X}$, получено:

$$\overline{X} = \sqrt[3]{\frac{B}{\overline{B}} \cdot \frac{3m \cdot tg\gamma \cdot R_{max}^2}{100\pi} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{\left(\frac{1}{R_{кр}} - \frac{1}{R_{дет}}\right)}}}. \qquad (5.6)$$

Отношение $B/\overline{B}$ меньше единицы, что приводит к уменьшению зернистости круга $\overline{X}$. Следовательно, вероятностный характер участия зерен в резании приводит к тому, что зернистость круга $\overline{X}$ необходимо уменьшать для обеспечения заданного значения параметра шероховатости поверхности R_{max}.

Очевидно, чем меньше отношение $B/\overline{B}$, тем меньше зернистость круга $\overline{X}$. Однако, уменьшение $\overline{X}$ происходит не столь существенно, поскольку отношение $B/\overline{B}$ входит в зависимость (5.6) с небольшой степенью – 0,33. Поэтому уменьшение отношения $B/\overline{B}$, например в 8 раз приведет к уменьшению зернистости круга $\overline{X}$ всего в 2 раза. Следовательно, для обеспечения заданного значения параметра шероховатости поверхности R_{max} с учетом вероятностного характера участия зерен в резании достаточно при выборе оптимальной зернистости круга $\overline{X}$ учесть 2-кратную поправку, например, при номинальном

значении $\overline{X}$ фактически принять 50 мкм $< \overline{X} <$ 100 мкм. Предложенная методика расчета оптимальной зернистости круга согласуется с результатами исследований шероховатости поверхности, выполненными с учетом вероятностного характера участия зерен круга в резании [179] и полученной зависимостью для определения относительной полноты профиля круга $\varepsilon(y)$, по физической сути соответствующей отношению $\overline{B}/B$: $\varepsilon(y) = 1 - e^{-\frac{2tg\gamma \cdot n \cdot y}{B}}$. Очевидно, $\frac{2tg\gamma \cdot n \cdot y}{B} = \frac{\overline{B}}{B}$. Тогда с учетом $y = R_{max}$ имеем: $\varepsilon(y = R_{max}) = 1 - e^{-\frac{\overline{B}}{B}}$. В табл. 5.2 приведены расчетные значения функции $\varepsilon(y = R_{max})$ для разных значений отношения $\overline{B}/B$.

Таблица 5.2

Расчетные значения функции $\varepsilon(y = R_{max})$

$\overline{B}/B$	0,12	1	2	4	8	10
$\varepsilon(y = R_{max})$	0,11	0,422	0,865	0,982	0,996	0,999

Как видно, с увеличением отношения $\overline{B}/B > 1$ функция $\varepsilon(y = R_{max})$ асимптотически стремится к единице. Это условие может быть реализовано в результате наложения и перекрытия проекций зерен в поперечном сечении обрабатываемой детали. Выполнение условия $\overline{B}/B = 1$ является приближенным, поскольку функция $\varepsilon(y = R_{max})$=0,422, что значительно меньше единицы. Следовательно, при расчете оптимальной зернистости круга $\overline{X}$ по зависимости (5.6) необходимо отношение $\overline{B}/B$ принимать больше единицы. Это приведет в соответствие расчетные и экспериментальные значения зернистости круга $\overline{X}$.

5.3. Определение оптимальных условий высококачественной обработки при алмазном шлифовании

При шлифовании твердосплавных изделий широкое применение получили алмазные круги на металлических связках, работающие в режиме непрерывной электроэрозионной правки [10]. Данный процесс шлифования позволяет существенно повысить производительность

обработки за счет обеспечения высокой режущей способности алмазного круга. Вместе с тем, приводит к довольно большим значениям шероховатости поверхности $R_a = 1 \ldots 2$ мкм.

В работе [81] показаны возможности применения алмазных кругов на металлических связках для решения задачи уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a. Для этого производится специальная подготовка к работе алмазного круга на металлической связке М1-01 путем шлифования алмазным кругом алмазного карандаша с продольной подачей. В результате происходит срезание вершин алмазных зерен круга (т.е. притупление режущих кромок), что позволяет в процессе шлифования твердого сплава получить шероховатость обработки на уровне $R_a = 0{,}2$ мкм и ниже при одновременном обеспечении высокой производительности обработки. Для выявления условий эффективного использования данного процесса шлифования, в настоящем параграфе дано теоретическое обоснование путей снижения параметра шероховатости поверхности R_a за счет искусственного притупления режущих кромок алмазных зерен круга [22].

Расчет параметра R_a произведен по методике, предложенной в работе [148]. Ее суть состоит в аналитическом описании приведенного режущего профиля, образованного от наложения проекций режущих зерен на фиксированную плоскость обрабатываемой детали, расположенную перпендикулярно движению зерен круга.

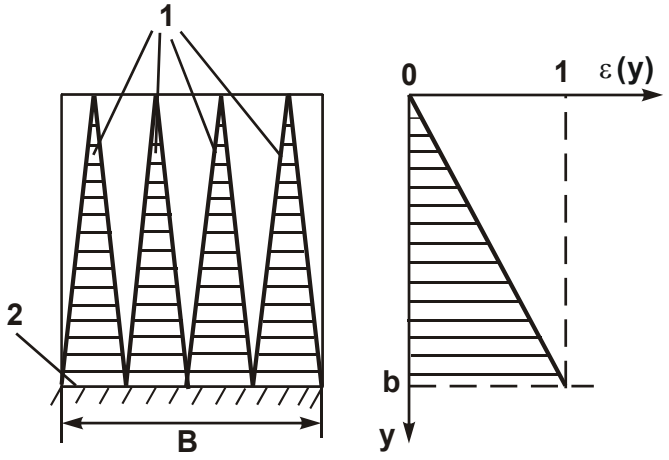


Рис. 5.2. Расчетная схема:
1 – зерна круга; 2 – связка круга

Для описания приведенного режущего профиля предложено использовать функцию − относительную полноту профиля круга – аналогичную классической функции относительной опорной длины микропрофиля обработанной поверхности детали (рис. 5.2). Относительная полнота профиля круга $\varepsilon(y)$, без учета перекрытия проекций зерен, равна

$$\varepsilon(y) = \frac{2 \cdot tg\gamma \cdot y \cdot n}{B}, \qquad (5.7)$$

где $n = k \cdot B \cdot l$ − количество зерен, расположенных на площади рабочей части круга;

k − поверхностная концентрация зерен круга, шт./м^2;

B − ширина круга, м;

l − длина рабочей поверхности круга, участвующая в формировании параметра шероховатости поверхности R_a, м;

γ − половина угла при вершине конусообразного режущего зерна;

y − координата, вдоль которой определяется высота профиля круга (высота выступания зерен над уровнем связки круга), м.

Подчиняя зависимость (5.7) условию $\varepsilon(y = R_{max}) = 1$, имеем:

$$R_{max} = \frac{1}{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot l}. \qquad (5.8)$$

Параметр шероховатости поверхности $R_{max} = 5 \cdot R_a$ тем меньше, чем больше k и l. Зернистость круга явно не входит в зависимость (5.8), а влияет на параметр R_{max} при изменении параметра k.

Как следует из табл. 5.3, при $l = 10$ мм и $k = 50$ шт./мм^2 параметр R_a принимает значение 0,2 мкм, что соответствует практическим данным. Увеличение параметров k и l приводит к существенному уменьшению параметра R_a, чего добиться на практике трудно.

Таблица 5.3

Расчетные значения R_a в мкм

k, шт./мм^2	l, мм			
	10	20	50	100
50	0,2	0,1	0,04	0,02
500	0,02	0,01	0,004	0,002
5 000	0,002	0,001	0,0004	0,0002

При плоском шлифовании торцом круга с одновысотным выступанием зерен $l = V_{кр} \cdot B / V_{дет}$ параметр шероховатости поверхности R_a определяется:

$$R_a = \frac{0{,}1 \cdot V_{дет}}{tg\gamma \cdot k \cdot B \cdot V_{кр}}. \qquad (5.9)$$

При плоском шлифовании периферией круга с одновысотным выступанием зерен $l = V_{кр} \cdot L / V_{дет} = V_{кр} \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot R_{max}} / V_{дет}$ параметр шероховатости поверхности R_a равен:

$$R_a = 2{,}5 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{V_{дет}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}}\right)^2 \cdot \frac{1}{R_{кр}}}. \qquad (5.10)$$

При шлифовании торцом круга параметры k, $V_{дет}$ и $V_{кр}$ в большей степени влияют на параметр R_a, чем при шлифовании периферией круга. Параметр B входит в зависимость (5.9) в первой степени, тогда как радиус круга $R_{кр}$ входит в зависимость (5.10) в степени 0,33, т.е. За счет увеличения параметра B можно значительно уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a.

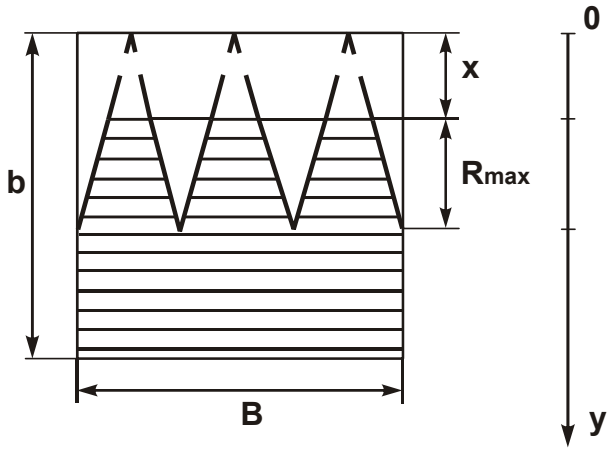


Рис. 5.3. Расчетная схема, учитывающая износ зерен круга

С учетом износа зерен (рис. 5.3) параметр шероховатости поверхности R_{max} определяется из зависимости (5.7) при условии $\varepsilon(y = R_{max} + x) = 1$:

$$R_{max} = \frac{1}{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot l} - x, \qquad (5.11)$$

где x − величина линейного износа зерен, м.

При плоском шлифовании торцом круга с учетом $l = V_{кр} \cdot B / V_{дет}$, имеем:

$$R_{max} = \frac{V_{дет}}{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot B \cdot V_{кр}} - x. \qquad (5.12)$$

При плоском шлифовании периферией круга с учетом $l = V_{кр} \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot R_{max}} / V_{дет}$ получено:

$$x = \frac{V_{дет}}{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot R_{max}}} - R_{max}. \qquad (5.13)$$

Согласно зависимостям (5.12) и (5.13), параметр шероховатости поверхности R_{max} уменьшается с увеличением величины x, причем при шлифовании торцом круга более интенсивно.

При выполнении условия $x \to \dfrac{V_{дет}}{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot B \cdot V_{кр}}$ параметр шероховатости поверхности $R_{max} \to 0$, т.е. для каждого режима шлифования и каждой характеристики круга существует вполне конкретное значение x, при котором $R_{max} \to 0$. Для реализации данного условия необходимо затупить режущие зерна на величину $x = \dfrac{V_{дет}}{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}}$.

Данное условие выполнимо при плоском шлифовании торцом круга. При плоском шлифовании периферией круга, исходя из зависимости (5.13), условие $R_{max} \to 0$ требует неограниченного роста первого слагаемого и величины x. Согласно рис. 5.4, с увеличением величины x от 0 до ∞ параметр шероховатости поверхности R_{max} уменьшается, асимптотически приближаясь к значению $R_{max} \to 0$. Для уменьшения x необходимо существенно увеличить множитель $\dfrac{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр}}}{V_{дет}}$ за счет увеличения k, $V_{кр}$, $R_{кр}$ и уменьшения $V_{дет}$. Так как увеличение параметров k, $V_{кр}$ и $R_{кр}$ ограничено, выполнить данное условие можно за счет уменьшения $V_{дет} \to 0$, что затруднено вследствие необходимости снижения производительности обработки. Таким образом показана возможность уменьшения вплоть до нуля параметра R_a при плоском шлифовании торцом круга за счет регулирования величины износа зерен x.

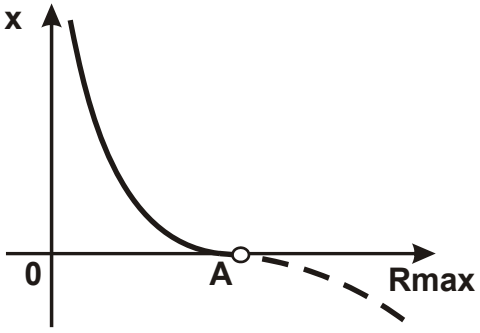


Рис. 5.4. Примерная зависимость x от R_{max}

Для оценки возможностей практического использования данного теоретического решения были проведены экспериментальные исследования процесса круглого наружного шлифования твердосплавных инструментов алмазным кругом формы 1А1 300×25 зернистостью АС6 125/100 на металлической связке М1–01, в ходе ко-

торых измерялся параметр шероховатости поверхности R_a. После установки круга на станок с помощью электроэрозионной правки произведено выведение биения круга и вскрытие алмазоносного слоя круга, а с помощью алмазного карандаша типа "Славутич", установленного в специальное устройство для правки на круглошлифовальном станке, произведено притупление режущих кромок алмазного круга. Опытами установлено, что подготовленный таким образом к работе алмазный круг в процессе шлифования в начальный период обеспечивал шероховатость поверхности $R_a = 0{,}1 – 0{,}2$ мкм.

Приблизительно через 30 минут работы алмазного круга параметр шероховатости поверхности R_a увеличился до значения 0,3 – – 0,4 мкм. Наблюдение за процессом показали, что это произошло вследствие выпадения из связки круга затупленных зерен и подключение в работу новых зерен с острыми кромками. Режущий рельеф алмазного круга стал более развитым, что привело в конечном итоге к уменьшению степени затупления зерен (уменьшению величины x) и в соответствии с зависимостью (5.13) – к увеличению параметра шероховатости обработки. Повторное притупление режущих кромок алмазного круга с помощью алмазного карандаша позволило опять же добиться при шлифовании уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a до значений 0,1 – 0,2 мкм. Опытами установлено также то, что с уменьшением производительности обработки алмазный круг более длительное время сохраняет исходный режущий рельеф (после притупления режущих кромок) и обеспечивает при шлифовании меньшие значения параметра шероховатости поверхности R_a.

5.4. Исследование связи возникающих в технологической системе упругих перемещений с точностью и производительностью механической обработки

Задачи повышения точности и производительности обработки при шлифовании имеют большое практическое значение. Им посвящены многочисленные работы [42; 66]. Важным направлением решения является снижение отрицательной роли упругих перемещений, возникающих в технологической системе, в формировании параметров точности обработки [90]. Поэтому необходимо проведение теорети-

ческих и экспериментальных исследований по установлению связи упругих перемещений, возникающих в технологической системе, с точностью и производительностью обработки.

Для решения поставленных задач воспользуемся теоретическим подходом [168; 171] к определению величины упругого перемещения y, возникающего в технологической системе, применительно к процессу круглого наружного врезного шлифования:

$$y = y_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\overline{\beta} \cdot \tau}\right), \tag{5.14}$$

где $y_{уст} = \dfrac{\sigma \cdot Q_0}{V_{кр} \cdot K_ш \cdot c}$;

$\overline{\beta} = \dfrac{V_{кр} \cdot K_ш \cdot c}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}$;

$Q_0 = \pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot V_{рад}$ – номинальная производительность обработки, м^3/с;

$K_ш = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования;

P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;

σ – условное напряжение резания, Н/м^2;

$D_{дет}$, $l_{дет}$ – диаметр и длина обрабатываемой детали, м;

$V_{рад}$ – скорость радиальной подачи, м/с;

τ – время обработки, с.

Параметр $y_{уст}$ после преобразования принимает вид:

$$y_{уст} = \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma \cdot V_{рад}}{V_{кр} \cdot K_ш \cdot c}. \tag{5.15}$$

Нетрудно видеть, что $y_{уст} = V_{рад} / \overline{\beta} = V_{рад} \cdot B$, где $B = 1/\overline{\beta}$. С физической точки зрения параметр B определяет время, за которое шлифовальный круг переместится в радиальном направлении на величину $y_{уст}$, т.е. параметр B – это постоянная времени формирования упругого перемещения в технологической системе. Тогда

$$y_{уст} = B \cdot V_{рад}; \tag{5.16}$$

$$B = \frac{1}{\overline{\beta}} = \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}{V_{кр} \cdot K_ш \cdot c}. \tag{5.17}$$

Постоянная времени B обратно пропорциональна параметру $\overline{\beta}$. Она тем меньше, чем меньше площадь обработки $F = \pi \cdot D_{\cdot дет} \cdot l_{дет}$, отношение $\sigma / К_ш$ (определяющее силовую напряженность процесса обработки) и чем больше скорость круга $V_{кр}$ и приведенная жесткость технологической системы c. Постоянную времени B можно рассматривать одной из основных характеристик технологической системы, поскольку она определяет длительность переходного процесса обработки, связанного с формированием в технологической системе упругого перемещения величиной $y_{уст}$.

Зависимость (5.14) с учетом зависимости (5.17) опишется:

$$y = y_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}}\right). \qquad (5.18)$$

Обозначая $n = \tau / B$, имеем:

$$\frac{y}{y_{уст}} = 1 - e^{-n}. \qquad (5.19)$$

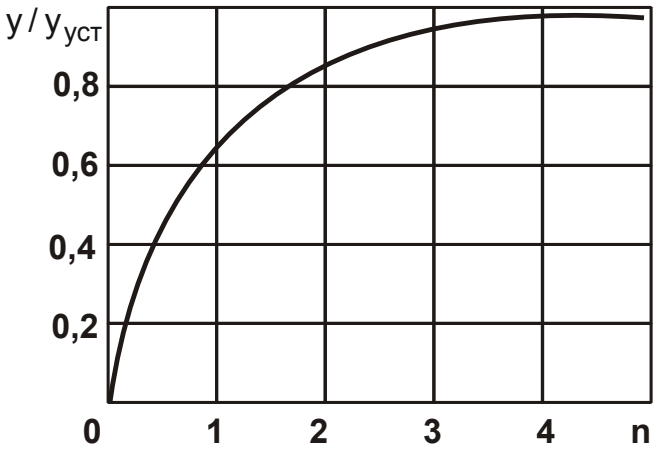


Рис. 5.5. Зависимость отношения $y / y_{уст}$ от величины n

Характер изменения рассчитанных по зависимости (5.19) значений $y / y_{уст}$ показан на рис. 5.5. Как видно, с увеличением n отношение $y / y_{уст}$ непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице. При $n = 3$ отличие значений y и $y_{уст}$ составляет 5 %. Поэтому при $n \geq 3$ с достаточной для практики точностью расчеты величины y можно вести по упрощенной зависимости:

$$y \approx y_{уст}. \qquad (5.20)$$

Для практического использования зависимостей (5.18) и (5.19) необходимо знать значения параметра B и, соответственно, величины $y_{уст}$, связанной с параметром B зависимостью (5.16). Определить B

можно на основе зависимости (5.17), однако это требует проведения сложных экспериментальных исследований по установлению значений условного напряжения резания σ, коэффициента шлифования $К_ш$ и жесткости технологической системы c. Более просто установить параметр B можно расчетно-экспериментальным путем, используя экспериментальные данные y, τ и представляя зависимость (5.18) в виде:

$$y = B \cdot V_{рад} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}}\right), \qquad (5.21)$$

где $V_{рад} = П/\tau$;

$П$ – номинальная величина снимаемого припуска, м.

После преобразований зависимость (5.21) запишется:

$$y = П \cdot \frac{B}{\tau} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}}\right) = \frac{П}{n} \cdot \left(1 - e^{-n}\right). \qquad (5.22)$$

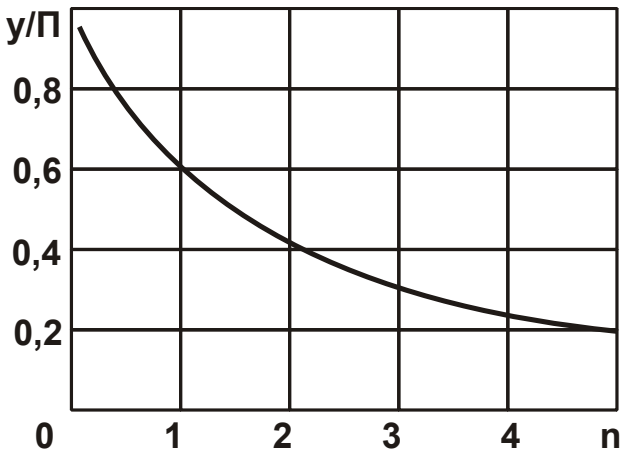


Рис. 5.6. Зависимость отношения $y/П$ от величины n

На рис. 5.6 приведены рассчитанные по зависимости (5.22) значения $y/П$. Как видно, с увеличением величины n (т.е. с увеличением времени обработки τ и, соответственно, уменьшением $V_{рад}$ при условии $П = const$) величина упругого перемещения y уменьшается. Методика определения входящей в зависимость (5.22) неизвестной величины n состоит в следующем. Экспериментально устанавливаются значения y, τ и $П$. По известному отношению $y/П$, используя рис. 5.5, определяется искомое значение n. Затем, по зависимости $B = \tau/n$ определяется значение B. Зная скорость радиальной подачи $V_{рад} = П/\tau$, определяется величина $y_{уст} = B \cdot V_{рад}$.

Для проведения экспериментов была изготовлена специальная цилиндрическая оправка из стали 45, на которой механическим путем крепились 4 пластины из твердого сплава ВК8. Оправка устанавливалась в центрах круглошлифовального станка и при шлифовании со-

вершала вращательное движение, а шлифовальный круг − врезную (радиальную) подачу. В результате обеспечивалось круглое наружное врезное шлифование твердосплавных пластин. Скорость круга устанавливали $V_{кр} = 30$ м/с, а скорость вращения детали − $V_{дет} = 30$ м/мин. В качестве шлифовального круга использовался алмазный круг на металлической связке 1А1 $300 \times 20 \times 5$ АС6 125/100 М1-01 4. После установки алмазного круга на станок производилась его электроэрозионная правка. Это позволило устранить биение круга и обеспечить его высокую режущую способность.

При проведении экспериментов принималась постоянной номинальная величина снимаемого припуска $П = 0{,}5$ мм независимо от скорости радиальной подачи $V_{рад}$. В ходе экспериментов измерялось время обработки τ и определялась величина упругого перемещения

$$y = П - \frac{D_{дет_1} - D_{дет_2}}{2}, \qquad (5.23)$$

где $D_{дет_1}$, $D_{дет_2}$ − диаметры детали до и после обработки, м.

В табл. 5.4 приведены экспериментальные значения параметров τ, y и $y/П$, полученные при шлифовании с разными скоростями радиальной подачи $V_{рад}$. На основе этих данных по соответствующим зависимостям, приведенным ранее, определены значения параметров n, B и $y_{уст}$ (табл. 5.5), что позволило количественно оценить роль упругих перемещений в процессе съема припуска при шлифовании.

Таблица 5.4

Экспериментальные значения параметров τ, $V_{рад}$, y и $y/П$

№ п/п	τ, с	$V_{рад}$, мм/с	y, мм	$y/П$
1	50	0,01	0,17	0,34
2	45	0,011	0,2	0,4

Таблица 5.5

Расчетные значения параметров n, B и $y_{уст}$

№ п/п	n	B, с	$y_{уст}$, мм
1	2,9	17,24	0,172
2	2,25	20,0	0,22

Как видно, значения $y_{уст}$ несколько больше значений y. Это согласуется с теоретическими результатами и свидетельствует о том, что при $n \to 3$ значения $y_{уст}$ и y отличаются несущественно.

Определим условия повышения производительности обработки с учетом ограничения по точности размера обработанной детали. Согласно полученному теоретическому решению [168], повысить производительность обработки можно за счет создания в технологической системе начального натяга y_0, равного или превышающего значение $y_{уст}$. Этим исключается переходной процесс, в течение которого фактическая производительность обработки Q и величина упругого перемещения y меньше номинальных значений Q_0 и $y_{уст}$. Выше предложена, по сути, экспресс-методика расчетно-экспериментального определения величины $y_{уст}$, что позволяет в каждом конкретном случае правильно устанавливать величину $y_{уст}$, повышая тем самым производительность обработки.

Необходимо отметить, что условие $y_0 = y_{уст}$ является необходимым, но недостаточным условием повышения производительности при финишной обработке. Достаточным может быть условие обеспечения максимально возможной производительности с учетом ограничения по точности обработки.

В работе [168] теоретически обоснована оптимальная по структуре операция шлифования, обеспечивающая максимально возможную производительность для заданной точности обработки, включающую лишь переход выхаживания. Однако для ее выполнения необходимо использовать инструменты с высокой режущей способностью, например, алмазные круги на металлической связке после их эффективной электроэрозионной правки (с развитым режущим рельефом). Применение алмазных кругов с относительно низкой режущей способностью требует осуществления операции шлифования в два перехода: черновое шлифование и последующее выхаживание.

Существенным ограничением осуществления установленной оптимальной по структуре операции шлифования являются также увеличенные припуски на обработку. В этом случае операцию шлифования также приходится выполнять в два перехода: черновое шлифование и

выхаживание. Иными словами, оптимальная по структуре операция шлифования может быть осуществлена при съеме относительно небольших припусков.

5.5. Теоретический анализ путей повышения точности и качества алмазно-абразивной обработки

Применяемые на практике схемы механической обработки материалов можно обобщенно представить тремя схемами: с фиксированной непрерывной или периодической радиальной подачей инструмента, с фиксированным радиальным или тангенциальным усилением между инструментом и обрабатываемой деталью, с фиксированным начальным упругим перемещением в технологической системе.

Первую схему принято называть жесткой схемой обработки. Она применяется при съеме основной части припуска на операциях предварительной обработки (лезвийными и абразивными инструментами) и получила наиболее широкое распространение.

Вторую схему обработки принято называть упругой. Она применяется с целью обеспечения более высоких показателей точности и качества обработки деталей главным образом при резании абразивными инструментами.

Значительное внимание изучению данной схемы уделено при разработке процессов алмазного шлифования. Доказано, что в условиях шлифования по упругой схеме в наибольшей степени используются потенциальные возможности алмазного круга с точки зрения производительности обработки и снижения расхода алмаза.

Третья схема реализуется на этапе выхаживания (с отключенной радиальной подачей) для обеспечения высоких показателей точности и качества (шероховатости) обработки. Применяется на операциях шлифования и других операциях абразивной обработки, в частности, при суперфинише. Чем длительнее процесс, тем выше показатели точности и качества обработки. Третья схема играет исключительно важную роль в окончательном формировании показателей обработки деталей, предусмотренных чертежом, однако она исследована не в полной мере.

В научно-технической литературе приведены результаты экспериментальных исследований и практически отсутствуют теоретические исследования. Это не позволяет выявить и научно обосновать технологические возможности схемы и реализующие на ее основе процессы механической обработки. С этой целью в работах [148; 151] предложен теоретический подход к расчету параметров обработки по схеме с фиксированным начальным радиальным упругим перемещением в технологической системе. Используя данный подход, в настоящем параграфе проведен анализ путей повышения точности и качества обработки с использованием алмазно-абразивных инструментов [81].

Параметры точности и качества обработки алмазно-абразивными инструментами формируются, как правило, на этапе выхаживания. Поэтому теоретический анализ процесса выхаживания имеет чрезвычайно большое научное и практическое значение.

При выхаживании величина упругого перемещения y, возникающего в технологической системе, определяет погрешность обработки δ, которая связана с временем τ зависимостью:

$$\tau = \frac{\pi \cdot \mathrm{tg}\gamma \cdot \mathrm{HV} \cdot \mathrm{F}}{2 \cdot \mathrm{c} \cdot (1-\eta) \cdot \mathrm{V_{кр}}} \cdot \ln \frac{\mathrm{y_1}}{\delta}, \qquad (5.24)$$

где HV – твердость обрабатываемого материала, н/м^2;

F – площадь контакта инструмента с материалом, м^2;

$V_{кр}$ – скорость круга (или другого алмазно-абразивного инструмента), м/с;

c – жесткость технологической системы, Н/м;

2γ – угол при вершине режущего зерна;

y_1 – начальное радиальное перемещение в технологической системе (при выхаживании равно величине снимаемого припуска), м;

η – безразмерный коэффициент, η =0…1 ($\eta \to 0$ – для острых зерен, $\eta \to 1$ – для затупленных зерен).

Время τ тем больше, чем больше параметры HV, F, η, y_1 и меньше c и δ. При условии y_1/δ = 1 время τ = 0. Наибольшее влияние на время τ оказывает отношение y_1/δ. Уменьшение погрешности обработки δ требует увеличения времени обработки (выхаживания).

Уменьшить время τ при δ = const можно уменьшением параметров F, y_1, η и увеличением c и $V_{кр}$, т.е. применением более "острых"

алмазно-абразивных инструментов и эффективных методов их правки, уменьшением снимаемого припуска и площади контакта инструмента с обрабатываемым материалом, увеличением жесткости технологической системы и скорости инструмента. Зависимость (5.24) справедлива для шлифования и других процессов финишной абразивной обработки.

Как правило, на практике требуется исправить погрешность размера и формы заготовки. В первом случае необходимо параметр y_1 уменьшить до значения δ, во втором случае – уменьшить разброс значений y_1 от Δy_1 до δ. В первом случае задача решается относительно просто.

В соответствии с зависимостью (5.24) выбираются условия обработки, обеспечивающие требуемую точность δ за заданное время τ. При $\eta \to 0$ время $\tau \to \infty$ и обеспечить требуемую точность обработки практически невозможно. Необходимо уменьшить безразмерный коэффициент $\eta \to 0$ за счет применения непрерывной или периодической правки инструмента и повышения его режущей способности. Существенным препятствием обеспечения заданной точности обработки δ является уменьшение жесткости технологической системы. В этом случае эффективно применение методов обработки, позволяющих увеличить динамическую жёсткость системы, например, за счет ударно – циклического взаимодействия инструмента с заготовкой, наложения на заготовку или инструмент вибраций (ультразвуковых колебаний) и т.д.

Для исправления погрешности формы заготовки необходимо максимальное значение припуска $y_{1_{max}}$ уменьшить до значения δ_{max}, а минимальное значение припуска $y_{1_{min}}$ до значения δ_{min} за одинаковое время τ. Для этого получена зависимость:

$$\Delta\delta = \Delta y_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{a_3}}, \qquad (5.25)$$

где $a_3 = \dfrac{\pi \cdot tg\gamma \cdot HV \cdot F}{2 \cdot c \cdot (1-\eta) \cdot V_{кр}}$.

Исходя из зависимости (5.25), для заданных значений Δy_1 и $\Delta\delta$ определяется соотношением τ / a_3 и по нему выбираются рациональные условия обработки (параметры F, c, η, $V_{кр}$, τ). Таким образом можно устранить погрешности обработки в виде конусности, бочкооб-

разности, эксцентриситета цилиндрической заготовки, неплоскостность и другие погрешности плоских поверхностей.

При условии 0,8 < η < 1,0 упругое перемещение η (погрешность обработки δ) определяется зависимостью:

$$y = \frac{tg^2\gamma \cdot HV \cdot F \cdot m}{900 \cdot c} \cdot \left(\frac{x}{\overline{X}}\right)^3. \qquad (5.26)$$

Наибольшее влияние на параметр y оказывают параметры *x* и $\overline{X}$. С течением времени параметры y и x увеличиваются, что снижает точность обработки. Уменьшить параметр y при условии x = const можно уменьшением параметров F, m и увеличением c и $\overline{X}$. Однако основной путь уменьшения параметра y – это уменьшение величины x за счет применения рациональных характеристик круга (исключающих значительное затупление зерен) и методов правки.

Параметр шероховатости поверхности R_a на этапе выхаживания определяется:

$$R_a = 2 \cdot \sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \overline{X}^6 \cdot \rho}{tg^2\gamma \cdot m^2 \cdot V_{кр}^2} \cdot \left(\frac{V_{дет}}{i}\right)^2}, \qquad (5.27)$$

где i – количество проходов круга при отключенной поперечной подаче на станке;

$\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$ – приведенный радиус, м$^{-1}$.

С увеличением i параметр R_a уменьшается. Влияние i на параметр R_a эквивалентно уменьшению скорости детали $V_{дет}$. Следовательно, один и тот же эффект обработки можно получить как уменьшением скорости детали $V_{дет}$, так и увеличением числа проходов i при выхаживании. Уменьшение скорости детали $V_{дет}$ предполагает применение глубинного шлифования (шлифования с "ползучей подачей").

Скорость детали $V_{дет}$ в этом случае уменьшается до значения 0,1 м/мин и ниже. Для поддержания производительности обработки на заданном уровне глубина шлифования увеличивается пропорционально уменьшению скорости детали.

Исходя из зависимости (5.27), наибольшее влияние на параметр шероховатости поверхности R_a оказывают зернистость круга $\overline{X}$ и без-

размерный коэффициент η. С уменьшением зернистости круга $\overline{X}$ параметр R_a уменьшается. При весьма малой зернистости круга, например, $\overline{X}$= 1/0 … 10/7, параметр R_a может быть уменьшен до значений 0,08 … 0,006 мкм, что соответствует 11 … 14 классам шероховатости обработанной поверхности. С увеличением безразмерного коэффициента $\eta \to 1$ параметр R_a уменьшается: $R_a \to 0$.

При условии 0,8 < η < 1,0 параметр шероховатости поверхности R_a описывается:

$$R_a = \frac{0{,}15}{x^{2,4}} \cdot \left(\frac{630 \cdot \pi \cdot \overline{X}^3 \cdot V_{дет}}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \right)^{1,2} \cdot t^{0,4} \cdot \rho^{0,6} . \qquad (5.28)$$

Наибольшее влияние на параметр R_a оказывают зернистость круга $\overline{X}$ и величина линейного износа зерна x. Чем больше x и меньше $\overline{X}$, тем меньше R_a. Величина x определяется прочностью удержания зерна в круге. Чем она больше, тем больше величина x. Наибольшая прочность удержания зерна в связке достигается у алмазных кругов на металлических связках.

Заданную величину x можно получить в результате шлифования алмазным кругом абразивного круга или алмазного ролика (алмазного карандаша, алмазного резца, алмазного круга и т.д.). Как показывает практика, в процессе такого шлифования происходит быстрое затупление алмазных зерен круга до заданной величины x. Например, экспериментально установлено, что после электроэрозионной правки алмазного круга 1А1 300×20×5 АС6 100/80 М1-01 параметр шероховатости поверхности R_a при круглом врезном шлифовании твердосплавного зенкера составил 1,0 мкм. Изменение в широких пределах режимов шлифования и увеличения времени выхаживания не привело к заметному уменьшению параметра R_a. После затупления алмазных зерен круга с использованием алмазного карандаша параметр R_a уменьшился до уровня 0,2 мкм, т.е. в 5 раз, что подтверждает преобладающую роль величины *x* в формировании шероховатости обработанной поверхности. Исходя из преобразованной зависимости

$$\frac{(1-\eta)^2}{(1+\eta)} = \left(\frac{R_a}{2} \right)^{2,5} \cdot \frac{m \cdot V_{кр}}{\pi \cdot \overline{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \rho^{0,5}} , \qquad (5.29)$$

можно определить безразмерный коэффициент для данного случая. С учетом исходных данных: m = 100; $\overline{X}$ = 0,09 мм; $V_{кр}$ = 35 м/с; $V_{дет}$ = 10 м/мин; $\rho^{0,5}$ = 0,2 мм$^{-0,5}$; R_a = 0,2·10^{-3} мм безразмерный коэффициент η = 0,91.

Определим величину линейного износа максимально выступающего над связкой зерна x:

$$x = \sqrt[6]{630^2 \cdot t \cdot \left(\frac{R_a}{2}\right)^5} \cdot \frac{\eta}{(1-\eta)}. \qquad (5.30)$$

Подставляя в зависимость (5.30) значения $R_a = 0{,}2 \cdot 10^{-3}$ мм; t = 0,1 мм; $\eta = 0{,}91$, имеем x = 0,027 мм.

Величина износа зерна x равна 0,3·$\overline{X}$, т.е. фактически выступание зерна над уровнем связки отсутствует. Из этого вытекает, что уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a можно за счет существенного увеличения величины износа зерна x, применяя алмазные круги на металлических связках. Обеспечить шероховатость поверхности $R_a = 0{,}2$ мкм можно уменьшением скорости детали $V_{дет}$. Так, если принять условие $\eta = 0$, то для заданных исходных данных, согласно зависимости (5.29), скорость детали равна $V_{дет} = 46$ мм/мин, что реализуется при глубинном шлифовании.

Таким образом, обоснованы основные пути повышения точности и шероховатости обработки, используя алмазно-абразивные инструменты.

5.6. Металлографический анализ качества обработки твердых сплавов при алмазном шлифовании

Опыт применения алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов на основе карбида вольфрама свидетельствует о том, что алмазный круг претерпевает достаточно быстрый износ и потерю режущих свойств. Первоначально достаточно высокая производительность процесса к концу периода стойкости инструмента резко понижается из-за интенсивного засаливания круга. Стойкость круга составляет 6 – 15 минут. Для восстановления режущих свойств алмазно-

го круга возникает необходимость в его правке. Такой интенсивный износ круга в основном объясняется высокой твердостью обрабатываемого материала: микротвердость WC составляет 1585 – 1730 кГс/мм^2.

Основной эксплуатационной характеристикой качества рабочих поверхностей алмазных инструментов является их режущая способность. Сохранение этих свойств в течение длительного периода времени находится в прямой зависимости от применяемого метода шлифования, позволяющего в той или иной степени поддерживать высокую развитость рельефа алмазного круга, исключать его засаливание в процессе работы и обеспечивать необходимое выступание режущих зерен над связкой алмазного круга. Опыты многих исследователей [10] показывают, что алмазные круги после электроэрозионной правки обладают высокими режущими свойствами, которые существенно превышают режущие свойства, получаемые после других видов правки – абразивной, катодной и пр. Они довольно долго сохраняют режущую способность, хотя в начальный период приработки наблюдается некоторое снижение производительности. При этом имеет место повышенный расход алмазов вследствие вырывания наиболее выступающих слабо закрепленных зерен. Если работа производится в режиме алмазно-искрового шлифования, то режущая способность круга стабильно сохраняется в течение длительного времени (несколько часов). В результате электроискрового воздействия существенно повышается режущая способность кругов, что приводит к снижению напряженного состояния обрабатываемой поверхности. Так, в результате шлифования сплавов ВК8 алмазными кругами одинаковой зернистости, но с различным способом правки круга (абразивная, электроэрозионная), наблюдается формирование в карбидной фазе сжимающих остаточных напряжений, обнаружена тенденция к их возрастанию в 2 раза при шлифовании кругами, правленными электроэрозионным способом (режим механической обработки образцов – $V_{кр}$ = 30 м/с, S = 1 м/мин, режим электроэрозионной правки кругов при помощи генератора импульсов – f = 8 кГц, W = 0,009 Дж) [172].

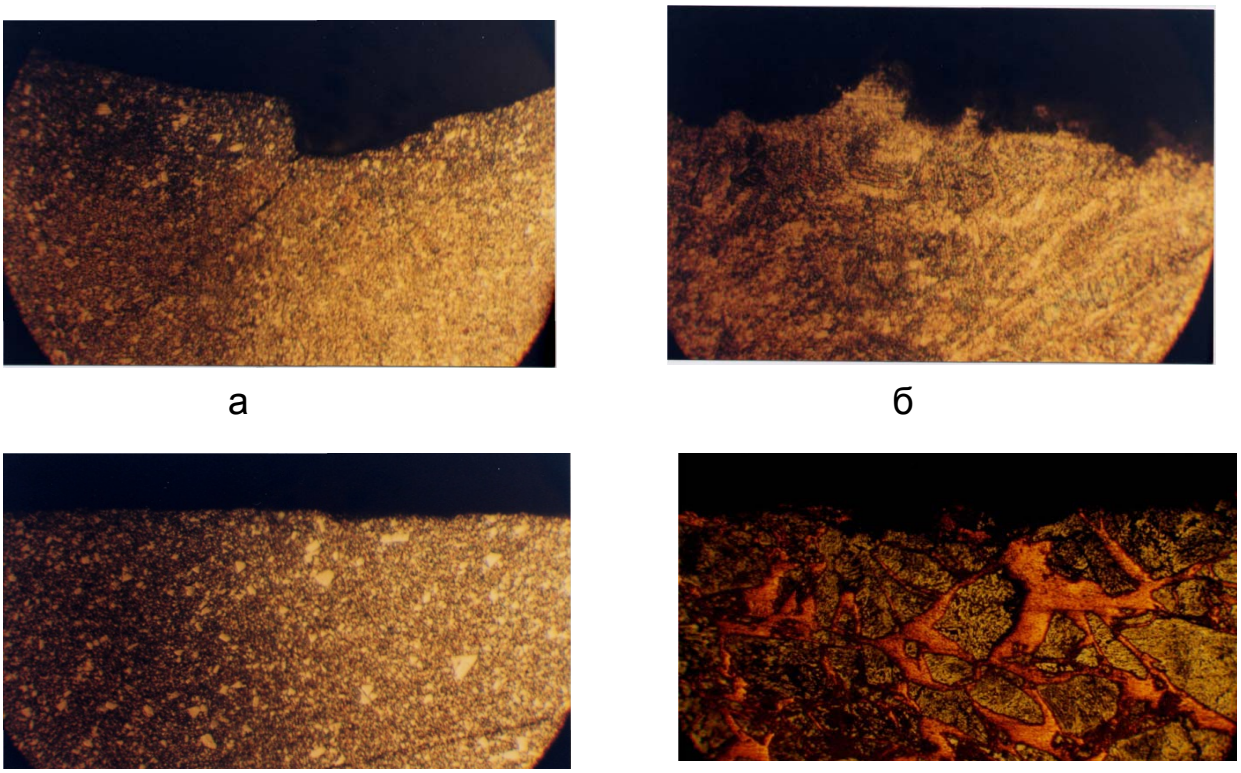
Сжимающий характер остаточных напряжений указывает на существенное значение силового фактора в формировании напряженного состояния обрабатываемой поверхности в обоих случаях правки и меньшим тепловыделении вследствие лучшей микрогеометрии алмаз-

ных зерен и большего выступания их над связкой в случае шлифования кругами, подвергнутыми правке электроэрозионным способом. Процесс алмазно-искрового шлифования (АИШ) основан на совмещении в зоне обработки механического резания и электроискрового воздействия.

Исследование качества поверхности труднообрабатываемых сплавов после АИШ представляет практический интерес. Твердые сплавы на основе WC имеют относительно низкую прочность на изгиб. Как известно, твердость карбида вольфрама очень высокая, но в то же время он очень хрупкий. При АИШ высокотемпературный и высокоскоростной локальный нагрев приводит к существенным изменениям в условиях работы алмазных зерен и, следовательно, может влиять на фазовый состав, микроструктуру и напряженное состояние обработанной поверхности. Одновременно с этим происходит электроискровое воздействие на материал инструмента и его правка, что в свою очередь отражается на параметрах состояния поверхностного слоя. На процесс формирования обработанной поверхности при АИШ оказывают влияние в основном электрические параметры обработки: сила тока, напряжение. С увеличением силы тока (от 10 до 60 А) высота микронеровностей несколько уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением силы тока повышается интенсивность электрохимических процессов, что уменьшает долю механического съема. Некоторое уменьшение микротвердости при электрохимическом алмазном шлифовании можно объяснить меньшими силовыми воздействиями на обрабатываемую деталь вследствие преимущественного растворения кобальтовой связки [172]. В связи с этим важно оценить параметры качества обработки крупнозернистых и мелкозернистых твердых сплавов на основе карбида вольфрама после алмазно-искрового и обычного алмазного шлифования кругами формы 12А1 и 1А1 на металлической связке М1-01 [117].

Первоначально проводились исследования процесса алмазного шлифования кругом 12А1 45° $150\times10\times3\times32$ АС6 125/100 М1-01 4 (с применением электроэрозионной правки) торца кольца, выполненного из композиции "твердый сплав "Релит" – медь". Твердый сплав релит представляет собой зерна литого карбида вольфрама размером 0,18 – 0,28 мм, твердостью 2100 – 2800 кГс/мм^2. Композиция "твердый

сплав "Релит" – медь" получена методом прессования с удельным давлением 3 – 4 т/см^2 и последующим спеканием в вакуумной печи при температуре 1150 – 1200 ^{o}С.



а б

в г

Рис. 5.7. Микроструктура твердых сплавов
на основе карбида вольфрама

Структура сплава "Релит" представляет собой вольфрамовый каркас, поры которого заполнены медью (рис. 5.7,а). Медь и вольфрам практически не растворяются один в другом ни в жидком, ни в твердом состоянии. Твердые сплавы на основе WC имеют простую кристаллическую решетку, которая не распадается при нагреве и отличается высокой прочностью. Особенностью данного сплава является то, что размер зерна WC составляет 0,2 мм и выше, что затрудняет процесс шлифования.

Шлифование торца вращающегося кольца торцом алмазного круга производилось на внутришлифовальном станке. Кольцо устанавливалось в патроне. Круг устанавливался на шпинделе станка и прижимался к торцу кольца. Скорость подачи круга в радиальном направлении составляла 1,5 мм/мин, скорость вращения круга –

30 м/сек, скорость вращения кольца – 60 м/мин, СОЖ – 3 %-й раствор Na_2NO_3. Электроэрозионная правка алмазного круга производилась с использованием источника постоянного тока мощностью до 2-х кВт.

Для определения фазового состава проводились рентгеновские съемки поверхностного и предповерхностного слоя (около 5 мкм от поверхности) прошлифованного образца на дифроктометре Дрон-2,0 в излучении хромового анода. Дифрактограммы записывались автоматически при непрерывном вращении образца и счетчика. На дифрактограммах поверхностного и предповерхностного слоя выявляются линии только WC и Cu. Линии достаточно сильные и идентифицируются уверенно. Интенсивность дифракционных линий поверхностного слоя меньше, чем предповерхностного, что объясняется различной чистотой поверхности.

Металлографический анализ выявляет наличие микролунок (рис. 5.7,а). Под действием электрического разряда происходит быстрый высокотемпературный локальный нагрев поверхности электродов с образованием микролунок за счет плавления, кипения, испарения металла. Глубина лунок на поверхности нашего образца в среднем равна 4 мкм.

Измерение микротвердости Н поверхностного и предповерхностного слоя образца при нагрузке 100 г выявили наличие упрочнения в поверхностном слое: Н = 1226,8 кГс/мм², а в приповерхностном слое Н = 1062,3 кГс/мм². Опыты многих исследователей показали, что существует оптимальная микротвердость поверхностных слоев трущихся деталей. Для повышения износоустойчивости деталей машин необходимо создавать в процессе АИШ микротвердость поверхностных слоев трения, равную или несколько большую оптимальной для данных условий трения поверхностей. Задача будущих исследований – определить оптимальную величину микротвердости для сплава "Релит" после АИШ для заданных условий трения.

Остаточные ориентированные напряжения σ определялись рентгенографическим методом многократных наклонных съемок ("$\sin^2\Psi$-метод) на дифрактометре Дрон-1 в излучениях хромового анода. Регистрация профилей дифракционных линий проводилась по точкам – способом набора заданного числа импульсов. Расчет напряжений в поверхностном слое сплава показал наличие растягивающих

напряжений в карбидной фазе: σ = +24,43 кГс/мм^2; напряжения в медной составляющей сплава равны нулю. На основании приведенных выше результатов можно сделать следующие выводы:

1. Электрические разряды выполняют вспомогательную роль, их действие способствует интенсификации основного процесса шлифования, а именно поддержанию высокой режущей способности алмазного круга.

2. Исследование показателей качества поверхностного слоя сплава выявили оптимальные значения с точки зрения износостойкости, а именно: отсутствие фазовых превращений; отсутствие микротрещин; наличие упрочнения поверхностного слоя.

Сплав ВК8 (92 % WC и Co 8 %) относится к I группе твердых сплавов и применяется в основном для обработки чугуна, цветных металлов. Порошок WC прессуют и спекают при высокой температуре (1400 ^{o}C) с порошком кобальта, при этом кобальт является пластичной связкой для WC и сплавов, неметаллических материалов [60]. Весьма целесообразно применение резцов, оснащенных ВК8, при непрерывном точении жаропрочных сплавов (ЭИ437А, ЭИ767, ЭИ766, ЭИ787, ЭИ827), например, при обработке дисков турбин. Одновременно установлена невозможность использования твердых сплавов при непрерывном точении жаропрочных сплавов, так как уже в первые минуты работы резцов имеют место крупные сколы пластинок, после чего их дальнейшее использование становится невозможным. Наблюдения за износом резцов, оснащенных твердым сплавом при непрерывном точении сплава ЭИ437, показывают, что имеет место сваривание образующейся стружки с твердым сплавом. При срыве налипших частиц приварившейся стружки происходит отслаивание твердого сплава как по передней, так и по задней поверхностям [54].

Таким образом, резцы из твердых сплавов типа ВК8 работают в условиях высоких температур и знакопеременных нагрузок. Поэтому большой интерес представляют вопросы изучения влияния условий АИШ на основные характеристики качества поверхности, которые определяют поведение резцов и других деталей в процессе эксплуатации.

Качество поверхностного слоя пластинок из твердого сплава оценивается совокупностью показателей, характеризующих геометрию поверхностного слоя и его физико-механические свойства. Первая группа

показателей включает характеристику макро- и микронеровностей поверхности; наличие или отсутствие микротрещин является важным показателем работоспособности инструмента, а вторая – характеристики структуры, напряженное состояние, фазовый состав и твердость [119]. Усталостная прочность является одной из основных эксплуатационных характеристик для твердосплавных инструментов. Как было установлено многочисленными наблюдениями исследователей, очаги разрушения деталей от усталости материала зарождаются на их поверхности. Поэтому усталостная прочность деталей машин в значительной степени определяется шероховатостью их поверхностей и физическим состоянием поверхностного слоя. Наличие на поверхности детали, работающей в условиях циклической и знакопеременных нагрузок, отдельных дефектов и шероховатостей способствует концентрации напряжений, величина которых может превысить предел усталости материала. В этом случае поверхностные дефекты и обработочные риски играют роль очагов возникновения субмикроскопических нарушений сплошности материала поверхностного слоя и его разрыхления, являющихся первопричиной образования усталостных трещин.

Для исследования качества поверхности сплава ВК8 были взяты четыре образца, прошлифованные на круглошлифовальном станке алмазным кругом 1А1 300×25×6 АС6 125/100 М1-01 4. Образец №1 шлифовался в режиме алмазно-искрового шлифования: сила тока I = 20 А, поперечная подача $S_{поп}$ =0,2 мм/дв. ход, скорость круга $V_{кр}$= 25 м/с, скорость вращения заготовки $V_{вр.заг.}$=180 об./мин, скорость движения стола $V_{стола}$=12 м/мин, съем материала составил 6 мм. Образец №2 после шлифования на выше указанном режиме подвергался выхаживанию, то есть шлифованию без подачи (в течение 3 минут) до полного исчезновения искры. Съем материала также составил 6 мм.

Образец №3 обрабатывался по режиму обычного алмазного шлифования, с теми же механическими параметрами обработки. Однако алмазный круг предварительно подвергался электроэрозионной правке. Стойкость его работы увеличилась примерно в 10 раз.

Образец №4 обработан по схеме: обычное алмазное шлифование + выхаживание (без подачи).

Весьма тонкие поверхностные слои материала после шлифова-

ния характеризуются определенными изменениями физико-механических свойств по сравнению со свойствами исходного материала. Для установления наличия фазовых превращений при различных условиях шлифования было проведено рентгеноструктурное исследование четырех образцов (пластин) из твердого сплава марки ВК8. В результате произведенного фазового анализа было установлено наличие только двух фаз WC и Co – β – твердого раствора. Оценка внутренних напряжений в поверхностном слое проводилась по выше описанной методике для сплава "Релит". Показателем степени напряженного состояния в поверхностном слое является полуширина В дифракционной кривой.

Режим АИШ формирует незначительные растягивающие напряжения σ_{x1}= + 24 кГс/мм², что можно объяснить воздействием электрических разрядов на поверхность образца. Глубина лунок около 18 мкм (рис. 5.7,б). Режим №2 несколько уменьшает растягивающие напряжения: σ_{x2}= + 15,74 кГс/мм². Сжимающие напряжения выявлены в образце №3 и составляют σ_{x3}= –26,22 кГс/мм².

Многочисленными исследованиями установлено, что при наличии в поверхностном слое сжимающих напряжений усталостная прочность изделия значительно возрастает. В рамках данного режима можно говорить об улучшении состояния поверхностного слоя. Применяемая же доводка в образце №4 изменяет знак напряжений и составляет: σ_{x4} = +19,54 кГс/мм². Металлографические исследования образцов также показали различное состояние поверхностного слоя. Особенно необходимо выделить поверхность образца №2 (рис. 5.7,в). На поверхности отчетливо видны микротрещины, которые являются результатом релаксации внутренних напряжений. Такой механизм трещинообразования характерен для хрупких и твердых материалов. Такое объяснение логично сочетается со значением внутренних напряжений данного образца (некоторое снижение растягивающих напряжений по сравнению с режимом АИШ №1). Глубина микролунок составляет 8 мкм для образца №2, глубина микролунок от электрических разрядов после АИШ равна 18 мкм. Поверхность образца №3 является оптимальной, так как на ней отсутствуют задиры, трещины (рис. 5.7,г).

Полученные данные основных показателей качества образцов позволяют рекомендовать режим №3 для шлифования сплава ВК8.

Алмазный круг после электроэрозионной правки показывает не только повышенную стойкость, но и одновременно обеспечивает качественный поверхностный слой, а именно: "чистую" поверхность, наличие сжимающих напряжений, оптимальную шероховатость, что в свою очередь должно обеспечить высокую эксплуатационную надежность деталей, выполненных из сплава ВК8.

5.7. Исследование макроструктуры и шероховатости поверхности стали при алмазно-искровом шлифовании

Метод алмазно-искрового шлифования (АИШ) относится к комбинированным упрочняющим методам обработки деталей машин, в которых совмещаются процессы пластической деформации и структурно-фазовые превращения [8; 116]. В результате АИШ-упрочнения в поверхностном слое стали формируется структура гарденита ("белого слоя"). Белые слои как метастабильные структуры состоят из высокодисперсного мартенсита, остаточного аустенита и карбицидов, а в отдельных случаях и феррита (в зависимости от исходной микроструктуры стали). Такие структуры намного дисперснее структур обычной закалки. Белые слои являются катодами по отношению к основному металлу или зоне, лежащей под ними; плохо травятся обычными реактивами и более коррозионностойки; обладают повышенной твердостью, прочностью. В результате фазовых структурных превращений и пластического деформирования в них возникают остаточные напряжения сжатия. Такие физико-механические и электромеханические свойства определяют высокую работоспособность импульсно-упрочненного материала [8].

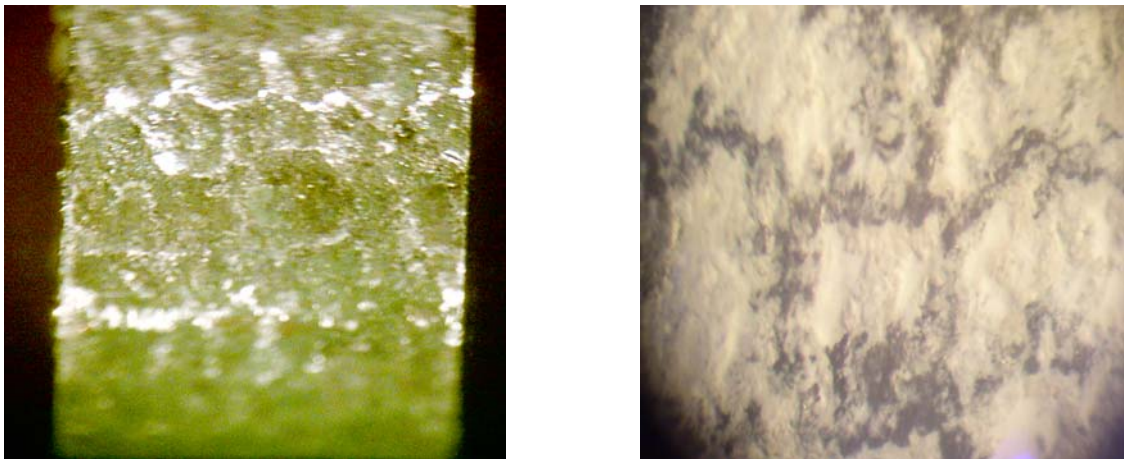
В процессе АИШ-упрочнения электрические разряды играют определяющую роль: способствуют лучшему проникновению смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания и на контактные участки режущей поверхности круга с металлом; являются дополнительным источником тепла, изменяют тепловой баланс шлифования [172]. Под действием разряда происходит быстрый высокотемпературный локальный нагрев поверхности электродов с образованием макролунок за счет плавления, кипения, испарения металла и выброса его в виде микрошариков. Макролунки представляют собой зону эрозии поверхностного слоя под действием электрической энергии.

При применении энергии постоянного напряжения происходит стабильное перемыкание электродов срезаемой стружкой и частицами диспергированного металла. Между связкой шлифовального круга, стружкой и обрабатываемым материалом возникают разряды, которые могут быть кратковременные – в случае, если образующаяся стружка-электрод с большой скоростью перемыкает зазор после инициирования разряда или нормальной длительности – если условия позволяют полностью сформироваться разряду после пробоя. При этом анод (круг) претерпевает обычно меньше повреждения, чем катод. Межэлектродный промежуток заполнен смазочно-охлаждающей жидкостью. Как правило, это слабый раствор электролита. Электрические разряды, действующие в зоне шлифования, оказывают существенное влияние на рабочую поверхность инструмента и на формирование поверхностного слоя изделия [172].

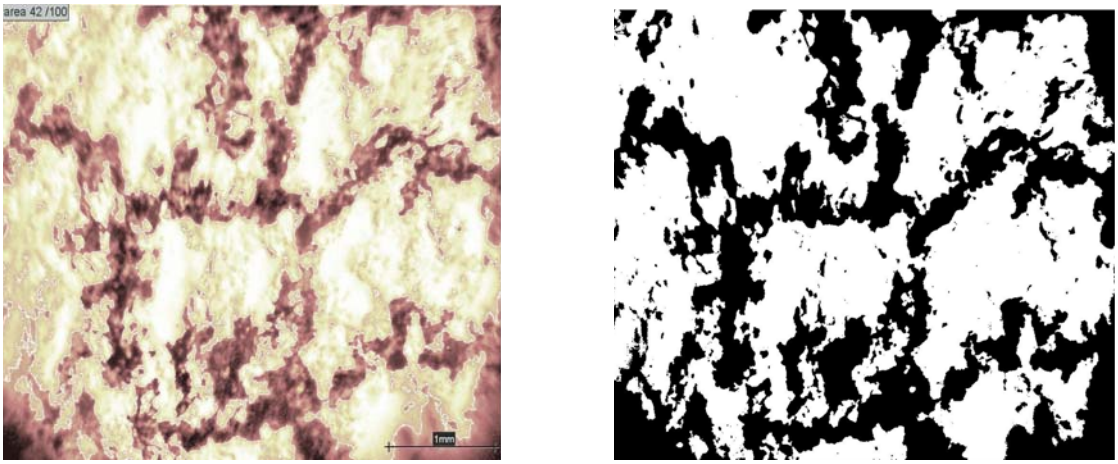
В связи с вышеизложенным, возникает необходимость оценить влияние АИШ в режиме упрочнения на одни из основных показателей качества поверхности обрабатываемого изделия: макроструктуру и шероховатость поверхностного слоя [177].

Исследования проводились на образцах из углеродистых сталей 45, У7, У12 в состоянии после закалки и низкого отпуска и последующего АИШ-упрочнения на двух режимах: АИШ № 1 (оптимальный для упрочнения режим обработки с глубиной шлифования t = 0,07 мм) и АИШ № 2 (режим, при котором, по данным предварительных исследований, не образуется качественный белый слой (t = 0,035 мм)). Шлифовальный круг был подключен к источнику постоянного тока мощностью до 3,6 кВт, напряжение в сети 36 В, сила тока зависела от параметра поперечной подачи (t, мм). Макроструктура поверхности после алмазно-искрового шлифования изучалась с помощью металлографического микроскопа при увеличении в 30 раз (рис. 5.8,а).

В рамках макроскопического анализа была посчитана площадь лунок $S_{лун}$ в мм^2, образовавшихся от эрозионного действия искры, в процессе АИШ. Для этого, для увеличения контрастности, на поверхность образцов была нанесена водоэмульсионная краска (рис. 5.8,б). Затем было проведено повторное фотографирование образцов. С помощью методики и специальной компьютерной программы обработки изображения [51] была выделена темная и светлая составляющие изображения (монохромное изображение) (рис. 5.8,в,г).



а б



в г

Рис. 5.8. Вид поверхности образца и обработка изображения для расчета площади лунок $S_{лун}$

Далее было посчитано процентное соотношение темной и светлой составляющих макроструктуры обработанных образцов и линейки (с целью определения масштаба изображения). Результаты исследования представлены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Площадь зоны эрозии углеродистых сталей в результате АИШ-обработки

Сталь	Площадь лунок, мм^2	
	АИШ № 1	АИШ № 2
Сталь 45	11,56	11,35
У7	10,5	10,25
У12	12,34	12,17

Шероховатость поверхности исследовалась на образцах из стали У7 (с исходной структурой мартенсит отпуска). Измерение шероховатости производилось традиционным контактным методом, путем прощупывания рельефа образца, на приборе Surtronic 3+.

Макроскопический анализ показал, что электроэрозионные следы появляются на обработанной поверхности случайно. Интенсивность действия разрядов на обрабатываемый материал и соответственно их влияние на шероховатость обработанной поверхности возрастают с повышением силы технологического тока, зависящего от глубины шлифования. Величина площади лунок или размер электроэрозии зависит не только от технологических параметров обработки, но и от содержания углерода в стали, которое в свою очередь определяет величину теплопроводности (рис. 5.9).

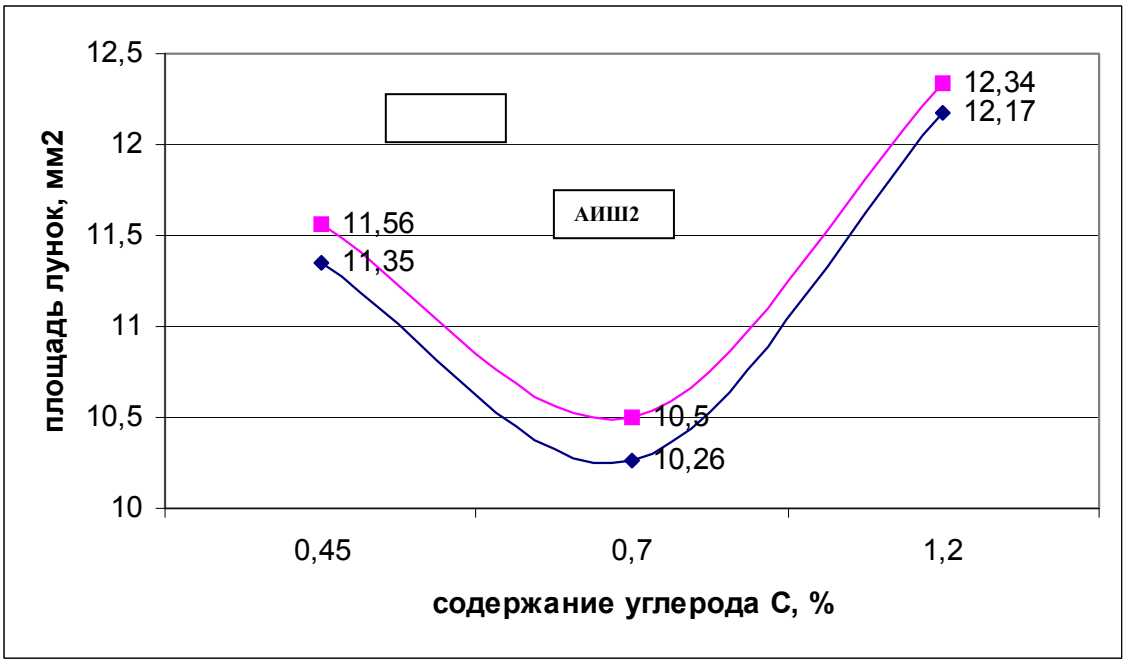


Рис. 5.9. Площадь лунок (размер электроэрозии) поверхности углеродистых сталей после АИШ

Теплопроводность стали существенно влияет на скорость охлаждения металла, формирование белых слоев и величину эрозионной зоны поверхностного слоя стали (табл. 5.7) [144]. Чем выше теплопроводность стали, тем меньше размер электроэрозии поверхности. Сталь У7 при температуре 900 ^{o}С имеет наибольшую теплопроводность λ = 29 Вт/(м·^{0}С) из исследуемых углеродистых сталей и

наименьшую величину электроэрозии. Наибольшая электроэрозия стали У12 объясняется не только наименьшим коэффициентом теплопроводности, но и наличием карбидов цементита в структуре данной стали, которые ухудшают теплоотвод.

Результаты исследования шероховатости поверхности представлены в табл. 5.8.

Таблица 5.7

Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м· ^{0}С)

Марка стали	Температура испытания, ^{0}С					
	20	100	300	500	700	900
Сталь 45	52	51	46	38	30	26
У7	46	46	41	33 (600 ^{0}С)	-	29
У12	40	45	44	35	28	25

Таблица 5.8

Характеристики шероховатости поверхностного слоя стали У7 при АИШ

№	Режимы обработки	Характеристики шероховатости	
		Среднее отклонение профиля R_a, мкм	Средняя величина неровностей R_z, мкм
1	АИШ № 1	4,2	21,2
2	АИШ № 2	3,94	13,1
3	АИШ № 1 + выхаживание	1,68	8,6
4	АИШ № 2 + выхаживание	1,36	8,2

Режим АИШ № 1 формирует более выраженную шероховатость по сравнению с режимом АИШ № 2 из-за большей глубины шлифования и силы тока в этом режиме. Режимы позиций 3 и 4 (табл. 5.8) после обработки АИШ включали выхаживание поверхности, которое осуществлялось по упругой схеме при отсутствии поперечной подачи. После АИШ № 1, выхаживание понизило значения R_a и R_z на 40 %, а после АИШ № 2, значения R_a уменьшились на 34 %, R_z – на 63 %.

Исследования показали, что шероховатость поверхности после алмазно-искрового шлифования можно значительно улучшить (до 6 – 7 классов) за счет введения в цикл обработки процесса выхаживания.

5.8. Повышение эффективности доводки поверхностей деталей пастами и суспензиями

Особую роль в техническом процессе изготовления деталей играют чистовые и отделочные методы обработки. Наиболее распространенным из них является алмазно-абразивная доводка, которая позволяет заменить шлифование, получить 12 – 14 классы чистоты поверхности и отклонения от требуемой геометрической формы обработанных (плоских, цилиндрических и сферических) поверхностей в пределах 0,1 – 0,3 мм [26; 43; 167; 190].

Технологическое преимущество механических доводок заключается в том, что за одну операцию можно осуществить сначала черновой, а затем окончательный чистовой переход [23].

Эксплуатационные качества обработки поверхности после доводки могут быть выше, чем после точного шлифования, суперфиниша, хонингования. В отечественной и зарубежной промышленности на доводочных станках обрабатываются: плоские поверхности поршневых колец, поворотных заслонок, кулисных камней, зубчатых секторов и шестерен, мембран, шатунов; плоские и цилиндрические поверхности деталей гидро- и топливной аппаратуры агрегатов, стыковые поверхности корпусных деталей, салазок ползунов и суппортов станков, торцевые поверхности подшипников, быстросменные твердосплавные пластины резцов, фрез, калибры, плоскопараллельные меры длины, торцевые поверхности наборных фрез и т.д. В приборостроении широко применяются доводочные и полировальные станки для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов, например, керамик марок ЦМ332 и 22ХС стеатита, твердых сплавов, рубина, кварца, кремния, арсенида галлия, ферритов, ситаллов и т.д.

В зависимости от способа подачи абразива в зону обработки различают следующие методы доводки:

- с непрерывной подачей абразивной смеси (суспензии) на рабочие поверхности притиров;
- с намазкой – нанесением абразивной алмазной смеси – пасты на притиры;
- притирами или плитами, предварительно шаржированными зернами паст.

По точности и шероховатости обработанной поверхности доводочные операции делятся на грубые – припуск на сторону 0,02 – 0,05 мм (чистота 9 – 10 классы (геометрия 3,5 мкм)), чистовые – припуск 0,005 – 0,01 мм (геометрия 1 – 2 мкм), чистота 10 – 11 классы, тонкие – припуск 0,0003 – 0,001 мм (точность 0,1 – 0,5 мкм), чистота 12 – 14 классы.

Доводка стальных деталей осуществляется шлифованием и микропорошками из электрокорунда Э (нормальный, белый, титанистый, хромистый), монорунда МОНО, карбида кремния ВЗ, алмазными микропорошками АСМ, АСН, АМ и микропорошками эльбора ЛМ; доводка твердосплавных деталей карбидами кремния КЗ, бора В4С, алмазными микропорошками. Окончательную доводку деталей из стали и мягких материалов (медь, алюминий и сплавы) рекомендуется выполнять абразивными материалами пониженной твердости (окись хрома, окись алюминия, крокус и глинозем, прокаленный при температуре 120 – 130 ^{0}С). Применение этих абразивов позволяет устранить нашаржирование их в материал детали.

Физическая сущность доводки

Абразивная доводка – процесс массового динамического воздействия абразивных зерен на обрабатываемый материал, происходящий при активном участии среды, в которой происходит снятие тончайших стружек. Доводка основывается на механических процессах, связанных с выкаливанием и отрыванием частиц обрабатываемого материала, образованием стружки, пластическим и другим деформированием и переддеформированием обрабатываемой поверхности. Химические и физико-химические процессы последних связаны с образованием окислительных пленок.

При введении в состав суспензии поверхностно активных веществ на обрабатываемой поверхности адсорбируются полярные молекулы, проникающие вглубь обрабатываемого материала по микротрещинам, возникающим в процессе деформации поверхностного слоя. В результате адсорбционных процессов уменьшается твердость твердого тела.

Абразивные зерна на поверхности деталей из стали и чугуна воздействуют следующим образом: при переменном движении детали и притира относительно друг друга абразивные зерна то врезаются в материал притира и детали, то выходят из него, принимая каждый раз

новое положение. При этом они изнашиваются со всех сторон. Как только действующее усилие на отдельные зерна превысит их прочность, затупившиеся зерна разламываются, образуя несколько мелких зерен, которые имеют острые режущие кромки.

Таким образом, в процессе работы восстанавливается абразивная способность суспензии, хотя давление на режущие кромки зерен уменьшается и они оставляют следы на обрабатываемой поверхности меньшей глубины.

Особенность процесса доводки деталей шаржированными притирами по сравнению с доводкой свободными зернами паст и суспензией следующая.

Закрепленные в поверхности притира зерна внедряются в поверхность детали на меньшую глубину, чем зерна той же зернистости, находящиеся в свободном состоянии в слое пасты или суспензии. Поэтому результаты доводки деталей стабильнее.

Доводка суспензиями

При плоской односторонней и двухсторонней доводке объем снятого материала прямо пропорционален пути доводки и увеличивается с ростом зернистости абразива, давления P и скорости V.

Количество абразивной суспензии должно быть достаточным для того чтобы создать на всей поверхности притира равномерный слой. При разрыве слоя суспензии произойдет непосредственное соприкосновение поверхностей обрабатываемой детали и притира.

Вязкость жидкости оказывает незначительное влияние на абразивные свойства суспензии. Рабочая жидкость – веретенное масло, керосин и эмульсии (75 % веретенного масла, 8 % канифоля, 10 % леиновой кислоты, 4,5 % спирта, 4,5 % каустической соды). Хорошо зарекомендовало себя веретенное масло.

Суспензии обычно применяются для окончательной доводки. Абразивная способность алмазных суспензий при доводке сталей Х12Ф1 в 2,5 – 7,5 раза выше, чем абразивных суспензий (при тех же условиях обработки).

Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), применяемые при алмазно-абразивной обработке

СОЖ способствует формированию поверхностного слоя детали и его модифицирования пленками различного назначения, например,

антикоррозийными, гидрофобными и т.д. Диспергирующее действие СОЖ позволяет эффективно снижать поверхностную энергию в зоне разрушения. За счет отвода тепла из зоны обработки снижается контактная температура.

СОЖ классифицируют по химической структуре и разделяют на углеводородные составы, эмульсионные и водные жидкости.

Водные СОЖ разделяются на электролиты, водные растворы поверхностных веществ (ПАВ) и суспензии. Часто используют комбинированные составы, содержащие одновременно растворы солей.

ПАВ

В зарубежной литературе СОЖ этого класса известны как химические или синтетические жидкости. Эмульсиями называются дисперсные системы, состоящие из двух жидкостей, взаимно нерастворимых или малорастворимых. Жидкость, являющаяся дисперсной фазой, распределена в форме мельчайших капелек. При обработке материалов резанием применяют эмульсии "масло в воде". Концентрат, разбавляемый водой, называют эмульсиями. Современные эмульсии являются сложными коллоидными системами, включающими эмульгаторы, активные присадки, ингибиторы коррозии, бактерицидные добавки и другие компоненты. К углеводородным СОЖ относятся минеральные и растительные масла.

Иногда используют компаундированные системы – смеси минеральных и растительных масел. Однако, последние дороги и дефицитны. Значительно чаще используют минеральные масла, легированные присадками. Последние по характеру действия можно разделить на: антифрикционные, противоизносные и противозадирные. Масла с присадками обычно гораздо эффективнее чистых минеральных масел. К углеводородным СОЖ относятся также органические растворители, например, четыреххлористый углерод, керосин.

Для подавления коррозионной агрессивности СОЖ используются ингибиторы и пассиваторы коррозии. Ингибиторы – вещества, замедляющие электрохимические процессы между внешней средой и металлом. Действие пассиваторов металла заключается в образовании на его поверхности защитной пленки, предохраняющей металл от дальнейшего развития коррозионных процессов. В качестве антикоррозионных присадок к водным растворам рекомендуется использовать соли щелочных металлов, буру, первичный и третичный фосфат, нит-

рит натрия, этаноламины, их соли с жирными кислотами. Для придания антикоррозийных свойств эмульсиям ингибиторам коррозии можно вводить как в водную, так и в масляную фазы. В водную составляющую эмульсий вводят: нитриты натрия, калия и лития, соду, триэтаноламин, олеиновую кислоту, а в масляную: соединения бората глицерина с щелочами КОН, NaOH, LiOH, $Ca(OH)_2$, амином или спиртоамином. Наибольшее применение в производственных условиях находят: ингибитор коррозии – триэтаноламин и пассиватор – нитрит натрия.

СОЖ легко загнивает (особенно эмульсия). Радикальным средством повышения бактерицидности СОЖ является использование всевозможных бактерицидных присадок: финил-фенолета натрия и других продуктов фенольного типа, нитробутанола, четвертных аммониевых солей, метилового ацетата ртути, мертиолята, растворяемого в СОЖ 1:105, 1:106. Чаще используют порошок гексахлорфена (130 г гексахлорфена и 50 г каустической соды в 1 литре воды) – идет 1,2 г на 1 л эмульсии. К пенообразованию особенно склонны эмульсии и легкие минеральные масла. Антивсмениваемость водных композиций обеспечивают добавкой 5 % смеси кальциевых солей слабых кислот и триэтаноламин-фосфата. Для эмульсий рекомендуется препарат, представляющий смесь минерального масла, полиэтилена и микрокристаллического парафина – 3 – 5 %. Для масляных СОЖ – присадка: 6 – 12 % соли кароксильной кислоты, 2 – 4 % соли сульфокислоты, 0,05 – 1 % окисленного микровоска, 70 – 90 % линерального масла.

Выбор СОЖ:

- для скоростного и обычного шлифования: МР-4 (углеводородная); МР-1 (масляная); Укринол-12 (эмульсия); Укринол-2;
- для хонингования и суперфиниширования: 7 – 10 % эмульсия НСК-5; ВН-4; ОСМ-1.

Взамен импортного Хонило-1 следует использовать ОСМ-1 на станки "Тиленхауз" для доводки сфер штоков. СОЖ Укринол-1-12 и Аквол-2 в различных процентных соотношениях равнозначны составу "Чимпериал 20", разработанному фирмой Цинциннати (США) по максимальной величине бесприжоговой подачи, удельной производительности шлифования, шероховатости и удельной мощности. Необходим эффективный способ подвода СОЖ, т.е. истечение скорости жидкости из сопла или использование энергии воздушных потоков, окружающих

шлифовальный круг. Рекомендуемая СОЖ для хонингования: Тринатрий фосфат 250 г; Тиамогевина 100 г; Триэтаноламин 380 г; Глицерин 200 г; Нитрий натрия 300 г на 100 л.

Получила применение СОЖ, содержащая: 54 % ПЭО (полиэтилен гликоль), 2 % моноэталоамина, 0,2 % нитрит натрия, 0,05 % ТМС-31.

Перспективы применения СОЖ

Повышение эффективности действия СОЖ при обработке материалов резанием предполагает:

1. Изменение условий контактирования СОЖ с режущим инструментом и обрабатываемой деталью.

1.1. Динамическая активация повышения скорости движения СОЖ относительно объекта процесса резания.

1.2. Рациональная траектория движения СОЖ.

1.3. Оптимизация количества (раствора) СОЖ.

2. Изменение физико-химических свойств СОЖ.

2.1. Традиционное средство – легирование СОЖ присадками, содержащими химически и поверхностно-активное вещество.

Обычно стремятся повысить физическую и химическую активность СОЖ по отношению к обрабатываемой детали и режущему инструменту, чтобы создать на их контактирующих поверхностях более прочные и термостойкие химические и физические пленки.

В принципе для всех видов обработки металлов резанием можно создать типаж унифицированных СОЖ, включающих всего 12 составов. В это число входят: одна эмульсия и одна синтетическая жидкость, предназначенные специально для шлифования различных материалов, и легкое масло с присадками для хонингования. Две масляные жидкости с различным количеством присадок для лезвийной и абразивной обработки труднообрабатываемых материалов. Одна – для обработки титановых сплавов.

Эффективность финишной обработки плоскостей на станках "Растр-350"

Доводка плоскостей на станках "Растр-350" позволяет достигать 10–11 классов чистоты поверхности и плоскостности до 0,001 – 0,002 мм с обеспечением различного микрорельефа за счет возможности регулирования "рабочего движения" станка. В результате сложения взаимно перпендикулярных колебаний шатунов с различными частотами каж-

дая точка поверхности притира движется по траектории, имеющей вид сетки сложной конфигурации. На рис. 5.10 показаны фрагменты траекторий, воспроизведенных станком.

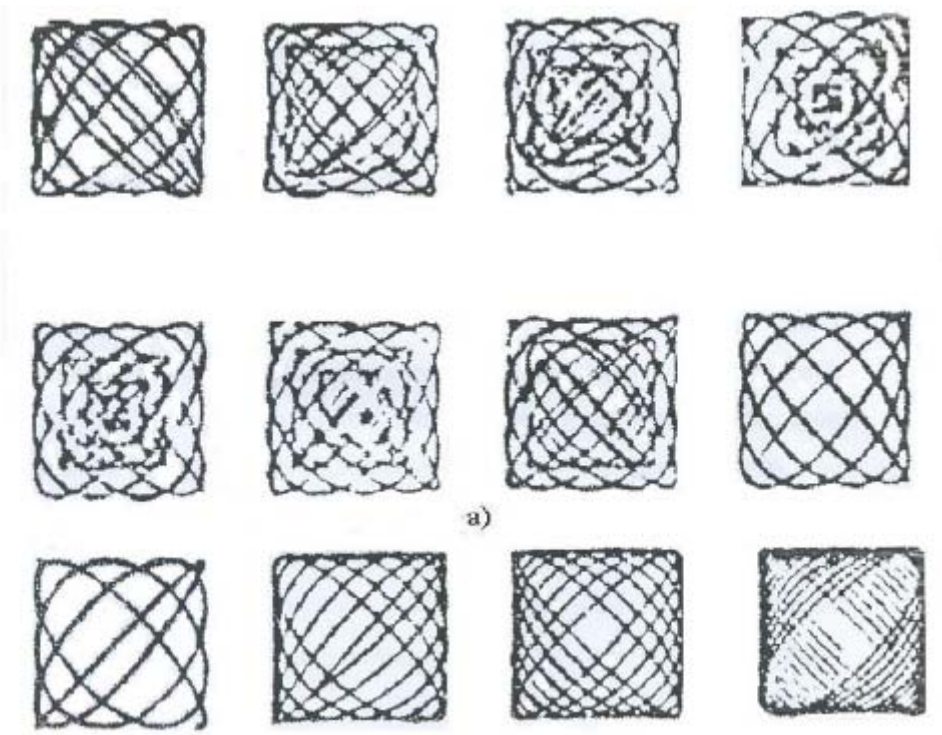


Рис. 5.10. Траектории притира: а – при изменении расстройки частот; б – при изменении амплитуд колебаний

Сетка траектории распределена по площади квадрата со сторонами, равными ходам шатунов. Траектория образуется из последовательно сменяющихся фигур вращений. Кадры чередуются с частотою $n = (n_2 - n_1)$, где n_2 и n_1 – количество оборотов в минуту эксцентриковых валов с нерегулируемым шкивом и вариатором соответственно.

Рисунок траектории в каждом кадре индивидуален, а линии – строки, из которых состоит кадр, не повторяются в последующих кадрах. Сложность и неповторимость траекторий точек притира на практике означает, что каждое зерно все время проходит по новому месту обрабатываемой поверхности и не оставляет на ней глубоких следов, благодаря чему уменьшается шероховатость.

Многократное самопересечение траектории при непрерывной смене направления движения заставляет абразивные зерна работать всеми гранями своих вершин, что повышает режущую способность инструмента и увеличивает производительность процесса. Постепенное

и плавное уменьшение амплитуд колебаний притира в конечной стадии доводки способствует ликвидации отдельных рисок и получению однородного микрорельефа на обработанной поверхности.

Установлено, что на результаты доводки (особенно на алмазных плитах) оказывает влияние плотность сетки распределенной траектории. Плотность сетки определяет число строк в кадре $N = (n_2 + n_1)/(n_2 - n_1)$. Она управляется изменением расстройки частот исходных колебаний $(n_2 - n_1)$: чем меньше расстройка, тем плотнее сетка.

Возможность плавного регулирования плотности позволяет подобрать на станке такую траекторию, при которой шероховатость доведенной поверхности для конкретного сочетания обрабатываемого и абразивного материала будет наименьшей. Более того, целенаправленный выбор плотности позволяет формировать на поверхности обрабатываемых деталей микрорельеф с оптимальной геометрической структурой для таких эксплуатационных свойств, как износостойкость, контактная жесткость, герметичность стыка и т.д.

Поскольку при доводке притир движется с равными мгновенными скоростями всех точек, пути трения деталей одинаковы по всей поверхности. Средняя скорость резания определяется формулой $V = 3A \cdot (n_2 + n_1)$, где A – амплитуда колебаний (половина хода шатунов). Единственным условием равномерного износа притира является равномерное распределение обрабатываемых деталей по его поверхности. Выполнение этого требования обеспечивается применением соответствующих кассет для укрепления обрабатываемых деталей.

Данная технология эффективно используется для обработки поверхностей ответственных деталей авиационного назначения.

Выводы

1. Раскрыты основные преимущества и недостатки теоретических подходов к структурно-параметрической оптимизации финишной механической обработки. Показан достигнутый относительно высокий уровень математической формализации теории абразивной и алмазно-абразивной обработки, что позволяет научно обосновано подходить к разработке эффективных технологических процессов финишной механической обработки.

2. Разработана расчетная схема определения шероховатости поверхности при шлифовании на основе равномерного и вероятностного характера участия зерен круга в резании, что позволило обосновать условия уменьшения шероховатости поверхности. Расчетами установлено, что из всех рассмотренных параметров режима шлифования и характеристик круга наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывает зернистость круга – с ее уменьшением шероховатость поверхности существенно уменьшается. Исходя из этого, разработана методика выбора оптимальной зернистости круга для заданной шероховатости поверхности. Показано, что в первом приближении при расчете оптимальной зернистости круга можно ограничиться рассмотрением равномерного характера участия зерен круга в резании, учитывая вероятность участия зерен круга в резании за счет 2-кратной поправки на установленное значение зернистости круга. Даны конкретные практические рекомендации по выбору оптимальных параметров режима шлифования и характеристик круга для эффективного осуществления процесса шлифования с учетом требований по шероховатости обрабатываемой поверхности.

3. Теоретически обоснованы условия существенного уменьшения шероховатости поверхности при алмазном шлифовании за счет искусственного создания на вершинах алмазных зерен круга площадок износа. Аналитически определено оптимальное значение величины линейного износа максимально выступающего над уровнем связки круга алмазного зерна, при достижении которого при плоском шлифовании торцом круга высотные параметры шероховатости поверхности принимают нулевое значение. Показано, что при шлифовании периферией круга для выполнения этого условия необходимо существенно увеличивать величину линейного износа зерна. Экспериментально подтверждены результаты расчетов.

4. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований связи упругих перемещений в технологической системе с точностью и производительностью обработки. Предложена экспресс-методика расчетно-экспериментального определения начального натяга (величины упругого перемещения) в технологической системе, обеспечивающего максимально возможную производительность с учетом ограничения по точности обработки.

5. Теоретически обоснованы условия повышения параметров точности и качества алмазно-абразивной обработки. Они состоят, главным образом, в выборе на основе полученных аналитических зависимостей оптимальной величины линейного износа зерна, поскольку с ее уменьшением величина упругого перемещения в технологической системе, определяющая точность обработки, уменьшается, а высотные параметры шероховатости поверхности, наоборот, увеличиваются. Сформулированы конкретные практические рекомендации.

6. Произведена оценка параметров качества обработки крупнозернистых и мелкозернистых твердых сплавов (релита и ВК8) на основе карбида вольфрама после обычного алмазного и алмазно-искрового шлифования кругами формы 12А1 и 1А1 на металлической связке М1-01. Установлено, что при алмазно-искровом шлифовании в поверхностном слое обрабатываемой детали образуются сжимающие напряжения, а это повышает их эксплуатационные свойства. Показано, что электрические разряды выполняют вспомогательную роль, их действие способствует интенсификации основного процесса шлифования за счет поддержания высокой режущей способности алмазного круга. Исследования показателей качества поверхностного слоя сплава выявили оптимальные значения с точки зрения износостойкости, а именно: отсутствие фазовых превращений; отсутствие микротрещин; наличие упрочнения поверхностного слоя.

7. В работе приведены результаты исследований макроструктуры и шероховатости поверхности стали при алмазно-искровом шлифовании. Показано, что метод АИШ-упрочнения невозможно применять без включения процесса выхаживания в цикл обработки. Такая комплексная отделочно-упрочняющая технология позволяет обеспечить не только формирование структуры белого слоя, но и значительно улучшает шероховатость поверхности, в результате чего износостойкость обрабатываемых изделий повышается.

8. В работе обоснованы технологические возможности и даны практические рекомендации по осуществлению высокоэффективной доводки поверхностей деталей пастами и суспензиями. Приведены примеры эффективного применения паст и суспензий при доводке высокоточных деталей, в частности, на операциях финишной обработки плоскостей на станках "Растр-350".

Раздел 6
Разработка мобильных малогабаритных устройств беспрессовой штамповки для малых предприятий

6.1. Предпосылки и история создания импульсных технологий

Большая часть заготовок и деталей современной техники, наземного транспорта и летательных аппаратов производится методами холодной и горячей штамповки из листового, сортового и пруткового материалов. В условиях ограниченности любых видов ресурсов и возрастающей конкуренции товаропроизводителей все более важное значение приобретают как вопросы ресурсо- и энергосбережения, так и возрастающие требования к точности и качеству штампованных деталей, прочности и надежности всего изделия в целом [9; 16; 44; 115; 122; 133; 134; 147]. При разработке технологических процессов и выборе штамповочного оборудования в этой связи становится необходимым учет все большего количества факторов, среди которых наиболее важными являются мощность оборудования, производительность и универсальность применения, как по габаритам изготавливаемых изделий, так и по их конструктивно-технологическим характеристикам [133; 134; 147]. Следует также принимать во внимание, что современное прессовое оборудование, особенно то, что длительно находилось в эксплуатации (более 10…15 лет), зачастую не обеспечивает необходимой точности штамповки деталей повышенной прочности (высокопрочных сталей и сплавов) из-за влияния погрешностей изготовления, износа направляющих элементов и увеличенных зазоров в подвижных сочленениях. Даже новый, хорошо отлаженный пресс упруго деформируется в момент выполнения технологической операции под действием значительного усилия штамповки, что связано со смещением верхней половины штампа относительно нижней. В связи с этим изготовление на прессах изделий размерами в плане более 1 … 1,5 м либо невозможно, либо становится менее предпочтительным по технико-

экономическим соображениям по сравнению с использованием беспрессовых методов штамповки, таких как штамповка эластичными средами, гидравлическая, пневмо- и импульсная штамповка [16; 44; 115; 133; 134; 147].

Существенно важное значение в условиях физического и морального старения станочного парка в стране может приобрести высокоскоростная обработка металлов с использованием импульсных нагрузок, преимущества которой в области листовой штамповки, в том числе и при штамповке тонкостенных деталей сложной формы в плане, достаточно хорошо известны [9; 16; 44; 115; 122; 133; 134; 147]. Важнейшие из них: повышенная точность при обработке на сравнительно простой и недорогой оснастке; повышение механических свойств после штамповки (увеличение предела прочности некоторых металлов почти на 50 % и увеличение предела текучести ряда сталей при сжатии почти на 300 %); повышенное упрочнение по сравнению с холодной прокаткой при одинаковой степени деформации. При этом возможность регулирования в широких пределах параметров внешней нагрузки при изготовлении деталей из большинства труднодеформируемых материалов достигается значительно проще и экономически выгоднее, чем для традиционных и более капиталоемких методов металлообработки. В ряде случаев беспрессовые методы становятся безальтернативными, поскольку использование других методов либо экономически не выгодно, либо физически невозможно.

Отличительной чертой высокоскоростных импульсных способов штамповки (чаще всего гидровзрывной, газодетонационной, электрогидравлической, магнито-импульсной, а также с использованием энергии сжиженных газов) является и то, что при их применении отпадает необходимость в специальном крупногабаритном прессовом оборудовании, которое необходимо при изготовлении изделий или заготовок. Важным также является и то, что технологическая оснастка конструктивно значительно проще и менее дорогостоящая, так как при штамповке необходима лишь матрица или пуансон, а роль соответствующей части штампа, в частности, играет передающая среда, в которой осуществляется импульсное воздействие (взрыв, электрический разряд в жидкости и др.) и через которую энергия взрыва в виде ударной волны воздействует на заготовку, деформируя ее по форме инстру-

мента (пуансона или матрицы). Такой технологический процесс универсальный и для него не требуется длительная подготовка производства, поэтому высокоскоростные высокоэнергетические способы вне конкуренции для штамповки особосложных деталей, изготовление которых другими методами, прежде всего в условиях опытного и мелкосерийного производства, невозможно или нецелесообразно.

В создании и разработке импульсных методов металлообработки существенную роль сыграли работы выдающегося харьковского ученого, известного во всем мире, профессора Харьковского авиационного института (ХАИ), доктора технических наук Ростислава Вячеславовича Пихтовникова – создателя первой в СССР научной школы обработки металлов взрывом.

Пихтовников Р. В. (1907–1972)

Интереснейшие факты о творческой деятельности Ростислава Вячеславовича были приведены в специальном выпуске научно-технического журнала "Авиационно-космическая техника и технология", а также в докладах и в трудах международной конференции [16; 44; 115; 133; 134; 147]. О выдающемся вкладе и роли Пихтовникова Р. В. в возникновении целого ряда новых направлений импульсной металлообработки, таких как электрогидравлическая и магнито-импульсная обработка материалов, очень подробно и тепло рассказано и в содержательной статье [134]. Конечно, добрым словом вспомнили и вспоминают его и в других странах бывшего СССР.

Чем же важны те достижения основанного Пихтовниковым Р. В. нового направления металлообработки? Безусловно, не только тем, что его труды и труды его учеников и последователей принесли, можно прямо сказать, немеркнущую славу школе металлообработчиков Харьковского авиационного института, стали визитной карточкой славнейшего ВУЗа страны.

Чрезвычайно важной среди наследия Ростислава Вячеславовича можно считать созданную им методику достижения эффективного результата, всегда предусматривавшую возможность получения экономического эффекта и, как никогда актуальную и во многих случаях, увы, забытую. В основе ее – особое отношение к личности и взаимодействие личности и коллектива.

Сейчас, во время формирования в Украине нового экономического уклада, сопровождающегося болезненными процессами становления рыночной экономики, особое значение приобретает тот фактор "человеческого лица" в науке, который всегда был присущ и пропагандировался Пихтовниковым Р. В.

К реализации научных разработок в сферу производства Пихтовников Р. В. всегда активно привлекал молодежь, студенчество. Он четко подчеркивал, что самая значимая роль молодежи заключается не только в легком восприятии всего нового, необычного, но и оригинальности суждений с позиции "незнания". Пока не потеряно это качество, Пихтовников Р. В. стремился к тому, чтобы его фундаментальными идеями талантливые студенты овладели еще на старших курсах ВУЗа. Одновременно прививал им систему творческой работы. После такой подготовки молодые специалисты легко входили в коллектив научной школы. Ростислав Вячеславович обладал особым даром привлекать к себе талантливых единомышленников благодаря личной целеустремленности, уважительному отношению к молодым специалистам по принципу "сегодня студент – завтра профессор" или "тот не солдат, кто не мечтает быть маршалом". В трудную минуту мог пошутить примером "истории двух мышек в кувшине с молоком", в их безвыходной ситуации выживала мышка, у которой была сила воли, оптимизм. Создавался теплый, соревновательный и творческий климат в коллективе.

К находкам, стимулировавшим творческий и соревновательный дух в коллективе, следует отнести и создание на кафедре целевой группы – "перспективной группы" для исследования сигнальных, первых идей коллектива, где личное соучастие Пихтовникова Р. В. проявлялось не только в обсуждении новых идей, многие из которых актуальны и сегодня. Важным было и непосредственное его участие в проведении экспериментальных исследований, иногда в нарочно экстремальных условиях низких температур, считая их перспективными в

будущем. Ученики не знали, что в самые лютые морозы 1971 г. Пихтовников Р. В. проводит с ними эксперименты по взрывной штамповке за год до смерти. Так, совмещая интуицию и поиск нового, Пихтовников Р. В. формировал свой "человеческий капитал", сыгравший важнейшую роль в уникальных достижениях Пихтовникова Р. В. и его школы.

Заслуживает уважения и его умение не только найти идею, но и поддержать автора другой, "чужой" идеи, по принципу "парадокса". Это приводило к появлению новых направлений использования импульсных источников энергии, таких как газо-детонационные, с использованием энергии сжиженных газов, новых подходов к выбору формы и типов взрывчатых веществ.

Поощрялся интеллект и наблюдательность, умение показать применимость идеи. Ведь и сам Пихтовников Р. В., занимаясь в годы войны восстановлением разрушенной боевой техники, обратил внимание на необычное для листовой штамповки явление – значительное увеличение пластической деформации после взрывного деформирования авиационных изделий, хотя по канонам традиционной науки высокоскоростная штамповка была бы невозможна из-за хрупкого разрушения. Но в том-то и заслуга ученого: увидеть то, что другие просто не замечают, уметь подтвердить экспериментально свою догадку. Например, свое открытие Пихтовников Р. В. проверил в ванной собственной квартиры, где проводил первые опыты по взрывному деформированию с помощью пороховых зарядов (и за что бдительные соседи сообщали "куда следует"). Приоритет тех работ Ростислава Вячеславовича был закреплен авторскими свидетельствами (А. с. № 157957 и № 157958 от 1949 г.; А. с. № 139407 от 1960 г.; А. с. № 143211 от 1961 г.).

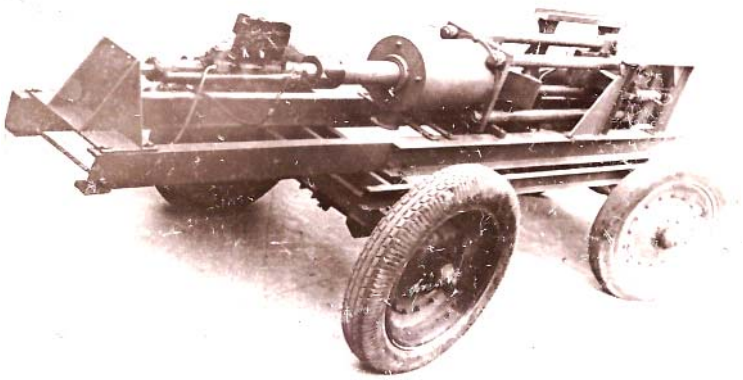
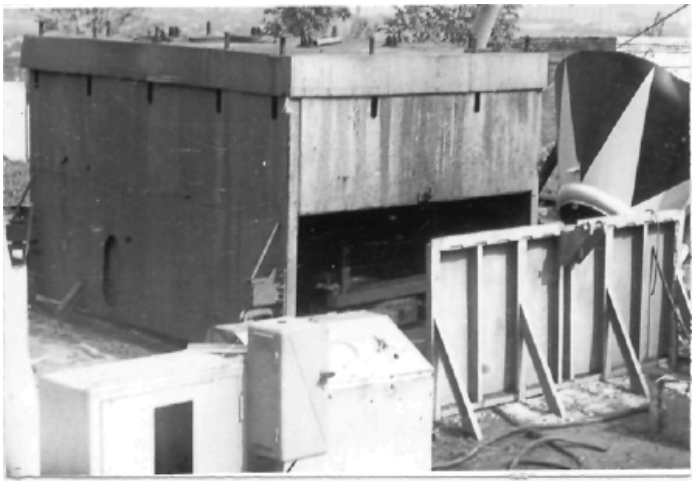


Рис. 6.1. Опытно-производственный копер порохового действия типа ВК-7 на транспортной тележке

На рис. 6.1 как пример "первого" поколения опытных мобильных устройств приведен копер ВК-7, а на рис. 6.2 – последующие варианты развития оборудования для взрывной штамповки по принципу возможности изготовления крупногабаритных изделий.



а б

Рис. 6.2. Оборудование для ведения взрывной штамповки:
а – в бассейне, штамповка-калибровка с использованием экранов;
б – штамповка в бронекамере с использованием гидроприжима как средства механизации

Поиск нового приводил, как правило, к разработке оригинальных технологических процессов, осуществляемых в таком оборудовании как бассейн или бронекамера (рис. 6.2), бронеямах и вакуум-камерах.

Слаженный коллектив Проблемной лаборатории по использованию импульсных нагрузок в промышленности, созданной в ХАИ в 1963 г. Постановлением Совета Министров Украины, был **Пионером** практически всех новых направлений импульсной обработки материалов, таких как взрывная штамповка крупногабаритных изделий (докт. техн. наук Борисевич В. К., канд. техн. наук Губский А. А., канд. техн. наук Кириченко Л. Р., канд. техн. наук Зорик В. Я., канд. техн. наук Волков А. И., канд. техн. наук Зайцев А. Н., канд. техн. наук Еременко В. Е., канд. техн. наук Горбань В. П., докт. техн. наук Драгобецкий В. В., канд. техн. наук Солодянкин С. Н., канд. техн. наук Елисеев В. И., канд. техн. наук Савченко Н. Ф., канд. техн. наук Сабакарь А. И., канд. техн. наук Соломянный А. У., канд. техн. наук Ходосов Д. С., канд. техн. наук Плиско-Виноградский А. Ф., канд. техн. наук Михайлюта И. О., Коче-

тов П.П. и многие-многие другие), импульсное деформирование и разделение материалов ударом твердого тела (школа докт. техн. наук Кононенко В. Г., а также канд. техн. наук Боборыкин Ю. А., канд. техн. наук Зайцев К. И. и др.), гидродинамическая штамповка (канд. техн. наук Мацукин Ю. Г., канд. техн. наук Волков А. И., канд. техн. наук Брагин А. П., канд. техн. наук Касьян В. Г., канд. техн. наук Крыжный Г. К., канд. техн. наук Лисицын А. В., канд. техн. наук Полтарушников С. А. и др.), газодетонационная штамповка (канд. техн. наук Черепенников Б. А., докт. техн. наук Сухов В. В., канд. техн. наук Трахтенберг Ю. Б., докт. техн. наук Фролов Е. А., канд. техн. наук Савченко Н. Ф. и др.), электрогидравлическая штамповка (канд. техн. наук Чебанов Ю. И., докт. техн. наук Тараненко М. Е. и др.) и других, например сварки (докт. техн. наук Драгобецкий В. В., канд. техн. наук Сазоненко Н. Д.), сверхинтенсивных нагружений (канд. техн. наук Самойлов В. Я., Коваленко П. И.), повышения точности (канд. техн. наук, проф. Семишов Н. И. и др.), штамповка сжиженными газами (Барсуков А. П., Азаревич А. Я. и др.).

Важным в деятельности исследователей было и то, что после проведения исследования на, как правило, простейших моделях осуществлялось создание промышленного оборудования типа бассейнов для взрывной штамповки и бронекамер.

В то время в ХАИ была также организована новая специальность – подготовка руководителей взрывных работ по обработке металлов (сотни человек для всей страны – б. СССР). Через целевую аспирантуру и соискательство из работников предприятий подготавливались кадры высшей квалификации (Казанович Л. Е., Баранников А. И. , Мартынов Е. Н. и др., всего свыше 50 кандидатов технических наук). Научная школа Пихтовникова Р. В. под его непосредственным руководством и трудами его учеников, впоследствии также выдающихся ученых Алексеева Ю. Н., Кононенко В. Г., Борисевича В. К., Лимберга Э. А., Бычкова С. А. и многих других подготовила для вузов, НИИ и предприятий страны более 30 докторов и более 200 кандидатов технических наук.

Многими успехами взрывная обработка была также обязана и исключительно важному умению Ростислава Вячеславовича находить "нужных" для внедрения его идей производственников. Не было завода, который бы не посетил лично он и его команда для ознакомления с "узкими" местами на производстве. Подчас находились сразу же, а в

других случаях, после "домашнего анализа" эффективные, полезные для предприятия решения. Как пример, можно привести сотрудничество с Харьковским авиационным заводом. После встречи "на высоком" уровне и принципиального делового обсуждения перспектив заводом была оказана поистине неоценимо высокая помощь ПНИЛ ХАИ – изготовлено оборудование – прообраз автоматизированного участка взрывной штамповки. В его создании самое активное участие приняли и директор завода Хохлов Б. А., и главный технолог Маркман Я. Б., и талантливый конструктор Солонар В. Г., и начальник отдела Подбузский Я. А. и др.

В период интенсивного освоения космоса, создания новых конструкций летательных аппаратов и двигателей, использования новых материалов взрывная штамповка становится практически единственной технологией изготовления высокоточных крупногабаритных деталей из новых высокопрочных и трудно деформируемых материалов, необходимых для создания образцов новой техники при минимальных сроках подготовки производства.

Штамповка взрывом могла проводиться и в специальных установках [115; 133; 147], представляющих собой подземные или наземные бассейны, оборудованные подъемно-транспортными средствами, вакуумными установками и соответствующей аппаратурой управления и контроля. Стенки бассейнов (вертикальные и наклонные) бетонируют и облицовывают листовой сталью. Таким образом, среди импульсных технологий наибольшее предпочтение в 70-х годах прошлого столетия отдавалось взрывной обработке материалов с использованием энергоносителей – бризантных взрывчатых веществ (БВВ), что было вызвано интенсивным развитием космических технологий, востребованностью новых высокопрочных материалов.

6.2. Основные направления и области использования импульсных технологий

К сожалению, в далеко не лучшие для науки нынешние времена в Украине убавился стремительный шаг взрывных технологий, что было вызвано постепенной, а иногда стремительной потерей приоритетов в наукоемких отраслях: космических, оборонных и др.

И только подчас героические усилия последователей научного наследия Пихтовникова Р. В., в первую очередь доктора технических наук, профессора, академика Борисевича В. К., основавшего в ХАИ Международный институт новых технологий и материалов, и труды уже его учеников позволили отстоять в Украине рубежи нового в обработке материалов энергией мирного взрыва. В этот период стали интенсивно развиваться новые методы групповой штамповки деталей, изготовляемых на цельнометаллической, композитной и сборно-разборной оснастке. Как примеры возможных решений при использовании методов групповой штамповки, на рис. 6.3 представлены изделия, изготовление которых возможно на универсальной и легко переналаживаемой оснастке. Использование одной матрицы и сменных технологических вкладышей позволяет осуществлять различные варианты изготовления изделий с использованием базовой детали типа "полусфера" или ее элементов (штампуемых или вырезаемых из цельной детали).

Исходя из известных технологических решений изготовления изделий и заготовок самого широкого ассортимента (днищ, трубчатых, оболочек и панелей и др.) [44; 115; 133; 147], а также оценивая востребованность новых экономических решений, можно сделать вывод, что по-прежнему актуальны основные положения, на которых базировалось создание технологических процессов импульсной обработки материалов:

- создание новых технологий на основе экспериментально подтвержденных научных исследований;
- перевооружение производства и пересмотр существующих технологий (их паспортизация) с позиций экологической безопасности, максимального ресурсо- и энергосбережения;
- высшие показатели экономической эффективности;
- пересмотр организационно-экономических принципов внедрения новых технологий с позиций функционирования производственных систем;
- внедрение гибких технологических систем, способных к автономному функционированию;
- обеспечение высокого уровня надежности различных технологических систем, их способности к дальнейшему функционированию в экстремальных условиях, безопасному для окружающей среды даже в случае выхода из строя отдельных элементов технологической систе-

мы, а также для предупреждения и ликвидации аварий с помощью гибких технологических систем;

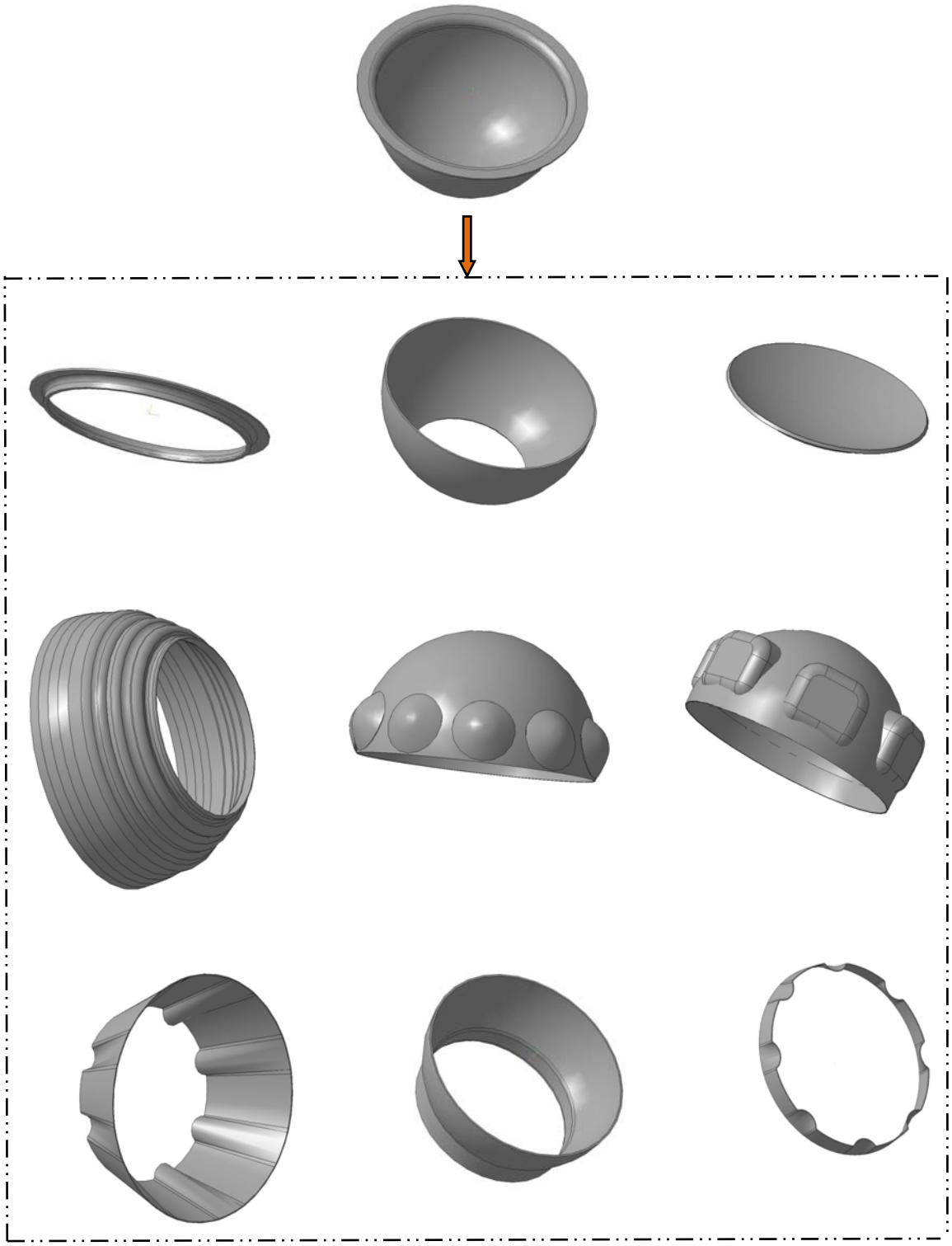


Рис. 6.3. Варианты изготовления деталей с использованием методов групповой штамповки на примере осесимметричной оболочки и ее элементов

•минимальные затраты на технологическое переоснащение производства; возможность интегрирования в существующие технологические комплексы и взаимодействия с автоматизированными системами управления производством;

• актуальны и могут считаться важнейшими такие принципы ресурсо- и энергосбережения, как:

• создание все более точных и качественных изделий из высокопрочных сплавов, обеспечивающих:

• возможность групповой обработки изделий и достигаемое благодаря этому снижение трудоемкости и сроков технологической подготовки производства;

• возможность изменения размеров заготовок и деталей в самых широких пределах;

• возможность взаимосогласования на этапах проектирования в широких пределах параметров изделия, энергоносителей и конструкции устройств для выполнения различных операций;

• возможность безопасного использования энергоносителей, используемых для выполнения технологических операций (основных и дополнительных).

Исходя из этого, и в настоящее время во многих научных коллективах (ХАИ, ХНЭУ и др.) используются положения профессора Пихтовникова Р. В. для расширения области применения импульсных технологий. Они используются в новых технологиях для:

• интенсификации добычи нефти или газа;

• очистки колонн и трубопроводов от парафиновых отложений и продуктов коррозии;

• ликвидации аварий путем устранения негерметичности в особо сложных условиях – в зоне повреждения обсадной колонны, а также ее смятия;

• проведения перфорации обсадной колонны последовательным прожиганием отверстий в стенке колонны;

• ликвидации прихватов и других работах, обычно осуществляемых с применением конденсированных бризантных взрывчатых веществ, пороховых аккумуляторов и генераторов давления;

• обезвреживания ядовитых и взрывоопасных материалов;

• ликвидации пожаров на крупных объектах, требующих интенсивного силового воздействия потоками различных сред или с использованием устройств метательного типа (например, снарядов или гранат) в гибких технологических системах предупреждения и ликвидации аварий (ГТС ПЛА) [16; 44; 115; 133; 134; 147].

По данным авторов, изучение научного наследия Пихтовникова Р. В. проводится особо активно и за пределами нашей страны, но, увы, практически без упоминания о приоритетности украинских ученых. Как результат, разрабатывается новое оборудование и технологии, многие решения позволяют выйти на недосягаемо высокий уровень, патентуются. В Украине же молодежь практически не знает о перспективах использования мирного взрыва, об ученых и технологах-разработчиках.

Примером одного из эффективных направлений использования "мирного взрыва" следует рассматривать новые методы беспрессовой пневмо-штамповки с использованием газодетонационных устройств, которые являются гибкими, мобильными и, благодаря минимальным капиталловложениям и повышенной безопасности, могут стать особенно эффективными в условиях малых предприятий [16; 134].

Это тем более актуально, что в современных условиях в Украине почти во многих отраслях промышленности сложилась ситуация, при которой большинство крупных промышленных предприятий, успешно существовавших в начале девяностых годов XX века, оказались не в состоянии выживать в новой для них конкурентной среде. Их деятельность могла быть более успешной при умении ориентироваться на создание и использование малых предприятий, специализирующихся на изготовлении базовых для конкретного предприятия изделий.

Именно малые предприятия (МП) во многих странах считают базисом экономики. Возникая во многих случаях с микропредприятий, они занимают важное место в экономике развитых стран. Специалисты утверждают, что без них не могут существовать во многих случаях крупные предприятия. В странах Евросоюза насчитывается более 20 млн. предприятий малого и среднего бизнеса (МСП), которые дают более половины общей добавленной стоимости. По численности МСП составляли в 2012 г. до 99,8 % всех предприятий региона. Подавляющее большинство из них (92,2 %) – микропредприятия [9]. Причем количество населения, занятого в малом бизнесе Европы, составляет около 70 %.

Однако малые предприятия в нашей стране сталкиваются с рядом как экономических, так и технологических проблем. Особенно очень сложными они могут быть для "переселенцев" из Донецкой и Луганской областей, которые выехали оттуда в связи с проведением АТО или нежеланием оставаться на территории, подконтрольной террористам. Переселенцы при создании МП сталкиваются как с общими человеческими проблемами при вынужденной смене места жительства, так и с проблемами, связанными с переносом собственной предпринимательской деятельности на новое место жительства.

К наибольшим сложностям, в первую очередь, можно отнести ограниченный производственный опыт, который оказывает негативное влияние на успешность применения новых технологий. В отличие от крупных предприятий, каждая новая продукция для малого предприятия становится уникальной, часто требует разработки технологических процессов с нуля. Во-вторых, могут возникать проблемы выбора номенклатуры изделий, их типоразмеров, оценки возможности одновременного изготовления изделий на упрощенной оснастке и другие вопросы. Часто для конструктивно сложных деталей (полусфер, коробчатых в плане и т.п.) собственные технологические разработки становятся непосильными.

Поэтому в условиях предпринимательства необходимо учитывать влияние на выбор номенклатуры изделий, изготовляемых импульсной листовой штамповкой, не только конструктивную сложность выбранных для организации производства деталей (или их отдельных элементов), но и вопросы безопасности, а также технологические возможности необходимого или имеющегося на предприятии оборудования и оснастки.

6.3. Особенности разработки новых изделий с позиций малого предприятия

Технологические возможности методов изготовления изделий вообще, а новых в особенности, существенно зависят не только от механических характеристик материала изделий, но и от конструктивных (толщины стенок изделия, его габаритов, формы в плане и других).

Поэтому при выборе номенклатуры и метода изготовления изделий учитывают их относительную глубину (отношение глубины к максимальному размеру) и относительную толщину или гибкость (отношение максимального размера (условного для неосесимметричных деталей) к толщине заготовки). Их изменение при штамповке без использования специальных методов интенсификации может характеризоваться с помощью графика зависимости степени вытяжки от гибкости изделия (рис. 6.4) [16; 133; 134; 135; 147].

При разработке новой продукции и выборе метода ее изготовления с позиций конструктивной сложности любое изделие можно представить как совокупность конструктивных элементов, определяющих не только фукциональные, но и другие свойства изделия, например, дизайн, ремонтопригодность, надежность и т.д. Тогда эту совокупность поверхностей можно представить в виде отдельных элементов:

$$a_{i_1},\ a_{i_2},\ \ldots\ a_{i_m} = \left|a_{i_j}\right|; \quad j = 1,\ 2,\ \ldots\ ,\ n.$$

Количество же возможных поверхностей, их набор можно выбрать на основе конструктивно-технологических представлений, а изделие представить в виде: $И = \langle a\ b\ c\ \ldots\ n \rangle$

При этом вся совокупность поверхностей составит "технологический" образ генеральной детали, т.е. той детали, изготовление которой планируется на определенном оборудовании или по определенной технологии. Возможность изготовления будет зависеть от количества конструктивно-технологических элементов, представленных как совокупность отдельных модулей "стенка – дно" [147]. Примером изменения совокупности конструктивных элементов может быть деталь, генеральный образ которой "полусфера" без или с отдельными элементами на ее поверхности (рис. 6.3). Очевидно, что появление "новых" конструктивных элементов на поверхности полусферы, таких, как различные по форме локальные выштамповки и рифты, может, безусловно, обеспечить определенные конкурентные преимущества (например, снизить массу изделий при повышении их жесткости) производителям подобной продукции. Однако при этом могут возникнуть технологические проблемы получения как полусферы, так и ее элементов. Поэтому проектирование технологического процесса

осуществляется всегда с учетом связи конструктивных и технологических параметров, а технологические возможности того или иного метода изготовления можно оценить зависимостью степени вытяжки и гибкости изделия (рис. 6.4). Очевидно, что увеличение конструктивной сложности изделий (прежде всего относительной глубины и гибкости) может ограничивать возможности использования методов штамповки как на традиционном оборудовании, так и при использовании новых методов.

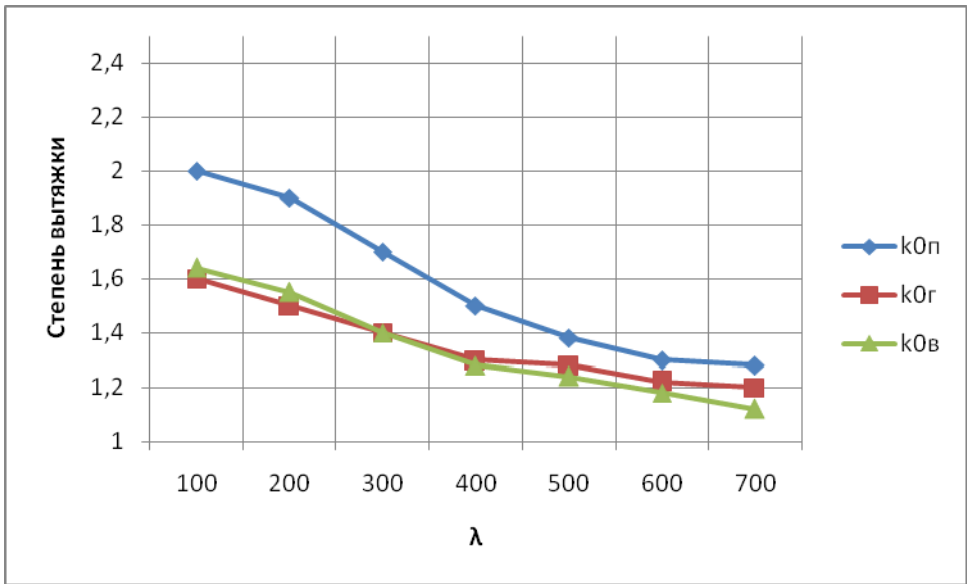


Рис. 6.4. Зависимость степени вытяжки от гибкости при штамповке на прессах, гидравлической и импульсной штамповке

Поэтому разработка новых технологий импульсной штамповки и обновление станочного парка применительно к малым предприятиям представляет важную задачу в условиях Украины.

Естественно, что при выборе направлений совершенствования импульсных методов штамповки необходимо учесть не только особое влияние собственно методов создания импульсных нагрузок, но и их влияние на формообразование поверхности изделия, его качество.

Таким образом, совершенствование технологии машиностроения методами импульсной штамповки может считаться одним из перспективных направлений ресурсо- и энергосбережения, а задачи интенсификации листовой штамповки, расширения ее технологических возможностей – важнейшими задачами.

Например, такое требование при тонколистовой штамповке как снижение скорости деформирования приведет к искусственному уменьшению кинетической энергии инструмента, в качестве которого можно использовать различные присоединенные массы, экраны, саму заготовку и передающую среду. Следовательно, создание новой товарной продукции может зависеть от разработки методов искусственного увеличения скорости смещения штампуемой заготовки или, наоборот, ее ограничения.

Не менее важно учитывать и следующие факторы, характеризующие условия производства: массу детали, степень освоения производства (на предприятии в зависимости от имеющегося оборудования и опыта), сложность изделия, количество изделий (программа или масштаб производства), создаваемые конкурентные преимущества (например, прочность, надежность и другие).

Особую сложность при проектировании новых технологических процессов представляет изготовление крупногабаритных (размерами более 1 м) деталей.

6.4. Разработка имитационных моделей при проектировании импульсных беспрессовых методов изготовления изделий

Рассмотрим общие подходы к расширению технологических возможностей импульсных методов штамповки.

Одной из важнейших предпосылок можно считать разработку методов интенсификации листовой штамповки путем управления напряженно-деформированным состоянием штампуемой заготовки, осуществляемым с учетом способа создания импульсных нагрузок и их распределения.

Ранее было установлено, что при разработке направлений интенсификации импульсной штамповки-вытяжки может быть весьма эффективным использование приемов "присоединенных масс" типа жестких экранов (в виде акустических линз) или деформируемых масс, восстанавливающих свои размеры после штамповки [16; 44; 134; 147]. Имитационная модель такой технологии представлена на рис. 6.5.

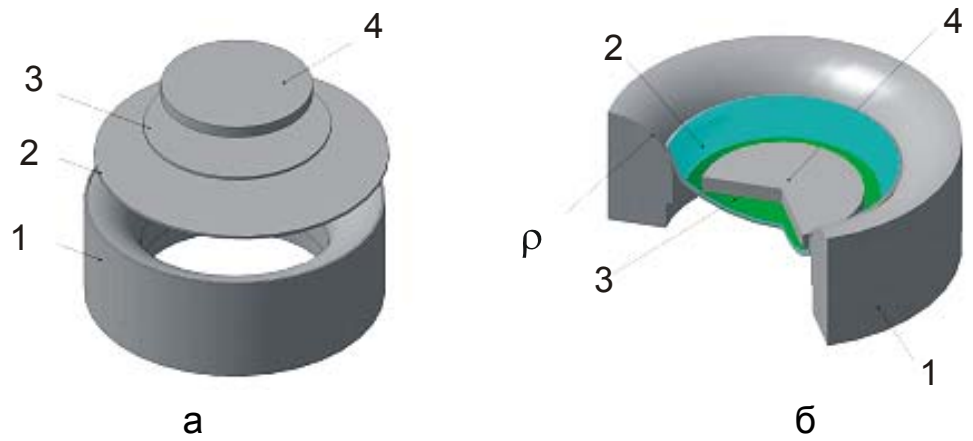


Рис. 6.5. Схема штамповки – сверткой с использованием экранов:
а – пример размещения основных элементов оснастки;
б – после штамповки; 1 – матричное кольцо; 2 – заготовка (полуфабрикат, рис. 6.1,б); 3 – эластичная прокладка; 4 – экран

Тогда при оценке влияния скоростных характеристик процесса импульсных методов штамповки можно исходить из условия, что деформирование фланца заготовки и ее формоизменение осуществляются под воздействием деформирующейся с высокой скоростью (до 100 м/с и более) донной части, разгоняемой импульсным воздействием. Из энергетических соображений можно считать, что перемещение фланца заготовки будет осуществляться при соблюдении условия:

$$W_{дч} \geq W_{пз}; \qquad (6.1)$$

$$W_{дч} + W_{пз} \leq k_c \cdot (M_{дч} + M_{тех}) \cdot V^2, \qquad (6.2)$$

где $W_{дч}$, $W_{пз}$ – работа пластической деформации соответственно купольной (донной, "несущей") и периферийной (фланцевой) зон штампуемой заготовки;

$M_{дч}$, $M_{тех}$ – масса донной и периферийной частей заготовки;

V – скорость смещения донной части заготовки;

k_c – коэффициент (k_c = 0,5 … 0,8).

Работа пластической деформации в общем случае определяется зависимостью [16]:

$$W = \xi(n) \cdot \sigma_b \cdot V_0 \cdot l_i^{1+n}, \qquad (6.3)$$

где $\xi(n)$, n – коэффициенты, зависящие от механических характеристик материала заготовки, $\xi(n)$=1,55·n ≈ 0,10 … 0,65;

V – объем плоской заготовки (или ее части); для донной части осесимметричной заготовки: $V_{дч} = 0{,}785 \cdot \pi \cdot d^2$; для сопрягающейся с ней периферийной, фланцевой, части: $V_{пз} = 0{,}785 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \left(k^2 - 1\right)$;

k – степень вытяжки, определяемая отношением диаметра заготовки к диаметру детали (отверстия матрицы);

l_i – средняя интенсивность деформации соответствующего участка заготовки.

Исходя из приведенных зависимостей, можно оценить среднюю интенсивность деформации фланца с учетом деформации донной части заготовки, определив (задав) ее максимальное значение в соответствии с техническими требованиями.

Для определения эквивалентной массы импульсного знергоносителя следует исходить из рекомендаций [16; 44; 115; 133 – 135; 147] . Величина массы энергоносителя:

$$G = \frac{W}{\eta \cdot E}, \tag{6.4}$$

где W – работа деформирования заготовки;

η – коэффициент полезного действия внешней нагрузки;

$E = \dot{L} \cdot K \cdot Q \cdot G$ – полная работа, выделившаяся при импульсном выделении энергии;

$\dot{L}$ – механический эквивалент тепла, кГс·м/ккал;

Q – теплота взрыва, ккал/кг;

K – коэффициент, учитывающий неполноту химической реакции энергоносителя.

Коэффициент полезного действия η можно определить:

$$\eta = \left(\eta^{\Sigma_{ув}} + \eta^{\Sigma_{гп}}\right) \cdot \eta_{Э}, \tag{6.5}$$

где значения $\eta^{\Sigma_{ув}}$ и $\eta^{\Sigma_{гп}}$ определяют долю энергии взрыва, передаваемой ударной волной и гидропотоком (уточняются экспериментально).

Максимальное давление при импульсной штамповке или калибровке можно определять по формуле Лапласа:

$$p = k_{Д} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_S}{R}, \tag{6.6}$$

где $k_{Д}$ – коэффициент динамичности, принимается равным 2 ... 10,

уточняется експериментально (с учетом типа энергоносителя, конкретных рабочих сред, возможности использования эффекта "интерференции" и др.);

σ_S – предел текучести материала заготовки;

R – радиус условной сферы, вписанной в полость штампуемого изделия постоянной кривизны, при этом для сложных изделий, содержащих угловые участки, например, прямоугольной формы или с пересекающимися поверхностями (по типу "дно – стенка") значение величины радиуса выбирается минимальным из всех имеющихся на поверхности.

Используя этот подход (применение экранов, изменение конструкции матрицы), могут быть расширены технологические возможности высокоскоростной штамповки-свертки, увеличены габариты изделий, устранена опасность неравномерного втягивания фланца (его утяжка), уменьшены габаритные размеры матриц, а также возможность их замены матричными кольцами (по схеме "штамповка на провал").

На втором этапе важно оценить возможности сокращения проблемных вопросов (безопасность процесса, риск возникновения неисправимого брака или ухудшения качества).

Важно также учесть, что типовой технологический процесс изготовления изделий, например штамповкой, на малом предприятии может охватывать как полный цикл операций по изготовлению изделия, так и отдельные, определенные их составляющие (специальные методы обработки заготовок).

Возможные варианты беспрессовой импульсной штамповки, перспективные для их использования в условиях малого специализированного предприятия, приведены в табл. 6.1.

Количество возможных решений составит:

$$N = \prod_{i}^{n_i} a_{i_n}, \qquad (6.7)$$

где a_{i_n} – соответственно количество вариантов i в столбцах n.

Для приведенного примера: $N = \prod_{i}^{n_i} a_{i_n} = 7 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 = 8960$.

Таблица 6.1

Морфологическая таблица вариантов беспрессовой штамповки

Технологическая особенность	Альтернативный вариант						
	1	2	3	4	5	6	7
Энергоноситель	заряд ВВ	энергоразряд	горючие газы	магнитный импульс	воздух или жидкость под давлением	термическое воздействие	
						сжиженный газ	пар
Передающая среда (инструмент)	вода	воздух	вакуум	песок	химическое вещество (реагент)		
Оснастка	матрица	пуансон	матрица -прижим	комплект			
Материал оснастки	металл	композит (бетон, пластмасса)	разрушаемая емкость	комбинированный			
Специальные приемы управления распределением внешней нагрузки по заготовке	нет	экран	присоединенная масса	конструктивные изменения энергоносителя			
Специальные приемы управления НДС заготовки при штамповке	нет	раздача полуфабриката	последовательное деформирование	искусственное гофрообразование			

Таким образом, из большого количества вариантов простым анализом и перебором выбрать оптимальный вариант достаточно сложно.

Поэтому вводим ограничительные факторы, такие как, например, требования безопасного обращения с энергоносителем и его доступности (0 или 1). Только особые условия к изготовлению изделий могут, например, обуславливать использование зарядов бризантных взрывчатых веществ (БВВ), что в 5 раз сократит число вариантов.

В связи с этим при проектировании беспрессовой импульсной (например, пневмо-газодетонационной) установки необходимо исходить из того, что они и их основные элементы (оснащение, вспомогательные устройства, например, для вакуумирования) могут быть представлены как гибкие технологические комплексы или их элементы. Выбор, приобретение или проектирование устройств для беспрессовой штамповки в этом случае может производиться с использованием следующих принципов [16; 115; 133; 147]:

1. Принцип совмещения высокой производительности и универсальности. Применение устройств для беспрессового формоизменения и ремонта изделий, использующих легкоперестраиваемое импульсное оборудование, позволяет совместить высокую производительность с универсальностью на оптимальном уровне, что возможно при современном развитии техники.

2. Принцип технологической гибкости. Способность устройств для беспрессовой штамповки в короткие сроки и с минимальными затратами переходить к изготовлению новых объектов производства (деталей, узлов, изделий) характеризует гибкость системы.

3. Принцип модульности. Например, устройства для беспрессовой штамповки состоят из модулей: оснащение; основание (станина) для размещения оснастки; рабочий (силовой) орган; дополнительные технологические устройства (для вакуумирования, термообработки, нанесения покрытий и др.).

Модуль, будучи компонентом устройств, например для беспрессовой штамповки, также может состоять из компонентов. Важнейшие модули могут быть классифицированы по технологическому принципу (или оборудованию); по виду энергоносителя; наличию или отсутствию аккумулирующих устройств; оснащению приборами управления; сигнализации обеспечения безопасности; восстановлению ресурсов и др.

4. Принцип иерархичности. Устройства для газодетонационной беспрессовой установки в самом общем виде представляет собой многоуровневую структуру: в самом нижнем уровне находятся заготовительные операции, на самом высоком – формирование поверхностного слоя или сборка конструкции – как завершающие операции.

5. Принцип функционирования при ограниченном количестве производственного персонала (принцип безлюдности). Согласно этому

принципу, решается задача максимального сокращения численности обслуживающего персонала за счет повышения уровня автоматизации выполняемых системой функций и автоматического контроля за ходом технологического процесса. Другим аспектом этой задачи является продление срока функционирования системы без вмешательства человека.

6. Принцип специализации и интеграции. Этот принцип определяет возможность создания совместных технологических систем. Может быть использован при поиске эффективных решений и "встраивании" импульсных устройств в существующий производственный процесс (упрочнения, нанесения покрытий и др.).

7. Принцип универсальности выражает тенденцию к расширению технологических возможностей системы и соответственно номенклатуры обрабатываемых деталей, уменьшению числа установок, сокращению технологических маршрутов и протяженности транспортных путей, увеличению производительности системы и степени завершенности обработки детали.

8. Принцип самовосстановления направлен на поддержку и сохранение технологического потенциала системы на заданном (проектном) уровне, достигается обеспечением системы средствами самодиагностики и самовосстановления отказавших элементов или их автоматической замены.

Дальнейший выбор решений при необходимости может проводиться с учетом приоритетности конструктивных и технологических решений и применяемых средств технологического оснащения – устройств для использования малыми предприятиями в конкретных технологических процессах. При этом все элементы такой системы могут быть двух основных видов исполнения по отношению к производственному комплексу: внешнего (вне территории малого предприятия) или внутреннего (непосредственно в помещении малого предприятия).

В обобщенном виде технологический процесс изготовления изделий может характеризоваться как:

заготовительный (предварительный, например, последовательная резка на гильотинных ножницах заготовок для последующей обработки);

сварочный (для крупногабаритных изделий);

механический (подготовительный, например, слесарная или токарная обработка);

термический (при необходимости);

штамповочный (однопереходная или многопереходная обработка);

термический (при необходимости);

механический (например, токарная обработка);

сборочный;

контрольный.

При выборе технологических параметров чаще всего достаточно оценить давления, необходимые для формоизменения или калибровки.

При выборе вариантов технологических процессов в машиностроении при изготовлении изделий можно предложить метод комплексной оценки качества инноваций с использованием критериев выбора лучшего решения, таких как коэффициент использования материала, затраты ресурсов по признакам значимости, энергозатраты, экологические характеристики, относительная масса оснащения, восстанавливаемость ресурсов [115] .

По этой причине описание технологического процесса (ТП) для малого предприятия можно представить как последовательную систему операторов:

$$ТП = A \times L \times ... \times I = \begin{pmatrix} A & B \\ c & м \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} L & K \\ l & k \end{pmatrix} \times ... \times \begin{pmatrix} I & G \\ s & g \end{pmatrix}, \qquad (6.8)$$

где A, B, L ... I,G – соответственно технологические составляющие, формируемые по альтернативным признакам: материальные ресурсы, оснащение, оборудование, конструктивные особенности изделия, … новые инновации (изделия, оснащение, материалы, технологии); с, м, ... g – ограничения или исключения варианта по принципу "да–нет" (1–0). Например, A и B могут быть материалы либо используемые в настоящий момент, либо предполагаемые для освоения.

Отсутствие какой-либо составляющей (ограничения, например, с=0 или м=0) может характеризовать деятельность малого, а тем более микропредприятия, как рискованную.

Среди наибольших ограничений и рисков можно считать риски некомпенсированных затрат времени по изготовлению опытной партии изделий из-за отсутствия высокобезопасного и энергетически приемлемого оборудования. Поэтому необходимо с особым вниманием под-

ходить к выбору ресурсов, особенно оснащения, для минимизации возможных рисков.

Для этого целесообразно использовать информационное моделирование, особенность которого заключается в том, что создаваемая технологическая модель насыщается огромным количеством разнообразной информации об изделии как объекте. Информационная модель создает новый формат обмена данными по проекту между потребителем, технологами, конструкторами, специалистами по инженерным сетям, монтажниками, эксплуатационниками. Технологии информационного (имитационного) моделирования позволяют отражать процесс изготовления деталей в 3D-моделях, закрепляя за каждым элементом изделия массив информации, имеющий отношение к особенностям его формообразования, а именно: геометрические размеры, марка материала (сталь, бетон, дерево, пластик), данные о стандарте, если он для этого элемента существует, сроки изготовления и т. д.

Во-первых, заложенная в модели информация о каждом элементе позволяет очень достоверно составить смету на организацию производства деталей.

Во-вторых, потребителю или заказчику можно продемонстрировать процесс производства во времени. Имея информационную модель сложного изделия, заказчик может следить за ходом производства и графиком выполнения отдельных этапов.

В-третьих, наличие общей имитационной модели позволяет еще на этапе проектирования вести работу над усовершенствованием изделий одновременно нескольким специалистам, что позволяет не совершать каких-то взаимопротиворечащих действий, которые скажутся на целостности технологического проекта.

В-четвертых, имитационная модель несет в себе полный набор информации для организации производства для малого предприятия. Все это дает уникальную возможность с прецизионной точностью смонтировать детали.

В-пятых, множество разных применений как в сфере экономики проекта, так и в области инженерной реализации и в рекламно-презентационной сфере. Например, модель можно распечатать в уменьшенном виде на 3D-принтере, а можно оценить из виртуальных экспозиций и визуализации этапов производства реалистичность про-

цесса производства новой детали.

Имитационное моделирование процессов штамповки деталей можно эффективно проводить в программном комплексе FormingSuite [16], а также моделированием в среде программного продукта КОМПАС. Его использование обеспечивает возможность проведения исследования и моделирования оснастки и технологии для оценки и выбора геометрической модели с учетом заданных свойств материалов. Это облегчает при выборе товарной продукции и на этапе проектирования технологии оценку возможности производства или оказания услуг по проведению ремонтных работ, а также позволяет оценить эффективность выбора оборудования по энергетическим критериям, выполнить разработку маршрутной технологии (или типового технологического процесса).

Имитационная модель комплекса для беспрессовой (стендовой) штамповки приведена на рис. 6.6.

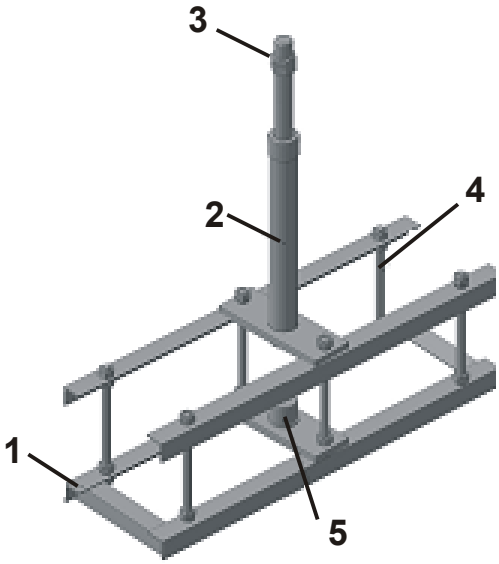


Рис. 6.6. Имитационная модель комплекса для беспрессовой (стендовой) штамповки: 1 – основание;
2 – устройство базирования рабочего органа – силового элемента 3;
4 – элементы крепления (размещения) элементов комплекса;
5 – элементы базирования элементов (например, оснастки)

Преимуществом имитационного моделирования можно считать и возможность согласования на этапе проектирования технологических процессов размеров оборудования и оснастки как основных элементов

комплекса беспрессовой штамповки, а также их размещения и использования. Примером может служить оснастка для листовой штамповки, она размещается на основании 1 (рис. 6.7) между элементами крепления 4 или используя элементы базирования 5. Матричное кольцо 3 (рис. 6.8) выполняет вспомогательную роль, обеспечивая рациональные условия для перемещения периферийных зон заготовки.

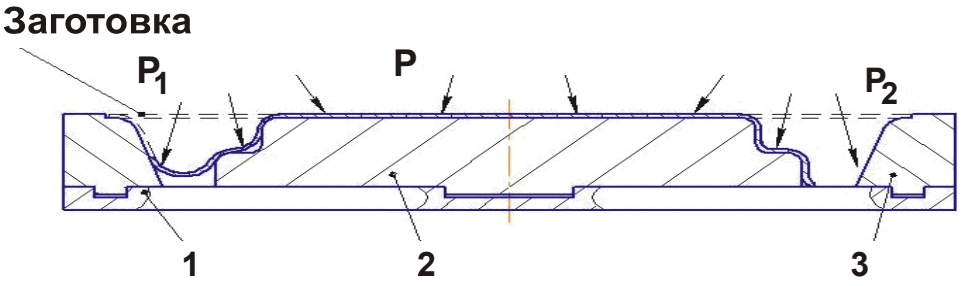


Рис. 6.7. Оснастка для листовой штамповки:
1 – плита; 2 – формблок; 3 – матричное кольцо

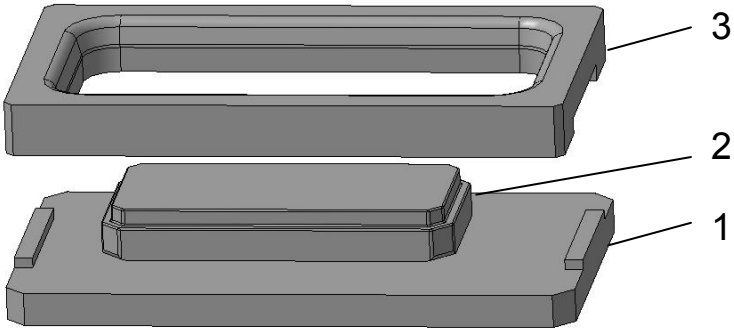
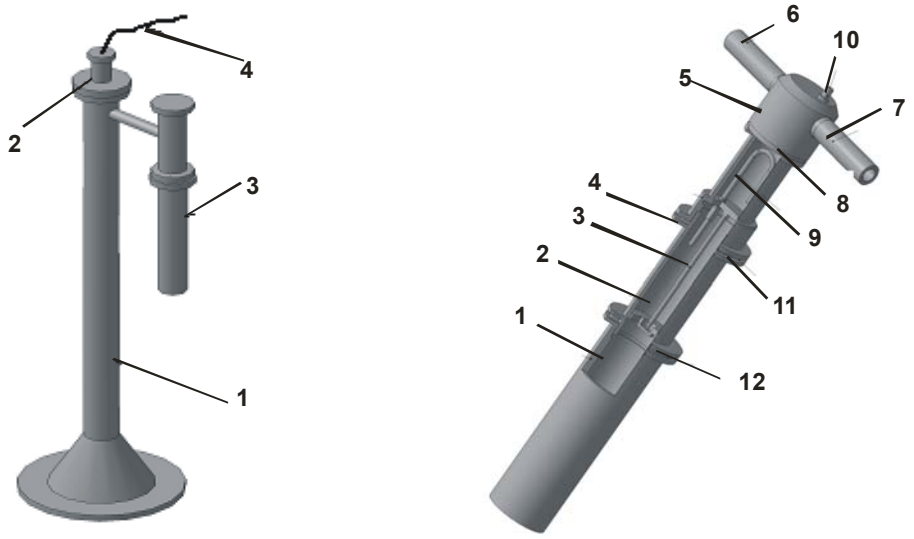


Рис. 6.8. Имитационная модель оснастки для листовой штамповки:
1 – плита; 2 – формблок; 3 – матричное кольцо

Комплексы такого типа позволяют с минимальными капитальными затратами производить переналадку оборудования для изготовления деталей в мелкосерийном производстве. Они могут быть особенно эффективны, например, для листовой штамповки изделий прямоугольной и осесимметричной формы в плане с габаритами 2 м и более.

Значительное внимание необходимо уделять выбору энергоносителя, удовлетворяющему все запросы производителя продукции по безопасному ведению взрывных работ и сочетанию этих требований с повышенными энергетическими возможностями. Именно к такому типу

универсального оборудования могут относиться беспрессовые газодетонационные устройства типа переносных и легко транспортабельных устройств (патент Украины № 72357) модульного исполнения, имитационная модель которого представлена на рис. 6.9.



а б

Рис. 6.9. Имитационная модель (а) газодетонационного устройства для беспрессовой штамповки мобильного типа (1 – газодетонационная импульсная камера; 2 – блок поджига горючей газовой смеси; 2 – газогенератор; 4 – электропроводка) и пример (б) выполнения газогенератора для мобильной беспрессовой газодетонационной установки (имитационная модель) (1 – корпус; 2 – корпус для реагента (воды); 3 – выталкиватель герметизирующего элемента; 4 – корпус активатора; 5 – газосборник; 6 – трубка (подсоединительная); 7 – трубка (отводящая); 8, 11, 12 – герметизирующее кольцо; 9 – газоотводящая трубка)

В состав газодетонационного устройства входят: собственно импульсная камера и энергоузел с детонационной трубой и энергоносителем (смесь горючего газа и окислителя). Размеры импульсной камеры и ее геометрия выбраны из условия обеспечения стабильного режима создания детонации в импульсной камере 1 (рис. 6.9,а).

Особенностью предложенного решения можно считать наличие встроенного в конструкцию газодетонационного устройства газогене-

ратора для получения горючих газовых смесей (рис. 6.9,б), выполненного из двух разъемных частей 1 и 2 с возможностью взаимного перемещения до разгерметизации корпуса 2 с жидкостью (чаще всего, водой или ее раствором) с помощью выталкивателя 3.

В газогенераторах могут подготавливаться как горючие газы типа ацетилена или водорода, так и другие газы, в том числе и смеси горючих газов с окислителями.

Наиболее простым решением может быть использование в качестве таких смесей газа – ацетилена, получение которого осуществляется по схеме "карбид кальция – вода" в газогенераторе (рис. 6.9,б). Основной способ получения ацетилена основан на реакции взаимодействия карбида кальция с водой.

Карбид кальция CaC_2 – твердое, кристаллическое вещество размерами 10 – 40 мм, размещается в корпусе 1 перед осуществлением технологической операции. При взаимодействии с водой карбид кальция разлагается с бурным выделением ацетилена (преимущество как энергоносителя – высокая теплотворность, составляющая 13900 ккал/м^3) и большого количества тепла. Использование ацетилена не предполагает ухудшение техники безопасности, уровень которой из-за его небольших количеств и разового использования может быть даже выше, чем при сварке или резке с использованием ацетилена.

Карбид кальция чрезвычайно активно вступает во взаимодействие с водой, разлагаясь при этом с образованием газообразного ацетилена и гидрата окиси кальция (гашеной извести). Разложение карбида кальция водой протекает экзотермически:

$$CaC_2 + 2H_2O = C_2H_2 + Ca(OH)_2 + 127{,}4 \text{ кДж/моль}.$$

Следовательно, для разложения 1 кг химически чистого CaC_2 требуется затратить 0,562 кг воды. При этом получается 0,406 кг C_2H_2 и 1,156 кг $Ca(OH)_2$. Плотность ацетилена при 20 ^{0}С и 760 мм рт. ст. равна 1,09 кг/м^3. Следовательно, количество ацетилена (выход ацетилена), получаемого при разложении 1 кг CaC_2, равно 372,5 дм^3/кг.

Для обеспечения полной безопасности работ при использовании ацетилена необходимо учитывать его взрывчатые свойства. Следует всегда иметь в виду, что ацетилен (как и водород) относится к наиболее взрывоопасным газам. Температура самовоспламенения ацетилена находится в пределах 240 … 630 ^{0}С и зависит от давления и при-

сутствия в ацетилене различных веществ. Повышение давления существенно снижает температуру самовоспламенения ацетилена. Присутствие в ацетилене частиц других веществ увеличивает поверхность контакта и тем самым понижает температуру самовоспламенения.

В этом случае получаемый и находящийся в газогенераторе ацетилен под рабочим давлением впрыскивается в импульсную камеру по принципу сообщающих сосудов, затем смешивается с находящимся в камере окислителем (чаще всего кислородом или воздухом) до создания необходимого по технологическим соображениям начального давления, обычно не более 0,2 – 0,5 МПа. Начальное давление газа выбирают в зависимости от типа технологической операции, чаще всего по энергетическим соображениям.

При поджигании горючей смеси ацетилена осуществляется переход горения в детонацию по реакции: $C_2H_2 + 2{,}5O_2 = 2CO_2 + H_2O + Q$.

Из уравнения реакции следует, что для полного сгорания одного объема ацетилена требуется 2,5 объема кислорода. Высшая теплотворная способность ацетилена при 0 ^{0}С и 760 мм рт. ст. равна $Q_В$ = 58660 кДж/м^3, низшая теплотворная способность при тех же условиях может быть принята $Q_Н$ = 55890 кДж/м^3 .

При замене ацетилена другим газом конструкция газогенератора изменяется, а количество газа–заменителя ацетилена выбирается на основании экспериментов (с учетом типа штампуемой детали) или другой операции. В первом приближении коэффициент замены ацетилена (отношение расхода газа–заменителя V_3 к расходу ацетилена V_a) может быть выбран как и для производства сварочных работ при равном тепловом воздействии на нагреваемый металл – обозначается $\psi = V_з / V_а$ (табл. 6.2). Для определения значения коэффициента замены ψ пользуются графиками, по которым находят расход газа-заменителя для условий, когда он при сгорании в смеси с кислородом обеспечивает эффективную мощность пламени, равную таковой для ацетилено-кислородного пламени состава: кислород/ацетилен = 1,15.

Импульсная камера для беспрессовой газодетонационной установки может быть использована как для изготовления, так и для докалибровки различных по габаритам изделий, в том числе и крупногабаритных деталей (более 0,5 – 2 м) различной формы в плане, например, изделий антенной техники типа оболочек антенн. При необходимости газодето-

национное устройство может применяться как пневмо-импульсное устройство в комплекте со специализированной установкой для стендовой штамповки с механическим, пневматическим или гидравлическим силовым устройством, а также для импульсной калибровки.

Таблица 6.2

Коэффициенты замены и давления в импульсной камере

Горючий газ	Коэффициент замены ацетилена
ацетилен	1
водород	5,2
метан	4
пропан	1 … 1,2

Пример такого решения представлен на рис. 6.10.

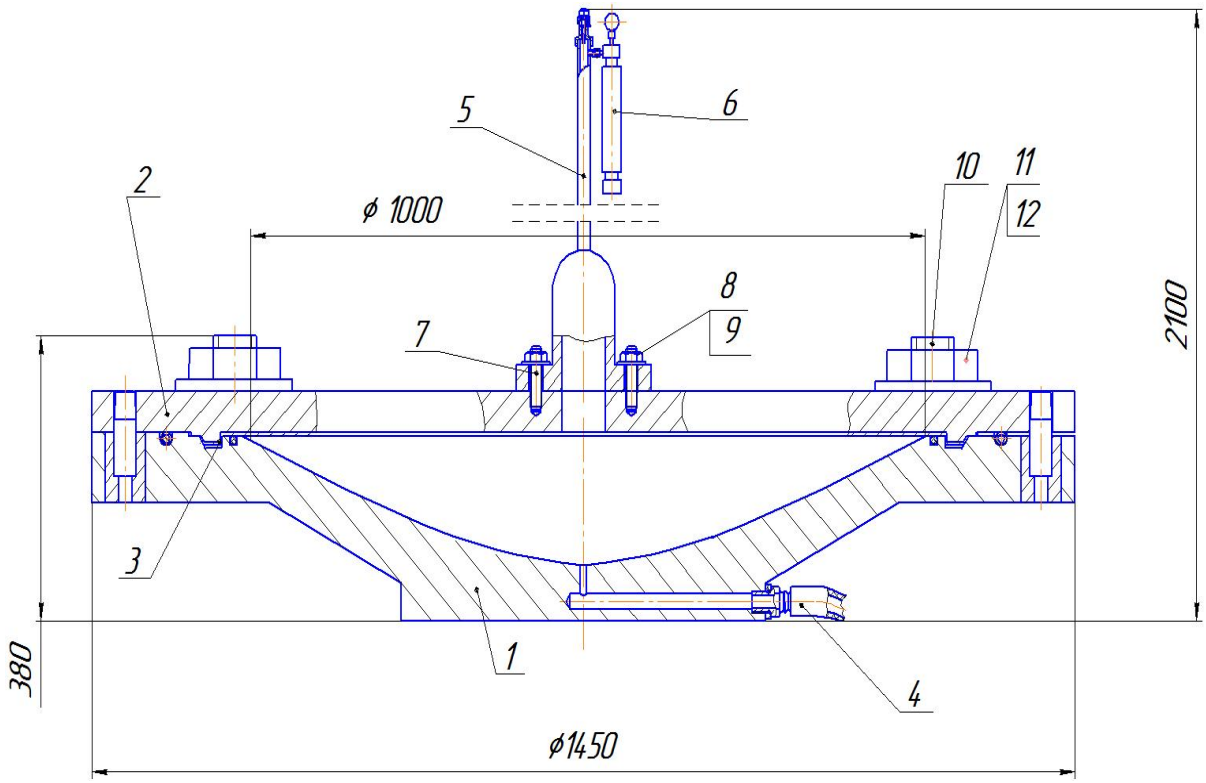


Рис. 6.10. Устройство для импульсной штамповки крупногабаритных изделий: 1 – матрица; 2 – прижимная плита; 3 – заготовка; 4 – гибкий вакуум-шланг; 5 – пневмо-газодетонационное устройство; 6 – газогенератор; 7, 8, 9 – элементы крепления импульсной камеры к прижимной плите; 10,11, 12 – шпилька, гайка, шайба для прижима заготовки к матрице

Предложенная газодетонационная беспрессовая установка модульного типа позволяет в 20 – 50 раз снизить капитальные затраты на оборудование и оснастку. Она универсальна по применению, может использоваться как мобильная, легко транспортируемая установка для штамповки и проведения различных ремонтных работ. Ее использование в условиях мелкосерийного производства может быть оправданно как при изготовлении крупногабаритных деталей (более 0,5 – 1 м), так и при изготовлении деталей сложной формы на упрощенной оснастке (штамповка с использованием матричных колец вместо матриц). В дальнейшем предполагается исследование и разработка энергоаккумулирующих устройств с целью более полного использования энергии горючих газовых смесей после технологического цикла и в процессе воздействия на заготовку или заготовки.

Важным направлением расширения области использования импульсных нагрузок может считаться и разработка прогрессивного метода листовой штамповки деталей из конических полуфабрикатов для проведения штамповочных работ непосредственно в зоне эксплуатации крупногабаритных сооружений с искусственным регулированием технологических несовершенств, например, локальных штамповок или гофрирования на поверхности полуфабрикатов, регулирования размеров зон пластической устойчивости.

Это обусловлено, как правило, необходимостью и сложностью доставки крупногабаритных деталей к месту монтажа, большими издержками и трудоемкостью работ, снижением их качества.

Основной причиной всего этого являются большие объемы сварочных и подготовительных работ, низкая точность из-за сравнительно небольших размеров отдельных частей изделий.

Предлагается способ изготовления тонкостенных сферических оболочек, который позволяет изготавливать их на монтажных площадках из рулонированных заготовок, используя традиционные подъемные и такелажные механизмы. Особенность способа – в последовательном, по участкам, формообразовании изделия в стенде (рис. 6.11), одна поверхность которого соответствует поверхности изделия, однако меньше ее в несколько раз (обычно в 3 – 10 раз), рис. 6.12. Такой метод снижает трудозатраты на изготовление и транспортирование достаточно объемного полуфабриката к месту монтажа, что позволяет

изготавливать крупногабаритные изделия сложной формы, относимых, в ряде случаев, к уникальным изделиям, в относительно простой оснастке.

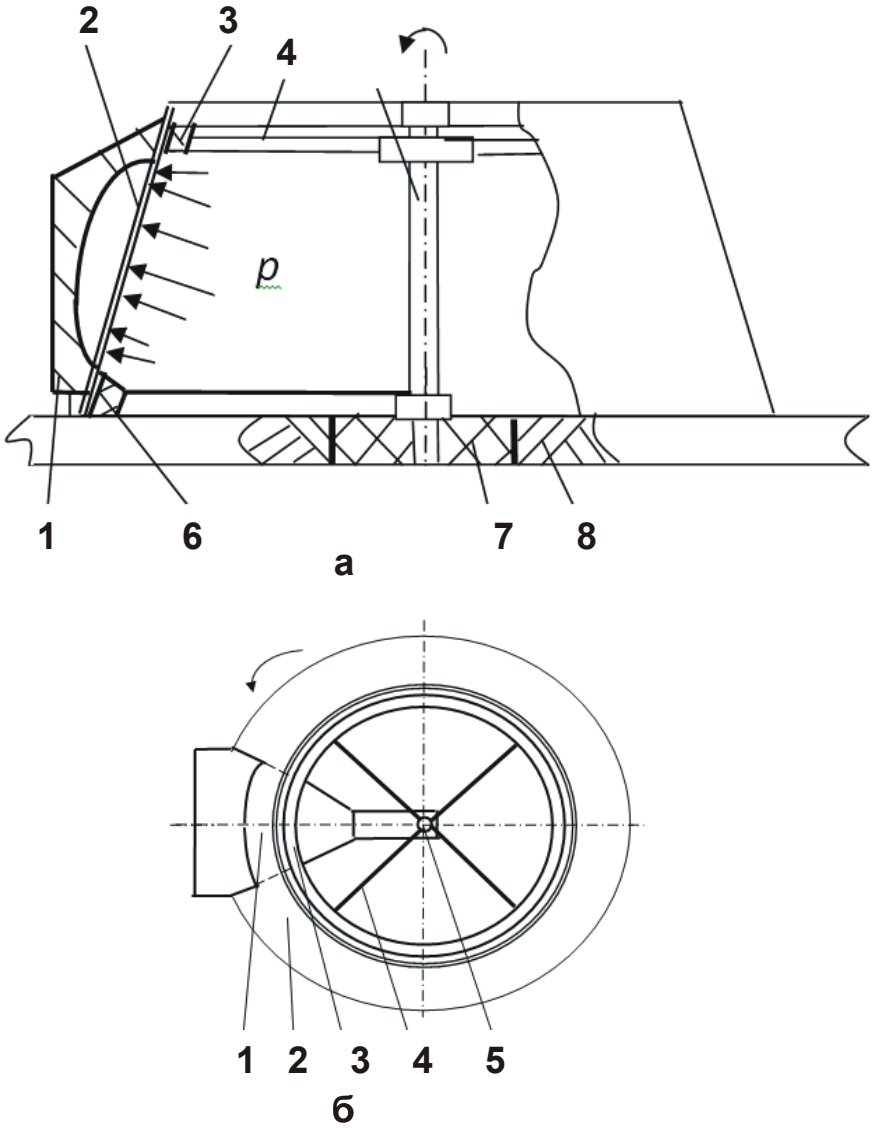
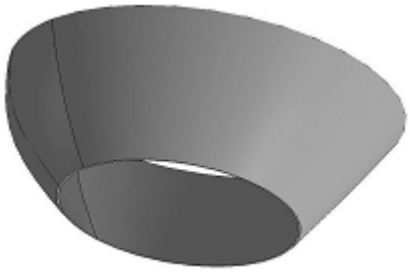


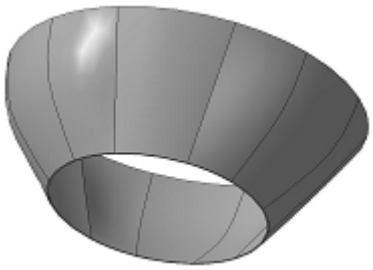
Рис. 6.11. Схема стендовой штамповки с использованием термофизических методов локальной штамповки: фронтальный (а) и горизонтальный (б) вид: 1 – матрица-сектор; 2 – пространственный полуфабрикат; 3 – прижим; 4 – упор; 5 – ось; 6 – основание; 7 – втулка

Способ позволяет уменьшить сроки изготовления за счет исключения до минимума трудоемкого процесса сварки. В то же время возможно получение тонкостенной сферической оболочки, выдержи-

вающей рабочее давление до 4 МПа. Дополнительным преимуществом можно считать возможность использования для интенсификации процесса вытяжки методов искусственного регулирования размеров зон деформации и их величины (утонение стенок не более 10 – 20 %).



а



б

Рис. 6.12. Полуфабрикат, изготовляемый стендовой штамповкой (3D-модель): а – с одной выштамповкой; б – с тремя выштамповками

Пространственная или плоская заготовка 2 в соответствии со способом фиксируется на основании 6 с помощью колец-прижимов 3. Термофизическое воздействие осуществляется на основе использования специальной конструкции камеры для создания внешних воздействий: газодетонационным методом или термовоздействием, например паром.

При проектировании технологии штамповки с ориентацией на снижение объема сварочных работ и, совершенствуя методы непосредственного использования штамповки в зоне сооружения крупногабаритных сооружений, необходимо учитывать параметры изделия:

1) гибкость (отношение его диаметра или условного размера к толщине стенки) или относительную толщину изделия (обратное гибкости значение);

2) относительную глубину штамповки, определяемую отношением глубины (высоты) изделия к его диаметру или условному размеру;

3) механические характеристики материала (пределы прочности, текучести, относительное удлинение);

4) требования к качеству изделий, определяемые величиной утонений, наличием и размерами гофров на поверхности.

Важно также и условие минимизации затрат на транспортировку заготовок и формообразование их до получения оболочки крупногаба-

ритного сооружения – резервуара. К таким методам можно отнести и предлагаемый метод стендовой штамповки с использованием беспрессовых термофизических методов локального воздействия на плоскую или, в общем случае, пространственную заготовку (рис. 6.12).

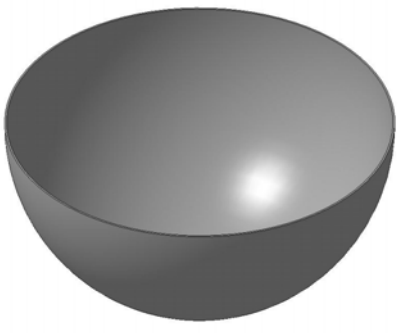


Рис. 6.13. Сфера (модель резервуара) после окончательного формообразования

Модель изделия после формоизменения имеет вид полусферической поверхности (рис. 6.13). Обычно количество воздействий определяют исходя из энергетических расчетов. К этим изделиям относятся, прежде всего, сооружения и агрегаты, изготовляемые для хранения сельскохозяйственной продукции, переработки и транспортировки продуктов, энергоносителей и сырья. Примеры таких конструкций – это цилиндрические, каплевидные, конические и сферические резервуары диаметрами более 3 – 5 м, однослойные или многослойные, а также другие металлоконструкции, изготовляемые из цельных и штампосварных заготовок.

Как правило, их изготовление чрезвычайно трудоемко из-за отсутствия эффективных методов изготовления наиболее сложных элементов конструкции, таких как сферические и эллиптические днища, крышки осесимметричной и неосесимметричной формы в плане.

Преимуществом предложенного решения будет то, что приемлемых методов изготовления подобных изделий непосредственно в зоне сооружения или примыкающей к ней из-за их больших размеров, достигающих 20 – 50 и более метров, а также сложности управления качественными параметрами протяженных участков деталей, практически не существует [16; 44; 115; 122; 133 – 135; 147]. Во многих случаях внутренняя поверхность в процессе эксплуатации подвергается разрушающему действию коррозии. Поэтому расширение области применения крупногабаритных тонкостенных сооружений, повышение качества крупногабаритных изделий, снижение рисков разрушения и увеличение их номенклатуры (ассортимента) позволит малым предприятиям активно участвовать в создании крупных промышленных комплексов, например, для хранения и переработки овощей непосредственно в зонах их хранения или сбора, снизит риски из-за несвоевре-

менного ремонта резервуаров для хранения горюче-смазочных материалов или в период их транспортировки.

Повышение эффективности использования импульсных технологий с использованием метода имитационного моделирования во многих случаях требует проведения предварительных с позиций ресурсо- и энергосбережения модельных натурных исследований.

На этом этапе важно выбрать наиболее сложную технологическую составляющую, например, выяснение проблем и исследование особенностей пластического формоизменения при высокоскоростном деформировании, решения вопросов оценки безопасности процесса, риска возникновения неисправимого брака или ухудшения качества изделий. Примером такого подхода к разработке технологии и оснастки является изготовление в условиях малого предприятия различного типа изделий: днищ и деталей коробчатой формы (рис. 6.14), имитационные модели которых приведены на рис. 6.5 и рис. 6.8.

а б

Рис. 6.14. Примеры деталей: типа днищ, изготовленных взрывной штамповкой из материала 12Х18Н10Т л 10, Ø 840 мм (а); корпус, изготовленный с использованием при калибровке газодетонационной штамповки (б)

Таким образом, разработанные методы проектирования оснастки и технологий штамповки с использованием импульсных энергоносителей в условиях неопределенности, свойственной малым пред-

приятиям, могут быть во многих случаях экономически оправданными [16; 115; 122; 132 – 135; 147].

Импульсные технологии, благодаря использованию мобильных газодетонационных установок, могут эффективно использоваться и для подавления различного типа аварий, пожаров или выбросов ядовитых веществ. Особо перспективными с точки зрения безопасности может быть использование газодетонационных устройств, работы с которыми по уровню требований не превышают требования безопасности проведения сварочных работ.

Выводы

1. Технологии импульсной обработки, основоположником которых является харьковчанин, докт. техн. наук, профессор Харьковского авиационного института, заслуженный деятель науки и техники Ростислав Вячеславович Пихтовников, позволяют во многих случаях повысить эффективность использования имеющихся материальных и энергетических ресурсов как в машиностроении, так и в других отраслях экономики при изготовлении изделий, проведении ремонтных работ, а также при предупреждении и ликвидации аварий.

2. Для беспрессовой импульсной штамповки изделий предложено использовать методы информационного (имитационного) моделирования, на основании которых разработан ряд перспективных устройств и оснастки, применение которых может быть особенно эффективным в условиях малых предприятий. Предлагаемые усовершенствования в условиях рыночной экономики Украины могут иметь большое значение для ее инновационного обновления и развития.

3. Предложенные технологии информационного (имитационного) моделирования позволяют отражать процесс изготовления деталей в 3D-моделях, закрепляя за каждым элементом изделия массив информации. Благодаря этому достигается возможность учитывать все или большинство факторов на любом этапе проектирования технологического процесса, имеющих отношение к особенностям формообразования изделия, таких как корректировка геометрических размеров, марки материала, данные о стандарте, если он для этого элемента существует, сроки изготовления и т. д.

4. В условиях малого предприятия имитационное моделирование позволяет не только более точно представить конструктивные особенности оснастки или устройства, но и произвести визуализацию процесса штамповки изделий, оценить смету затрат, возможностей персонала предприятия в осуществлении различных этапов изготовления изделия или заготовки. Имея информационную модель сложного изделия, заказчик может следить за ходом производства и графиком выполнения отдельных этапов, а также еще на этапе проектирования вести работу над усовершенствованием изделий одновременно несколькими специалистами.

5. Показано, что примером реализации методов имитационного проектирования может быть предложенная газодетонационная беспрессовая установка модульного типа, которая позволяет в 20 – 50 раз снизить капитальные затраты на оборудование и оснастку, является универсальной в применении, может использоваться как мобильная, легкотранспортируемая установка для штамповки и проведения различных ремонтных работ. Ее использование в условиях мелкосерийного производства может быть оправданно как при изготовлении крупногабаритных деталей (более 0,5 – 1 м), так и при изготовлении деталей сложной формы на упрощенной оснастке (штамповка с использованием матричных колец вместо матриц). При необходимости газодетонационное устройство может применяться как пневмо-импульсное устройство в комплекте со специализированной установкой для стендовой штамповки с механическим, пневматическим или гидравлическим силовым устройством, а также для импульсной калибровки.

6. Предлагается разработка энерго-аккумулирующих устройств с целью более полного использования энергии горючих газовых смесей после технологического цикла и в процессе воздействия на заготовку или заготовки. Показано, что совершенствование технологии машиностроения методами импульсной штамповки может считаться одним из перспективных направлений ресурсо- и энергосбережения, а задачи интенсификации листовой штамповки, расширения ее технологических возможностей – важнейшими задачами.

Раздел 7
Теоретические и экспериментальные исследования условий уменьшения высоты микронеровностей и повышения оптических свойств обрабатываемых поверхностей прецизионных деталей

7.1. Общий подход к технологическому обеспечению оптических характеристик металлоизделий

Анализ конструкций летательных аппаратов показывает, что детали систем терморегулирования, выдвижные штанги, зеркала лазерных систем работают в условиях воздействия солнечного излучения. Технологическое обеспечение их оптических характеристик реализуется финишными процессами. Среди финишных процессов механической обработки существует специфичная область абразивного полирования материалов, которая является единственно эффективным способом формирования поверхностного слоя с минимальными значениями высотных параметров шероховатости поверхности. Дальнейшее повышение точности, качества поверхностного слоя вызывает необходимость применения новых конструктивно-технологических решений, повышение требований к физико-химическому состоянию поверхностных слоев.

В последнее время в связи с повышением тактико-технических характеристик летательных аппаратов, особенно военного применения, все больше в их конструкциях находят применение изделия с особыми свойствами поверхностных слоев.

Изготовление деталей и сборочных единиц летательных аппаратов с заданными значениями оптических характеристик их поверхностных слоев позволяет решать проблему минимизации их массы, температурных деформаций элементов конструкции с одновременным повышением их размерной стабильности. Типовыми примерами могут служить детали летательных аппаратов: систем терморегулирования отсеков с бортовой аппаратурой, отражатели лазерных зеркал, вы-

движные штанги, антенны и др. Свойства поверхностных слоев таких деталей будут определяться геометрическими характеристиками и физико-химическим состоянием этих слоев.

Таким образом, создание новых технологических процессов изготовления изделий с особыми свойствами поверхностных слоев является весьма актуальной задачей.

Изучение состояния проблемы по технологическому обеспечению поверхностных слоев деталей заданными геометрическими характеристиками и их физико-химическим состоянием показало, что в литературе имеется большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. Наиболее важными среди них следует отметить работы Якимова А. В., Маталина А. А., Богомолова Н. И., Дудко П. Д., Новикова Ф. В., Лавриненко В. И., Морозенко В. Н., Невлюдова И. Ш., Ящерицына П. И., Рыжова Э. В., Евсеева Д. Г. Однако, в этих работах имеется ограниченное количество исследований по сглаживанию неровностей поверхностного слоя, а также по формированию его физико-химического состояния. Недостаточно информации по прецизионной обработке металлоизделий малой жесткости.

Изучению взаимосвязей параметров поверхностного слоя и его оптических характеристик также посвящено ограниченное количество работ. Недостаточно исследованы вопросы минимизации высотных параметров шероховатости поверхности при полировании.

Поэтому необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования условий уменьшения высоты микронеровностей и повышения оптических свойств обрабатываемых поверхностей прецизионных деталей и на этой основе разработать технологическое обеспечение изделий летательных аппаратов из алюминиевых и титановых сплавов с повышенными эксплуатационными характеристиками.

7.2. Аналитическое определение условий уменьшения шероховатости поверхности при абразивном полировании

Как известно, наиболее эффективной схемой абразивной обработки (шлифования), обеспечивающей наименьшие значения параметров шероховатости поверхности R_a и R_{max}, является схема выхаживания, осуществляемая без поперечной подачи под действием

лишь упруго-восстанавливающей силы. Скорость съема металла в этом случае с течением времени обработки непрерывно уменьшается, также как и уменьшаются параметры R_a и R_{max}.

Процесс абразивного полирования предназначен для уменьшения параметров шероховатости R_a и R_{max} путем съема металла в пределах высоты микронеровностей исходной обрабатываемой поверхности. Эффект обработки достигается за счет перехода от жесткой схемы обработки (с фиксированной поперечной подачей) к упругой схеме (с фиксированным радиальным усилием), поскольку в связи с уменьшающейся по высоте микронеровностей фактической площади контакта зерен с обрабатываемым металлом происходит уменьшение удельного давления P во времени (рис. 7.1), а это приводит к уменьшению скорости съема металла и соответственно шероховатости поверхности. В результате фактически реализуется схема выхаживания, обеспечивающая существенное уменьшение шероховатости поверхности.

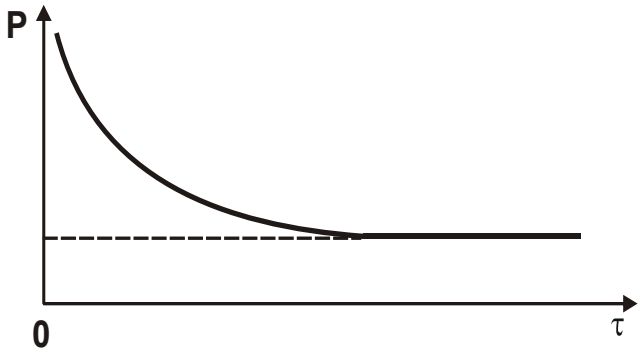


Рис. 7.1. Зависимость удельного давления P от времени обработки τ

После съема микронеровностей на поверхности происходит обработка сплошного слоя металла с постоянным удельным давлением. В этом случае скорость съема металла и шероховатость поверхности остаются постоянными во времени. Добиться существенного уменьшения параметров шероховатости поверхности R_a и R_{max} в этих условиях весьма сложно.

Очевидно, чем больше зерен участвует в процессе формирования шероховатости поверхности, тем меньше параметры R_a и R_{max}, что связано с уменьшением толщин срезов отдельными зернами. Однако, процесс резания (стружкообразования), как известно, может осуществляться при значениях толщин срезов, превышающих предельные значения. В противном случае имеет место лишь процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого металла без образования стружки. Данный процесс нежелателен с точки зрения съема металла, однако он эффективен в условиях сглаживания мик-

ронеровностей исходной поверхности с целью уменьшения параметров шероховатости поверхности R_a и R_{max}. Поэтому в начальный момент обработки при абразивном полировании, когда необходимо удалить основную часть микронерностей с поверхности, следует обеспечить процесс резания (стружкообразования – на рис. 7.1 он условно показан пунктирной линией), а на заключительном этапе обработки – процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого металла. Очевидно, для этого необходимо правильно выбрать радиальное усилие в зоне обработки, чтобы на конечном этапе удаления микронеровностей исходной поверхности был реализован процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого металла.

Если рассматривать процесс абразивного полирования с позиции резания и стружкообразования, то, очевидно, можно уменьшить параметр R_{max} лишь до определенного значения, определяемого предельной толщиной среза, при которой процесс резания переходит в процесс упруго-пластического деформирования материала без образования стружки. В результате обрабатываемый материал не будет удаляться, а будет лишь перераспределяться в пределах зоны обработки, что не приведет к снижению параметра шероховатости поверхности R_{max}. Таким образом, можно полагать, что существует предельное значение параметра R_{max}, обусловленное существованием предельной толщины среза [155].

В теории абразивной обработки сложилось достаточно однозначное представление о закономерности изменения предельной толщины среза a_z при микрорезании единичным зерном. Установлено, что a_z зависит главным образом от радиуса округления режущей кромки зерна ρ. Так, по экспериментальным данным профессора Богомолова Н. И. [12] предельное значение отношения a_z / ρ изменяется в диапазоне 0,04 – 0,08, а по данным профессора Крагельского И. В. – в диапазоне 0,14 – 0,17. Рассматривая в первом приближении $a_z \approx R_{max}$, можно полагать, что значения параметра шероховатости поверхности R_{max} будут изменяться в пределах $(0{,}04 – 0{,}17)\cdot \rho$.

Если принять в первом приближении, что величина ρ равна радиусу режущего зерна R, то наибольшие значения R_{max} будут определяться по зависимости $R_{max} = 0{,}17 \cdot R$ или

$$R_{max} = 0{,}085 \cdot D, \qquad (7.1)$$

где D – диаметр абразивного зерна, мкм.

В табл. 7.1 приведены рассчитанные по зависимости (7.1) значения параметров шероховатости поверхности R_{max} и $R_a = 0{,}25 \cdot R_{max}$.

Таблица 7.1

Расчетные значения параметров шероховатости поверхности R_{max} и $R_a = 0{,}25 \cdot R_{max}$

D, мкм	10	5	1	0,5	0,2	0,1
R_{max}, мкм	0,85	0,425	0,085	0,043	0,017	0,0085
R_a, мкм	0,21	0,1	0,021	0,01	0,004	0,002

Для сравнения в табл. 7.2 приведены рассчитанные по зависимости:

$$R_{max} = 0{,}04 \cdot R = 0{,}02 \cdot D \qquad (7.2)$$

значения параметров шероховатости поверхности R_{max} и $R_a = 0{,}25 \cdot R_{max}$, которые определяют наименьшую (минимально возможную) шероховатость поверхности.

Таблица 7.2

Расчетные значения параметров шероховатости поверхности R_{max} и $R_a = 0{,}25 \cdot R_{max}$

D, мкм	10	5	1	0,5	0,2	0,1
R_{max}, мкм	0,2	0,1	0,02	0,01	0,004	0,002
R_a, мкм	0,05	0,025	0,005	0,0025	0,001	0,0005

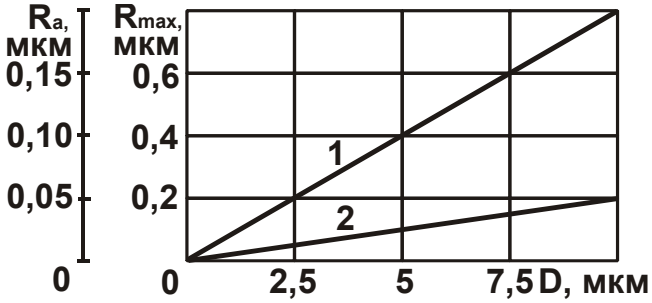


Рис. 7.2. Зависимость R_{max} от D:
1 – расчет по зависимости (7.1);
2 – расчет по зависимости (7.2)

Как видно, отличие значений параметров шероховатости поверхности, приведенных в табл. 7.1, табл. 7.2 и на рис. 7.2, составляет приблизительно 4 раза, что является достаточно большим для выработки научно обоснованных практических рекомендаций. В связи с этим возникает необходимость теоретического анализа отношения a_z / R, положенного в основу расчета параметров шероховатости поверхности. Для этого

следует воспользоваться известной зависимостью профессора Зворыкина К. А. [11] для определения условного угла сдвига обрабатываемого материала при резании (рис. 7.3):

$$\beta = 45^0 + \frac{\gamma - \psi}{2}, \qquad (7.3)$$

где γ – положительный передний угол режущего инструмента (резца);

ψ – условный угол трения сходящей стружки с передней поверхностью инструмента ($\mathrm{tg}\,\psi = \mathrm{f}$ – коэффициент трения).

С физической точки зрения процесс резания (стружкообразования) осуществим при положительном угле $\beta > 0$. При условии $\beta = 0$ процесс резания (стружкообразования) неосуществим, поскольку отсутствует сдвиг обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига ОА (рис. 7.3). В этом случае имеет место лишь процесс упругого и пластического деформирования материала без образования стружки. Следовательно, исходя из зависимости (7.3), условием осуществления процесса резания является выполнение неравенства:

$$\psi - \gamma > 90^0. \qquad (7.4)$$

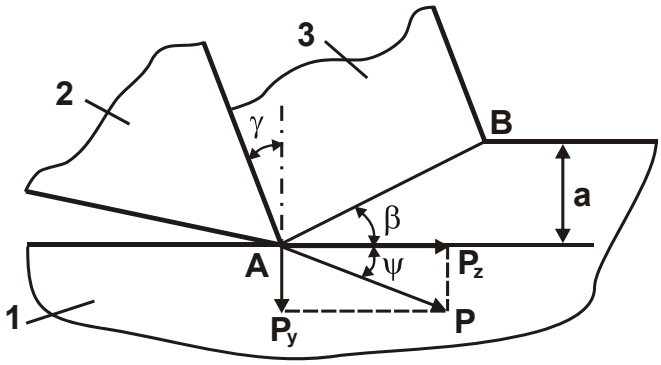


Рис. 7.3. Расчетная схема параметров процесса резания:
1 – обрабатываемый материал; 2 – резец; 3 – стружка

При резании лезвийным инструментом передний угол режущего инструмента γ относительно небольшой (положительный или отрицательный) и, как правило, меньше угла ψ. Поэтому в данном случае в широких диапазонах изменения углов γ и ψ осуществим процесс резания, поскольку разность углов $(\psi - \gamma)$ является, во-первых, положительной величиной, а во-вторых, относительно небольшой величиной, значительно меньшей 90°.

При абразивной обработке условный передний угол режущего зерна является отрицательным (рис. 7.4), в результате чего зависимость (7.4) принимает вид:

$$\psi + \gamma > 90^{o}. \qquad (7.5)$$

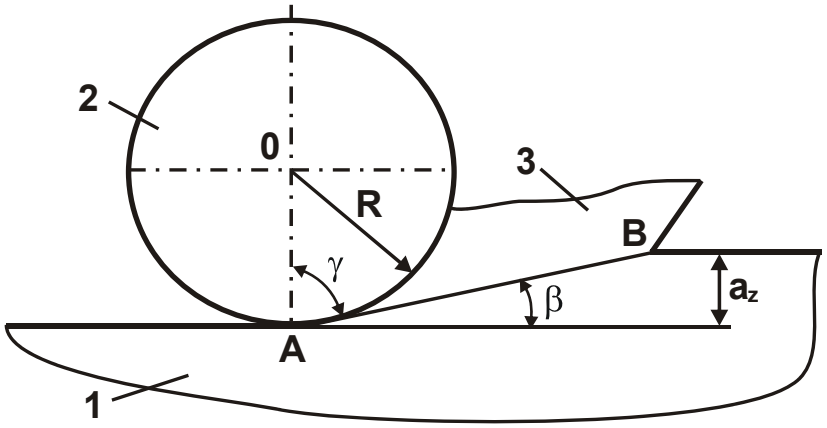


Рис. 7.4. Расчетная схема параметров процесса микрорезания единичным зерном: 1 – обрабатываемый материал; 2 – зерно; 3 – стружка

Угол γ может принимать значения, близкие к 90°. В этом случае сумма углов $(\psi + \gamma)$, очевидно, будет больше 90° и процесс резания (стружкообразования) неосуществим. Следовательно, для нормального протекания процесса резания необходимо уменьшить углы γ и ψ за счет исключения значительного износа и затупления режущих зерен, а также уменьшения интенсивности трения в зоне обработки путем применения абразивных материалов, характеризующихся относительно низким коэффициентом трения (алмаз, кубический нитрид бора и другие синтетические сверхтвердые материалы).

Предельное значение угла γ, при котором процесс резания переходит в процесс упруго-пластического деформирования материала, определяется из условия $\psi + \gamma = 90^{o}$, что соответствует условию:

$$\mathrm{tg}(\psi + \gamma) \to \infty. \qquad (7.6)$$

Представим

$$\mathrm{tg}(\psi + \gamma) = \frac{\mathrm{tg}\psi + \mathrm{tg}\gamma}{1 - \mathrm{tg}\psi \cdot \mathrm{tg}\gamma}. \qquad (7.7)$$

Тогда условие (7.6) примет вид:

$$\frac{\mathrm{tg}\,\psi + \mathrm{tg}\gamma}{1 - \mathrm{tg}\,\psi \cdot \mathrm{tg}\gamma} \to \infty . \qquad (7.8)$$

Данное условие выполняется в случае, если знаменатель равен нулю, т. е.

$$\left(1 - \mathrm{tg}\psi \cdot \mathrm{tg}\gamma\right) = 0 . \qquad (7.9)$$

Выразим угол γ (при микрорезании единичным абразивным зерном) через отношение a_z / R. Для этого рассмотрим расчетную схему (рис. 7.5,а), в которой режущее зерно представлено в форме сферы радиусом R. Предположим, что угол γ определяется длиной дуги контакта режущего зерна с обрабатываемым материалом АВ. Тогда из ΔАВС следует:

$$\mathrm{tg}\gamma = \frac{BC}{AC} = \frac{\sqrt{R^2 - \left(R - a_z\right)^2}}{a_z} \approx \sqrt{\frac{2R}{a_z}} . \qquad (7.10)$$

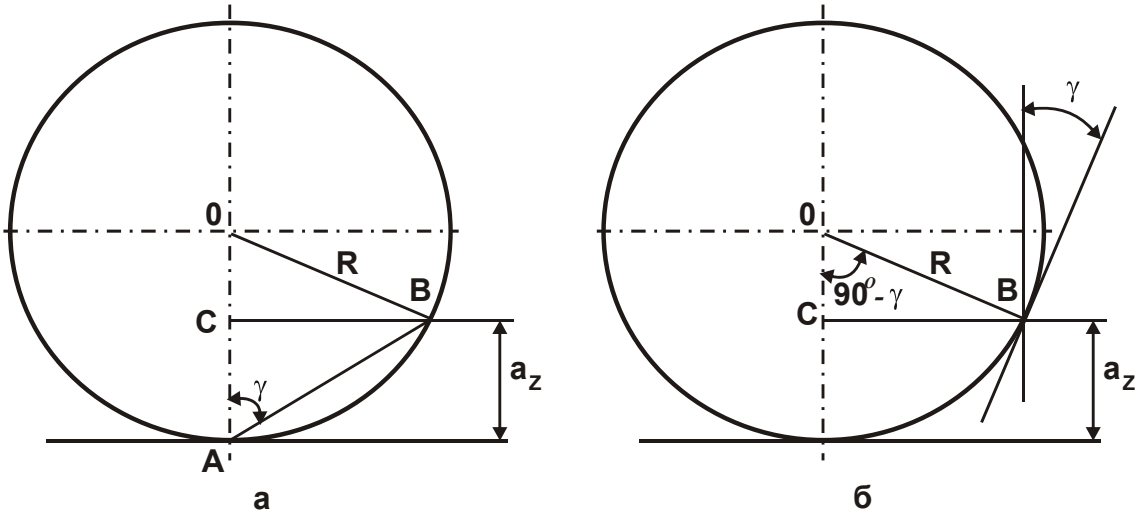


Рис. 7.5. Расчетные схемы угла γ

Подставляя зависимость (7.10) в уравнение (7.9) с учетом $\mathrm{tg}\psi = f$, получено:

$$\frac{a_z}{R} = 2 \cdot f^2 . \qquad (7.11)$$

Таким образом установлено, что отношение a_z / R вполне однозначно определяется коэффициентом трения f абразивного зерна с обрабатываемым материалом: чем больше f, тем больше отношение a_z / R. В табл. 7.3 приведены рассчитанные по зависимости (7.11) значения отношения a_z / R.

Таблица 7.3

Расчетные значения отношения a_z / R

f	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
a_z / R	0,02	0,045	0,08	0,18	0,32

Как видно, при изменении коэффициента трения f в пределах 0,15 – 0,3 отношение a_z / R принимает значения 0,045 – 0,18, что приблизительно соответствует граничным значениям a_z / R, рассмотренным выше на основе экспериментальных данных профессоров Богомолова Н. И. и Крагельского И. В. Учитывая то, что коэффициент трения f абразивных зерен с обрабатываемыми материалами (сталями) изменяется, как правило, в диапазоне 0,15 – 0,3, это свидетельствует о достоверности предложенной расчетной схемы. Следовательно, разброс значений $a_z / R = 0{,}04$ – 0,17 обусловлен изменением коэффициента трения f в пределах 0,15 – 0,3, что вполне допустимо при проведении экспериментальных исследований.

Необходимо отметить, что возможна и другая расчетная схема определения угла γ (рис. 7.5,б). Здесь угол γ представляет собой угол, заключенный между вертикальной осью и линией, проведенной по касательной к окружности зерна в точке В. Исходя из ΔВОО, получено:

$$\mathrm{ctg}\left(90^{o} - \gamma\right) = \frac{R - a_z}{\sqrt{R^2 - \left(R - a_z\right)^2}} \approx \sqrt{\frac{R}{2a_z}} \ . \qquad (7.12)$$

Поскольку $\mathrm{ctg}\left(90^{o} - \gamma\right) = \mathrm{tg}\gamma$, то имеем:

$$\mathrm{tg}\gamma = \sqrt{\frac{R}{2a_z}} \ . \qquad (7.13)$$

После подстановки зависимости (7.13) в уравнение (7.9) с учетом соотношения $\mathrm{tg}\psi = f$, получено:

$$\frac{a_z}{R} = 0{,}5 \cdot f^2 \ . \qquad (7.14)$$

В результате пришли к зависимости, аналогичной зависимости (7.11), однако с меньшим числовым множителем, равным 0,5. Следовательно, значения a_z / R, полученные на основе зависимости (7.14) и

приведенные в табл. 7.1, в 4 раза меньше значений, рассчитанных по зависимости (7.11) и приведенных в табл. 7.3.

Таблица 7.4

Расчетные значения отношения a_z / R

f	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
a_z / R	0,02	0,045	0,08	0,125	0,18

Как следует из табл. 7.4, значения $a_z / R = 0{,}045 – 0{,}18$ достигаются при изменении коэффициента трения f в пределах 0,3 – 0,6. Эти значения f также вполне реализуемы при микрорезании сталей абразивным зерном. Поэтому и аналитическая зависимость (7.14) может быть использована для анализа закономерностей процесса микрорезания единичным зерном. Однако окончательно принять решение о том, какая из двух приведенных зависимостей – зависимость (7.11) или (7.14) наиболее объективно отражает физическую суть процесса микрорезания единичным зерном, можно лишь на основе проведения экспериментальных исследований.

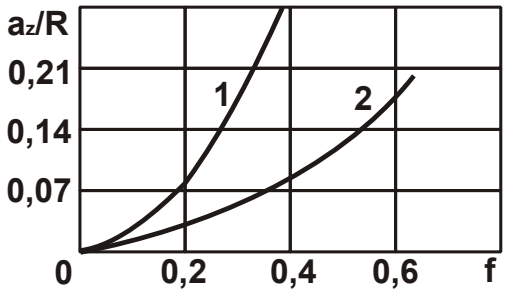


Рис. 7.6. Зависимость отношения a_z / R от f :
1 – расчет по зависимости (7.11);
2 – расчет по зависимости (7.14)

На рис. 7.6 приведены рассчитанные по зависимостям (7.11) и (7.14) значения a_z / R, которые дают наглядное графическое представление о характере изменения отношения a_z / R от коэффициента трения f для двух рассмотренных выше расчетных схем угла γ (рис. 7.5).

7.3. Закономерности взаимодействия инструмента-полировальника и обрабатываемого металла при абразивном полировании

Абразивное полирование является одним из основных методов финишной абразивной обработки. Условием осуществления съема металла и формообразования поверхностей при абразивном полиро-

вании следует рассматривать возможность достаточно прочного удержания абразивных зерен в материале инструмента-полировальника. Если материал инструмента характеризуется высокой твердостью, то, очевидно, абразивное зерно не сможет в него внедриться и удержаться в нем в процессе обработки. Оно будет перекатываться, фактически не совершая съем обрабатываемого материала. Поэтому материал инструмента следует выбирать достаточно пластичным, обеспечивающим внедрение (шаржирование) в него абразивного зерна и удержание его с силой, достаточной для осуществления процесса микрорезания.

Необходимо отметить, что в работах [4; 41; 191] обоснованы физические и технологические закономерности абразивного полирования. Однако в этих работах приведены в основном результаты экспериментальных исследований процесса полирования, что ограничивает возможности его дальнейшего совершенствования с точки зрения повышения производительности и качества обработки. Поэтому необходимо провести теоретический анализ условий обеспечения прочного удержания абразивных зерен в материале инструмента-полировальника и разработать практические рекомендации для их осуществления. В связи с этим, в настоящем параграфе обоснованы условия обеспечения прочного удержания абразивных зерен в материале инструмента-полировальника для осуществления высокопроизводительного съема материала и высококачественной обработки при абразивном полировании.

Для аналитического описания процесса взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым металлом и материалом инструмента рассмотрена расчетная схема (рис. 7.7), в которой под действием радиального усилия P_{y_0} абразивное зерно внедряется в обрабатываемый металл на глубину a и в материал инструмента на глубину a_1 [181; 182].

Для определения глубин a и a_1 необходимо знать площади контакта абразивного зерна с обрабатываемым металлом $F_{конт}$ и с материалом инструмента $F_{конт1}$. С целью упрощения расчетов первоначально рассмотрено абразивное зерно в форме двух спаренных между собой конусов с углами при вершинах 2γ. Тогда, исходя из рис. 7.7, получено:

$$F_{конт} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot tg^2\gamma \cdot a^2; \quad (7.15)$$

$$F_{конт1} = \pi \cdot r_1^2 = \pi \cdot tg^2\gamma \cdot a_1^2, \quad (7.16)$$

где $r = tg\gamma \cdot a$;

$r_1 = tg\gamma \cdot a_1$ – радиусы площадей $F_{конт}$ и $F_{конт1}$, м.

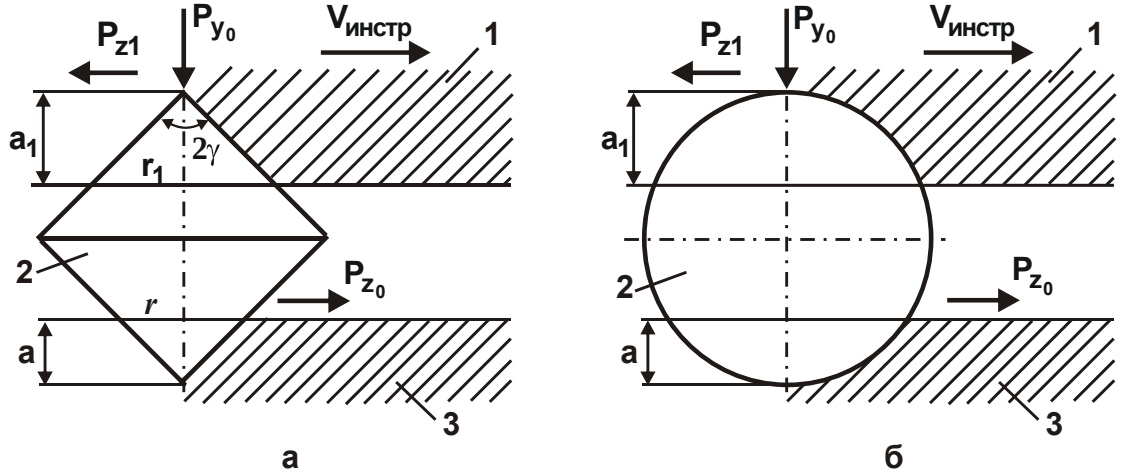


Рис. 7.7. Расчетные схемы взаимодействия абразивного зерна 2 в форме двух спаренных конусов (а) и в форме сферы (б) с материалом инструмента-полировальника 1 и с обрабатываемым материалом 3

Твердости обрабатываемого металла HV (по Виккерсу) и материала инструмента HV_1 определяются зависимостями:

$$HV = \frac{P_{y_0}}{F_{конт}} = \frac{P_{y_0}}{\pi \cdot tg^2\gamma \cdot a^2}; \quad (7.17)$$

$$HV_1 = \frac{P_{y_0}}{F_{конт1}} = \frac{P_{y_0}}{\pi \cdot tg^2\gamma \cdot a_1^2}. \quad (7.18)$$

Решая зависимости (7.17) и (7.18) относительно глубин a и a_1, получено:

$$a = \sqrt{\frac{P_{y_0}}{\pi \cdot tg^2\gamma \cdot HV}}; \quad (7.19)$$

$$a_1 = \sqrt{\frac{P_{y_0}}{\pi \cdot tg^2\gamma \cdot HV_1}}. \quad (7.20)$$

Как видно, чем больше угол γ, твердости обрабатываемого металла HV и материала инструмента HV_1, тем меньше глубины внедре-

ния абразивного зерна в обрабатываемый металл a и в материал инструмента a_1. Чтобы абразивное зерно глубже внедрилось в материал инструмента и прочнее в нем удерживалось в процессе обработки, необходимо уменьшать твердость материала инструмента HV_1. Это позволит увеличить тангенциальное усилие P_{z_1}, с которым абразивное зерно будет удерживаться в инструменте-полировальнике. Тангенциальное усилие P_{z_1} можно выразить:

$$P_{z_1} = K_{рез_1} \cdot P_{y_0}, \qquad (7.21)$$

где $K_{рез_1}$ – коэффициент, численно равный коэффициенту резания.

Очевидно, чем больше коэффициент $K_{рез_1}$, тем больше тангенциальное усилие P_{z_1} и прочнее удерживается абразивное зерно. Принимая условие $HV_1<HV$, с учетом зависимостей (7.19) и (7.20) получено:

$$\frac{a_1}{a} = \sqrt{\frac{HV}{HV_1}}. \qquad (7.22)$$

Из данного соотношения вытекает условие: $a_1 > a$. При перемещении абразивного зерна со скоростью инструмента $V_{инстр}$ произойдет процесс микрорезания обрабатываемого металла. Возникающая при этом тангенциальная составляющая силы резания P_{z_0} будет подчиняться зависимости:

$$P_{z_0} = K_{рез_0} \cdot P_{y_0}. \qquad (7.23)$$

Коэффициент резания $K_{рез_0}$ с физической точки зрения не должен превышать значение коэффициента $K_{рез_1}$, входящего в зависимость (7.21). В противном случае будет справедливо условие $P_{z_0} > P_{z_1}$, в результате чего зерно не сможет прочно удерживаться в материале инструмента, будет перекатываться, что исключает процесс микрорезания обрабатываемого металла. Иными словами, для осуществления процесса микрорезания обрабатываемого металла должно выполняться условие $P_{z_0} < P_{z_1}$.

Учитывая, что абразивное зерно с одинаковой вероятностью может осуществлять процесс микрорезания как обрабатываемого металла, так и материала инструмента-полировальника, для выполнения

условия $P_{z_0} < P_{z_1}$, исходя из зависимостей (7.21) и (7.22), необходимо выполнить условие $К_{рез_0} < К_{рез_1}$.

В работе [5] показано, что условное напряжение резания σ при микрорезании единичным зерном может быть описано зависимостью:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\mathrm{tg}\left[45^0 - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right]} = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{К_{рез}}, \qquad (7.24)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого металла, Н/м^2;

ψ – условный угол трения передней поверхности режущего зерна с металлом ($\mathrm{tg}\,\psi = f$ – коэффициент трения);

γ – условный передний угол режущего зерна.

Из зависимости (7.24) следует, что чем больше углы ψ и γ, тем больше условное напряжение резания σ. Это согласуется с практикой абразивной обработки, согласно которой образование площадок износа на режущих абразивных зернах ($2\gamma \to 180^0$) позволяет уменьшить шероховатость поверхности (обеспечивает сглаживание микронеровностей на обрабатываемой поверхности) за счет увеличения условного напряжения резания σ при полировании с фиксированным радиальным усилием P_y.

С другой стороны, чтобы снизить силовую напряженность процесса и повысить производительность обработки, наоборот, необходимо условное напряжение резания σ уменьшать, уменьшая углы ψ и γ. Следовательно, имеют место противоположные требования к параметру σ в зависимости от решаемой задачи: обеспечение уменьшения шероховатости поверхности или повышение производительности обработки. С целью уменьшения шероховатости поверхности параметр σ необходимо увеличивать, а с целью повышения производительности обработки, наоборот, уменьшать за счет обеспечения высокой остроты режущих зерен и снижения интенсивности трения в зоне резания. Очевидно, увеличение параметра σ предполагает увеличение тангенциальной составляющей силы резания P_{z_0} и поэтому для выполнения условия $P_{z_0} < P_{z_1}$ (соответственно, условия $К_{рез_0} < К_{рез_1}$)

требуется увеличивать силу P_{z_1}, повышая прочность удержания абразивного зерна в материале инструмента-полировальника.

Для анализа условия $К_{рез_0} < К_{рез_1}$ следует разрешить зависимость (7.24) относительно коэффициента резания $К_{рез}$. В результате получено:

$$К_{рез} = 2 \cdot tg\left[45^0 - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right]. \qquad (7.25)$$

В табл. 7.5 приведены рассчитанные по зависимости (7.25) значения $К_{рез}$.

Таблица 7.5

Расчетные значения коэффициента резания $К_{рез}$

$(\psi + \gamma)$, град.	30	45	60	70	90
$К_{рез}$	0,577	0,424	0,268	0,184	0

Применительно к процессам микрорезания абразивным зерном обрабатываемого металла и материала инструмента-полировальника, коэффициенты резания $К_{рез_0}$ и $К_{рез_1}$ аналитически опишутся:

$$К_{рез_0} = 2 \cdot tg\left[45^0 - \frac{(\psi_0 + \gamma)}{2}\right]; \qquad (7.26)$$

$$К_{рез_1} = 2 \cdot tg\left[45^0 - \frac{(\psi_1 + \gamma)}{2}\right], \qquad (7.27)$$

где ψ_0, ψ_1 – условные углы трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом и материалом инструмента-полировальника.

Очевидно, для того чтобы выполнить условие $К_{рез_0} < К_{рез_1}$, необходимо чтобы угол ψ_0 был больше угла ψ_1. С учетом соотношений $tg\psi_0 = f_0$; $tg\psi_1 = f_1$ (где f_0, f_1 – коэффициенты трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом и материалом инструмента-полировальника) должно выполняться условие $f_0 > f_1$. Однако, обеспечить выполнение данного условия сложно, поэтому одновременно будут происходить процессы микрорезания абразивным зерном обрабатываемого металла и материала инструмента-полировальника, т.е. фактически с одинаковой интенсивностью будут

изнашиваться инструмент-полировальник и производиться съем обрабатываемого металла.

В реальных условиях процесс абразивного полирования осуществляется зернами, имеющими геометрическую форму, близкую к сфере. Поэтому рассмотрены закономерности взаимодействия зерна в форме сферы с обрабатываемым металлом и материалом инструмента-полировальника при условии, что на зерно при полировании действует радиальное усилие P_{y_0} (рис. 7.7).

В работе [5] установлено, что условное напряжение резания σ и коэффициент резания $К_{рез}$ применительно к процессу микрорезания зерном в форме сферы описываются:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\left(\sqrt{\frac{a}{2R}} - tg\frac{\psi_0}{2}\right)} = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{К_{рез_0}}; \qquad (7.28)$$

$$К_{рез_0} = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{a}{2R}} - tg\frac{\psi_0}{2}\right), \qquad (7.29)$$

где a – толщина среза, м;

R – радиус абразивного зерна, м.

При таком представлении процесса микрорезания условное напряжение резания σ тем меньше, чем больше отношение a/R и меньше условный угол трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом ψ_0. Коэффициент резания $К_{рез}$, наоборот, тем меньше, чем меньше a/R и больше условный угол трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом ψ_0.

Наибольшее значение условного напряжения резания $\sigma \to \infty$, исходя из зависимости (7.28), достигается при условии:

$$\sqrt{\frac{a}{2R}} - tg\frac{\psi_0}{2} = 0. \qquad (7.30)$$

Откуда

$$\frac{a}{R} = 2 \cdot tg^2\frac{\psi_0}{2} \approx 0{,}5 \cdot tg^2\psi_0 = 0{,}5 \cdot f_0^2. \qquad (7.31)$$

С физической точки зрения отношение a/R в данном случае определяет предельное значение, при котором процесс резания переходит в процесс пластического деформирования обрабатываемого ма-

териала без образования стружки. В табл. 7.6 приведены расчетные значения отношения a/R в зависимости от коэффициента трения режущего зерна с обрабатываемым металлом f_0.

Таблица 7.6

Расчетные значения отношения a/R

f_0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0
a/R	0	0,005	0,01	0,045	0,08	0,125	0,18	0,5

Как показано в п. 7.2, согласно экспериментальным данным профессора Богомолова Н. И., условие перехода процесса резания в процесс пластического деформирования обрабатываемого материала без образования стружки выполняется при предельных значениях отношение a/R = 0,04 … 0,08, а по данным профессора Крагельского И.В. – при a/R = 0,14 … 0,17, т.е. в общем a/R=0,04 … 0,17. Исходя из табл. 7.6, для значений a/R=0,04 … 0,17 коэффициент трения режущего зерна с обрабатываемым металлом f_0 изменяется в пределах 0,3 … 0,6, что вполне соответствует экспериментальным данным, полученным при микрорезании единичными абразивными зернами.

Следовательно, аналитическая зависимость (7.28) позволяет установить предельные значения отношения a/R, которые, как видно, однозначно определяются коэффициентом трения f_0: чем больше f_0, тем больше отношение a/R. При этом расчетные значения отношения a/R приблизительно соответствуют экспериментальным значениям, что свидетельствует о правильности принятой расчетной схемы и выполненных расчетов. Зависимость (7.28) также идентична зависимости (7.14), полученной на основе известной формулы профессора Зворыкина К. А. для определения условного угла сдвига обрабатываемого материала при резании, что указывает на ее достоверность.

Зависимости (7.28) и (7.29) справедливы при микрорезании обрабатываемого металла. При микрорезании материала инструмента-полировальника зависимость (7.29) примет вид:

$$K_{рез_1} = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{a}{2R}} - tg\frac{\psi_1}{2} \right). \qquad (7.32)$$

Как видно, зависимости (7.29) и (7.32) отличаются условными углами трения ψ_0 и ψ_1, поскольку коэффициенты трения передней по-

верхности режущего зерна с обрабатываемым металлом f_0 и материалом инструмента-полировальника f_1 различны. Для того чтобы выполнялось условие $К_{рез_0} < К_{рез_1}$ необходимо выполнить условие $f_0 > f_1$. Это соответствует приведенному выше решению, полученному при моделировании абразивного зерна в форме двух спаренных между собой конусов (рис. 7.7,а).

Из зависимостей (7.29) и (7.32) вытекает важный вывод, связанный с тем, что чем больше отношение a/R, тем больше коэффициент резания. Учитывая то, что глубина внедрения абразивного зерна в материал инструмента-полировальника больше глубины внедрения зерна в обрабатываемый металл, то, очевидно, выполняется условие $К_{рез_0} < К_{рез_1}$. Следовательно, при микрорезании абразивным зерном в форме сферы гарантированно выполняется условие $P_{z_0} < P_{z_1}$, а это обеспечивает достаточно прочное удержание зерна в инструменте и осуществляет процесс съема обрабатываемого металла.

7.4. Технологические рекомендации по обработке поверхностей полированием

Основной задачей полирования является сглаживание неровностей на поверхности. Ряд деталей имеют поверхности, для которых оценка высотных параметров шероховатости поверхности недостаточна, так как и она не отражает соответствия требованиям эксплуатации. Особенно это относится к деталям летательных аппаратов. Ряд деталей должны иметь высокую отражательную способность поверхностей, а ряд деталей высокую светопоглощательную способность (детали наружных оболочек приборов ЛА, детали терморегулирующих устройств и др.). Анализ литературных данных позволил построить зависимость оптических характеристик от методов обработки (рис. 7.8).

Методы обработки определяют пределы изменения оптических характеристик и дают возможность выбрать метод обработки деталей летательных аппаратов. Для оценки влияния методов обработки на поверхностный слой, нами произведена оценка критерия шероховатости поверхности F и работы выхода электронов (КРП) для деталей из сплава АМг6 (рис. 7.9).

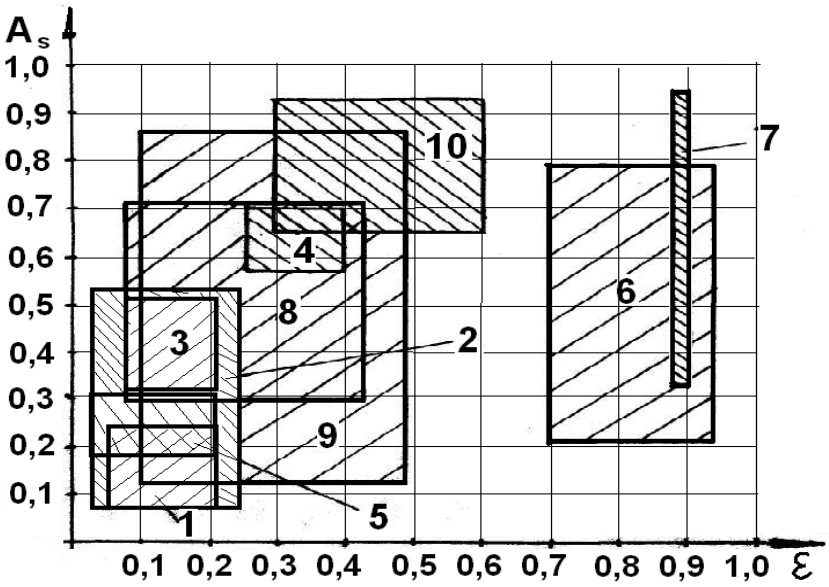


Рис. 7.8. Зависимость оптических характеристик от методов обработки деталей из алюминиевых сплавов:

1 – абразивное полирование; 2 – лезвийная обработка и поверхностное пластическое деформирование; 3 – шлифование; 4 – обработка металлической дробью; 5 – химическое и электрохимическое полирование; 6 – анодное окисление; 7 – толстослойное анодирование; 8 – химическое оксидирование; 9 – термическое оксидирование; 10 – электроискровое легирование

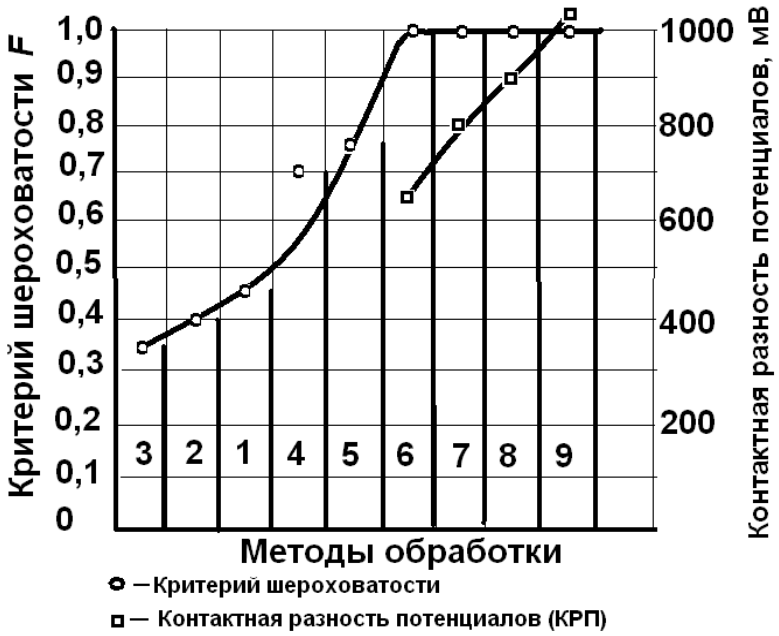


Рис. 7.9. Зависимость критерия шероховатости поверхности и КРП от методов обработки деталей из сплава АМг6:

1 – прокат; 2 – обработка металлической дробью; 3 – гидроабразивная обработка; 4 – фрезерование твердосплавной фрезой; 5 – фрезерование фрезой из эльбора; 6 – точение твердосплавным резцом; 7 – полирование алмазное; 8 – выглаживание; 9 – микроточение алмазным резцом

Установлено, что в процессе предварительной обработки поверхностей деталей с целью достижения минимальных значений высотных параметров шероховатости поверхности контроль обработанной поверхности необходимо осуществлять путем оценки критерия шероховатости поверхности, а после финишных методов обработки – путем оценки работы выхода электронов (оценки значений контактной разности потенциалов – КРП) [180].

Нами установлен характер изменения оптических характеристик и параметров поверхности от методов обработки деталей из сплава АМг6 (рис. 7.10). Такой характер изменения подтверждает предварительные выводы по контролю поверхностей после обработки [184].

Рис. 7.10. Характер изменения светоотражательной способности и параметров поверхности от методов обработки деталей из сплава АМГ-6: 1 – прокат; 2 – гидроабразивная обработка; 3 – обработка металлической дробью; 4 – фрезерование твердосплавной фрезой; 5 – фрезерование фрезой из эльбора; 6 – точение твердосплавным резцом; 7 – алмазное полирование; 8 – выглаживание; 9 – алмазное точение

Классификация методов обработки по технологическому воздействию показала, что абразивное полирование можно отнести к технологическим системам, связанным с незначительным изменением вещества в поверхностных слоях деталей (рис. 7.11, рис. 7.12), а классификация способов обработки по характеру воздействия на предмет труда показывает, что малоизученным является реализация процесса полирования высокоскоростным перемещением рабочей среды относительно обрабатываемой поверхности.

Поэтому в качестве основной схемы обработки была принята схема финишной обработки (рис. 7.13) с использованием дистиллированной воды и нанопорошка Al_2O_3.

Рис. 7.11. Классификация технологий по характеру воздействия на предмет труда

Рис. 7.12. Классификация способов обработки свободными абразивами по характеру воздействия абразивной частицы

Изучение изменения параметров шероховатости поверхности в процессе полирования показало, что стабилизация значений высотного параметра шероховатости R_a происходит значительно быстрее, чем R_{max}. Это, по-видимому, связано с наличием в составе абразивного порошка крупнозернистой доли фракции, а также участием в обработке зерен, подвергшихся дроблению и появлением в результате это-

го острых кромок, след которых при микроцарапании (рис. 7.14) увеличивает отношение R_{max}/R_a. После полирования, изменение опорной кривой показывает незначительные уменьшения угла при вершине опорной кривой и уменьшение разброса значений t_p по высоте профиля. Светоотражательная способность при этом достигает максимальных значений (при условии очистки поверхности от загрязнений).

Рис. 7.13. Схема полирования суспензией на основе ультрадисперсного порошка

Рис. 7.14. След единичного зерна

Установлено, что при предварительной обработке шлифованием отношение R_a/R_{max} при более высоких значениях параметра R_a возрастает в два раза (при этом исходное значение параметра R_a больше в 5 раз). Это можно объяснить повышением интенсивности роста параметра R_{max} по сравнению с параметром R_a за счет увеличения количества близких по размерам неровностей. С увеличением значений параметра шероховатости поверхности R_a для исходных образцов после их обработки значения параметра R_{max} растут более интенсивно по сравнению с параметром R_a (рис. 7.15, рис. 7.16) [185; 186; 188; 189].

Полирование поверхностей деталей необходимо выполнять в несколько этапов с использованием микропорошков различной зернистости. Эффективность абразивной обработки увеличивается при последовательном применении абразива зернистостью, равной достигнутому значению R_{max} на предшествующем этапе. Применение на

окончательных переходах овализированных зерен увеличит эффективность обработки за счет увеличения количества перекатывающихся зерен, что приведет к сглаживающему эффекту.

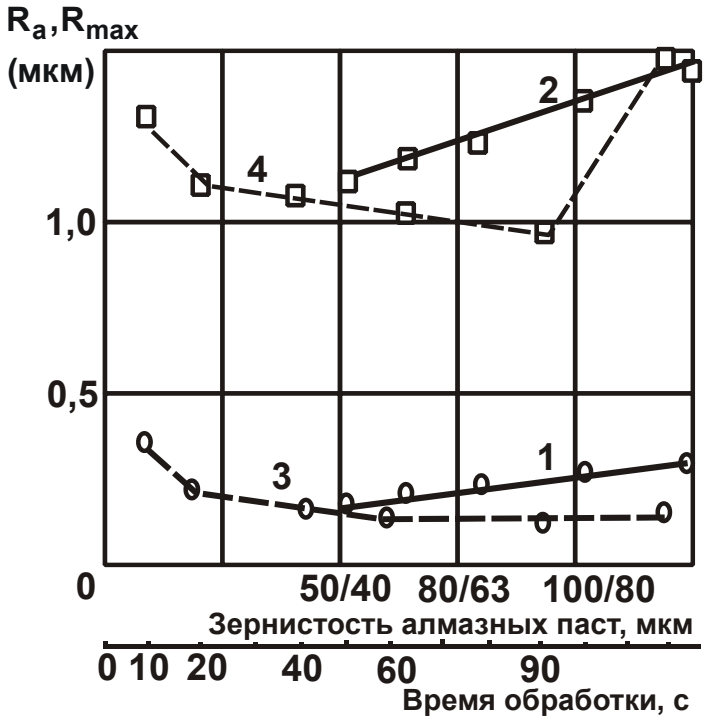


Рис. 7.15. Влияние зернистости алмазных лент 1, 2 и продолжительности обработки 3 и 4 на интенсивность изменения значений высотных параметров шероховатости поверхности (режим обработки): давление 4 МПа; скорость 35 м/с; продолжительность обработки 20 с для 1 и 2; зернистость абразива лент для 3 и 4 – АСМ 50/40

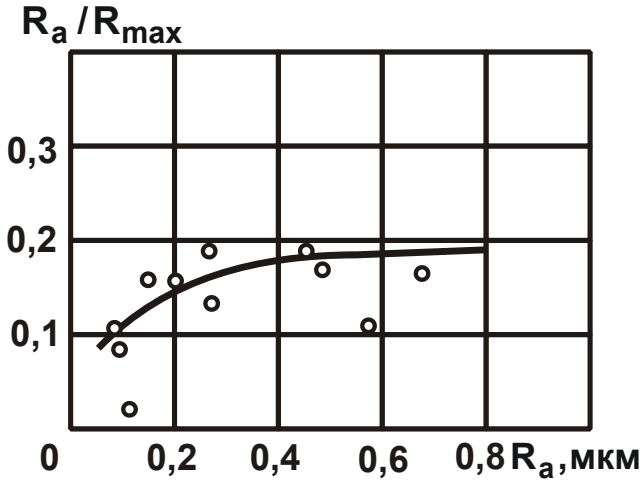


Рис. 7.16. Изменение отношения высотных параметров шероховатости поверхности при шлифовании перед полированием

Сглаживание поверхностного слоя следует проводить поэтапно, снижая зернистость абразива. Отношение высотных параметров шероховатости поверхности R_a / R_{max} может быть использовано для контроля дефектов поверхности после применения финишных процессов обработки, обеспечивая при этом максимальное значение работы выхода электронов (КРП – контактной разности потенциалов).

7.5. Технологическое обеспечение параметров поверхностей штанг систем пассивной ориентации ИСЗ

Материалы, применяемые для изготовления штанг систем гравитационной стабилизации ИСЗ относятся к сплавам с особыми свойствами – 36НХТЮ и медно-бериллиевые сплавы. Прогиб штанги обусловлен нагревом ее солнечной стороны, поэтому одним из решений является уменьшение поглощательной способности поверхностным слоем падающего излучения. Из-за малой толщины материала штанги увеличивается разность температур фронтальной и теневой стороны сечения трубчатого элемента, что и приводит к ее изгибу по длине (требования – прогиб штанги 1,5 – 2º). В работе [104] определен максимальный температурный градиент на сторонах сечения и произведена оценка деформации (прогиб штанги под воздействием энергии излучения).

Прогиб штанги зависит от поглощательной способности поверхностного слоя и теплофизических параметров материала штанги.

Нами разработана технология изготовления штанг систем гравитационной стабилизации ИСЗ из сплавов 36НХТЮ и БрБНТ1,7 с добавками магния, обеспечивающая уменьшение поглощательной способности с 0,88 до 0,45 (для сплава 36НХТЮ) и от 0,66 до 0,18 (для сплава БрБНТ1,7 с добавками магния). Для изготовления штанг применили абразивное полирование алмазными пастами и электрохимическое полирование электроконтактным способом.

Схема установки для изготовления штанг приведена на рис. 7.17.

Заготовка проходит формующие ролики, где приобретает необходимую форму с перекрытием кромок на 90º. В свернутом состоянии в печи термической обработки осуществляется дисперсионное твердение в течение 50 мин и, охлаждаясь до зоны разворачивания трубчатого элемента, сматывается в рулон.

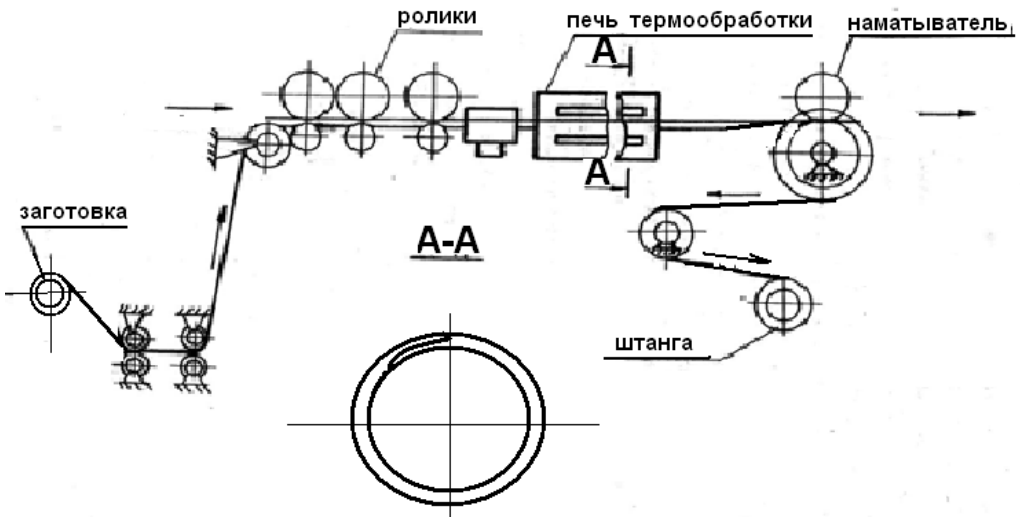


Рис. 7.17. Схема установки для изготовления трубчатых заготовок штанг

Для уменьшения поглощательной способности поверхности штанг разработана технология их изготовления из медно-бериллиевого сплава БрБНТ 1,7 с 0,09 % магния, которая включает следующие операции: формообразование трубчатой заготовки и ее термическая обработка; абразивное полирование; электрохимическое полирование.

Процессы абразивного и электрохимического полирования осуществляются на специальных установках, конструкции которых описаны в работе [104].

Для электрохимического полирования штанг была изготовлена специальная оправка (рис. 7.18).

Для штанг из лент сплава 36НХТЮ был разработан способ их изготовления с применением абразивного полирования алмазными пастами и последующего электрохимического полирования электроконтактным способом. Разработаны конструкции устройств для электрохимического полирования электроконтактным способом и бесконтактным подводом технологического тока [104; 190].

Устройство содержит тампоны, привод вращения держателя тампонов, систему циркуляции электролита, механизм фиксации тампонов в виде пружин и пальцев. В качестве тампонов в виде прямоугольных обечаек и механизма фиксации тампонов применен электролит. Можно взамен пальцев механизма фиксации тампонов применить регулировочные пневмоцилиндры для изменения давления полировальника на поверхность детали в процессе обработки.

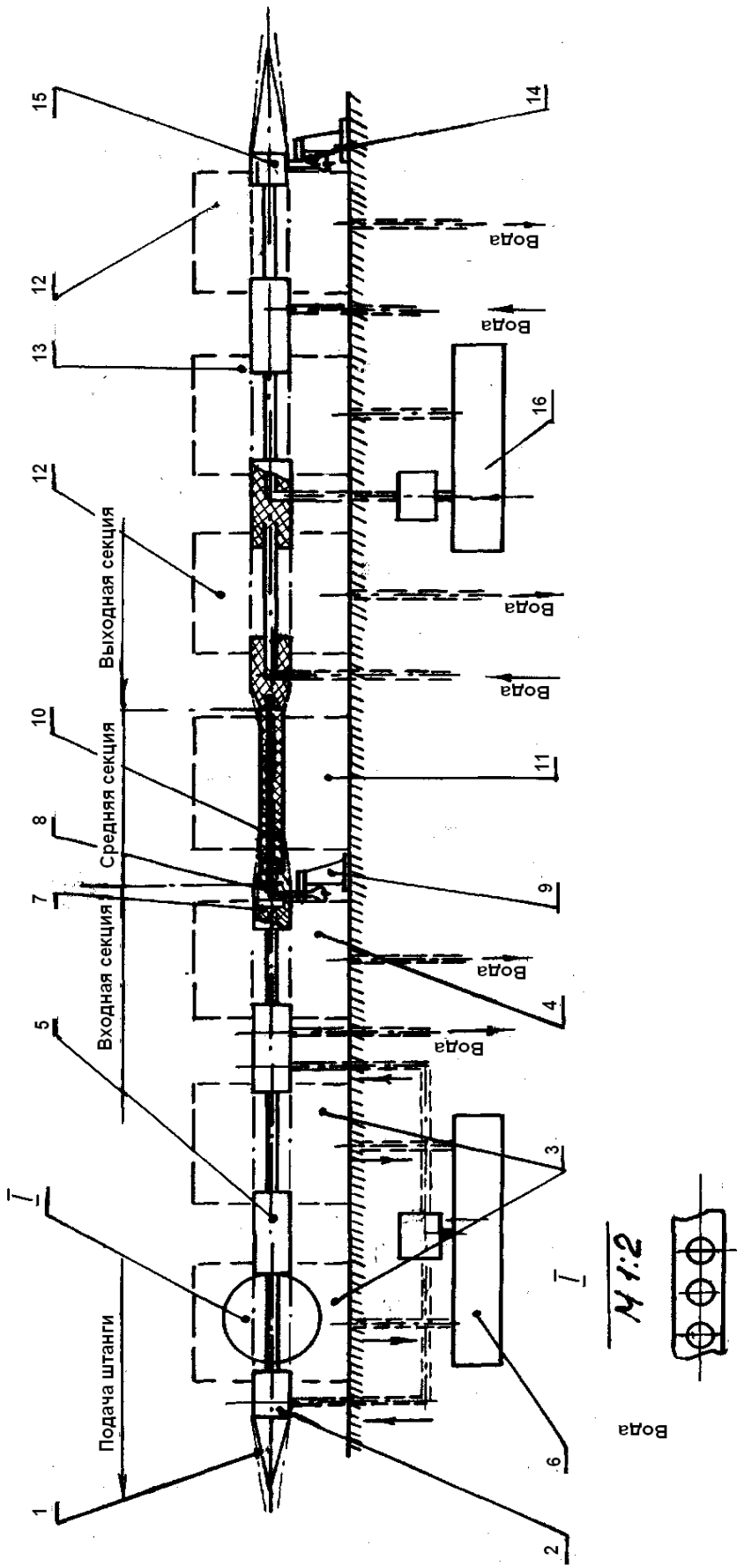


Рис. 7.18. Специальная оправка для электрохимического полирования штанг

При абразивном полировании происходит удаление исходной окисной пленки и образование нового поверхностного слоя с шаржированными абразивными частицами, при этом поверхностный слой сглаживается, а критерий шероховатости поверхности приближается к единице.

Применение электрохимического полирования электроконтактным способом или с бесконтактным подводом технологического тока предпочтительнее ванного способа. В первом случае более интенсивно обновляется окисная пленка в местах контакта тампона с неровностями поверхностного слоя. Возникающая прианодная пленка менее насыщена ионами металла и обладает меньшим сопротивлением, чем при ванном способе для направленного движения ионов. Процесс обработки интенсифицируется.

Наличие загрязнений на полированной абразивом поверхности приводит к образованию поверхностного слоя с окисленным слоем, что увеличивает поглощательную способность поверхности. Это подтверждается и оценкой работы выхода электронов. После электрополирования значения КРП значительно выше, чем после абразивного полирования (рис. 7.19).

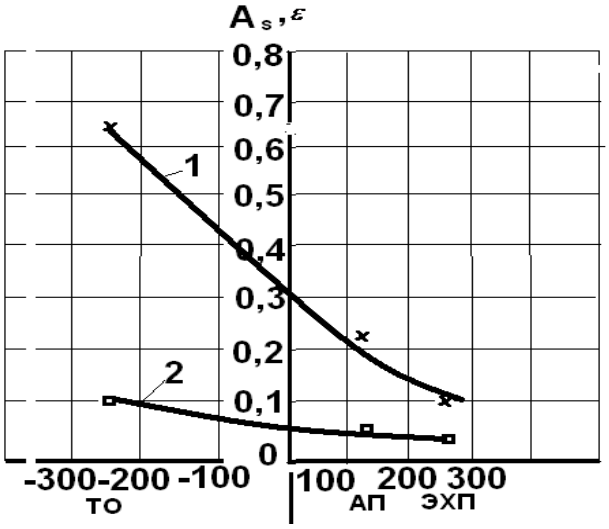


Рис. 7.19. Влияние методов обработки на поглощательную (1) и излучательную (2) способности обработанной поверхности лент медно-бериллиевого сплава БрБНТ 1,7 с 0,09 % магния: термическая обработка (ТО), абразивное (АП) и электрохимическое (ЭХП) полирование

7.6. Технологическое обеспечение деталей устройств терморегуляции отсеков летательных аппаратов

Разработаны технологические операции фрезерования, выглаживания, а также технологический процесс толстослойного анодирования.

Разработана операция обработки цилиндрических деталей из сплава АМг 6 путем выглаживания алмазным инструментом с радиусом при вершине 3 мм.

Режим обработки при выглаживании: усилие – 117 Н; подача инструмента – 0,4 мм/об.; скорость выглаживания детали с применением керосина – 80 м/мин. Поглощательная способность после обработки поверхности 15 %.

Для деталей из сплава ОТ4-1 рекомендовано обработку выглаживанием выполнять стальным шаром.

Режим обработки при выглаживании: усилие – 1 Н; подача инструмента – 0,07 мм/об.; скорость выглаживания детали с применением индустриального масла – 100 м/мин. Поглощательная способность после обработки поверхности 55 %.

Для обработки плоских деталей из титановых сплавов фрезерованием необходимо применять эльбор-Р.

1. Предварительная обработка пластинами ВК-8.

2. Последующая обработка фрезой с эльбором-Р.

Режим обработки при фрезеровании: скорость резания – 400 м/мин; подача – 13 мм/мин; глубина резания – 0,1 мм.

Поглощательная способность после обработки поверхности 55 %.

Излучательная способность – 22 %.

Для повышения поглощательной способности поверхностей деталей из алюминиевых сплавов нами разработана операция электроискрового легирования графитом на установке ЭФИ-45. Поглощательная способность после обработки поверхности увеличилась до 93 %.

Разработана технология толстослойного анодирования титановых сплавов (пленка до 40 – 50 мкм) в трехкомпонентном растворе на основе сульфосалициловой кислоты (табл. 7.7, табл. 7.8, рис. 7.20).

Поглощательная способность после обработки поверхности – 50 %.

Излучательная способность – 80 %.

Таблица 7.7

Технологический процесс толстослойного анодирования деталей из титановых сплавов

№ п/п	Наименование операции	Состав электролита		Режимы обработки			Примечание
		Наименование компонента	Содержание компонента, г/л	Температура, К	Плотность тока, А/дм^2	Время выдержки, мин	
1	Обезжиривание в органическом растворе	бензин	–	–	–	–	–
2	Сушка на воздухе	–	–	–	–	–	–
3	Монтаж деталей	–	–	–	–	–	–
4	Обработка переменным током	Серная кислота (пл.1,835 г/см^3), Соляная кислота	400 60	291–298	50 – 70	60 – 120	
5	Промывка в проточной воде			291–293		0,5 – 1,0	
6	Анодирование	Сульфосалициловая кислота. Соляная кислота (пл.1,19 г/см^3) Серная кислота (1,835 г/см^3) Соляная кислота	70 – 80 7–9 400 40(ВТ-6). 60 (ВТ14)	291–298	2–3 напряжение (40-45) В. (ВТ14, ВТ18)	в зависимости от толщины пленки	Напряжение за 2-е минуты повышают от нуля до рабочего значения, затем поддерживают постоянным. Плотность тока увеличивают через 0,5 А/дм^2
7	Промывка в проточной холодной воде					0,5 – 1,0	
8	Промывка в холодной воде					5 – 10	

Таблица 7.8

Технологический процесс толстослойного анодирования деталей из алюминиевых сплавов

№ п/п	Наименование операции	Состав электролита		Режимы обработки			Примечание
		Наименование компонента	Содержание компонента, г/л	Темпе-ратура, К	Плотность тока, А/дм^2	Время выдержки, мин	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Обезжиривание в органическом растворе	Бензин, Уайт-спирит, трихлор-этилен	–	–	–	3–20	–
2	Сушка на воздухе	–	–	–	–	–	–
3	Монтаж деталей	–	–	–	–	–	–
4	Химическое обезжиривание (травление)	Едкий натрий	40 – 60	–	–	0,5	Поверхность травильного раствора должна быть свободной от жира и загрязнений
5	Промывка в теплой воде	–	–	313 – –323	–	0,5 – 1,0	Объем воды: 1 объем в 2 часа
6	Промывка в холодной проточной воде	–	–	291 – –298	–	0,5 – 1,0	Объем воды: 1 объем в 1 час
7	Осветление	Азотная кислота (пл. 1,4 г/см^3)	–	291 – –298	–	0,5 – 1,0	–

Окончание табл. 7.8

1	2	3	4	5	6	7	8
8	Промывка в проточной воде		–	291 – –298	–	0,5 – 1,0	Перемешивание сжатым воздухом Объем воды: 1 объем в 1 час
9	Анодирование	Серная кислота	180 – 200	283– –291	8 – 12 Началь-ная плотность тока	30 – 45	Напряжение на источнике 40-45 В. Охлаждение с помощью холодильной установки. Перемешивание сжатым воздухом
10	Промывка в проточной воде			291 – –298		0,5 – 1,0	Перемешивание сжатым воздухом Объем воды: 1 объем в 1 час
11	Промывка в теплой воде			343– –363			Перемешивание сжатым воздухом Объем воды: 1 объем в 2 часа
12	Сушка						
13	Демонтаж						
14	Контроль						

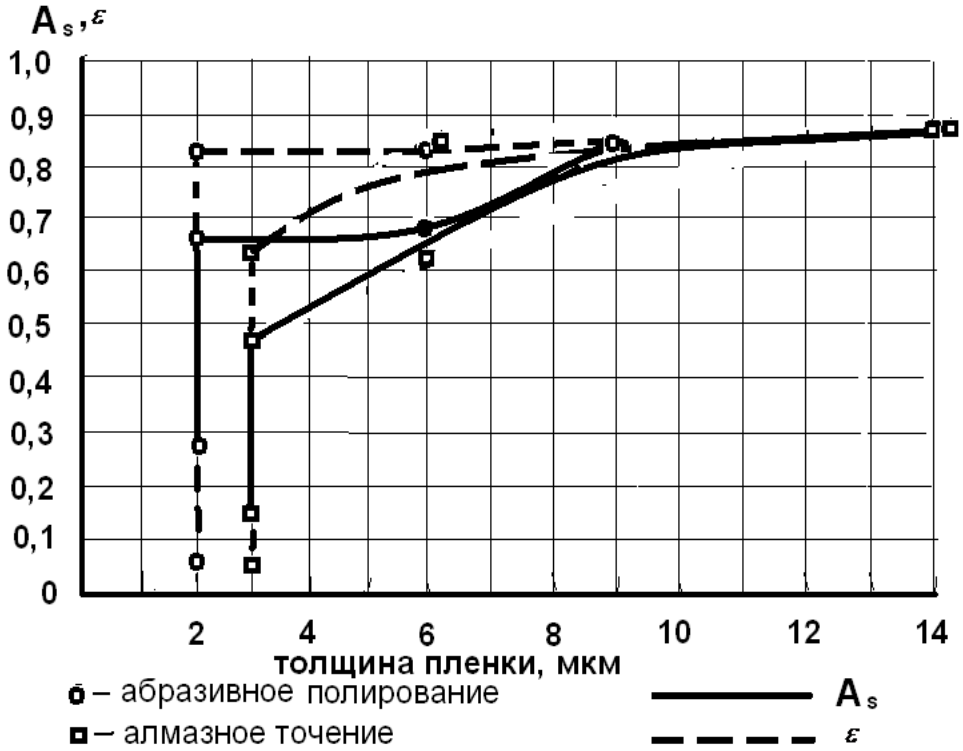


Рис. 7.20. Влияние толщины пленки при глубоком анодировании поверхности образца из сплава АМг6 на изменение поглощательной и излучательной способности

Технология глубокого анодирования деталей из алюминиевых сплавов в серной кислоте (табл. 7.8) обеспечивает различные значения A_s и ε. Изменение поглощательной способности от 0,2 до 0,93 и излучательной от 0,7 до 0,95 достигнуто за счет применения различных методов предварительной обработки перед анодированием, а также за счет изменения режимов обработки.

Профилограммы поверхности для сплава АМг6 до и после анодирования (предварительная обработка: алмазное точение и абразивное полирование) приведены на рис. 7.21, рис. 7.22. На рис. 7.23 приведена фотография сечения образца после анодирования (толщина пленки 40 мкм).

После механического полирования значения R_a меньше, однако, значения R_{max} больше, по-видимому, за счет более глубоких следов дробленых зерен, поэтому R_a / R_{max} при предварительной обработке механическим полированием имеет меньшие значения. Перед анодированием R_a / R_{max} = 0,0275 , а после анодирования R_a / R_{max} = 0,9.

Рис. 7.21. Профилограмма поверхности образца из сплава АМг6 до (а) и после (б) анодирования: ВУ2000; ГУ 100; подготовка поверхности: алмазное точение

При предварительной обработке алмазным точением отношение $R_a / R_{max} = 0{,}046$, а после анодирования $R_a / R_{max} = 0{,}6$.

Значения высотных параметров шероховатости поверхности увеличиваются после анодирования, а значения критерия шероховатости поверхности, наоборот, уменьшаются.

Покрытие, получаемое анодированием поверхности с предварительной обработкой переменным током, отличается более мелкозернистой структурой, более плотное.

Для повышения поглощательной способности поверхностей деталей из алюминиевых сплавов до 93 % нами разработана технология электроискрового легирования графитом на установке ЭФИ-46.

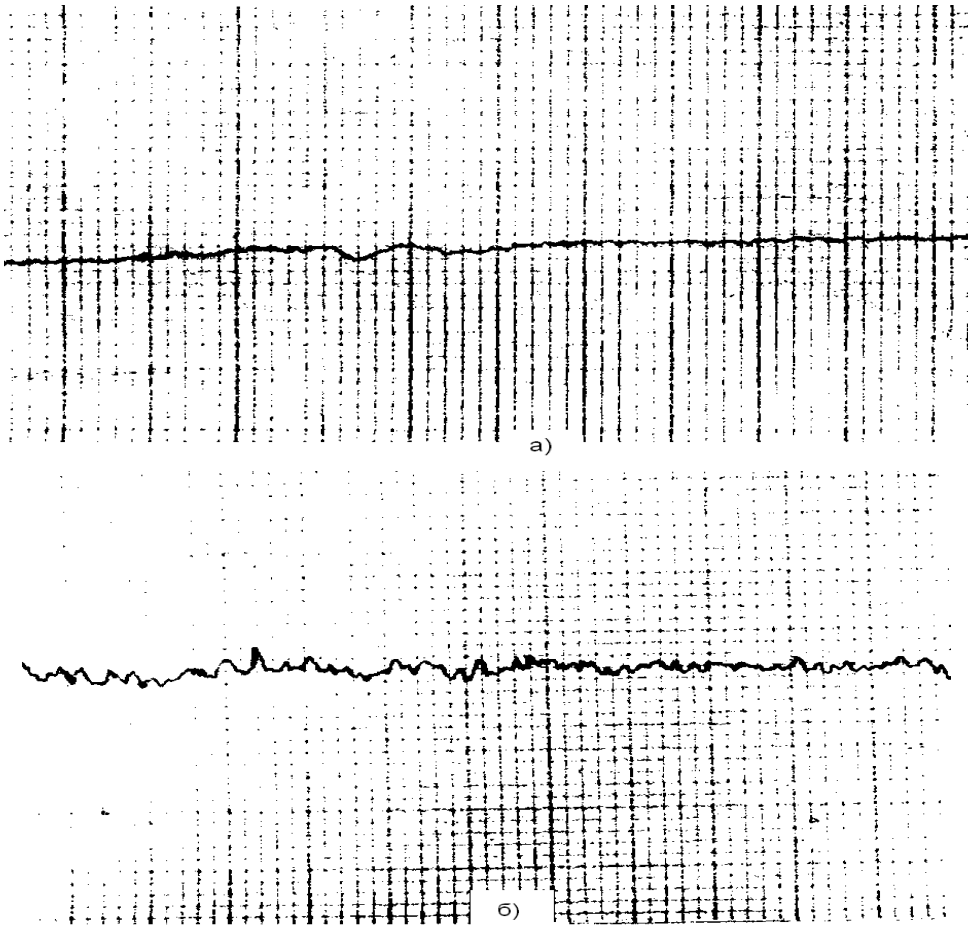


Рис. 7.22. Профилограмма поверхности образца из сплава АМг6 до (а) и после (б) анодирования: ВУ2000; ГУ 100; подготовка поверхности: абразивное полирование

Рис. 7.23. Поперечное сечение образца из сплава АМг6 с анодной пленкой 40 мкм: 1 – пленка; 2 – основа

Анализ приведенных зависимостей позволяет заключить: метод предварительной обработки при минимальных значениях высотных параметров шероховатости поверхности практически не влияет на поглощательную и излучательную способность поверхности, подвергающейся глубокому анодированию. Баланс поглощение / излучение

поверхности достигается уже при толщине пленки 15 мкм. Применение разработанного технологического процесса на деталях из алюминиевых сплавов обеспечило получение анодных пленок повышенной толщины (50 мкм), при этом поглощательная способность достигает значений 0,92 – 0,95. Метод предварительной обработки незначительно влияет на поглощательную способность поверхности после анодирования (табл. 7.9, табл. 7.10). По нашему мнению, это связано с большой толщиной анодной пленки на поверхности. С другой стороны, метод предварительной обработки существенно влияет на излучательную способность поверхности. Наполнение пленки в черный цвет обеспечивает отношение $A_s / \varepsilon \to 1$.

Таблица 7.9

Поглощательная и излучательная способность поверхностей деталей после предварительной обработки перед анодированием

№ п/п	Метод обработки	АМг6		АМг3		ВТ14		ВТ6	
		A_s	ε	A_s	ε	A_s	ε	A_s	ε
1	Фрезерование твердым сплавом	0,43	0,15	0,43	0,14	0,55	0,26	0,57	0,27
2	Алмазное точение	0,08	0,11	0,1	0,11	0,5	0,19	0,51	0,19
3	Полирование механическое	0,2	0,09	0,2	0,15	0,5	0,2	0,5	0,2
4	Гидроабразивная	0,62	0,35	0,63	0,36	0,78	0,52	0,8	0,56
5	Выглаживание	0,22	0,22	0,25	0,23	0,5	0,27	0,5	0,27
6	Химическое полирование	0,2	0,09	0,2	0,08	0,5	0,22	0,5	0,22
7	Электрохимическое полирование	0,3	0,09	0,22	0,08	0,51	0,23	0,51	0,23

Предварительная гидроабразивная обработка и последующее химическое полирование увеличивает поглощательную способность поверхности и также приближает отношение A_s / ε к единице. При предварительной обработке химическим фрезерованием излучательная способность принимает небольшие значения.

Испытания на коррозионную стойкость проводили путем имитации жестких климатических условий и последующего снятия и анализа поляризационных кривых. В качестве коррозионной среды выбран 3 %-й раствор соли NaCl. Все поверхности образцов, кроме подготов-

ленных к проведению испытаний, покрывались химически стойким лаком типа ЛХС, а затем высушивались в термостате при температуре 120 °С в течение одного часа.

Таблица 7.10

Поглощательная и излучательная способность поверхностей деталей из алюминиевого сплава АМг6 после анодирования и через 1 год натурных испытаний

Марка материала	Количество образцов	Обработка перед анодированием	Наполнение после анодирования	A_s		ε	
				После анод	Через 1 год	После анод	Через 1 год
АМг6, состояние поставки	12	Без обработки	В воде	0,24	0,27	0,8	0,86
АМг6, состояние поставки	12	Химическое полирование	В хромпике	0,3	0,41	0,86	0,92
АМг6, гидропескоструйная обработка	12	Без обработки	В воде	0,65	0,62	0,9	0,91
АМг6, гидропескоструйная обработка	12	Химическое полирование	В воде	0,8	0,84	0,89	0,93
АМг6, гидропескоструйная обработка	12	Без обработки	В черный цвет	0,92	0,96	0,89	0,93
АМг6, гидропескоструйная обработка	12	Без обработки	В черный цвет	0,89	0,91	0,88	0,91
АМг6, гидропескоструйная обработка	12	Без обработки	В хромпике	0,61	0,69	0,93	0,94
АМг6, химическое фрезерование	12	Без обработки	В хромпике	0,82	0,84	0,93	0,93
АМг6, химическое фрезерование	12	$NaOH + HNO_3$	Анод. 40 мин	0,52	0,56	0,17	0,20
АМг6, химическое фрезерование	12	$NaOH + HNO_3$	Анод. 40 мин	0,54	0,54	0,20	0,23
АМг6, химическое фрезерование	12	Орган. раствор + HNO_3	Анод. 40 мин	0,56	0,56	0,22	0,21

Для оценки коррозионных потерь выбран весовой метод. В качестве единицы потерь выбрана величина ΔG, характеризующая изменение массы образца во времени (мг/ч·м^2). Взвешивание образцов осуществляли на аналитических весах ВЛА-200. Образцы помещались в эксикатор, на дне которого налит 3 %-й соляной раствор NaCl. Эксикатор помещали в сушильный шкаф. Образцы подвергались испытанию в условиях: верхнее значение температуры в каждом цикле 150 ± 5 ^{o}C; относительная влажность воздуха при верхнем значении температуры в каждом цикле 95 – 100 %; продолжительность выдержки при верхнем значении температуры в каждом цикле 8 часов; продолжительность охлаждения 40 часов; нижнее значение температуры в каждом цикле 22 ± 2 ^{o}C; продолжительность одного цикла 48 часов. Это имитация жестких климатических условий. Прекращение испытаний производили при появлении язвенной коррозии на поверхности.

Первые коррозионные поражения в виде ржавых пятен появились на второй день испытаний. При изучении поверхностей на металлографическом микроскопе обнаружено наличие мелких точек коррозионного разрушения. Результаты изменения потери массы с единицы поверхности во времени показывает, что на 10 – 12 сутки процесс изменения массы стабилизируется и для образцов после абразивного полирования приближается к значению 0,0004 г/ч м^2.

Для снятия поляризационных кривых в качестве электродов использовали образцы из стали ЭИ 961 в 3 %-ом растворе NaCl при комнатной температуре. Снятие кривых производили на приборе ПИ-50-1. При этом применяли вспомогательный электрод (платиновый) и электрод сравнения (хлорсеребряный). Скорость развертки 0,2 мВ/с. Диапазон потенциалов 50 мВ. Для установления постоянной плотности тока в области пассивности выдержка длилась 1/4 часа. Всю кривую в исследуемом интервале потенциалов снимали на одном электроде.

7.7. Технологическое обеспечение отражательной способности зеркал лазерных установок

Анализ существующих технологических процессов изготовления зеркал показал, что улучшение физико-химических параметров поверхности при обработке свободным абразивом возможно за счет

улучшения технологической среды, конструкций инструмента и полировальника, режимов обработки, а также автоматизации технологического цикла изготовления. Поэтому разработаны технологические решения, направленные на повышение отражательной способности металлических зеркал, связанные с проектированием технологии изготовления деталей с применением улучшенных технологических сред конструкций, инструментов и полировальников, а также оптимизацией процесса их обработки [6; 7; 183].

Улучшение технологических сред возможно путем применения в абразивных суспензиях всевозможных компонентов, которые в процессе обработки приводят к улучшению физико-химического состояния поверхностного слоя. Работа выхода электронов должна уменьшаться.

Для обработки зеркал из меди, алюминиевых сплавов и молибдена разработаны оптимальные технологические составы, обеспечивающие повышение их отражательной способности. Разработанные составы с полимерными добавками обеспечили повышение отражательной способности по сравнению с применявшимися ранее составами. Состав суспензии защищен авторским свидетельством [7]. В качестве полимерной добавки выбрана поливинилацетатная дисперсия (ГОСТ 18992-73), наличие которой в суспензии при оптимальном содержании 5 – 7 вес %, обеспечивает фиксацию абразивных зерен на полировальнике, а продукты механической деструкции поливинилацетата химически взаимодействуют с металлом обрабатываемой детали, с неровностями поверхностного слоя, сглаживая их. На поверхности образуется тончайшая, оптически прозрачная окисная пленка. При этом образуется ювенильная поверхность с благоприятным физико-химическим состоянием, с тончайшей пленкой окислов, которая практически не влияет на отражательную способность. Работа выхода электрона у такой поверхности гораздо меньше, чем у поверхностей, обработанных абразивной суспензией, например, с добавками поверхностно-активных веществ. Наличие полимерных добавок повышает в 2 раза съем металла по сравнению с применявшимися ранее добавками ПАВ и повышает производительность труда. Кроме этого состава использовали состав на основе оксихинолиновых соединений при следующем соотношении компонентов (вес %): алмазный порошок 2 – 4; насыщенный раствор 8-оксихинолина – остальное.

Введение комплексообразующего компонента 8-оксихинолина обеспечивает увеличение производительности обработки за счет подавления сдвиговых деформаций и селективности воздействия на поверхностный слой обрабатываемого материала комплексообразующих компонентов (КК). КК взаимодействует с обрабатываемой поверхностью и при этом вначале адсорбируется поверхностью, а затем координационные центры КК образуют комплексные образования (еще не ставшие комплексными соединениями) с наиболее активными центрами поверхности. В результате активные центры, представляющие собой узлы кристаллической решетки материала, все более вовлекаются в координационную сферу КК. При этом все более ослабляются связи, удерживающие ионы в узлах кристаллической решетки.

Таким образом, существенно снижается энергетический порог отрыва ионов. Для этого достаточно небольших энергий сдвиговых деформаций в процессе полирования, то есть съем поверхностного слоя может происходить не только путем царапания абразивными частицами, но и за счет сдвиговых деформаций. В результате значительно увеличивается производительность обработки в процессе полирования с участием КК.

Другой особенностью является селективность воздействия на поверхностный слой обрабатываемого материала. Наиболее уязвимыми местами для комплексообразования являются дефектные области поверхности, особенно наклонные гребни выступов, а также впадины, в которые затруднено проникновение громоздких молекул комплексообразователей. За счет этого максимальное количество КК взаимодействует с наиболее доступными узлами дефектных зон (гребни выступов), обеспечивая максимальный съем этих участков. При этом происходит сглаживание рельефа поверхности выступов, уменьшается крутизна и высота профиля.

Особенно важным обстоятельством является то, что поверхность в процессе обработки в среде КК 8-оксихинолина не изменяет своего состава. В результате этого работа выхода электрона такой поверхности минимальна.

В качестве состава для изготовления полировальника использовали полировальную смолу марки СП-18 ТУ (СТБ 47-71), изготовляемую Красногорским оптико-механическим заводом, с введением добавки в виде износостойких мелкодисперсных частиц фторопласта-4.

Частицы фторопласта-4, обладающие более высокой износостойкостью, способствуют сохранению заданной формы поверхности полировальника и повышению отражательной способности обрабатываемой детали. Применение такого полировальника благоприятно влияет на физико-химическую структуру поверхности – способствует меньшему шаржированию и окислению поверхности благодаря интенсивному съему материала. Это позволяет без предварительной подготовки (исключая операцию шлифования) получать качественную поверхность. Разработанные составы суспензии обеспечивают более ровный фон рисок, благодаря чему поверхность приобретает высокую коррозионную стойкость во влажной атмосфере в течение длительного периода эксплуатации (порядка 1 года).

На основании результатов испытаний для изготовления полировальника можно рекомендовать композиционный материал следующего состава (%, массовые доли): 90 – 95 пеко-канифольной смолы; 5 – 10 мелкодисперсного порошка фторопласта-4.

По эксплуатационным характеристикам полировальники с этим составов превосходят ранее применявшиеся полировальники на основе пеко-канифольной смолы. Установлено, что производительность обработки с применением такого полировальника увеличилась на 20 – 25 %, износостойкость – на 23 – 26 % по сравнению с обработкой полировальником на основе пеко-канифольной смолы. Отражательная способность медных зеркал увеличилась с 98,8 % (достигаемой при использовании традиционной технологии) до 99,3 %.

Для дальнейшего повышения качества обработки поверхностей деталей из алюминия, меди и их сплавов (например, повышения отражательной способности зеркал) необходимо полировать или доводить детали технологическими средами на основе сферических абразивов с размером зерна 0,05 – 0,3 мкм.

Выводы

1. Разработана методология технологического обеспечения изготовления изделий летательных аппаратов абразивной обработкой с получением заданных геометрических характеристик поверхностных слоев и физико-химического состояния обработанных поверхностей.

Разработаны научные основы технологии изготовления изделий систем терморегулирования отсеков бортовой аппаратуры летательных аппаратов, которые базируются на математической модели процесса сглаживания неровностей поверхностного слоя, что позволило управлять режимами абразивной обработки поверхностей.

2. Разработана математическая модель определения шероховатости поверхности в процессе абразивного полирования и установлены условия уменьшения. Они состоят в реализации граничного значения отношения толщины среза к радиусу округления режущей кромки абразивного зерна, соответствующего переходу процесса резания (стружкообразования) к процессу пластического деформирования материала без отделения стружки. Установлено, что предельные значения отношения толщины среза к радиусу округления режущей кромки абразивного зерна определяются коэффициентом трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Поэтому уменьшить шероховатость поверхности можно уменьшением коэффициента трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Расчетами определены предельные значения параметров шероховатости поверхности, которые могут быть достигнуты при условии перехода от процесса резания к процессу пластического деформирования материала. Показано, что основное влияние на шероховатость поверхности оказывает зернистость абразива.

3. Теоретически определены условия, при которых абразивное зерно не будет перекатываться в зоне обработки, а прочно удерживаться в материале инструмента-полировальника и осуществлять процесс резания и съема металла с обрабатываемой поверхности. Расчетами установлено, что в случае моделирования абразивного зерна в форме двух конусов, которые внедряются в материал инструмента-полировальника и обрабатываемый металл, тангенциальные усилия, возникающие в материале инструмента-полировальника и обрабатываемом металле, будут приблизительно равны. Поэтому абразивные зерна с одинаковой вероятностью могут как перекатываться в зоне обработки, так и удерживаться в материале инструмента-полировальника и совершать полезную работу. При моделировании абразивного зерна в форме сферы за счет особенностей процесса резания (стружкообразования) тангенциальное усилие, возникающее в обраба-

тываемом металле, будет меньше тангенциального усилия, возникающего в материале инструмента-полировальника. Поэтому в данном случае вероятность удержания зерна в инструменте выше и выше эффективность процесса абразивного полирования. При этом доказано, что прочность удержания абразивного зерна в материале инструмента-полировальника зависит от отношения твердости и прочности на сжатие материала. Это позволяет научно обоснованно подойти к выбору необходимого материала инструмента-полировальника.

4. Экспериментально установлено, что при абразивном полировании шероховатость поверхности с течением времени обработки первоначально уменьшается, а затем стабилизируется. Это связано с уменьшением контактного давления на обрабатываемую поверхность. Установлено также, что с уменьшением зернистости абразивного порошка время до момента стабилизации шероховатости поверхности уменьшается. Для каждой зернистости абразива существует только ей присущая высота неровностей полированной поверхности (при равной шероховатости исходных поверхностей). Это согласуется с полученными теоретическими решениями и свидетельствует о достоверности разработанной математической модели определения параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании.

5. Исследованиями установлена взаимосвязь между параметрами шероховатости поверхности, физико-химическим состоянием и оптическими характеристиками поверхностных слоев. Разработана методика оценки качества обработанных поверхностей оптических металлоизделий.

6. Показано, что применяемые в промышленности процессы абразивной обработки и практические рекомендации по их эффективному использованию не обеспечивают требуемого сглаживания неровностей поверхности и достижения весьма малых значений высотных параметров шероховатости поверхности деталей с оптическими характеристиками. Поэтому перспективными направлениями дальнейшего развития абразивной обработки с целью достижения сверхгладких поверхностей деталей с оптическими характеристиками следует рассматривать метрологическое обеспечение контроля качества обработки, выбор соответствующей технологической среды и разработка системы управления процессом формообразования поверхностных слоев деталей.

7. На основе проведенных исследований осуществлена систематизация конструктивных и технологических решений по прецизионной обработке поверхностей металлоизделий малой жесткости и сформулированы научные предпосылки эффективного применения метода обработки свободным абразивом. Рассмотрены особенности формирования характеристик поверхностей металлоизделий в процессе обработки и установлена связь параметров поверхностного слоя с эксплуатационными оптическими характеристиками. На этой основе выделены параметры поверхности металлоизделий, имеющих наибольшую связь с эксплуатационными оптическими характеристиками деталей. Разработан теоретический подход к определению технологических условий обеспечения параметров качества при абразивной обработке деталей на основе критериев шероховатости поверхности и физико-химического состояния поверхностного слоя деталей. Проведен комплекс экспериментальных исследований по установлению параметров качества, производительности и стабильности обработки свободным абразивом, а также оценки достоверности полученных теоретических решений. Разработаны рекомендации по сглаживанию неровностей поверхностного слоя и минимизации высотных параметров шероховатости поверхности.

8. Разработаны новые способы обработки, составы полировальных суспензий и инструменты, которые обеспечивают стабильность процессов обработки оптических металлоизделий. Рекомендованы рациональные технологические регламенты создания поверхностей деталей систем терморегулирования, которые обеспечивают заданные оптические характеристики.

9. Разработаны конструкции установок и оснастки для осуществления эффективной обработки свободным абразивом Разработана методика комплексной оценки качества поверхности оптических металлоизделий. Предложены эффективные технологии обработки свободным абразивом, а также технологические рекомендации по обеспечению заданными оптическими характеристиками.

Раздел 8
Обоснование условий повышения эффективности механической обработки

8.1. Условия уменьшения температуры резания при лезвийной обработке

Широкое применение современных сборных режущих твердосплавных лезвийных инструментов с износостойкими покрытиями с целью их эффективного практического использования требует глубоких знаний закономерностей, происходящих в процессе резания, в противном случае сроки окупаемости затрат на их приобретение могут оказаться весьма большими из-за высокой себестоимости обработки. Наглядным примером тому является опыт применения на предприятиях Украины современных (однако дорогостоящих) зарубежных металлорежущих инструментов, когда вследствие необоснованных условий их использования себестоимость обработки может в несколько раз превышать себестоимость обработки отечественными инструментами, несмотря на возможность увеличения производительности обработки. Поэтому для их эффективного использования необходимо знать новые подходы к назначению оптимальных режимов резания, позволяющих снизить силовую и тепловую напряженности процесса резания и повысить технико-экономические показатели обработки. В значительной степени это относится к снижению температуры резания, которая предопределяет стойкость инструмента, производительность и качество обработки и в целом все технико-экономические показатели обработки.

Необходимо отметить, что вопросам аналитического определения температуры резания при лезвийной обработке посвящены работы [29; 92; 121; 138; 196], в которых предложены различные теоретические решения. Значительный вклад в разработку теоретических основ теплофизики процесса резания внесли Резников А. Н., Якимов А. В., Силин С. С., Сипайлов В. А., Евсеев Д. Г. и другие исследователи. В их работах [21; 29; 121; 138; 196] приведены аналитические зависимости для определения максимальной температуры резания. Однако они получены на основе решения дифференциального уравнения теп-

лопроводности с учетом тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, без аналитической взаимосвязи с теплом, одновременно уходящим в образующуюся стружку. Распределение выделяемого при резании тепла между обрабатываемой деталью и образующейся стружкой производится на основе поправочных коэффициентов, справедливых для частных условий обработки. Как установлено расчетами, это приводит к существенному расхождению расчетных и экспериментальных значений температуры резания, а также не позволяет установить общие теоретические решения по определению температуры резания. Кроме того, требуется выполнение достаточно сложных расчетов температуры резания с привлечением ряда экспериментальных данных, которые невозможно установить аналитически. Поэтому в настоящем параграфе решается задача аналитического определения максимальной температуры резания с учетом баланса тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующуюся стружку [97].

Как известно, в процессе резания происходит нагревание поверхностного слоя обрабатываемой детали толщиной l_2 [92] и образующейся стружки (рис. 8.1). В результате работа резания $A = P_z \cdot l$ равна количеству тепла, затрачиваемого на их нагревание до максимальной температуры резания θ [162; 163]:

$$P_z \cdot l = 0{,}5 \cdot c \cdot m_{дет} \cdot \theta + k \cdot c \cdot m_{стр} \cdot \theta, \qquad (8.1)$$

где $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau}$ – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м;

λ − коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;

c − удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);

ρ − плотность обрабатываемого материала, кг/м^3;

$\tau = \frac{L}{V} = \frac{a}{V \cdot tg\beta}$ – время, в течение которого происходит перерезание инструментом бесконечно тонкого адиабатического стержня (рис. 8.1), набором которых представлен снимаемый припуск, с;

L – расстояние между вершиной инструмента (резца) и адиабатическим стержнем, м;

V – скорость резания, м/с;

a – толщина среза, м;

β – условный угол сдвига обрабатываемого материала;

P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

l – длина пути резания, м;

$m_{дет}$, $m_{стр}$ – соответственно нагретые массы поверхностного слоя обрабатываемой детали толщиной l_2 и образующейся стружки, кг;

k – коэффициент, учитывающий распределение тепла по толщине образующейся стружки ($k < 1$).

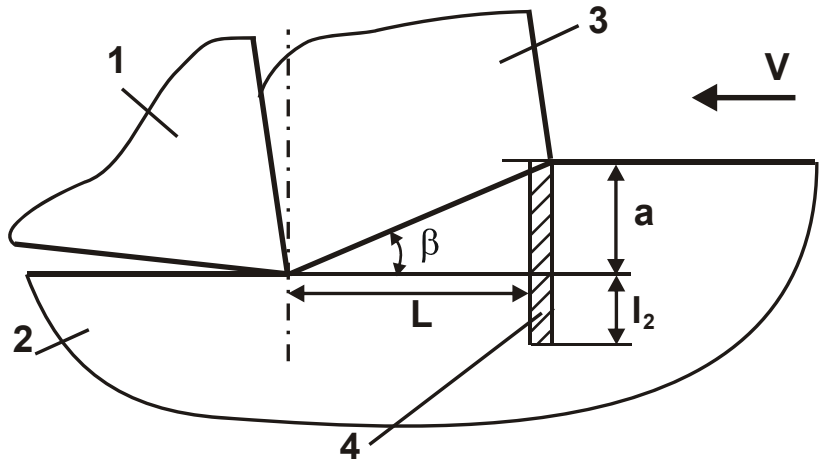


Рис. 8.1. Расчетная схема процесса точения: 1 – резец; 2 – обрабатываемый материал; 3 – образующаяся стружка; 4 – адиабатический стержень

Тогда $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{a}{V \cdot tg\beta}}$. С учетом соотношений $m_{дет} = \rho \cdot l \cdot в \cdot l_2$ и $m_{стр} = \rho \cdot l \cdot в \cdot a$ максимальная температура резания θ определится:

$$\theta = \frac{P_z}{c \cdot \rho \cdot (0{,}5 \cdot l_2 + k \cdot a) \cdot в}, \qquad (8.2)$$

где $в$ – ширина среза, м.

Тангенциальную составляющую силы резания P_z можно представить в виде [162]:

$$P_z = \sigma \cdot S \cdot t, \qquad (8.3)$$

где σ – условное напряжение резания (энергоемкость обработки), Н/м^2;

S – продольная подача, м/об.;

t – глубина резания, м.

При точении $a = S \cdot \sin\varphi$; $в = t / \sin\varphi$ [11], где φ – главный угол резца в плане. Окончательно после преобразований зависимость (8.2) примет вид:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + k\right)}. \qquad (8.4)$$

При условии, что температура образующейся стружки изменяется равномерно от нуля до значения θ, коэффициент $k = 0{,}5$. Тогда зависимость (8.4) опишется:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + 1\right)} = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot z. \qquad (8.5)$$

Как видно, максимальная температура резания θ определяется произведением отношения $2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho)$ и безразмерного коэффициента $z = \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + 1\right)}$, который принимает значения, меньшие единицы, изменяющиеся в пределах 0 … 1. Следовательно, максимальная температура резания θ принимает значения, меньшие или равные отношению $2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho)$.

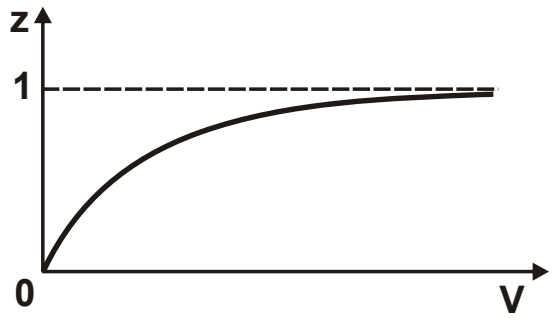


Рис. 8.2. Характер изменения безразмерного коэффициента z от скорости резания V

Как видно, с увеличением скорости резания V и продольной подачи S безразмерный коэффициент z, непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице (рис. 8.2). Это указывает на то, что с увеличением скорости резания V и продольной подачи S фактически все тепло, образующееся при резании, уходит на нагревание стружки, а в обрабатываемую деталь уходит небольшая часть тепла. В результате появляется возможность повышения качества обрабатываемой поверхности за счет снижения вероятности образования прижогов, микротрещин, микросколов и других температурных дефектов, возникающих на обрабатываемой поверхности.

Из зависимости (8.5) вытекает, что на максимальную температуру резания θ оказывают влияние переменные параметры σ, S, V, β, φ и не оказывает влияние глубина резания t. Чем больше параметры σ, S, V, β и φ, тем больше θ, что согласуется с известными экспериментальными данными.

Исходя из зависимости (8.5), из всех переменных параметров наибольшее влияние на максимальную температуру резания θ оказывает условное напряжение резания σ, которое прямо пропорционально связано с ней. Поэтому, обеспечивая высокую остроту режущего инструмента и снижая интенсивность трения в зоне резания, можно добиться уменьшения θ.

Произведем количественную оценку безразмерного коэффициента z при точении для следующих исходных данных: обрабатываемый материал – сталь ШХ15: $\lambda = 14$ Дж/(м·с·град.); $S = 0{,}47$ мм/об.; $c \cdot \rho = 2{,}74 \cdot 10^6$ Дж/(м^3·град.); $V = 20$ м/мин; $\varphi = 70^0$; $\beta = 36^0$. Расчетами установлено, что $z = 0{,}77$. Следовательно, максимальная температура резания θ близка к значению отношения $2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho)$.

С физической точки зрения отношение $2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho)$ определяет температуру нагревания образующейся стружки $\theta_{стр}$. Это вытекает из зависимости (8.5), рассматривая первое слагаемое, стоящее в знаменателе в круглых скобках, равным нулю, т.е. при отсутствии тепла, уходящего в обрабатываемую деталь:

$$\theta_{стр} = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho}. \qquad (8.6)$$

Следовательно, фактически все образующееся в процессе точения тепло уходит в образующуюся стружку. В обрабатываемую деталь для данных условий обработки уходит небольшое количество тепла, равное 23 %.

Экспериментально установлено, что для рассматриваемых условий обработки условное напряжение резания $\sigma = 1489{,}36$ Н/мм^2 [11]. Тогда, исходя из зависимости (8.5), получено: $\theta = 906{,}6^0$; $\theta_{стр} = 1042{,}6^0$, т.е. значения θ и $\theta_{стр}$ отличаются незначительно.

Если не учитывать тепло, уходящее в образующуюся стружку, а считать, что все тепло уходит в обрабатываемую деталь, то зависимость (8.5) примет вид:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \rho}{\lambda} \cdot S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}. \qquad (8.7)$$

Используя приведенные выше исходные данные, расчетами на основе зависимости (8.7) установлено, что $\theta = 6950{,}6^0$. Как видно, данное значение максимальной температуры резания θ значительно больше (в 7,7 раз) значения $\theta = 906{,}6^0$, установленного на основе зависимости (8.5). Следовательно, неучет тепла, уходящего в образующуюся стружку при точении, существенно снижает точность расчета максимальной температуры резания θ и приводит к физически неосуществимым при резании результатам.

В работе [162] показано, что $\sigma = \sigma_{сж} / tg\beta$, где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м^2. Подставляя данную зависимость в зависимость (8.5), имеем:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{tg\beta}{S \cdot V \cdot \sin\varphi}} + tg\beta\right)}. \qquad (8.8)$$

Из зависимости (8.8) вытекает, что уменьшение максимальной температуры резания θ происходит в результате уменьшения переменных параметров S, V, φ и увеличения условного угла сдвига обрабатываемого материала β. Однако уменьшение скорости резания V и продольной подачи S не эффективно, поскольку это приводит к уменьшению производительности обработки. Следовательно, основным путем уменьшения температуры резания θ необходимо рассматривать увеличение угла β в результате снижения интенсивности трения резца с обрабатываемым материалом в зоне резания.

Поскольку удельная производительность обработки $Q_{уд} = S \cdot V$, то зависимость (8.8) можно представить:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{tg\beta}{Q_{уд} \cdot \sin\varphi}} + tg\beta\right)}. \qquad (8.9)$$

Как видно, при заданном значении $Q_{уд} = S \cdot V$ основным условием уменьшения максимальной температуры резания θ является увеличение условного угла сдвига обрабатываемого материала β и уменьшение главного угла резца в плане φ. Как показано выше,

уменьшить угол β можно за счет снижения интенсивности трения резца с обрабатываемым материалом в зоне резания, применяя, например, высокоскоростную обработку (увеличивая скорость резания V при одновременном уменьшении продольной подачи S, т.е. выполняя условие $Q_{уд} = S \cdot V = const$), а также за счет повышения остроты режущего лезвия инструмента.

8.2. Уточненный расчет температуры резания при лезвийной обработке

При точении острозаточенным резцом тепло в зоне резания образуется в основном вследствие сдвиговых деформаций в условной плоскости сдвига материала ОА (рис. 8.3) и трения сходящей стружки с передней поверхностью резца. Поэтому температура резания будет определяться суммой температур, возникающих в условной плоскости сдвига материала ОА и в зоне трения сходящей стружки с передней поверхностью резца.

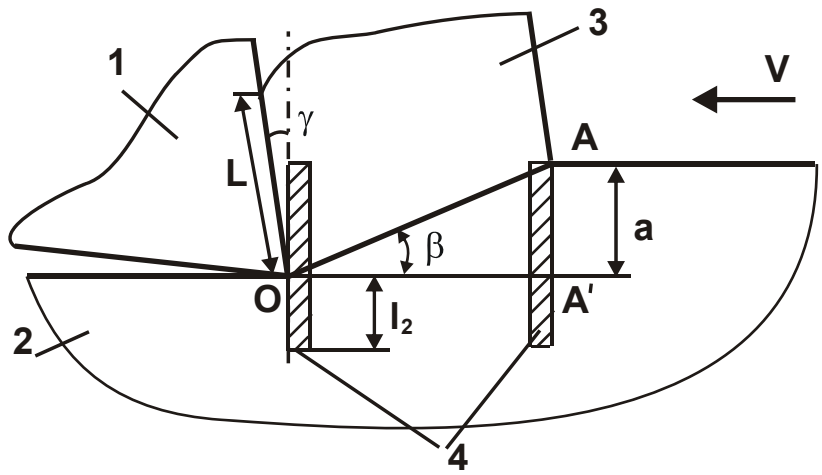


Рис. 8.3. Расчетная схема процесса точения: 1 – резец; 2 – обрабатываемый материал; 3 – образующаяся стружка; 4 – адиабатический стержень

Если рассматривать срезаемый слой обрабатываемого материала толщиной l_2 в виде пакета бесконечно тонких адиабатических стержней, расположенных перпендикулярно вектору скорости резания, то срез адиабатического стержня 1 начинается в точке А и оканчивается в точке О. Скорость перерезания адиабатического стержня резцом

равна $V_{рез} = V \cdot tg\beta$, где V – скорость резания, м/с; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

За время перемещения адиабатического стержня из положения A' в положение О, происходит его нагревание от 0 до максимального значения θ, определяемого интенсивностью сдвиговых деформаций в условной плоскости сдвига материала ОА. Окончательное перерезание адиабатического стержня в точке О приводит к его последующему трению вдоль передней и задней поверхностей резца и дополнительному нагреванию. При резании острозаточенным резцом можно ограничиться рассмотрением нагревания адиабатического стержня при его перемещении из положения A' в положение О и последующем трении с передней поверхностью резца, не рассматривая нагревание от трения с задней поверхностью резца.

Как известно, основная часть тепла, образующаяся вследствие трения стружки с передней поверхностью резца, уходит в стружку. Поэтому тепло, уходящее в резец, в первом приближении учитывать не будем. Тогда температура нагревания контактной поверхности стружки за время ее трения с передней поверхностью резца определится [92]:

$$\theta = \frac{q \cdot l_{стр}}{\lambda}, \qquad (8.10)$$

где $q = \frac{P_y \cdot V_{стр}}{F}$ – плотность теплового потока, действующего на передней поверхности резца, Вт/м^2;

$P_y = \frac{P_z}{K_{рез}}$ – радиальная составляющая силы резания, Н;

P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

$K_{рез}$ – коэффициент резания (при точении $K_{рез}$>1);

$V_{стр} = V \cdot tg\beta$ – скорость перемещения образующейся стружки вдоль передней поверхности резца, м/с;

$F = в \cdot L$ – площадь контакта стружки с передней поверхностью резца, м^2;

в – ширина стружки, м;

L – длина контакта стружки с передней поверхностью резца, м;

$l_{стр} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau}$ – глубина проникновения тепла в стружку, м;

$\tau = \frac{L}{V_{стр}} = \frac{L}{V \cdot tg\beta}$ – время контакта фиксированной точки на поверхности стружки с передней поверхностью резца, с.

Зависимость (8.10) получена на основе закона теплопроводности, рассматривая нулевым значение температуры на некотором удалении $l_{стр}$ от контактной поверхности стружки (действия теплового источника плотностью q). Согласно зависимости (8.10), уменьшить температуру θ можно уменьшением параметров q и $l_{стр}$.

С учетом известного соотношения $P_z = \sigma \cdot a \cdot в$ [162], имеем:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V \cdot tg\beta}{\lambda \cdot K_{рез}} \cdot \frac{a}{L} \cdot l_{стр}; \qquad (8.11)$$

$$l_{стр} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{L}{V \cdot tg\beta}}. \qquad (8.12)$$

После преобразований зависимости (8.11) получено:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot a}{K_{рез}} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V \cdot tg\beta}{L}}. \qquad (8.13)$$

С учетом соотношения $K_{рез} = tg2\beta$ [162] и тригонометрического преобразования $tg2\beta = \frac{2 \cdot tg\beta}{1 - tg^2\beta}$ зависимость (8.13) примет вид:

$$\theta = \sigma \cdot a \cdot \left(1 - tg^2\beta\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V}{L \cdot tg\beta}}. \qquad (8.14)$$

Из зависимости (8.14) следует, что наибольшее влияние на температуру θ оказывает условное напряжение резания σ. Толщина среза a связана с длиной контакта стружки с передней поверхностью резца L: чем больше a, тем больше L. Поэтому с увеличением a температура θ увеличивается, однако с меньшей интенсивностью, чем от увеличения σ.

С увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала β температура θ однозначно уменьшается. С учетом формулы Зворыкина К. А. [11]: $\beta = 45^0 + (\gamma - \psi)/2$ функция $tg\beta = tg\left[45^0 + (\gamma - \psi)/2\right]$, где γ – передний угол инструмента; ψ – условный угол трения образующейся стружки с передней поверхностью резца ($tg\psi = f$ – коэффициент трения). Следовательно, чем больше угол γ и меньше угол ψ,

тем меньше температура θ. Вполне однозначное влияние на температуру θ оказывает скорость резания V: чем больше V, тем больше θ, что согласуется с известными экспериментальными данными.

Согласно зависимости (8.12), увеличение скорости резания V приводит к уменьшению параметра $l_{стр}$, что в определенной степени снижает интенсивность роста температуры θ с увеличением скорости резания V. Увеличение условного угла сдвига обрабатываемого материала β за счет увеличения угла γ и уменьшения угла ψ также способствует уменьшению параметра $l_{стр}$ и, соответственно, температуры θ.

Произведем расчет температуры θ при точении для следующих исходных данных [11]: обрабатываемый материал – титановый сплав ВТ1: $\lambda = 13{,}45$ Дж/(м·с·град.); $c \cdot \rho = 2{,}74 \cdot 10^6$ Дж/(м^3·град.); продольная подача $S = 0{,}47$ мм/об.; глубина резания $t = 2{,}5$ мм; $V = 20$ м/мин; главный угол резца в плане $\varphi = 70^0$. Толщина среза равна $a = S \cdot \sin\varphi = 0{,}472$ мм.

Экспериментально установлено, что для рассматриваемых условий обработки условное напряжение резания $\sigma = 1489{,}36$ Н/мм^2, условный угол сдвига обрабатываемого материала $\beta = 36^0$, $L \approx 4 \cdot a$ [11]. Подставляя эти исходные данные в зависимость (8.14), получено: $\theta = 257{,}7$ ^{0}С. Параметр $l_{стр}$, определяемый зависимостью (8.12), для этих исходных данных равен: $l_{стр} = 0{,}277$ мм, т.е. он меньше толщины среза $a = S \cdot \sin\varphi = 0{,}472$ мм и, соответственно, толщины стружки.

Используя зависимость (8.10) можно определить температуру, возникающую на передней поверхности резца при условии, что все тепло, образующееся вследствие трения стружки с передней поверхностью резца из твердого сплава ВК6М, уходит в его тело ($\lambda_{резца} = 50{,}2$ Вт/м·К). В данном случае в качестве параметра $l_{стр}$ следует условно рассматривать толщину режущей части резца, равную $H = 15$ мм, тогда зависимость (8.10) примет вид:

$$\theta = \frac{q \cdot H}{\lambda_{резца}}, \qquad (8.15)$$

где $q = \frac{\sigma \cdot V}{8} \cdot \left(1 - tg^2\beta\right)$.

Подставляя в зависимость (8.15) исходные данные, расчетами установлено: $\theta = 8790$ К $= 9063$ ^{0}С. Это значение температуры значи-

тельно больше значения температуры $\theta = 257{,}7\ ^0C$, рассчитанного по зависимости (8.14). Следовательно, при расчете температуры по зависимости (8.15) необходимо принимать меньшие значения плотности теплового потока q, например $0{,}0284 \cdot q$, тогда значения температур, рассчитанных по зависимостям (8.14) и (8.15), одинаковы. Из этого можно сделать вывод о том, что в тело резца уходит значительно меньше тепла (2,84 %), чем в образующуюся стружку, т.е. основная часть тепла (97,16 %) уходит в образующуюся стружку. Поэтому расчет температуры θ, возникающей на передней поверхности резца, вследствие ее трения с образующейся стружкой, с достаточной для практики точностью можно производить по зависимости (8.14).

Для более точного расчета температуры θ необходимо установить плотности тепловых потоков q_1 и q_2, которые определяют максимальные температуры резца $\theta_1 = \dfrac{q_1 \cdot H}{\lambda_{резца}}$ и стружки $\theta_2 = \dfrac{q_2 \cdot l_{стр}}{\lambda}$. С учетом соотношения $q = q_1 + q_2$ и условия $\theta_1 = \theta_2$ получено уравнение:

$$(q - q_2) \cdot \frac{H}{\lambda_{резца}} = \frac{q_2 \cdot l_{стр}}{\lambda}. \qquad (8.16)$$

Откуда

$$q_2 = \frac{q}{\left(1 + \dfrac{l_{стр}}{H} \cdot \dfrac{\lambda_{резца}}{\lambda}\right)}. \qquad (8.17)$$

Очевидно, вследствие того, что $H > l_{стр}$, знаменатель зависимости (8.17) принимает значения, близкие к единице, а параметр q_2 – значения, близкие к плотности теплового потока q, действующего на передней поверхности резца. Следовательно, основная часть тепла уходит в образующуюся стружку, что согласуется с известными экспериментальными данными. Температура $\theta \approx \theta_2$ определяется:

$$\theta = \frac{q \cdot l_{стр}}{\lambda \cdot \left(1 + \dfrac{l_{стр}}{H} \cdot \dfrac{\lambda_{резца}}{\lambda}\right)}. \qquad (8.18)$$

Как видно, температура θ, рассчитанная по зависимости (8.18), будет меньше температуры, рассчитанной по зависимостям (8.10) и (8.14), вследствие того, что небольшая часть тепла уходит в резец,

а это уменьшает количество тепла, уходящего в стружку. Для определения температуры, возникающей в условной плоскости сдвига материала ОА (рис. 8.3) в связи с его сдвиговыми деформациями, установим баланс тепла, уходящего в стружку и в обрабатываемую деталь, с учетом равенства работы резания $A = P_z \cdot l$ и количества тепла, затрачиваемого на их нагревание до максимальной температуры θ [92; 162; 163]:

$$P_z \cdot l = 0{,}5 \cdot c \cdot m_{дет} \cdot \theta + k \cdot c \cdot m_{стр} \cdot \theta, \qquad (8.19)$$

где l – длина пути резания, м;

$m_{дет}$, $m_{стр}$ – нагретые массы поверхностного слоя обрабатываемой детали толщиной l_2 и образующейся стружки, кг;

$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau}$ – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м;

$\tau = \frac{a}{V_{рез}} = \frac{a}{V \cdot tg\beta}$ – время, в течение которого происходит перерезание резцом бесконечно тонкого адиабатического стержня (рис. 8.3), т.е. время перемещения адиабатического стержня из положения А′ в положение О;

k – коэффициент, учитывающий распределение тепла по толщине образующейся стружки ($k < 1$).

Преобразуя зависимость (8.19) с учетом $m_{дет} = \rho \cdot l \cdot в \cdot l_2$; $m_{стр} = \rho \cdot l \cdot в \cdot a$; $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{a}{V \cdot tg\beta}}$; $P_z = \sigma \cdot S \cdot t$; $a = S \cdot \sin\varphi$; $в = t / \sin\varphi$, определена максимальная температура резания θ, возникающая в условной плоскости сдвига материала:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + k\right)}. \qquad (8.20)$$

При условии, что температура образующейся стружки изменяется равномерно от нуля до значения θ, коэффициент $k = 0{,}5$. Тогда зависимость (8.20) опишется:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + 1\right)} = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot z. \qquad (8.21)$$

Из зависимости (8.21) следует, что максимальная температура резания θ определяется произведением отношения $2\cdot\sigma/(c\cdot\rho)$ и безразмерного коэффициента $z=\dfrac{1}{\left(\sqrt{\dfrac{2\cdot\lambda}{c\cdot\rho}\cdot\dfrac{1}{S\cdot V\cdot tg\beta\cdot\sin\varphi}}+1\right)}$, который принимает значения, изменяющиеся в пределах 0 … 1 (рис. 8.2). Поэтому максимальная температура резания θ принимает значения, меньшие или равные отношению $2\cdot\sigma/(c\cdot\rho)$.

Согласно зависимости (8.21), с увеличением V, S и φ максимальная температура резания θ увеличивается, асимптотически приближаясь к значению $2\cdot\sigma/(c\cdot\rho)$, равному температуре нагрева стружки при условии, что все образующееся при резании тепло уходит в стружку. Это вытекает из зависимости (8.21), рассматривая первое слагаемое, стоящее в знаменателе в круглых скобках, равным нулю, т.е. при отсутствии тепла, уходящего в обрабатываемую деталь:

$$\theta_{стр}=\frac{2\cdot\sigma}{c\cdot\rho}. \qquad (8.22)$$

Из сказанного следует, что с увеличением скорости резания V и продольной подачи S фактически все тепло, образующееся при резании, уходит на нагревание стружки, а в обрабатываемую деталь уходит небольшая часть тепла. В результате появляется возможность повышения качества обрабатываемой поверхности за счет снижения вероятности образования прижогов, микротрещин, микросколов и других температурных дефектов, возникающих на обрабатываемой поверхности.

Произведем количественную оценку отношения $2\cdot\sigma/(c\cdot\rho)$ и безразмерного коэффициента $z=\dfrac{1}{\left(\sqrt{\dfrac{2\cdot\lambda}{c\cdot\rho}\cdot\dfrac{1}{S\cdot V\cdot tg\beta\cdot\sin\varphi}}+1\right)}$, входящего в зависимость (8.21), и максимальной температуры резания θ для исходных данных, приведенных выше (обрабатываемый материал – титановый сплав ВТ1): $\lambda=13{,}45$ Дж/(м·с·град.); $c\cdot\rho=2{,}74\cdot10^6$ Дж/(м^3·град.); $S=0{,}47$ мм/об.; $t=2{,}5$ мм; $V=20$ м/мин; $\varphi=70^0$; $a=S\cdot\sin\varphi=0{,}472$ мм; $\sigma=1489{,}36$ Н/мм^2; $\beta=36^0$.

Расчетами установлено, что $2\cdot\sigma/(c\cdot\rho)=1042{,}6$ ^{0}С; $z=0{,}77$; $\theta=906{,}6$ ^{0}С. Следовательно, максимальная температура резания θ

близка к значению отношения $2\cdot\sigma/(c\cdot\rho)$. Поэтому фактически все образующееся в процессе точения тепло для данных условий обработки уходит в образующуюся стружку. В обрабатываемую деталь уходит небольшое количество тепла, составляющее 23 %.

При условии $k=1$ зависимость (8.20) опишется:

$$\theta=\frac{\sigma}{c\cdot\rho}\cdot\frac{1}{\left(\sqrt{\frac{\lambda}{2\cdot c\cdot\rho}\cdot\frac{1}{S\cdot V\cdot tg\beta\cdot\sin\varphi}}+1\right)}=\frac{\sigma}{c\cdot\rho}\cdot z_1. \qquad (8.23)$$

Расчетами установлено, что $\sigma/(c\cdot\rho)=521{,}3$ ^{0}C; $z_1=0{,}87$; $\theta=453{,}3$ ^{0}C. Поэтому максимальная температура резания θ незначительно отличается от значения отношения $\sigma/(c\cdot\rho)$ и фактически все образующееся в процессе точения тепло (87 %) уходит в образующуюся стружку.

Как видно, коэффициент k значительно влияет на максимальную температуру резания θ. При $k=0{,}5$ имеем $\theta=906{,}6$ ^{0}C, а при $k=1$, соответственно, $\theta=453{,}3$ ^{0}C, т.е. с увеличением k в 2 раза максимальная температура резания θ уменьшилась в 2 раза. Учитывая, что случай $k=0{,}5$ в большей мере отражает реальные условия нагревания стружки в процессе обработки, следует этот случай принять за основу, тогда $\theta=906{,}6$ ^{0}C.

Условное напряжение резания σ связано с условным углом сдвига обрабатываемого материала β зависимостью [162]: $\sigma=\sigma_{сж}/tg\beta$, где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м^2. Тогда зависимость (8.21) примет вид:

$$\theta=\frac{2\cdot\sigma_{сж}}{c\cdot\rho}\cdot\frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2\cdot\lambda}{c\cdot\rho}\cdot\frac{tg\beta}{S\cdot V\cdot\sin\varphi}}+tg\beta\right)}. \qquad (8.24)$$

Из зависимости (8.24) вытекает, что уменьшение максимальной температуры резания θ происходит в результате уменьшения переменных параметров S, V, φ и увеличения условного угла сдвига обрабатываемого материала β. Однако уменьшение скорости резания V и продольной подачи S не эффективно, поскольку это приводит к уменьшению производительности обработки. Поэтому основными условиями уменьшения температуры резания θ при точении необходимо рассматривать увеличение угла β и, соответственно, уменьше-

ние условного напряжения резания σ в результате снижения интенсивности трения резца с обрабатываемым материалом в зоне резания.

Таким образом в работе получена аналитическая зависимость (8.14) для определения температуры, возникающей в зоне трения сходящей стружки с передней поверхностью резца, и аналитическая зависимость (8.21) для определения температуры, возникающей в условной плоскости сдвига материала ОА (рис. 8.3). Расчетами установлено, что их значения составляют 257,7 ^{0}С и 906,6 ^{0}С.

Как отмечалось выше, сумма этих температур определяет суммарную температуру резания θ, которая для данных условий обработки равна 1164,3 ^{0}С. Тогда окончательно выражение для определения θ с учетом зависимостей (8.14) и (8.21) примет вид:

$$\theta = \sigma \cdot a \cdot \left(1 - tg^2\beta\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V}{L \cdot tg\beta}} + \\ + \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + 1\right)}. \qquad (8.25)$$

Входящие в первое и второе слагаемые зависимости (8.25) параметры σ, V, S (с учетом $a = S \cdot \sin\varphi$) одинаково влияют на суммарную температуру резания θ: чем они больше, тем больше θ. Поскольку σ связано с условным углом сдвига обрабатываемого материала β зависимостью [92]: $\sigma = \sigma_{сж} / tg\beta$, то с увеличением β суммарная температура резания θ уменьшается.

8.3. Сравнение температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке

Общеизвестно, что шлифование материалов характеризуется повышенной тепловой напряженностью вследствие интенсивного трения связки круга с обрабатываемым материалом, что приводит к ухудшению качества обрабатываемых поверхностей деталей машин. В связи с этим определению температуры резания при шлифовании в научно-технической литературе уделено большое внимание [29; 121; 196]. Разработана математически формализованная теплофизическая теория процесса шлифования. Произведены расчеты нестационарных температурных полей на основе решения дифференциальных уравнений

частных производных, что позволило обосновать основные условия уменьшения температуры резания при шлифовании. Однако эти расчеты достаточно сложны для выработки простых инженерных решений по снижению тепловой нагруженности процесса шлифования и выбору оптимальных условий обработки с учетом ограничения по температурному критерию. Поэтому в работах [92; 163] предложены упрощенные аналитические подходы к определению температуры резания при шлифовании, которые дополняют классические теплофизические решения и позволяют довольно просто подойти к оптимизации условий обработки.

Настоящая работа является развитием этих работ и направлена на установление новых упрощенных зависимостей для определения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке и обоснования условий ее уменьшения на основе учета баланса тепла, возникающего в процессе резания и уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки. Предполагая, что все образующееся при шлифовании тепло уходит в обрабатываемый материал (рис. 8.4), важно определить глубину его проникновения в обрабатываемый материал, при которой температура достигает нулевого значения.

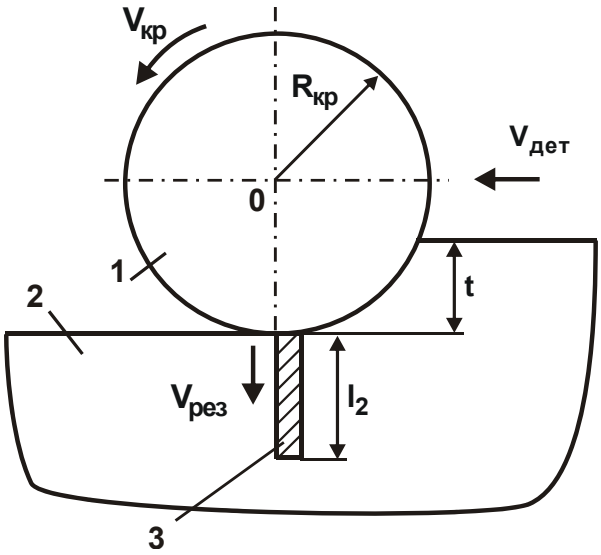


Рис. 8.4. Расчетная схема параметров процесса шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – адиабатический стержень

Для решения этой задачи следует воспользоваться известной зависимостью для определения количества тепла Q_1, выделяющегося в теле, имеющем форму адиабатического стержня (рис. 8.4), при его нагреве до некоторой температуры θ в процессе шлифования:

$$Q_1 = c \cdot m \cdot \theta, \qquad (8.26)$$

где $m = \rho \cdot S \cdot l_2$ – масса нагретого адиабатического стержня, кг;

S – площадь поперечного сечения адиабатического стержня, м^2;

l_2 – длина нагретой части адиабатического стержня, м.

С другой стороны, $Q_1 = N \cdot \tau = q \cdot S \cdot \tau$, где $N = q \cdot S$ – мощность резания, Вт; τ – время действия теплового источника на адиабатический стержень, с; q – плотность теплового потока, Вт/м^2. После преобразования зависимости (8.26) определена температура резания:

$$\theta = \frac{q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l_2}. \qquad (8.27)$$

Вследствие теплопроводности материала адиабатического стержня, количество тепла Q_2, прошедшего вдоль адиабатического стержня длиной l_2 за время τ, равно:

$$Q_2 = \lambda \cdot S \cdot \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{l_2} \cdot \tau, \qquad (8.28)$$

где θ_2, θ_1 – значения температуры в начале и конце адиабатического стержня, град.

С учетом $Q_2 = Q_1 = q \cdot S \cdot \tau$ имеем:

$$(\theta_2 - \theta_1) = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}. \qquad (8.29)$$

Рассматривая температуру θ в виде $\theta = 0{,}5 \cdot (\theta_2 + \theta_1)$, зависимость (8.27) примет вид:

$$(\theta_2 + \theta_1) = \frac{2 \cdot q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l_2}. \qquad (8.30)$$

Очевидно, максимальная температура будет достигаться на торце адиабатического стержня, где действует тепловой источник. Тогда, разрешая совместно зависимости (8.29) и (8.30) относительно температур θ_2 и θ_1, имеем:

$$\theta_2 = \frac{q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l_2} + \frac{q \cdot l_2}{2 \cdot \lambda}; \qquad (8.31)$$

$$\theta_1 = \frac{q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l_2} - \frac{q \cdot l_2}{2 \cdot \lambda}. \qquad (8.32)$$

Как видно, справедливо неравенство $\theta_2 > \theta_1$, т.е. расчеты выполнены правильно.

Исходя из зависимости (8.31), длина нагретой части адиабатического стержня l_2 неоднозначно влияет на температуру θ_2, т.е. имеет место экстремум функции θ_2 от l_2. Для его определения следует подчинить зависимость (8.31) необходимому условию экстремума: $(\theta_2)'_{l_2} = 0$. В результате преобразований получено:

$$(\theta_2)'_{l_2} = -\frac{q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l_2^2} + \frac{q}{2 \cdot \lambda} = 0. \qquad (8.33)$$

Соответственно, вторая производная равна:

$$(\theta_2)''_{l_2} = \frac{2 \cdot q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l_2^3} > 0. \qquad (8.34)$$

Поскольку вторая производная $(\theta_2)''_{l_2}$ в точке экстремума больше нуля (т.е. положительная величина), то имеет место минимум температуры θ_2.

Экстремальное значение длины нагретой части адиабатического стержня, исходя из уравнения (8.33), равно:

$$l_{2экстр} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}} = \sqrt{2 \cdot a \cdot \tau}, \qquad (8.35)$$

где $a = \lambda/(c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м^2/с.

Подставляя зависимость (8.35) в (8.31), определена минимально возможная температура θ_2:

$$\theta_2 = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \qquad (8.36)$$

Для определения температуры θ_1 в точке экстремума (минимума) температуры θ_2 необходимо подставить зависимость (8.35) в (8.32). После преобразований получено: $\theta_1 = 0$, что соответствует физическому смыслу решаемой задачи.

В табл. 8.1 приведены расчетные значения первого и второго слагаемых зависимости (8.31), а также температуры θ_2 для исходных данных (шлифование закаленной стали ШХ15): $q = 1$ Вт/м^2; $\tau = 0{,}01$ с; $a = \lambda/(c \cdot \rho) = 8{,}4 \cdot 10^{-6}$ м^2/с; $\lambda = 42$ Вт/(м·град.). Как видно, с увеличением параметра l первое слагаемое и температура θ_2 уменьшаются, а второе слагаемое увеличивается. При значении $l_{2экстр} = 410$ мкм, рассчи-

танном по зависимости (8.35), температура θ_2 принимает минимальное значение $\theta_2 = 10^{-5}$ град, которое рассчитано по зависимости (36). Этим показано, что действительно в точке экстремума имеет место минимум температуры θ_2.

Таблица 8.1

Расчетные значения первого и второго слагаемых зависимости (8.31) и температуры θ_2

$l_2 \cdot 10^{-6}$, м	1	10	100	1000
$\frac{q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l_2}$, ^{0}	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
$\frac{q \cdot l_2}{2 \cdot \lambda}$, ^{0}	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$	$1{,}2 \cdot 10^{-7}$	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$
θ_2, ^{0}	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}2 \cdot 10^{-5}$	$1{,}4 \cdot 10^{-5}$

При обработке детали толщиной $l_2 < l_{2экстр}$, согласно табл. 8.1, температура θ_2 меньше экстремального (минимального) значения θ_2, определяемого зависимостью (8.36). Для определения текущего значения температуры θ_2 следует использовать зависимость (8.31), а для определения температуры θ_1 – соответственно зависимость (8.32). Исходя из зависимости (8.32), температура θ_1 с уменьшением длины $l_2 \to 0$ увеличивается от 0 до ∞.

При этом разность температур $(\theta_2 - \theta_1)$, исходя из зависимости (8.29), уменьшается с уменьшением длины l_2, т.е. температура становится приблизительно одинаковой вдоль всей нагретой части длиной l_2 адиабатического стержня. В этом случае в первом приближении температуру адиабатического стержня можно определить по среднему значению на основе зависимости (8.26) без учета зависимости (8.27), обусловленной теплопроводностью обрабатываемого материала. Наибольшее значение $(\theta_2 - \theta_1)$, исходя из зависимости (8.29), определяется из условия $l_2 = l_{2экстр}$:

$$(\theta_2 - \theta_1) = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \qquad (8.37)$$

Этим показано, что при шлифовании тонкостенных деталей, когда толщина поверхностного слоя обрабатываемого материала мень-

ше экстремального значения длины $l_{2экстр}$, температура резания будет существенно увеличиваться, а это может привести к возникновению различных температурных дефектов. Поэтому необходимо уменьшать $l_{2экстр}$ путем уменьшения времени τ за счет увеличения скорости перемещения теплового источника (шлифовального круга) вдоль обрабатываемой детали.

Уменьшить параметр $l_{2экстр}$ и, соответственно, температуру $\theta_2 = q \cdot l_{2экстр} / \lambda$ можно также увеличением коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала λ, входящего в зависимость (8.35), т.е. за счет выбора оптимальной характеристики обрабатываемого материала.

Как показано выше, при условии $l_2 < l_{2экстр}$ температуру резания можно в первом приближении рассчитывать по зависимости (8.27), рассматривая $Q_1 = N \cdot \tau$, где $N = P_z \cdot V_{кр}$ – мощность резания, Вт; $P_z = \sigma \cdot Q / V_{кр}$ – тангенциальная составляющая силы резания, Н; σ – условное напряжение резания, Н/м^2; $Q = V_{рез} \cdot S$ – производительность обработки, м^3/с; $V_{рез}$ – скорость перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом (рис. 8.4), м/с; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

После преобразований получено:

$$Q_1 = \sigma \cdot S \cdot t, \tag{8.38}$$

где $t = V_{рез} \cdot \tau$ – глубина шлифования, м.

Подставляя зависимость (8.38) в (8.26), имеем

$$\theta = \frac{Q_1}{c \cdot m} = \frac{\sigma \cdot t}{c \cdot \rho \cdot l_2}. \tag{8.39}$$

Согласно зависимости (8.39), уменьшение длины l_2 приводит к увеличению температуры резания θ. Уменьшить θ можно уменьшением условного напряжения резания σ и глубина шлифования t. Очевидно, с целью увеличения производительности обработки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ (где B – ширина шлифования, м; $V_{дет}$ – скорость перемещения детали, м/с) необходимо увеличивать $V_{дет}$, т.е. обработку производить по схеме многопроходного шлифования. Однако, наибольший эффект в снижении температуры резания θ достигается за счет уменьшения условного напряжения резания σ путем повыше-

ния режущей способности круга и снижения интенсивности трения в зоне резания. Полученное решение справедливо и при резании лезвийными инструментами. Например, при продольном точении

$$Q_1 = P_z \cdot V \cdot \tau = \sigma \cdot S_0 \cdot V \cdot \tau = \sigma \cdot t \cdot S_{прод} \cdot V \cdot \tau, \qquad (8.40)$$

где $P_z = \sigma \cdot S_0$ – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

$S_0 = t \cdot S_{прод}$ – площадь поперечного сечения среза, м^2;

t – глубина резания, м;

$S_{прод}$ – продольная подача, м/об.;

V – скорость резания, м/с.

Зависимость (8.40) можно представить в виде: $Q_1 = \sigma \cdot Q \cdot \tau$, где $Q = t \cdot S_{прод} \cdot V = V_{рез} \cdot S$. Тогда

$$Q_1 = \sigma \cdot V_{рез} \cdot S \cdot \tau = \sigma \cdot S \cdot t, \qquad (8.41)$$

где $t = V_{рез} \cdot \tau$ – глубина шлифования, м.

Подставляя зависимость (8.41) в (8.26), получено

$$\theta = \frac{Q_1}{c \cdot m} = \frac{\sigma \cdot t}{c \cdot \rho \cdot l_2}. \qquad (8.42)$$

В итоге установлена зависимость для определения температуры резания θ, идентичная зависимости (8.39). Следовательно, температура резания θ при шлифовании и лезвийной обработке описывается одной и той же зависимостью. Уменьшить θ при лезвийной обработке, также как и при шлифовании, можно обеспечением высокой режущей способности инструмента и снижением интенсивности трения в зоне резания.

Для окончательного определения температуры θ_2 при шлифовании необходимо в зависимости (8.36) выразить плотность теплового потока q через параметры режима шлифования: $q = N/S = \sigma \cdot V_{рез}$ [92]. С учетом соотношения $V_{рез} = t/\tau = t \cdot V_{дет}/L$ (рис. 8.4) получено:

$$\theta_2 = \sigma \cdot \sqrt{\frac{Q_{уд}}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{кр}}}, \qquad (8.43)$$

где $\tau = L/V_{дет}$;

$L = \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}$ – длина контакта круга с деталью, м;

$R_{кр}$ – радиус круга, м;

$Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$ – удельная производительность обработки, м^2/с.

Как видно, уменьшить температуру θ_2 можно уменьшением параметров σ, $Q_{уд}$ и t. Поскольку удельную производительность обработки $Q_{уд}$ необходимо увеличивать, то основными условиями уменьшения температуры θ_2 следует рассматривать уменьшение параметров σ и t за счет обеспечения высокой режущей способности круга (соответственно уменьшения интенсивности трения в зоне резания) и применения многопроходного шлифования.

Зависимость (8.43) получена из условия, что все выделяющееся при шлифовании тепло уходит в обрабатываемую деталь. В действительности, выделяющееся при шлифовании тепло уходит как в обрабатываемую деталь, так и в образующиеся стружки и шлифовальный круг [121; 196].

Поэтому для определения температуры при шлифовании θ_2 с учетом тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и в образующиеся стружки, необходимо работу резания $A = N \cdot \tau$ принять равной количеству выделившегося при шлифовании тепла

$$Q_1 = c \cdot \left(m_1 \cdot \theta_2 + m_2 \cdot \frac{\theta_2}{2} \right) = c \cdot \rho \cdot B \cdot L \cdot \theta_2 \cdot \left(t + \frac{l_{2экстр}}{2} \right), \qquad (8.44)$$

где $m_1 = \rho \cdot B \cdot L \cdot t$ – масса образующихся стружек, кг;

$m_1 = \rho \cdot B \cdot L \cdot l_{2экстр}$ – масса объема обрабатываемого материала $B \cdot L \cdot l_{2экстр}$, кг.

Исходя из зависимости (8.44), с учетом соотношения $A = \sigma \cdot B \cdot L \cdot t$ и условия $A = Q_1$, определена температура θ_2:

$$\theta_2 = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{l_{2экстр}}{2 \cdot t} \right)}. \qquad (8.45)$$

Длина нагретой части адиабатического стержня $l_{2экстр}$, определяемая зависимостью (8.35), с учетом соотношений $\tau = L / V_{дет}$ и $L = \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}$ принимает следующий вид:

$$l_{2экстр} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дет}}}. \qquad (8.46)$$

Подставляя зависимость (8.46) в (8.45), имеем:

$$\theta_2 = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{Q_{уд}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{2 \cdot t}}}\right)}. \qquad (8.47)$$

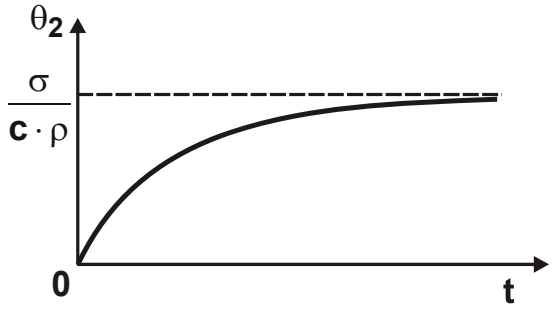


Рис. 8.5. Зависимость температуры θ_2 от глубины шлифования t

Как видно, с увеличением глубины шлифования t и удельной производительности обработки $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$ температура θ_2 непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к установившемуся значению $\sigma / c \cdot \rho$ (рис. 8.5). Этим показано, что учет одновременно тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь, изменяет характер формирования температуры θ_2, поскольку зависимости (8.43) и (8.47) различны.

Уменьшить температуру θ_2 при условии $Q_{уд} = const$ можно уменьшением глубины шлифования t при одновременном увеличении скорости детали $V_{дет}$, т.е. применением схемы многопроходного шлифования.

Исходя из зависимости (8.44), определена доля тепла, уходящего в образующиеся стружки:

$$\alpha_1 = \frac{c \cdot m_1 \cdot \theta_2}{c \cdot \left(m_1 \cdot \theta_2 + m_2 \cdot \frac{\theta_2}{2}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot Q_{уд}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{2 \cdot t}}}\right)} \qquad (8.48)$$

и доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь:

$$\alpha_2 = \frac{c \cdot m_1 \cdot \frac{\theta_2}{2}}{c \cdot \left(m_1 \cdot \theta_2 + m_2 \cdot \frac{\theta_2}{2}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{c \cdot \rho \cdot Q_{уд}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{кр}}}}\right)}. \qquad (8.49)$$

Как следует из зависимостей (8.48) и (8.49), с увеличением глубины шлифования t доля тепла α_1, уходящего в образующиеся стружки, увеличивается от 0 до 1, а доля тепла α_2, уходящего в обрабатываемую деталь, наоборот, уменьшается от 1 до 0.

В табл. 8.2 приведены расчетные значения отношения $l_{2экстр}/2\cdot t$, параметров α_1 и α_2 для исходных данных (шлифование закаленной стали ШХ15): $a=\lambda/(c\cdot\rho)=8{,}4\cdot10^{-6}$ м^2/с; $\lambda=42$ Вт/(м·град.); $Q_{уд}=10^{-5}$ м^2/с; $R_{кр}=0{,}2$ м.

Таблица 8.2

Расчетные значения отношения $l_{2экстр}/2\cdot t$ и параметров α_1 и α_2

$t\cdot10^{-6}$, м	10	20	40	80	160	320
$l_{2экстр}/2\cdot t$	9,17	7,7	6,47	5,44	4,57	3,84
α_1	0,1	0,12	0,14	0,155	0,18	0,2
α_2	0,9	0,88	0,86	0,845	0,82	0,8

Как видно, с увеличением глубины шлифования t в условиях обычного многопроходного шлифования имеет место незначительное увеличение параметра α_1 и уменьшение параметра α_2, т.е. в обрабатываемую деталь уходит практически все образующееся при шлифовании тепло. Длина нагретой части адиабатического стержня $l_{2экстр}$ значительно превышает глубину шлифования t. Этим и объясняется высокая вероятность образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях детали при шлифовании.

Сравнение зависимостей (8.47) и (8.48) показывает, что характер изменения доли тепла α_1, уходящего в образующиеся стружки, идентичен характеру изменения температуры θ_2. Следовательно, температура θ_2 изменяется по закону изменения параметра α_1, и зависимость (8.47) можно представить в виде:

$$\theta_2=\frac{\sigma}{c\cdot\rho}\cdot\alpha_1. \qquad (8.50)$$

Исходя из этого, важным условием уменьшения температуры θ_2 является уменьшение параметра α_1 за счет уменьшения глубины шлифования t при заданном значении $Q_{уд}$. Однако, основным условием уменьшения температуры θ_2 следует рассматривать уменьшение условного напряжения резания σ, которое прямо пропорционально связано с температурой резания θ_2.

Зависимость (8.43) после преобразований можно представить:

$$\theta_2 = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{Q_{уд}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{2 \cdot t}}}\right)}. \qquad (8.51)$$

Зависимость (8.51) отличается от аналогичной зависимости (8.47) лишь отсутствием в знаменателе (в скобках) первого слагаемого, равного единице. Однако, судя по расчетным значениям параметра α_1 (табл. 8.2), который входит в зависимость (8.50), он принимает небольшие значения – значительно меньше единицы. Поэтому в первом приближении зависимости (8.51) и (8.47) можно рассматривать фактически идентичными, и расчеты температуры резания θ_2 производить по обеим зависимостям. Данная закономерность обусловлена тем, что фактически все образующееся при многопроходном шлифовании тепло уходит в обрабатываемую деталь. Следовательно, учет тепла, уходящего в образующиеся стружки, не вносит принципиальных изменений в закономерности формирования температуры θ_2.

К такому же выводу можно прийти, рассматривая процесс продольного точения, для которого справедлива зависимость (8.44), учитывая соотношения $Q_1 = A = \sigma \cdot B \cdot L \cdot t$. В итоге приходим к зависимости (8.45), полученной применительно к процессу шлифования. Следовательно, температура резания θ_2 при шлифовании и лезвийной обработке описывается одной и той же зависимостью. Отличие состоит лишь в значениях условного напряжения резания, которое, как известно, меньше при лезвийной обработке, так как при шлифовании оно определяется интенсивным трением связки круга с материалом. Этим объясняются более высокие значения температуры при шлифовании. Поэтому лезвийную обработку целесообразно использовать на финишных операциях для обеспечения высококачественной обработки.

8.4. Условия повышения эффективности высокоскоростного фрезерования на основе снижения энергоемкости обработки

В последние годы в машиностроительном производстве на операциях фрезерования получили широкое применение новые технологические процессы, станки с ЧПУ типа "обрабатывающий центр", сбор-

ные конструкции режущих твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями (как правило, зарубежного производства), позволяющие многократно повысить производительность и обеспечить высокие показатели качества и точности обрабатываемых поверхностей. Наибольший эффект обработки достигается в условиях высокоскоростного фрезерования, поэтому фрезерование зачастую используется на финишных операциях. Особенно эффективно применение высокоскоростного фрезерования при изготовлении отверстий, пазов и других, сложных по конструктивному исполнению, элементов деталей машин, а также при обработке высокоточных деталей, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами, что открыло новые технологические возможности их изготовления.

Так, в работе [130] приведены результаты исследований высокоскоростного фрезерования отверстий и глубоких пазов, которое, по сути, является новым направлением в механической обработке. При обработке отверстия фреза и обрабатываемая деталь совершают вращательные движения аналогично традиционно применяемой схеме внутреннего шлифования. Это позволяет изготавливать сквозные и глухие отверстия. Поэтому дальнейшее расширение технологических возможностей высокоскоростного фрезерования имеет большое практическое значение, однако требует разработки новых научных подходов к определению оптимальных условий обработки, позволяющих добиться повышения технико-экономических показателей этого прогрессивного метода обработки, в особенности снижения энергоемкости обработки, определяющей силовую и тепловую напряженности процесса резания. В настоящем параграфе проведен теоретический анализ закономерностей формирования и уменьшения условного напряжения резания (энергоемкости обработки) при высокоскоростном фрезеровании.

Основным ограничивающим фактором увеличения производительности обработки при высокоскоростном фрезеровании является увеличение силовой и тепловой напряженности процесса и снижения стойкости инструмента. Для раскрытия технологических закономерностей высокоскоростного фрезерования следует воспользоваться аналитической зависимостью для определения условного напряжения резания (энергоемкости обработки) применительно к процессу микрорезания единичным абразивным зерном, приведенной в работе [105]:

$$\sigma = \cos\psi_1 \cdot \cos\alpha \cdot \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}, \qquad (8.52)$$

где $\tau_{сдв}$ – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м^2;

$\psi_1 = \psi + \gamma$;

ψ − условный угол трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом;

γ − отрицательный передний угол режущего абразивного зерна;

α − угол входа абразивного зерна в обрабатываемый материал.

В отличие от шлифовального круга, где условный передний угол режущего абразивного зерна γ принимает отрицательные значения, у фрезы передний угол γ – положительный. Поэтому угол $\psi_1 = \psi + \gamma$ необходимо рассматривать в виде $\psi_1 = \psi - \gamma$.

Как следует из зависимости (8.52), при резании с постоянной толщиной среза (т.е. при угле α=0) параметр σ меньше, чем при резании с увеличивающейся по закону $x \cdot tg\alpha$ толщиной среза, где x – длина пути зерна в металле, м.

Очевидно, с увеличением угла α в пределах 0 … 45^0 параметр σ увеличивается, так как функция $\sin(\alpha + \psi_1)$ увеличивается интенсивнее уменьшения функции $\cos\alpha$, стоящей в числителе зависимости (8.52). Следовательно, при фрезеровании, характеризующемся переменной (увеличивающейся во времени) толщиной среза параметр σ будет больше, чем, например, при точении, характеризующемся постоянной во времени толщиной среза.

К значительному увеличению параметра σ, исходя из зависимости (8.52), приводит увеличение угла $\psi_1 = \psi + \gamma$, который при микрорезании единичным абразивным зерном может принимать значения, близкие к 90^0. В этом случае $\sigma \to \infty$, чем, собственно, и объясняется чрезвычайно высокая энергоемкость обработки при шлифовании и других методах абразивной обработки. Естественно, при лезвийной обработке, вследствие меньших значений угла $\psi_1 = \psi - \gamma$, параметр σ меньше, чем при шлифовании. Однако увеличение угла α при фрезеровании может приводить к достаточно большим значениям функции $\sin(\alpha + \psi_1) \to 1$ и, соответственно, к существенному увеличению энергоемкости обработки при фрезеровании. Этим можно объяснить по-

вышение энергоемкости, силовой и тепловой напряженностей процесса высокоскоростного фрезерования, что ограничивает повышение производительности обработки.

В работе [105] приведена упрощенная аналитическая зависимость для определения условного напряжения резания (энергоемкости обработки) применительно к процессу микрорезания единичным абразивным зерном с учетом отношения толщины среза а к радиусу округления режущей кромки абразивного зерна R, т.е. известного и широко применяемого в теории резания материалов отношения а/R:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot \cos^2 \alpha}{\sqrt{\frac{a}{2R}} - tg\frac{(\alpha + \psi)}{2}}. \qquad (8.53)$$

Из зависимости (8.53) вытекает, что при угле α=0 (т.е. при точении) условное напряжение резания (энергоемкость обработки) σ вполне однозначно определяется двумя величинами: отношением толщины среза а к радиусу округления режущего лезвия инструмента R, и условным углом ψ трения инструмента с обрабатываемым материалом. Чем больше отношение a/R и меньше угол ψ, тем меньше параметр σ и эффективнее осуществлять процесс резания.

При резании с увеличивающейся по закону $x \cdot tg\alpha$ толщиной среза (т.е. при фрезеровании) параметр σ зависит от трех величин: отношения a/R, угла ψ и угла α. С увеличением угла α следует ожидать увеличения параметра σ, поскольку тригонометрическая функция $tg\frac{(\alpha + \psi)}{2}$ в большей мере влияет на параметр σ, чем тригонометрическая функция $\cos\alpha$, входящая во второй степени в зависимость (8.53).

С увеличением угла α также следует ожидать увеличения толщины среза а, что приводит, наоборот, к уменьшению параметра σ. Следовательно, имеет место неоднозначное влияние угла α на параметр σ. При относительно небольших значениях угла α, что имеет место при фрезеровании, очевидно, в зависимости (8.53) будет преобладать фактор увеличения отношения a/R, так как функция $tg\frac{(\alpha + \psi)}{2}$ изменяется не столь значительно с увеличением угла α. Это способствует уменьшению параметра σ. Поэтому для уменьшения параметра σ в этих условиях следует стремиться к увеличению отношения a/R.

Из зависимости (8.53) следует, что при условии $\sqrt{\frac{a}{2R}} - tg\frac{(\alpha+\psi)}{2} \to 0$ параметр σ принимает бесконечно большое значение ($\sigma \to \infty$) и процесс стружкообразования неосуществим – имеет место упруго-пластическое деформирование обрабатываемого материала (без образования стружки). Этот случай обработки возможен при небольших значениях отношения a/R и увеличенных значениях углов α и ψ. Следовательно, осуществление процесса стружкообразования при фрезеровании не всегда возможно. Например, в начальный момент образования среза при фрезеровании отношение a/R весьма малое и, очевидно, процесс стружкообразования неосуществим, так как знаменатель зависимости (8.53) принимает отрицательные значения. Процесс стружкообразования начнется при увеличении отношения a/R до значений, при которых знаменатель зависимости (8.53) примет положительное значение. При этом значении отношение a/R должно быть больше, чем при резании с постоянной толщиной среза (т.е. α=0), так как тригонометрическая функция $tg\frac{(\alpha+\psi)}{2}$ за счет угла α принимает большие значения.

Обеспечить увеличение отношения a/R можно двумя путями. Во-первых, увеличением толщины среза a, во-вторых, уменьшением радиуса округления режущего лезвия инструмента R до значений, меньших, чем при резании с постоянной толщиной среза.

Из проведенного анализа следует, что для увеличения отношения a/R лезвия режущего инструмента (фрезы) должны обладать высокой остротой и сохранять ее в процессе фрезерования. Для выполнения этого условия необходимо использовать твердосплавные или керамические режущие пластины с нанесением на их рабочие поверхности износостойких покрытий, позволяющих повысить работоспособность инструмента. Также необходимо обеспечить уменьшение интенсивности трения в зоне резания за счет применения эффективных технологических сред и увеличения скорости резания, т.е. применяя схему высокоскоростного фрезерования. Собственно этим и объясняется высокая эффективность применения в настоящее время метода высокоскоростного фрезерования в производстве в связи с созданием современных режущих инструментов, отвечающих требованиям, вытекающим из приведенных выше аналитических зависимостей.

Из зависимости (8.53) вытекает, что в отличие от зависимости (8.52), функция $\cos\alpha$ входит во второй степени, а это приводит к уменьшению параметра σ. Однако, определяющим фактором в формировании параметра σ, является знаменатель зависимости, который может принимать как отрицательные, так и положительные значения, т.е. изменяться в широких пределах, вызывая чрезмерное увеличение параметра σ. Поэтому увеличение отношения a/R и уменьшение условного угла трения ψ инструмента с обрабатываемым материалом являются основными факторами снижения параметра σ при резании с увеличивающейся во времени толщиной среза, определяемой углом α.

Одним из условий уменьшения параметра σ и повышения эффективности обработки следует рассматривать применение схемы попутного фрезерования (с противоположным направлением вращения фрезы).

В этом случае угол входа режущего лезвия инструмента в обрабатываемый материал α принимает отрицательные значения и зависимости (8.52) и (8.53) видоизменяются:

$$\sigma = \cos\psi_1 \cdot \cos\alpha \cdot \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{[1 - \sin(\psi_1 - \alpha)]}; \qquad (8.54)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot \cos^2\alpha}{\sqrt{\frac{a}{2R}} - tg\frac{(\psi - \alpha)}{2}}. \qquad (8.55)$$

Как следует из приведенных зависимостей, при значении $\alpha > \psi$ тригонометрические функции $tg\frac{(\psi - \alpha)}{2}$ и $\sin(\psi_1 - \alpha)$ существенно уменьшаются и могут принимать отрицательные значения, что позволяет существенно увеличить знаменатели зависимостей (8.54) и (8.55) и, соответственно, уменьшить параметр σ. Однако, как показано выше, основным условием уменьшения параметра σ следует рассматривать увеличение отношения a/R (главным образом за счет уменьшения радиуса округления режущего лезвия инструмента R) и уменьшение угла трения ψ инструмента с обрабатываемым материалом путем обеспечения высокой остроты режущих лезвий инструмента и применения высокоскоростного фрезерования. Это обеспечит увеличение отношения a/R в начальный момент формирования срезаемого слоя, когда удаляется его основная часть.

Таким образом показано, что при использовании схемы попутного фрезерования, также как и при использовании рассмотренной выше схемы встречного фрезерования, параметр σ определяется главным образом отношением a/R: чем оно больше, тем меньше σ.

Для анализа характера изменения толщины среза и, соответственно, отношения a/R при фрезеровании цилиндрической фрезой рассмотрим схему обработки, показанную на рис. 8.6.

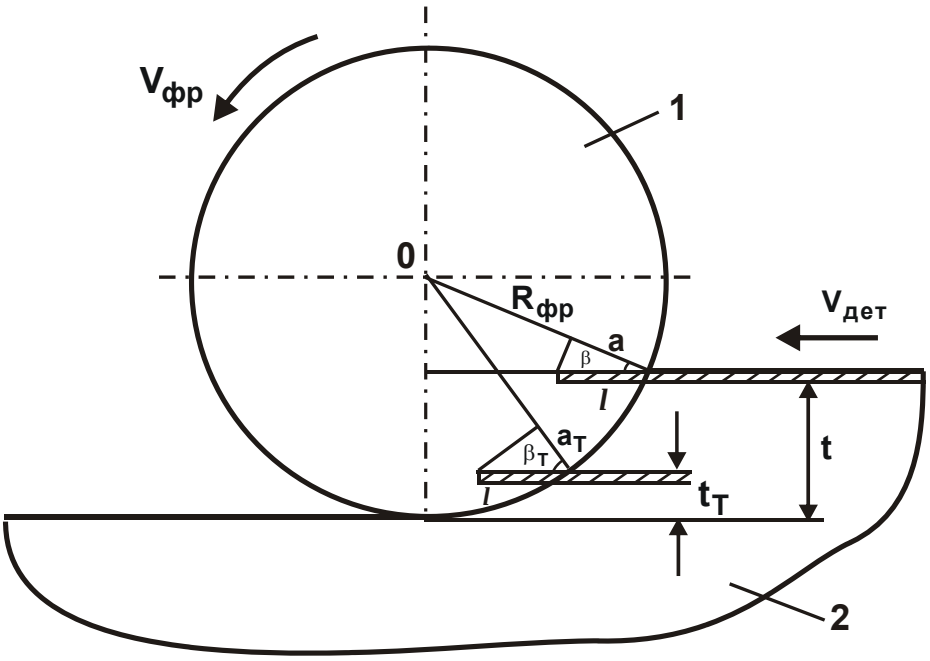


Рис. 8.6. Расчетная схема параметров фрезерования цилиндрической фрезой: 1 – контур фрезы; 2 – обрабатываемая деталь

Для удобства расчетов толщины среза удаляемый в процессе обработки материал представлен в виде горизонтальных элементарных слоев, которые контактируют с режущими зубьями фрезы под разными углами β. Так, для периферийного элементарного слоя обрабатываемого материала максимальная толщина среза a определяется:

$$a = l \cdot \cos\beta, \qquad (8.56)$$

где $l = V_{дет} \cdot \tau$ – перемещение периферийного элементарного слоя обрабатываемого материала в горизонтальном направлении за период времени $\tau = L / V_{фр}$ между работой двух соседних зубьев фрезы, м;

$V_{дет}$ – скорость перемещения детали, м/с;

$L = 2 \cdot \pi \cdot R_{фр} / n$ – расстояние (по окружности) между двумя соседними зубьями фрезы, м;

$R_{фр}$ – радиус фрезы, м;

n – число зубьев фрезы;

$V_{фр}$ – скорость вращения фрезы, м/с.

Тригонометрическая функция $\cos\beta$ может быть определена из условия:

$$\cos\beta = \frac{\sqrt{R_{фр}^2 - (R_{фр} - t)^2}}{R_{фр}} \approx \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{фр}}}, \qquad (8.57)$$

где t – глубина резания, м.

Тогда максимальная толщина среза a выразится:

$$a = \frac{2 \cdot \pi}{n} \cdot \frac{V_{дет}}{V_{фр}} \cdot \sqrt{t \cdot D_{фр}}, \qquad (8.58)$$

где $D_{фр} = 2 \cdot R_{фр}$ – диаметр фрезы, м.

Текущая толщина среза a_T, определяемая углом β_T и текущим значением t_T (рис. 8.6), аналогично зависимости (8.58), аналитически описывается:

$$a_T = \frac{2 \cdot \pi}{n} \cdot \frac{V_{дет}}{V_{фр}} \cdot \sqrt{t_T \cdot D_{фр}}. \qquad (8.59)$$

Из зависимости (8.59) вытекает, что текущая толщина среза a_T всегда меньше максимальной толщины среза a и изменяется по закону:

$$\frac{a_T}{a} = \sqrt{\frac{t_T}{t}}, \qquad (8.60)$$

т.е. чем меньше t_T, тем меньше a_T.

С точки зрения уменьшения силовой и тепловой напряженностей процесса фрезерования максимальную толщину среза a необходимо уменьшать, например, за счет увеличения скорости вращения фрезы $V_{фр}$, осуществляя переход в область высокоскоростного фрезерования. Это позволит, исходя из зависимости (8.58), одновременно увеличить скорость перемещения детали $V_{дет}$ и, соответственно, производительность обработки. Однако уменьшение максимальной толщины среза a, согласно зависимости (8.60), приводит к уменьшению текущей толщины среза a_T и отношения a_T/R, т.е. к снижению вероятности осуществления процесса стружкообразования при резании. Следовательно, с этой точки зрения максимальную толщину среза a необхо-

димо увеличивать, уменьшая параметр σ и осуществляя процесс интенсивного стружкообразования при резании. Для этого необходимо использовать режущие инструменты, обладающие повышенной стойкостью при повышенной температуре резания [118].

Таким образом показано, что для осуществления процесса интенсивного стружкообразования при фрезеровании необходимо увеличивать максимальную толщину среза a, вызывая увеличение силовой и тепловой напряженностей процесса. Наиболее эффективно это условие может быть выполнено с применением высокоскоростного фрезерования, которое, во-первых, позволяет уменьшить интенсивность трения в зоне резания и условное напряжение резания (энергоемкость обработки) σ. Во-вторых, обеспечивает увеличение производительности обработки, так как, исходя из зависимости (8.58), за счет увеличения скорости вращения фрезы $V_{фр}$ можно в широких пределах изменять максимальную толщину среза a и скорость перемещения детали $V_{дет}$.

8.5. Основные направления уменьшения шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании

С появлением новых обрабатываемых материалов и ужесточением требований к их обработке постоянно возникает необходимость дальнейшего совершенствования технологий фрезерования с точки зрения повышения производительности, качества и точности обработки [65; 162]. При этом важную роль играет фактор уменьшения шероховатости поверхности, который не всегда обеспечивается при высокоскоростном фрезеровании. В связи с этим, настоящий параграф работы посвящен теоретическому определению шероховатости поверхности при фрезеровании и условиям ее уменьшения.

Необходимо отметить, что в работе [11] приведена упрощенная аналитическая зависимость для определения шероховатости поверхности при фрезеровании цилиндрической фрезой, однако она получена со значительными упрощениями и требует уточнения. Поэтому важно получить уточненное теоретическое решение определения шероховатости поверхности при фрезеровании и на его основе провести

теоретический анализ условий уменьшения шероховатости поверхности без уменьшения производительности обработки.

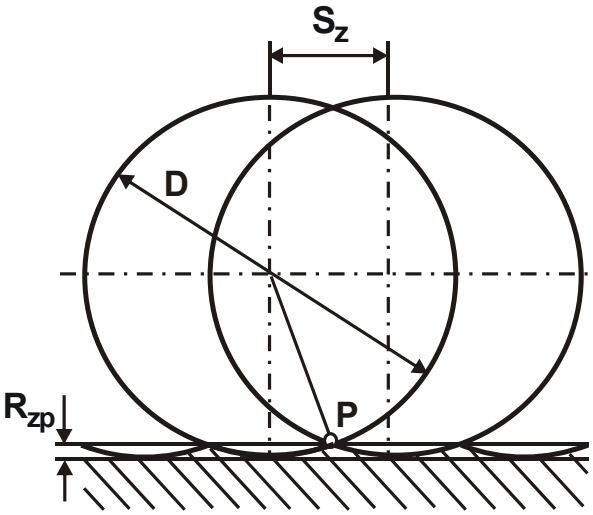


Рис. 8.7. Расчетный микропрофиль обработанной поверхности при фрезеровании цилиндрической фрезой

Предложенная в работе [11] аналитическая зависимость для определения шероховатости поверхности при фрезеровании цилиндрической фрезой получена на основе установления точки пересечения P двух окружностей диаметром D, имитирующих перемещение фрезы на расстояние, равное величине подачи на зуб фрезы S_z (рис. 8.7). Однако в процессе фрезерования с учетом вращательного и поступательного движения вершины зуба фрезы, она будет совершать более сложную траекторию, отличную от траектории, описываемой окружностью. Поэтому полученная таким образом аналитическая зависимость для определения шероховатости поверхности при фрезеровании цилиндрической фрезой

$$R_z = \frac{S_z^2}{4D}, \qquad (8.61)$$

является упрощенной и ее необходимо уточнить. Для этого следует рассмотреть расчетную схему, приведенную на рис. 8.8, считая, что фреза совершает вращательное движение со скоростью $V_{фр}$, а деталь – прямолинейное поступательное движение со скоростью $V_{дет}$. Процесс резания осуществляется с глубиной резания t.

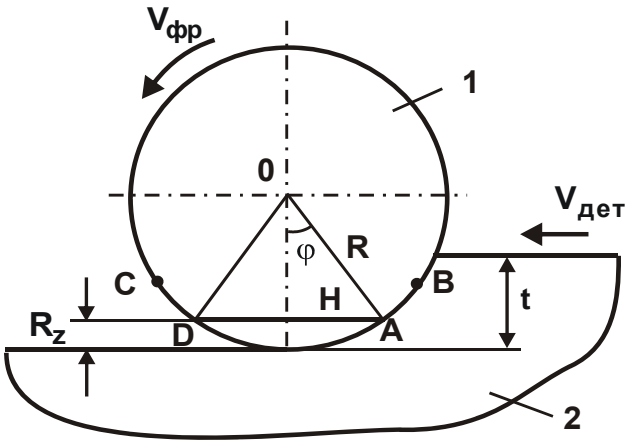


Рис. 8.8. Расчетная схема параметров фрезерования цилиндрической фрезой:
1 – контур фрезы;
2 – обрабатываемая деталь

При определении параметра шероховатости поверхности R_z необходимо исходить из условия,

что за некоторое время τ вершина зуба фрезы, расположенная в точке A, переместится по окружности радиусом R на длину дуги AB, а фиксированная точка A, расположенная на обрабатываемом материале детали, переместится по горизонтальной прямой в точку D, расположенную на этой окружности. Тогда за время τ вершина соседнего зуба фрезы, расположенная в точке C, должна переместиться в точку D и в последующем удалить обрабатываемый материал в зоне AD. В этом случае на обрабатываемой поверхности образуются гребешки микронеровностей высотой R_z.

Время τ определяется двумя соотношениями:

$$\tau = \frac{AB}{V_{фр}} = \frac{AD}{V_{дет}}. \qquad (8.62)$$

Откуда длина отрезка AD равна:

$$AD = AB \cdot \frac{V_{дет}}{V_{фр}}. \qquad (8.63)$$

Длина дуги окружности AB определяется разностью длин дуг окружности BD и AD:

$$AB = BD - AD, \qquad (8.64)$$

где $BD = L = 2\pi \cdot R / n$ – длина дуги окружности между двумя соседними зубьями фрезы, м;

n – количество зубьев фрезы.

Для определения длины дуги окружности AD необходимо определить длину отрезка $AD = 2H$ по теореме Пифагора:

$$R^2 = H^2 + (R - R_z)^2. \qquad (8.65)$$

Откуда $H \approx \sqrt{2R \cdot R_z}$, соответственно, длина отрезка

$$AD = 2H = 2 \cdot \sqrt{2R \cdot R_z}. \qquad (8.66)$$

Длина дуги окружности $AD = 2 \cdot \varphi \cdot R$, где угол $\varphi \approx \sin\varphi = \frac{H}{R} = \sqrt{\frac{2 \cdot R_z}{R}}$. Тогда длина дуги окружности AB, исходя из зависимости (8.64), выразится:

$$AB = L - 2 \cdot \sqrt{2R \cdot R_z}. \qquad (8.67)$$

Соответственно, длина отрезка AD равна:

$$AD = \left(L - 2 \cdot \sqrt{2R \cdot R_z}\right) \cdot \frac{V_{дет}}{V_{фр}}. \qquad (8.68)$$

Сравнивая зависимость (8.68) и преобразованную зависимость $AD = 2 \cdot \varphi \cdot R$, определяется параметр шероховатости поверхности

$$R_z = \left(\frac{\pi}{n}\right)^2 \cdot \frac{R}{\left(\frac{V_{фр}}{V_{дет}} - 1\right)^2}. \qquad (8.69)$$

Как видно, уменьшить параметр шероховатости поверхности R_z можно уменьшением радиуса фрезы R, увеличением количества зубьев фрезы n и отношения $V_{фр} / V_{дет}$. Очевидно, при условии $V_{фр} / V_{дет} \to 1$ параметр шероховатости поверхности R_z увеличивается, поэтому необходимо увеличивать скорость вращения фрезы $V_{фр}$, применяя высокоскоростное фрезерование ($V_{фр} / V_{дет} >> 1$). В этом случае зависимость (8.69) упростится и примет вид:

$$R_z = \left(\frac{\pi}{n}\right)^2 \cdot R \cdot \left(\frac{V_{дет}}{V_{фр}}\right)^2. \qquad (8.70)$$

Скорость вращения фрезы $V_{фр}$ влияет на параметр шероховатости поверхности R_z по обратноквадратичной зависимости, т.е. ее незначительное увеличение приводит к существенному уменьшению R_z. Этим, собственно, и определяется эффективность применения новых металлорежущих высокооборотных станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и фрез небольшого диаметра, обеспечивающих значительное уменьшение шероховатости поверхности, в особенности при изготовлении отверстий и пазов, где требуется добиться высоких показателей шероховатости обработанной поверхности.

Для сравнения известной зависимости (8.61) с полученной зависимостью (8.70) необходимо представить зависимость (8.61) с учетом соотношений $S_z = V_{дет} \cdot T = V_{дет} \cdot \frac{L}{V_{фр}} = V_{дет} \cdot \frac{2\pi \cdot R}{n \cdot V_{фр}}$ и $D = 2R$ в виде:

$$R_z = 0{,}5 \cdot \left(\frac{\pi}{n}\right)^2 \cdot R \cdot \left(\frac{V_{дет}}{V_{фр}}\right)^2. \qquad (8.71)$$

Как видно, зависимости (8.70) и (8.71) отличаются в 2 раза, поскольку упрощенный расчет параметра шероховатости поверхности R_z по зависимости (8.71) приводит к меньшему значению R_z, чем рас-

чет по зависимости (8.70). Учитывая столь значительное расхождение расчетных значений R_z, для практического применения следует рекомендовать полученную зависимость (8.70), позволившую уточнить известную зависимость (8.71).

Аналогично зависимости (8.61), зависимость (8.70) может быть представлена в виде:

$$R_z = \frac{S_z^2}{2 \cdot D}. \qquad (8.72)$$

Важно оценить возможности уменьшения параметра шероховатости поверхности R_z при фрезеровании концевой фрезой с прямыми зубьями для заданной производительности обработки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$, принимая глубину резания равной $t = 2R$ (где B – ширина фрезерования, м). Тогда $Q = 2B \cdot R \cdot V_{дет}$, и зависимость (8.70) опишется:

$$R_z = \left(\frac{\pi}{n}\right)^2 \cdot \frac{1}{4B^2 \cdot R} \cdot \left(\frac{Q}{V_{фр}}\right)^2. \qquad (8.73)$$

Исходя из зависимости (8.73), обеспечить уменьшение параметра шероховатости поверхности R_z при заданной производительности обработки $Q = 2B \cdot R \cdot V_{дет}$ можно главным образом увеличением количества зубьев фрезы n и скорости вращения фрезы $V_{фр}$, поскольку эти параметры входят в зависимость во второй степени. Например, уменьшение R_z в связи с уменьшением радиуса фрезы R можно в полной мере (с избытком) компенсировать за счет этого фактора путем увеличения скорости вращения фрезы $V_{фр}$, т.е. переходом в область высокоскоростного фрезерования.

Полученные решения открывают новые направления исследований, связанные с созданием и применением новых технологий фрезерования деталей, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами, и прогрессивных режущих твердосплавных и керамических инструментов с износостойкими (в особенности, алмазными) покрытиями для осуществления высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" с целью повышения производительности обработки, качества и точности обрабатываемых поверхностей, в частности, высокоточных деталей формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности.

8.6. Разработка и изготовление высокоточной формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности

ООО "Империя металлов" (г. Харьков) является многопрофильным производственным предприятием, одним из ведущих операторов отечественного рынка формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности. Согласно последним данным аналитических исследований, на долю ООО "Империя металлов" приходится более 50 % производства оснастки для макаронной и кондитерской отраслей среди стран СНГ. На предприятии разработаны и эффективно функционируют технологические процессы изготовления формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности, включая оснастку для производства сахарного печенья, затяжного "крекерного" печенья, песочного печенья, пряников, а также процессы изготовления матриц и фильер для производства всех видов макарон (рис. 8.9, рис. 8.10).

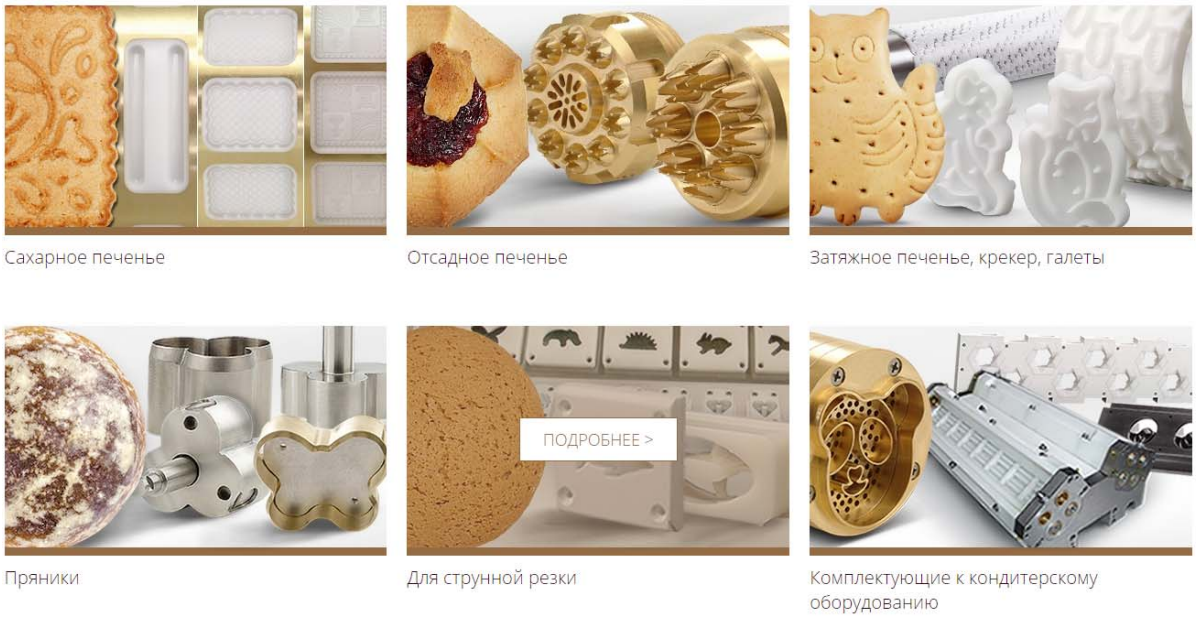


Рис. 8.9. Оснастка для производства кондитерских изделий

Для производства сахарного печенья изготавливаются роторы разных размеров и конфигураций для всех видов ротационных машин, включая машины известных мировых брендов. В зависимости от технических требований оборудования и технологий заказчика по произ-

водству сахарного печенья предложены следующие конструктивные решения: цельнолатунный формующий ротор с полимерными формующими вставками; ротор формующий со сменными латунными кольцами с полимерными вставками; цельнополимерный формующий ротор для печенья; ротор формующий с полимерными кольцами. Формующие вставки к латунным кольцам и полимерные кольца выполнены из пищевого полимера, обладают высокой износостойкостью, высокой механической стойкостью к деформациям и механическим воздействиям. Формующие элементы выполняются с высочайшим уровнем точности, что гарантирует совершенную формовку даже самых мелких и тонких элементов.

Рис. 8.10. Валы для производства кондитерских изделий

Для производства затяжного печенья, крекеров и галет изготавливаются вырубные роторы (валы) разных размеров и конфигураций для всех линий затяжного печенья, включая линии известных мировых брендов, а также накладки на вырубной ротор. В производстве формующей оснастки используется только высокоточное современное оборудование с ЧПУ, что позволяет добиваться высокой точности и повторяемости форм для производства печенья.

Для производства отсадного (песочного, сдобного) печенья изготавливаются отсадные матрицы различной комплектации, имеется огромный выбор отсадных фильер (отсадные вставки, дюзы, формы). Производится оснастка и комплектующие для отсадных машин любых производителей, включая машины известных мировых брендов. С помощью этой оснастки можно производить все виды отсадного печенья.

Для производства пряников предлагаются матрицы под струнную обрезку следующей комплектации: платформа может быть изготовлена из стали или алюминия для формования одноцветных и двухцветных изделий; формующая часть может быть выполнена в виде цельной накладки с формующими отверстиями и пазами под держатели струны; формующая часть также может быть выполнена в виде отдельных формующих элементов из полимера. Предлагаются матрицы и сегменты для диафрагменной резки (для производства пряника с наполнителем). Предлагаются штампы (формы) ручного формования для изготовления печатных (сувенирных) пряников, выполняемые по индивидуальным эскизам заказчика.

Освоено производство всех видов макаронных матриц: круглая матрица для короткорезанных макаронных изделий; "перьевая" матрица для макарон с косым срезом; "сочневая" матрица для изделий лазанья, бежбармак; прямоугольная матрица для длиннорезанных макаронных изделий (спагетти); «щелевая» матрица для макаронных изделий лазанья, бантики, бешбармак; конус косого реза для бешбармака с косым срезом.

Освоено производство макаронных фильер**:** более 500 разновидностей фильер для макаронных изделий; реализация индивидуальных форм любой сложности согласно запроса заказчика. Освоено производство и реставрация узлов и деталей макаронного оборудования: шнеков; шнековых камер; импеллеров и т.д. Производится полное технологическое сопровождение при введении продукции в эксплуатацию, а также помощь при любых производственных вопросах.

На предприятии для изготовления высокоточных отверстий в специальной оснастке, используемой в пищевой промышленности, широко применяется метод фрезерования твердосплавными концевыми фрезами с износостойкими покрытиями зарубежного производства на станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр". Схема фрезерования включает вращательное движение фрезы, ее движение по контуру и вдоль обрабатываемого отверстия. Диаметр фрезы меньше диаметра обрабатываемого отверстия. Используя этот метод, можно обрабатывать отверстия в деталях, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами (высокопрочные стали и сплавы, цветные металлы и т.д.). В отличие от традиционно применяемого метода сверления и рассверливания отверстий, фрезе-

рование отверстий обеспечивает высокие показатели точности, шероховатости и качества обрабатываемых поверхностей. Производительность обработки может быть увеличена в несколько раз.

Эффективность фрезерования отверстия резко возрастает с увеличением скорости вращения фрезы. Поэтому переход в область высокоскоростного фрезерования кардинально решает проблему повышения точности, качества и производительности обработки отверстий. Используя метод фрезерования, можно изготавливать сквозные и глухие отверстия различной геометрической формы (круглые, квадратные, треугольные и другие). Опыт изготовления отверстий в деталях из латуни показал на возможность обеспечения точности их обработки в пределах нескольких микрон при многократном увеличении производительности обработки, что позволило резко сократить трудоемкость их изготовления. При этом появилась возможность высокоточного изготовления фрезерованием различных пазов и “карманов” на плоских и цилиндрических деталях и т.д.

Выводы

1. На основе аналитического описания температуры резания при точении, с учетом распределения тепла между образующейся стружкой и поверхностным слоем обрабатываемой детали, определены условия ее уменьшения. Они состоят главным образом в уменьшении условного напряжения резания (энергоемкости обработки) за счет уменьшения интенсивности трения в зоне резания путем применения высокоскоростного резания, а также за счет уменьшения главного угла резца в плане. Показано, что температура резания с увеличением скорости резания и продольной подачи непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к постоянному значению, равному температуре нагрева образующейся стружки. Это указывает на то, что с увеличением скорости резания и продольной подачи фактически все тепло, образующееся при резании, уходит на нагревание стружки, а в обрабатываемую деталь уходит небольшая часть тепла. Расчетами установлено, что неучет тепла, уходящего в образующуюся стружку при точении, приводит к существенному увеличению температуры резания до физически неосуществимых при резании значений. Следовательно, приблизить расчетные значения максимальной температуры

резания к экспериментальным значениям можно на основе учета баланса тепла, уходящего в образующуюся стружку и поверхностный слой обрабатываемой детали.

2. Приведены аналитические зависимости для определения температуры резания при лезвийной обработке на основе установления баланса тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, стружку и резец, от действия тепловых источников, возникающих в условной плоскости сдвига материала и в зоне трения образующейся стружки с передней поверхностью резца. Теоретически доказано, что образующееся в процессе трения на передней поверхности резца тепло уходит в основном в стружку, в резец уходит значительно меньшее количество тепла. Температура, возникающая в условной плоскости сдвига материала, меньше температуры, возникающей на передней поверхности резца в результате ее трения со стружкой. Обоснованы условия уменьшения температуры резания, состоящие главным образом в уменьшении условного напряжения резания и увеличении условного угла сдвига обрабатываемого материала.

3. Получены упрощенные аналитические зависимости для определения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке с учетом баланса тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки. Расчетами установлено, что при многопроходном шлифовании в обрабатываемую деталь уходит фактически все образующееся при шлифовании тепло, чем и объясняется высокая вероятность образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях детали. Доказано, что при шлифовании и лезвийной обработке температура резания описывается фактически одинаковыми зависимостями, а уменьшить температуру резания можно главным образом за счет уменьшения условного напряжения резания путем повышения режущей способности круга и снижения интенсивности трения в зоне резания, а также уменьшением глубины шлифования и увеличением скорости детали. Показано, что вследствие меньших значений условного напряжения резания при лезвийной обработке, ее целесообразно использовать на финишных операциях взамен процессов шлифования, которые характеризуются повышенными показателями энергоемкости обработки и температуры резания.

4. Проведен теоретический анализ закономерностей формирования условного напряжения резания (энергоемкости обработки) при вы-

сокоскоростном фрезеровании и определены условия его уменьшения, состоящие в увеличении отношения толщины среза к радиусу округления режущего лезвия инструмента и уменьшении интенсивности трения в зоне резания за счет перехода в область высокоскоростного фрезерования и применения современных твердосплавных керамических режущих инструментов с износостойкими покрытиями, обеспечивающих высокую остроту и износостойкость режущих лезвий инструмента при повышенных температурах резания. Установлено, что при резании с переменной (увеличивающейся во времени) толщиной среза, т.е. при фрезеровании, условное напряжение резание (энергоемкость обработки) больше, чем при резании с постоянной толщиной среза, т.е. при точении. Поэтому в этих условиях добиться уменьшения энергоемкости обработки можно главным образом за счет уменьшения радиуса округления режущего лезвия инструмента. Теоретически показана эффективность применения попутного фрезерования, обеспечивающего увеличение отношения a/R в начальный момент формирования срезаемого слоя, когда удаляется основная часть снимаемого слоя.

5. Предложен новый теоретический подход к расчету шероховатости поверхности при фрезеровании, на основе которого получена аналитическая зависимость, позволившая уточнить известную зависимость для определения шероховатости поверхности при фрезеровании цилиндрической фрезой с прямыми зубьями. Показано, что рассчитанные по двум зависимостям значения параметра шероховатости поверхности R_z отличаются в 2 раза. Это указывает на важность и актуальность полученного решения. Установлено также, что уменьшить шероховатость поверхности и одновременно увеличить производительность обработки можно за счет увеличения скорости вращения фрезы, осуществляя схему высокоскоростного фрезерования на высокооборотных станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр". При этом важным фактором уменьшения шероховатости поверхности при фрезеровании отверстий и глубоких пазов является уменьшение радиуса фрезы.

6. Показано, что применение полученных решений позволило решить проблему производства формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности, требующего широкого применения технологий фрезерной обработки с обеспечением высоких показателей качества и точности обрабатываемых поверхностей, поскольку изготавливаемые изделия относятся к классу высокоточных.

Раздел 9
Определение оптимальных параметров процессов абразивной обработки

9.1. Технологические закономерности и условия повышения эффективности прерывистого и обычного шлифования

9.1.1. Физические эффекты прерывистого шлифования

Прерывистое шлифование является одним из наиболее эффективных методов шлифования, обеспечивающих повышение качества и производительности обработки деталей машин. Основной эффект прерывистого шлифования состоит в снижении температуры резания за счет периодичности контакта прерывистого круга с обрабатываемым материалом и возможности частичного охлаждения зоны резания в момент прерывания процесса. Кроме того, в результате ударного характера взаимодействия прерывистого круга с обрабатываемой деталью происходит самооформление профиля круга (т.е. его постоянная правка), что приводит к непрерывному обновлению режущего рельефа круга и снижению энергоемкости обработки. Такой двойной эффект шлифования исключает образование на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов и обеспечивает высококачественную обработку даже в условиях съема значительных припусков, т.е. метод прерывистого шлифования можно использовать как при окончательной, так и предварительной обработке.

Большой вклад в развитие прогрессивного метода прерывистого шлифования внес выдающийся ученый-технолог, руководитель Одесской научной технологической школы, профессор Якимов Александр Васильевич [196], который разработал физические и технологические основы прерывистого шлифования, обосновал наиболее рациональные конструкции прерывистых кругов, оптимальные режимы шлифования и предложил научно-практические рекомендации по эффективному применению прерывистого шлифования. Под его научным руководством осуществлено широкое внедрение метода прерывистого шлифования на промышленных предприятиях, в особенности на пред-

приятиях авиационной отрасли при изготовлении высокоточных изделий, в инструментальном производстве, при обработке высокотвердых неметаллических материалов и т.д.

В 1986 году коллективу ученых, возглавляемому профессором Якимовым А. В., была присуждена Государственная премия Украины за разработки в области создания и промышленного применения технологий прерывистого шлифования. В настоящее время проводятся дальнейшие работы по исследованию и внедрению в производство технологий прерывистого шлифования, в особенности с применением алмазных прерывистых кругов. Поэтому постоянно возникают и новые задачи, связанные с разработкой более эффективных технологических процессов прерывистого шлифования и определением оптимальных условий обработки, обеспечивающих высокие показатели качества, точности и производительности.

В работах профессора Якимова А. В. [149; 151; 163; 196; 197] приведено большое количество экспериментальных данных, касающихся исследования основных технологических показателей прерывистого шлифования: силы и температуры резания, параметров качества и производительности обработки и т.д. На основе этих данных обоснованы преимущества прерывистого шлифования и целесообразность перехода от обычного шлифования сплошными кругами к шлифованию прерывистыми кругами. Приведенные результаты экспериментальных исследований открывают новые технологические возможности осуществления высокоэффективного шлифования прерывистыми кругами. Однако для их практического использования на современном уровне промышленного производства требуется разработка и применение новых методических подходов к определению оптимальных условий прерывистого шлифования. Поэтому настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию условий уменьшения снижения силовой и тепловой напряженности прерывистого шлифования, повышения качества и производительности обработки. В основу работы положены результаты исследований [107; 108; 149; 196].

В общем виде тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания, а также условное напряжение резание $\sigma = P_z / S_{мгн}$ (энергоемкость обработки) при шлифовании аналитически описываются следующими зависимостями [108]:

$$P_z = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{К_ш} \cdot S_{мгн}; \quad (9.1)$$

$$P_y = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{К_ш^2} \cdot S_{мгн}; \quad (9.2)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{К_ш}, \quad (9.3)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м^2;

$К_ш = P_z / P_y = tg2\beta = ctg(\gamma + \psi)$ – коэффициент шлифования;

β – условный угол сдвига обрабатываемого материала, Н/м^2;

γ – отрицательный передний угол режущего зерна;

ψ – условный угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ($tg\psi = f$ – коэффициент трения);

$S_{мгн} = Q / V_{кр}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м^2;

$Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ – производительность обработки, м^3/с;

B – ширина шлифования, м;

t – глубина шлифования, м.

Как видно, параметры силовой напряженности процесса шлифования P_z, P_y и σ однозначно определяются коэффициентом шлифования $К_ш$, который при шлифовании всегда меньше единицы. Чем больше $К_ш$, тем больше P_z, P_y и σ. Радиальная составляющая силы резания P_y больше зависит от $К_ш$, т.е. принимает большие значения, чем тангенциальная P_z составляющая силы резания. С увеличением углов γ и ψ коэффициент шлифования $К_ш$ увеличивается, что интенсифицирует силовую напряженность процесса шлифования, т.е. приводит к увеличению параметров P_z, P_y и σ. Поэтому с целью уменьшения этих параметров следует уменьшать углы γ и ψ за счет обеспечения работы шлифовального круга в режиме самозатачивания или применения непрерывной (периодической) правки круга, а также применения эффективных технологических сред, снижающих интенсивность трения в зоне шлифования.

При прерывистом шлифовании в связи с периодическим ударным характером взаимодействия прерывистого круга с обрабатываемым

материалом происходит самооформление профиля рабочей поверхности круга, образование и поддержание развитого режущего рельефа круга, работающего, по сути, в режиме интенсивного самозатачивания [196; 197]. Затупившиеся режущие зерна своевременно выпадают из связки круга, а в работу подключаются новые неизношенные зерна. Это обеспечивает постоянное поддержание высокой режущей способности прерывистого круга, повышение производительности и качества обработки (исключение образования на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов). В связи с увеличенным выступанием режущих зерен над уровнем связки круга существенно снижается интенсивность трения связки круга с обрабатываемым материалом, тогда как при обычном шлифовании сплошным кругом доля энергии трения в общем энергетическом балансе шлифования является определяющей [196]. Такой режим работы зерен способствует уменьшению угла γ и, соответственно, уменьшению параметров P_z, P_y и σ, особенно радиальной P_y составляющей силы резания, которая квадратичной зависимостью связана с коэффициентом шлифования $К_ш$.

Поэтому при прерывистом шлифовании с увеличением толщины среза и, соответственно P_y, коэффициент шлифования $К_ш$ остается фактически постоянным в связи с постоянным значением угла γ, тогда как при обычном шлифовании в связи с затуплением зерен и образованием на них площадок износа угол γ уменьшается от 90^0 до определенного (установившегося) значения, вызывая первоначально увеличение $К_ш$, а затем его примерное постоянство. Следовательно, достижение установившегося значения $К_ш$ при обычном шлифовании возможно при увеличенных значениях P_y, что согласуется с аналогичными экспериментальными данными, установленными профессором Сагардой А. А. [139]. Таким образом, теоретически показана возможность уменьшения параметров силовой напряженности процесса шлифования P_z, P_y и σ в условиях прерывистого шлифования, что согласуется с известными экспериментальными данными (рис. 9.1 [196]).

Как следует из рис. 9.1, с течением времени обработки тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания при обычном шлифовании увеличиваются, а при прерывистом шлифовании

остаются фактически постоянными в связи с высокой режущей способностью прерывистого круга, обусловленной его ударным характером взаимодействия с обрабатываемым материалом и обеспечением работы круга в режиме самозатачивания, о чем свидетельствуют повышенные значения коэффициента шлифования $К_ш = P_z / P_y$.

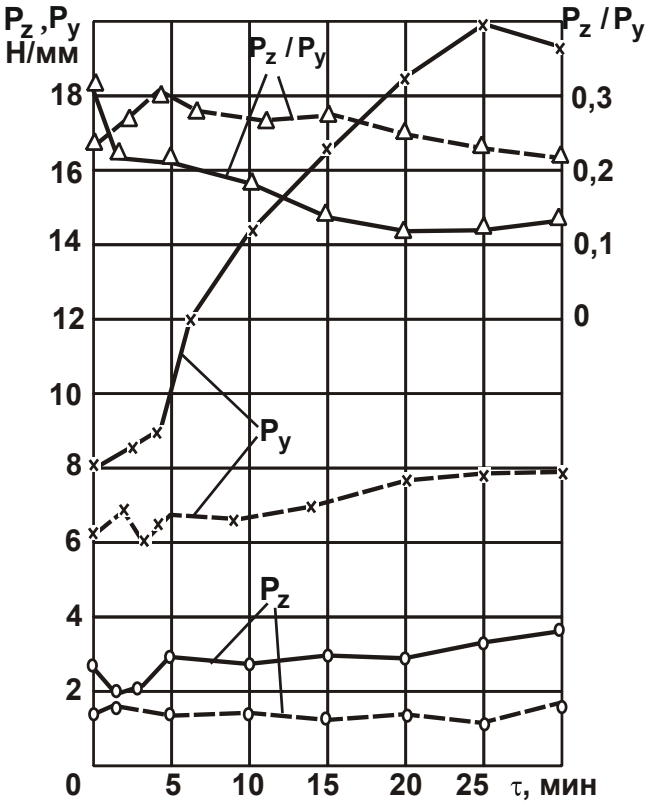


Рис. 9.1 . Зависимости тангенциальной и радиальной составляющих силы резания P_z, P_y и отношения P_z/P_y от времени работы круга ($V_{кр} = 35$ м/с; $V_{дет} = 10$ м/мин; контурные линии – сплошной круг; штриховые линии – прерывистый круг)

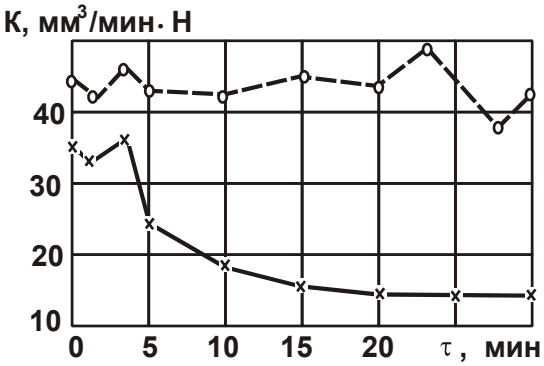


Рис. 9.2 . Зависимость удельного съема металла К от времени шлифования деталей из стали Х12М (абразивный круг – Э9А25СМ2К; $V_{кр} = 25$ м/с; $V_{дет} = 10$ м/мин; контурные линии – сплошной круг; штриховые – прерывистый круг)

Исходя из зависимостей (9.1) и (9.2), уменьшить P_z и P_y можно также путем уменьшения производительности обработки Q и увеличения скорости круга $V_{кр}$.

Из зависимости (9.1) можно установить связь между тангенциальной и радиальной составляющими силы резания P_z и P_y:

$$P_z = \sqrt{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot S_{мгн} \cdot P_y}\,. \qquad (9.4)$$

С физической точки зрения произведение параметров $\sigma_{сж} \cdot S_{мгн} = P_{z0}$ представляет собой силу, при достижении которой возможно разрушение прямолинейного бруса (площадью поперечного сечения $S_{мгн}$) при его сжатии, тогда

$$P_z = \sqrt{2 \cdot P_{z0} \cdot P_y}\,. \qquad (9.5)$$

Как видно, тангенциальная P_z составляющая силы резания всегда больше силы P_{z0}, так как $P_{z0} < P_y$, т.е. процесс стружкообразования при резании характеризуется большей силовой напряженностью по сравнению с процессом разрушения прямолинейного бруса в условиях его сжатия. Из зависимости (9.5) следует, что тангенциальная P_z составляющая силы резания изменяется менее интенсивно, чем радиальная P_y составляющая силы резания, о чем свидетельствуют экспериментальные данные (рис. 9.1), полученные в особенности при обычном шлифовании. При прерывистом шлифовании также наблюдается более интенсивный рост P_y по сравнению с P_z (с течением времени обработки), однако с меньшей интенсивностью, чем при обычном шлифовании сплошным кругом.

Из зависимости (9.2) можно определить удельный съем металла

$$К = \frac{Q}{P_y} = \frac{К_ш^2 \cdot V_{кр}}{2 \cdot \sigma_{сж}}, \qquad (9.6)$$

который тем больше, чем больше коэффициент шлифования $К_ш$ и скорость круга $V_{кр}$. Поэтому при прерывистом шлифовании удельный съем металла К больше, чем при обычном шлифовании в связи с увеличенным значением коэффициента шлифования $К_ш$, что подтверждается экспериментальными данными (рис. 9.2 [196]).

Как следует из рис. 9.2, при прерывистом шлифовании удельный съем металла К остается фактически постоянным с течением времени обработки, а при обычном шлифовании непрерывно уменьшается в связи с уменьшением коэффициента шлифования $К_ш$. Таким образом, приведенные аналитические зависимости вполне адекватно описывают параметры силовой напряженности процессов прерывистого и обычного шлифования и позволяют производить теоретический анализ закономерностей их функционирования, что открывает новые технологические возможности интенсификации процесса шлифования.

Как известно [196; 197], температура резания при прерывистом шлифовании меньше, чем при обычном шлифовании. Это связано, во-первых, с прерывистостью контакта круга с обрабатываемым материалом и возможностью периодического (хотя и весьма кратковременного) охлаждения обрабатываемой поверхности в момент прохождения впадины прерывистого круга. Во-вторых, с уменьшением силы резания и соответственно условного напряжения резания σ (энергоемкости обработки), которое прямо пропорционально связано с температурой резания. Причем, уменьшение условного напряжения резания, пожалуй, в большей мере влияет на уменьшение температуры резания, чем прерывистость контакта и периодическое кратковременное охлаждение обрабатываемой поверхности в момент прохождения впадины прерывистого круга.

Несомненно, ударный характер взаимодействия прерывистого круга с обрабатываемым материалом вызывает возникновение колебаний в технологической системе, которые отрицательно сказываются на точности и качестве обработки. Поэтому в процессе прерывистого шлифования необходимо исключить резонансное состояние технологической системы, в частности, за счет уменьшения количества рабочих выступов круга и уменьшения скорости круга с целью уменьшения частоты следования импульсов силы. Это позволит уменьшить интенсивность колебаний при шлифовании и повысить точность и качество обработки.

Очевидно, с увеличением глубины внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал в момент контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом будет увеличиваться шероховатость обрабатываемой поверхности. Поэтому с целью ее уменьшения необходимо уменьшать зернистость круга $\overline{X}$, которая оказывает наибольшее влияние на параметр шероховатости обработанной поверхности при алмазном шлифовании [151]:

$$R_{max} = 10 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \overline{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \right)^{0,4}, \qquad (9.7)$$

где m – объемная концентрация зерен в круге;

$\rho = 1/R_{дет} + 1/R_{кр}$;

$R_{дет}$, $R_{кр}$ – соответственно радиусы детали и круга, м.

Как следует из зависимости (9.7), для уменьшения параметра шероховатости поверхности R_{max} целесообразно также уменьшать скорость детали $V_{дет}$, а для поддержания производительности обработки на заданном уровне – увеличивать глубину шлифования t, которая не входит в зависимость (9.7), т.е. переходить в область высокопроизводительного глубинного шлифования. Этим подтверждается эффективность применения на практике при шлифовании труднообрабатываемых материалов алмазных прерывистых кругов при обработке пазов, канавок, профильном шлифовании, разрезке материалов и т.д.

9.1.2. Закономерности снижения силовой и тепловой напряженностей прерывистого шлифования

В работах Якимова А. В., Якимова А. А., Новикова Ф. В., Новикова Г. В. [149; 151; 163; 195] теоретически и экспериментально установлены функциональные связи между параметрами силовой и тепловой напряженности процесса шлифования и определены условия уменьшения силы и температуры резания, повышения качества и производительности обработки. В настоящем параграфе решается задача дальнейшего развития этих исследований, направленная на выявление, обоснование и реализацию новых резервов повышения эффективности прерывистого шлифования [129].

В работе [198] эффективность прерывистого шлифования предложено оценивать с позиции влияния на силы и температуру резания множителя $(1+l_{02}/l_{01})$, характеризующего время прерывания процесса шлифования в момент прохождения впадины прерывистого круга зоны шлифования (где l_{01}, l_{02} – длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга).

В работе [107] показано, что условное напряжение резания (энергоемкость механической обработки) σ, в частности процесса шлифования, зависит от суммы условного переднего угла режущего зерна γ и условного угла трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ψ:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{tg\left(45^{o} - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}, \qquad (9.8)$$

где $\tau_{сдв}$ – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м^2.

Чем меньше эти углы, тем меньше энергоемкость обработки σ и выше эффективность шлифования. Очевидно, при прерывистом шлифовании, вследствие ударного характера взаимодействия рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом, процесс обновления режущего контура круга будет происходить интенсивнее, режущие зерна будут выступать над уровнем связки на большую высоту и будут острее. Поэтому условные углы γ и ψ будут меньше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом. Согласно зависимости (9.8), это приведет к уменьшению энергоемкости обработки σ. Однако это может не привести к уменьшению тангенциальной составляющей силы резания $P_z = \sigma \cdot S_{мгн}$, которая зависит от производительности обработки $Q = Q_0 \cdot (1 + l_{02} / l_{01})$, достигаемой в момент контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом:

$$P_z = \sigma \cdot \frac{Q_0 \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right)}{V_{кр}}, \qquad (9.9)$$

где $S_{мгн} = Q_0 / V_{кр}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м^2;

Q_0 – производительность обработки при шлифовании сплошным кругом, м^3/с.

Поскольку рабочий выступ прерывистого круга вынужден удалять оставшийся после прохождения впадины слой металла, то очевидно, производительность обработки Q в момент прохождения рабочего выступа круга будет больше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом Q_0. Это приведет к увеличению тангенциальной составляющей силы резания P_z. Поэтому P_z зависит от двух противоположно изменяющихся параметров: σ и Q, первый из которых уменьшается, а второй увеличивается при прерывистом шлифовании.

Экспериментально установлено [196], что при прерывистом шлифовании, как правило, тангенциальная составляющая силы резания P_z меньше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом. Следовательно, интенсивность уменьшения энергоемкости обработки σ выше интенсивности увеличения множителя $(1 + l_{02} / l_{01})$. Это связано

с тем, что отношение (l_{02}/l_{01}) изменяется в небольших пределах и не приводит к существенному увеличению множителя $(1+l_{02}/l_{01})$ и, соответственно, тангенциальной составляющей силы резания P_z, тогда как даже незначительное уменьшение σ приводит к ощутимому (пропорциональному) уменьшению P_z. В этом и состоит физическая сущность снижения силовой напряженности прерывистого шлифования: за счет уменьшения суммы углов $(\psi+\gamma)$ уменьшается σ, а это предопределяет уменьшение P_z и, соответственно, температуры резания.

В работе [108] показано, что в общем случае тангенциальная составляющая силы резания P_z определяется двумя составляющими, обусловленными процессом резания и процессом трения связки круга с обрабатываемым материалом (рис. 9.3):

$$P_z = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{V_{кр}} + f_1 \cdot c \cdot \left(V_{дет} - V_{дет0}\right) \cdot \tau, \qquad (9.10)$$

где F – площадь поперечного сечения среза обрабатываемого прямолинейного образца (детали), м^2;

$V_{дет}$ – скорость детали, м/с;

$V_{дет0}$ – фактическая линейная скорость съема материала, м/с ($V_{дет0} \le V_{дет}$);

f_1 – коэффициент трения связки круга с материалом;

c – жесткость технологической системы, Н/м;

τ – время контакта круга с фиксированным сечением обрабатываемой поверхности, с.

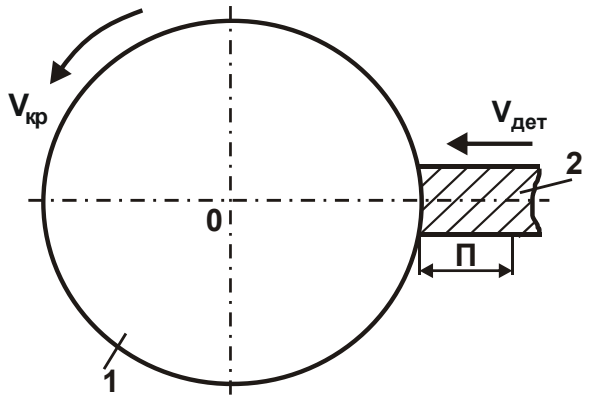


Рис. 9.3. Расчетная схема параметров процесса шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга: 1 – круг; 2 – деталь

Данная зависимость справедлива для обычного шлифования сплошным кругом. При прерывистом шлифовании, вследствие более высокого выступания режущих зерен над уровнем связки круга и их более высокой остроты, трение связки круга с обрабатываемым материалом будет меньше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом. Поэтому в первом приближении вторым слагаемым зависимости (9.10) можно пренебречь, т.к. $V_{дет0} \approx V_{дет}$. В итоге это приведет к снижению тангенциальной составляющей силы резания P_z. Кроме того, уменьшение энергоемкости обработки σ в первом слагаемом зависимости (9.10) также приведет к снижению P_z при прерывистом шлифовании. Однако при этом необходимо вместо величины $V_{дет0}$ рассматривать $V_{дет0} \cdot (1 + l_{02} / l_{01})$. Тогда зависимость (9.10) примет вид:

$$P_z = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right)}{V_{кр}}. \qquad (9.11)$$

Температура резания θ при прерывистом шлифовании аналитически описывается упрощенной зависимостью [148]:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}, \qquad (9.12)$$

тогда

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{дет0} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right)}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_м \cdot \rho}}, \qquad (9.13)$$

где $q = \frac{N}{F} = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{F}$ – плотность теплового потока, Вт/м^2;

$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_м \cdot \rho}}$ – глубина проникновения образующегося в процессе шлифования тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м;

$N = P_z \cdot V_{кр}$ – мощность шлифования, Вт;

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;

$c_м$ – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/кг·К;

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м^3.

С учетом выражения $\tau = l_{01} / V_{кр}$ зависимость (9.13) примет вид:

$$\theta = \sigma \cdot V_{дет0} \cdot \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{c_м \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} . \qquad (9.14)$$

Как видно, имеет место экстремум температуры резания θ от длины рабочего выступа прерывистого круга l_{01}. Подчиняя функцию θ необходимому условию экстремума $\theta'_{l_{01}} = 0$, получено: $l_{01} = l_{02}$, т.е. экстремальные значения длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга одинаковы.

Вторая производная $\theta''_{l_{01}} > 0$, следовательно, в точке экстремума достигается минимум температуры резания θ. Этим показано, что добиться наименьшей температуры резания при прерывистом шлифовании можно при условии $l_{01} = l_{02}$, тогда:

$$\theta_{min} = \sigma \cdot V_{дет0} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot l_{01}}{c_м \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} . \qquad (9.15)$$

Применительно к шлифованию сплошным кругом при условиях $l_{02} = 0$ и $\tau = 2 \cdot l_{01} / V_{кр}$ зависимость (9.13) принимает вид:

$$\theta = \sigma \cdot V_{дет0} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot l_{01}}{c_м \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} . \qquad (9.16)$$

Как видно, при шлифовании сплошным кругом температура резания θ меньше, чем при прерывистом шлифовании. Однако при этом следует учитывать, что энергоемкость обработки σ при прерывистом шлифовании меньше, а дополнительное охлаждение зоны резания в момент прерывания процесса шлифования также приводит к снижению температуры резания θ_{min}. Поэтому, очевидно, температура резания θ_{min} при прерывистом шлифовании будет меньше, чем при шлифовании сплошным кругом, что подтверждается известными экспериментальными данными.

Таким образом, увеличение температуры резания θ_{min} при прерывистом шлифовании вследствие того, что рабочий выступ прерывистого круга вынужден удалять оставшийся после прохождения впадины слой металла, с избытком компенсируется уменьшением энергоемкости обработки σ и дополнительным охлаждением зоны резания в момент прерывания процесса шлифования. Это приводит к

снижению температуры резания θ_{min} при прерывистом шлифовании, что согласуется с экспериментальными данными.

Из проведенного анализа следует, что температура резания зависит в основном от двух параметров: P_z и $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_м \cdot \rho}}$. Как показано выше, тангенциальная составляющая силы резания P_z при прерывистом шлифовании может быть меньше, чем при обычном шлифовании сплошным кругом. Время контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом τ и, соответственно, параметр l_2 также меньше при прерывистом шлифовании вследствие периодичности процесса резания. Поэтому температура резания θ_{min} при прерывистом шлифовании меньше, что подтверждается известными экспериментальными данными.

Как видно, уменьшение температуры резания θ_{min} при прерывистом шлифовании происходит по двум направлениям: путем уменьшения P_z и τ. Это указывает на значительные технологические возможности прерывистого шлифования, так как ни один из известных методов шлифования не обладает таким преимуществом – одновременно за счет снижения энергоемкости обработки и обеспечения дополнительного охлаждения зоны резания в момент прохождения впадины прерывистого круга – добиться существенного снижения температуры резания и исключить образование температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях без снижения производительности обработки. Этим подтверждается высокая эффективность практического применения предложенного профессором Якимовым А. В. прогрессивного метода прерывистого шлифования. Полученные решения использованы в производстве на операции прерывистого шлифования твердосплавных пластин, в результате чего достигнуто повышение качества и производительности обработки.

9.1.3. Определение температуры резания при финишной обработке шлифованием

Анализ литературных источников [17; 121; 138] показал, что в настоящее время создана математически формализованная теория теплофизики процессов шлифования, позволяющая на основе реше-

ния классического уравнения теплопроводности рассчитать стационарные и нестационарные тепловые поля, возникающие в обрабатываемой детали при шлифовании, и таким образом определить температуру поверхностного слоя обрабатываемой детали. Это создает объективные предпосылки установления оптимальных условий шлифования, исключающих образование на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов.

Наряду с фундаментальными решениями дифференциального уравнения теплопроводности применительно к процессу шлифования, существуют и упрощенные инженерные решения по определению температуры резания при шлифовании [163], которые позволяют достаточно просто (фактически без потери точности расчетов) определить температуру резания при шлифовании и произвести теоретический анализ условий ее уменьшения. Основу упрощенных решений составляет расчетная схема (рис. 9.4 [92]), согласно которой снимаемый припуск представлен в виде пакета бесконечного множества прямолинейных адиабатических стержней, которые перерезаются шлифовальным кругом со скоростью $V_{рез}$ при его движении вдоль обрабатываемой поверхности.

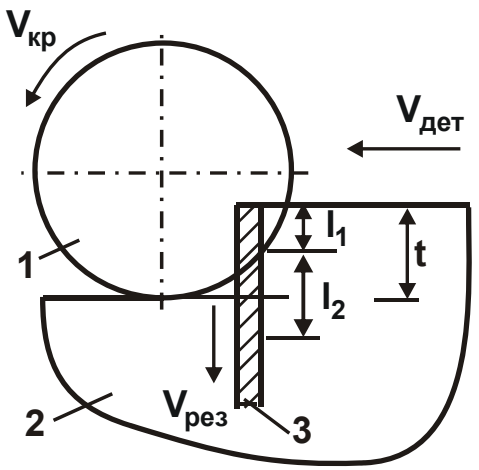


Рис. 9.4. Расчетная схема параметров плоского шлифования: 1 − круг; 2 − обрабатываемая деталь; 3 − адиабатический стержень

На рис. 9.4 приняты следующие обозначения: l_1 – текущее значение толщины снимаемого слоя материала, м; l_2 – текущая глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м; $V_{кр}$ – скорость вращения круга, м/с.

Данное решение можно использовать для определения условий уменьшения температуры резания при финишной обработке по методу многопроходного шлифования. Однако для этого необходимо получить новые аналитические зависимости, позволяющие с единых позиций с учетом распределения тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки, сравнить различные варианты финишной об-

работки шлифованием по температурному критерию и научно обоснованно подойти к выбору наилучшего из них.

Для решения поставленной задачи рассмотрен предложенный в работах [175] упрощенный теоретический подход к определению температуры резания при шлифовании. В его основу положено описание распределения тепла в бесконечно тонких адиабатических стержнях, которыми условно представлен снимаемый припуск и которые расположены перпендикулярно направлению движения шлифовального круга (рис. 9.5). Установлено, что, согласно классическому решению дифференциального уравнения теплопроводности в полубесконечном стержне $\frac{\partial\theta(x,\tau)}{\partial\tau} = a \cdot \frac{\partial^2\theta(x,\tau)}{\partial x^2}$ для граничного $\left.\frac{\partial\theta}{\partial x}\right|_{x=0} = -\frac{1}{\lambda} \cdot q_0$ и начального $\theta\big|_{\tau=0} = 0$ условий с учетом безразмерной величины $z = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}$ температура $\theta(z)$ и плотность теплового потока $q(z)$ по глубине поверхностного слоя обрабатываемого материала непрерывно уменьшаются, асимптотически приближаясь к нулевому значению:

$$\theta(z) = 2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-z^2} - z \cdot (1 - \mathrm{erf}z)\right]; \qquad (9.17)$$

$$q(z) = q_0 \cdot (1 - \mathrm{erf}z), \qquad (9.18)$$

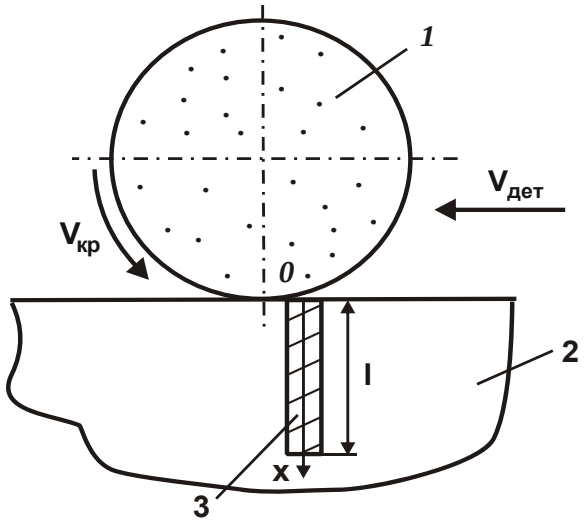


Рис. 9.5. Расчетная схема температуры резания при шлифовании:
1 – круг; 2 – деталь;
3 – адиабатический стержень

где x – координата, м;

τ – время, с;

$a = \lambda / (c_м \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности материала, м^2/с;

q_0 – плотность теплового потока при условии $x = 0$, Вт/м^2.

Как видно, в данном случае глубина проникновения тепла в поверхностный слой материала бесконечна и поэтому нельзя однозначно определить истинное значение нарушенного (дефектного с точки зрения теплового воздействия) слоя обрабатываемого

материала. В связи с этим предложен упрощенный теоретический подход [94] к определению температуры резания при шлифовании. Его суть состоит в том, что задается закон распределения плотности теплового потока по глубине поверхностного слоя обрабатываемого материала (рассматривая его в виде адиабатического стержня длиной Δx). Тогда в случае $q(x) = q_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{\Delta x}\right)$ с учетом граничного условия $\theta(x = \Delta x) = 0$ получено:

$$\theta(x) = -\frac{1}{\lambda} \cdot \int q(x) \cdot dx = \theta_{max_2} \cdot \left(1 - \frac{x}{\Delta x}\right)^2. \qquad (9.19)$$

Соответственно, максимальная температура резания при шлифовании определяется:

$$\theta(x = 0) = \theta_{max_2} = \frac{q_0}{\lambda} \cdot \frac{\Delta x}{2} = 1{,}225 \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau}. \qquad (9.20)$$

Температура резания при шлифовании и плотность теплового потока в зависимости от безразмерной величины z выражаются:

$$\theta(z) = 1{,}225 \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \cdot \overline{\theta}(z); \qquad (9.21)$$

$$q(z) = q_0 \cdot \overline{q}(z), \qquad (9.22)$$

где $\overline{\theta}(z) = (1 - 0{,}816 \cdot z)^2$;

$\overline{q}(z) = (1 - 0{,}816 \cdot z)$ – безразмерные функции температуры резания при шлифовании и плотности теплового потока.

Количество тепла Q_1, вошедшее в адиабатический стержень длиной Δx за время τ:

$$Q_1 = q_0 \cdot S \cdot \tau. \qquad (9.23)$$

Количество тепла Q_2, затрачиваемое на нагревание адиабатического стержня длиной Δx до температуры θ за время τ:

$$Q_2 = c_м \cdot \rho \cdot S \cdot \int_0^{\Delta x} \theta(x) \cdot dx, \qquad (9.24)$$

где S – площадь поперечного сечения адиабатического стержня, м.

Из условия равенства значений Q_1 и Q_1 (т.е. $Q_1 = Q_2$) установлена глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали

$$l_2 = \Delta x = 2{,}45 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}. \qquad (9.25)$$

В случае $q(x) = q_0$ с учетом граничного условия $\theta(x = \Delta x) = 0$ имеем:

$$\theta(x) = \theta_{max_3} \cdot \left(1 - \frac{x}{\Delta x}\right). \qquad (9.26)$$

Соответственно, максимальная температура резания при шлифовании определяется:

$$\theta(x = 0) = \theta_{max_3} = \frac{q_0}{\lambda} \cdot \Delta x = 1{,}414 \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\,. \qquad (9.27)$$

Температура резания при шлифовании в зависимости от безразмерной величины z выражается:

$$\theta(z) = 1{,}414 \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \cdot \bar{\theta}(z), \qquad (9.28)$$

где $\bar{\theta}(z) = (1 - 1{,}414 \cdot z)$ – безразмерная функция температуры.

Из условия $Q_1 = Q_2$ определена глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали

$$l_2 = \Delta x = 1{,}414 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\,. \qquad (9.29)$$

Установлено, что значения максимальной температуры резания при шлифовании, рассчитанные на основе зависимостей (9.17), (9.21) и (9.28), отличаются в пределах 15 % (рис. 9.6), т.е. незначительно. Поэтому полученное решение достаточно объективно отражает закономерности формирования температуры резания при шлифовании и может быть, наряду с уточненным решением (9.17), использовано для практических расчетов температуры резания при шлифовании.

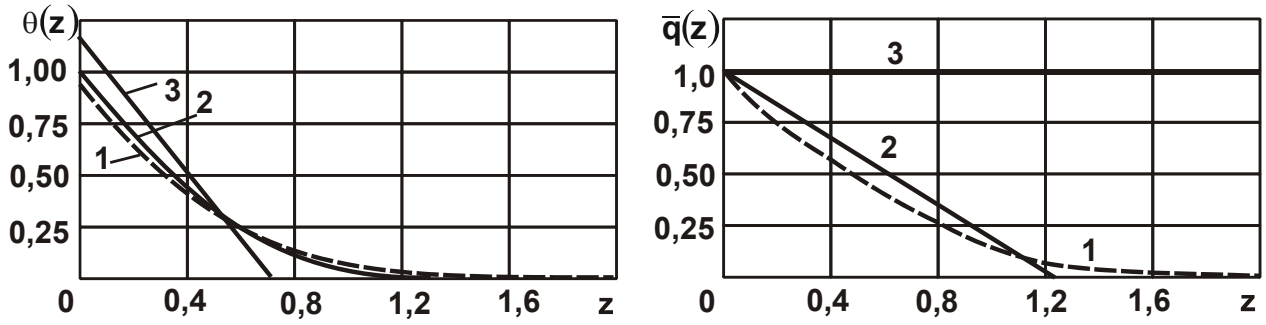


Рис. 9.6. Графики функций $\theta(z)$ (а) и $q(z)$ (б), описываемые зависимостями: 1 – (9.17) и (9.18); 2 – (9.21) и (9.22); 3 – (9.28) для условия $\sqrt{a \cdot \tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda} = 1$

Необходимо отметить, что данное решение получено из условия, что все тепло, образующееся при плоском шлифовании периферией

круга, уходит в обрабатываемую деталь. Чтобы учесть долю тепла, уходящего также в образующиеся стружки, общее количество тепла следует представить в виде двух составляющих, обусловленных отводом тепла из зоны резания в поверхностный слой обрабатываемой детали (W_1) и нагреванием стружек (W_2). Тогда уравнение баланса тепла примет вид:

$$W = W_1 + W_2. \qquad (9.30)$$

Рассмотрим первоначально случай 3 (рис. 9.6 [94]), когда плотность теплового потока не изменяется по глубине поверхностного слоя обрабатываемой детали. В этом случае максимальная температура резания при шлифовании определяется аналитической зависимостью (9.27), а глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали – зависимостью (9.29). Разрешая зависимость (9.27) относительно плотности теплового потока, получено:

$$q_0 = \frac{\lambda \cdot \theta_{max_3}}{1{,}414 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}. \qquad (9.31)$$

Для удобства расчетов предположим, что шлифовальный круг в процессе шлифования периодически останавливается и по схеме врезного шлифования в течение времени $\tau = \frac{l_{конт}}{V_{дет}} = \frac{\sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дет}}$ удаляет обрабатываемый материал, где $l_{конт} = \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}$ – длина контакта круга с обрабатываемой деталью, м; $R_{кр}$ – радиус круга, м (рис. 9.4).

Тогда количество тепла W_1, уходящего в обрабатываемую деталь в результате его теплопроводности, при плоском шлифовании периферией круга определится:

$$W_1 = q_0 \cdot F \cdot \tau = \frac{\lambda \cdot \theta_{max_3} \cdot F}{1{,}414} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{a}}, \qquad (9.32)$$

где $F = B \cdot l_{конт}$ – площадь контакта круга с обрабатываемой деталью, м^2;

B – ширина шлифования, м.

Количество тепла, уходящего в образующуюся стружку, равно

$$W_2 = c_м \cdot \rho \cdot F \cdot t \cdot \theta_{max_3}. \qquad (9.33)$$

Общее количество выделившегося при плоском шлифовании периферией круга тепла W равно работе резания: $A = \sigma \cdot \vartheta$, где σ − условное напряжение резания (энергоемкость обработки), н/м^2;

$\vartheta = F \cdot t$ – объем снимаемого материала за время $\tau = \frac{l_{конт}}{V_{дет}} = \frac{\sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дет}}$ контакта круга с адиабатическим стержнем, м^3. Тогда из условия $W = A = \sigma \cdot F \cdot t = W_1 + W_2$ с учетом $\tau = \frac{l_{конт}}{V_{дет}} = \frac{\sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дет}}$, имеем

$$\theta_{max_3} = \frac{\sigma}{c_м \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{a}{t \cdot V_{дет}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{2 \cdot t}}}\right)} = \frac{\sigma}{c_м \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(1 + 0{,}84 \cdot \sqrt{\frac{a}{t \cdot V_{дет}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{t}}}\right)}. \quad (9.34)$$

Если все образующееся при шлифовании тепло уходит в стружки, т.е. $W_1 = 0$, то зависимость для определения θ_{max_3} с учетом соотношения $W = W_2$ примет вид:

$$\theta_{max_3} = \frac{\sigma}{c_м \cdot \rho}. \quad (9.35)$$

Следовательно, первый множитель зависимости (9.34), равный $\sigma / c_м \cdot \rho$, определяет температуру нагрева образующихся стружек, а второй множитель – долю тепла, уходящего в обрабатываемую деталь. Это вытекает также из условия, что если все образующееся при шлифовании тепло уходит в обрабатываемую деталь, т.е. $W_2 = 0$, то зависимость для определения θ_{max_3} с учетом соотношения $W = W_1$ примет вид:

$$\theta_{max_3} = \frac{\sigma}{c_м \cdot \rho} \cdot \sqrt{\frac{V_{дет} \cdot t}{a} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{кр}}}}, \quad (9.36)$$

который соответствует зависимости (9.34) без учета первого слагаемого в знаменателе, равного единице и обусловленного наличием тепла, уходящего в образующиеся стружки.

Как видно, с увеличением глубины шлифования t температура резания θ_{max} увеличивается, асимптотически приближаясь к значению $\theta_{max} = \sigma / c_м \cdot \rho$. Выше показано, что значение температуры резания $\theta_{max} = \sigma / c_м \cdot \rho$ определяется условием полного перехода в стружки образующегося при шлифовании тепла, т.е. в этом случае отсутствует переход тепла в обрабатываемую деталь.

Такой же характер распределения тепла имеет место и с увеличением $V_{дет}$. Однако в этом случае происходит менее интенсивный

рост температуры резания. При условии $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$ с увеличением глубины шлифования t также происходит увеличение температуры резания, однако не столь существенно, т.к. глубина шлифования t входит в зависимость (9.36) со степенью 0,25.

Для исходных данных: $R_{кр} = 0{,}15$ м; $V_{дет} = 1$ м/с; $t = 0{,}01 \cdot 10^{-3}$ м; $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t = 600$ мм^2/мин$= 10^{-5}$ м^2/с; $a = 8{,}4 \cdot 10^{-6}$ м^2/с (шлифование стали ШХ15) второй множитель зависимости (9.34) принимает небольшое значение, равное 0,105. Поэтому наличие второго множителя в зависимости (9.34) позволяет уменьшить значения θ_{max_3}, что приводит в соответствие теорию и практику шлифования. Из этого можно сделать вывод о том, что основная часть образующегося при многопроходном шлифовании тепла уходит в обрабатываемую деталь, а в образующиеся стружки уходит небольшая часть тепла. В данном случае 89,5 % тепла уходит в обрабатываемую деталь, а 10,5 % – в образующиеся стружки.

Рассмотрим теперь случай 2, показанный на рис. 9.6 [94], когда плотность теплового потока по глубине поверхностного слоя обрабатываемой детали уменьшается по линейному закону. В этом случае максимальная температура резания при шлифовании определяется аналитической зависимостью (9.20). Разрешим ее относительно плотности теплового потока

$$q_0 = \frac{\lambda \cdot \theta_{max_2}}{1{,}225 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}. \qquad (9.37)$$

Тогда количество тепла, уходящего в обрабатываемую деталь W_1, определится:

$$W_1 = q_0 \cdot F \cdot \tau = \frac{\lambda \cdot \theta_{max_2} \cdot F}{1{,}225} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{a}}. \qquad (9.38)$$

Количество тепла, уходящего в образующуюся стружку, определяется зависимостью (9.33).

Из условия $W = \sigma \cdot F \cdot t = W_1 + W_2$ с учетом $\tau = \dfrac{\sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дет}}$, имеем

$$\theta_{max_2} = \frac{\sigma}{c_м \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(1 + 0{,}97 \cdot \sqrt{\dfrac{a}{t \cdot V_{дет}} \cdot \sqrt{\dfrac{R_{кр}}{t}}}\right)}. \qquad (9.39)$$

В количественном выражении отличие значений температуры резания при шлифовании, рассчитанных по зависимостям (9.34) и (9.39) не превышает 13 %. Это указывает на то, что характер изменения плотности теплового потока вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали мало влияет на характер изменения температуры вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали и ее абсолютные значения. Поэтому при расчете температуры резания при шлифовании можно использовать обе зависимости. С учетом доли тепла, уходящего в образующиеся стружки, расхождение значений температур резания, рассчитанных по двум зависимостям, будет небольшим – в пределах 10 %, что вполне приемлемо для практических расчетов.

Вместе с тем, отличие значений глубины l_2 проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали для двух случаев, исходя из зависимостей (9.25) и (9.29), будет больше. Поэтому важно экспериментально оценить достоверность полученных теоретических решений на основе использования приведенных в научно-технической литературе экспериментальных значений l_2.

На рис. 9.7 [199] показан характер изменения температуры по глубине поверхностного слоя обрабатываемой детали, изготовленной из сплава ЖС6К, при плоском шлифовании для следующих условий обработки: $a = 3{,}73 \cdot 10^{-6}$ м^2/с; $V_{дет} = 0{,}1$ м/с; $R_{кр} = 0{,}3$ м. Как видно, графики изменения температуры, приведенные на рис. 9.6 и рис. 9.7, примерно одинаковые, что свидетельствует о соответствии теоретических и экспериментальных данных.

Параметр l_2 следует определить на основе использования аналитических зависимостей (9.29) и (9.25), представляя их с учетом $\tau = \dfrac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дет}}$ для плоского шлифования в виде:

$$l_2 = 1{,}414 \cdot \sqrt{a \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дет}}}; \qquad (9.40)$$

$$l_2 = 2{,}45 \cdot \sqrt{a \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дет}}}. \qquad (9.41)$$

В табл. 9.2 и в табл. 9.3 приведены рассчитанные по зависимостям (9.40) и (9.41) значения l_2 для разных глубин шлифования t.

Таблица 9.2

Расчетные значения параметра l_2

t, мм	0,01	0,02	0,03
l_2, мм	0,606	0,721	0,798

Таблица 9.3

Расчетные значения параметра l_2

t, мм	0,01	0,02	0,03
l_2, мм	1,05	1,25	1,382

Значения l_2, приведенные в табл. 9.3, незначительно отличаются от экспериментальных значений (рис. 9.7 [199]) – в пределах 10 – 15 %. Это свидетельствует о возможности использования зависимости (9.41) для расчета значения l_2, а, следовательно, и зависимостей (9.39) и (9.34) для расчета максимальной температуры резания при шлифовании.

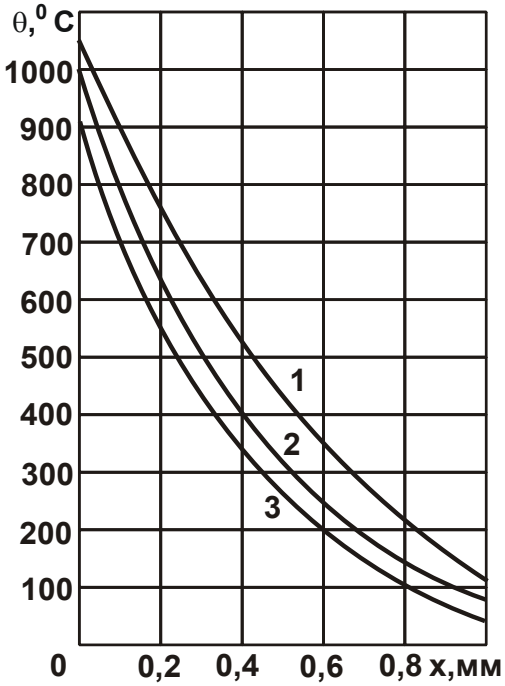


Рис. 9.7. Кривые распределения температуры по сечению тела в зависимости от глубины шлифования сплава ЖС6К:
1 – t = 0,03 мм; 2 – t = 0,02 мм; 3 – t = 0,01 мм ($V_{дет}$ = 0,1 м/с) [199]

Исходя из зависимости (9.39), основным условием уменьшения температуры резания при шлифовании θ_{max_2} следует рассматривать уменьшение условного напряжения резания σ, которое оказывает

наибольшее влияние на θ_{max_2}. При заданной удельной производительности обработки $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$, согласно зависимости (9.39), уменьшить температуру резания θ_{max_2} можно уменьшением глубины шлифования t.

9.1.4. Установление взаимосвязей температуры резания с параметрами теплового процесса при шлифовании

Для определения характера распределения тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки, следует воспользоваться уравнением баланса тепла: $W = W_1 + W_2$. После несложных преобразований данное уравнение принимает вид:

$$\sigma \cdot F \cdot t = \frac{\lambda \cdot \theta_{max} \cdot F}{1{,}414} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{a}} + c_м \cdot \rho \cdot F \cdot t \cdot \theta_{max} \qquad (9.42)$$

или с учетом $\tau = \frac{l_{конт}}{V_{дет}} = \frac{\sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дет}}$:

$$1 = \frac{1}{\left(1 + 1{,}19 \cdot \sqrt{\frac{t \cdot V_{дет}}{a} \cdot \sqrt{\frac{t}{R_{кр}}}}\right)} + \frac{1}{\left(1 + 0{,}84 \cdot \sqrt{\frac{a}{t \cdot V_{дет}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{t}}}\right)}. \qquad (9.43)$$

Обозначая $u = 1{,}19 \cdot \sqrt{\frac{V_{дет} \cdot t}{a} \cdot \sqrt{\frac{t}{R_{кр}}}}$, уравнение (9.43) принимает вид:

$$1 = \frac{1}{(1+u)} + \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{u}\right)}. \qquad (9.44)$$

По физической сути, безразмерная функция u определяет безразмерную температуру шлифования, определяемую зависимостью (9.36), полученную из условия $W_2 = 0$, т.е. из условия, что все образующееся при шлифовании тепло уходит в обрабатываемую деталь. С учетом тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки, температура резания θ_{max}, определяемая зависимостью (9.34), может быть представлена:

$$\theta_{max} = \frac{\sigma}{c_м \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{u}\right)}. \qquad (9.45)$$

В табл. 9.4 и на рис. 9.8,а показан характер изменения безразмерной функции $\theta_{max} \cdot \frac{c_м \cdot \rho}{\sigma}$, определяемой зависимостью (9.45), для различных значений безразмерной функции u.

Таблица 9.4

Расчетные значения $\theta_{max} \cdot \frac{c_м \cdot \rho}{\sigma}$, первого W_1 и второго W_2 (в относительных величинах) слагаемых уравнения (9.44)

u	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20
$\theta_{max} \cdot \frac{c_м \cdot \rho}{\sigma}$	0	0,333	0,5	0,667	0,75	0,8	0,833	0,91	0,952
W_1	1	0,667	0,5	0,333	0,25	0,2	0,167	0,09	0,048
W_2	0	0,333	0,5	0,667	0,75	0,8	0,833	0,91	0,952

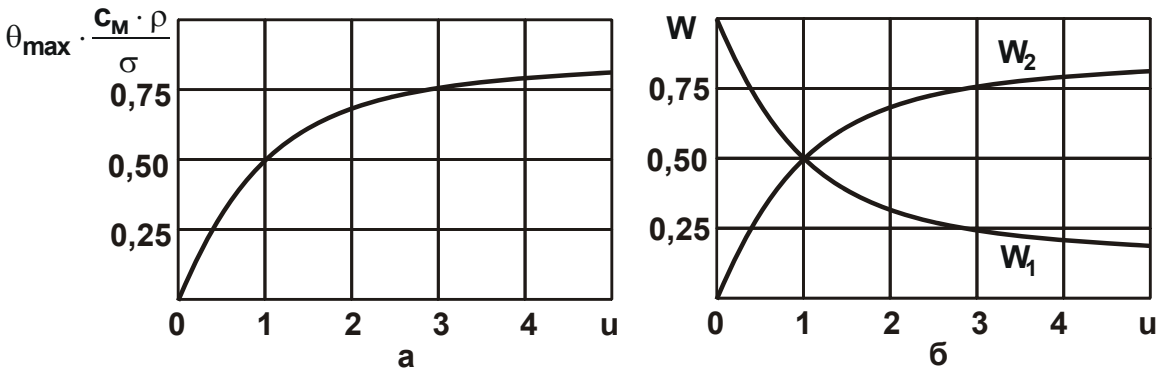


Рис. 9.8. Зависимости безразмерной функции $\theta_{max} \cdot \frac{c_м \cdot \rho}{\sigma}$ (а), значений W_1 и W_2 (в относительных величинах) (б) от безразмерной функции u

Анализируя уравнение (9.44), видно, что первое и второе слагаемые являются взаимопротивоположными.

В табл. 9.4 и на рис. 9.8,б приведены расчетные значения первого W_1 и второго W_2 (в относительных величинах) слагаемых уравнения (9.44) в зависимости от безразмерной функции u. Первое слагаемое с увеличением безразмерной функции u непрерывно уменьшается, асимптотически приближаясь к нулевому значению, а второе слагаемое, наоборот, непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице. При этом значения W_2 идентичны значениям безразмерной функции $\theta_{max} \cdot \frac{c_м \cdot \rho}{\sigma}$, т.е. характер изменения

W_2 и $\theta_{max} \cdot \frac{c_м \cdot \rho}{\sigma}$ идентичен в зависимости от изменения безразмерной функции u. Следовательно, доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, с увеличением безразмерной функции u уменьшается, а доля тепла, уходящего в образующиеся при шлифовании стружки, увеличивается.

Увеличение безразмерной функции u, согласно принятого обозначения $u = 1{,}19 \cdot \sqrt{\frac{V_{дет} \cdot t}{a}} \cdot \sqrt{\frac{t}{R_{кр}}}$, предполагает увеличение глубины шлифования t, скорости детали $V_{дет}$ и, соответственно, удельной производительности обработки $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$. Поэтому, чем больше параметры t, $V_{дет}$ и $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$, тем меньше доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и больше доля тепла, уходящего в образующиеся стружки.

При этом глубина l_2 проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, с учетом $\tau = \frac{l_{конт}}{V_{дет}} = \frac{\sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дет}}$, определяемая зависимостью

$$l_2 = 1{,}414 \cdot \sqrt{a \cdot \tau} = 1{,}414 \cdot \sqrt{a \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дет}}}, \qquad (9.46)$$

с увеличением глубины шлифования t увеличивается, а с увеличением скорости детали $V_{дет}$ уменьшается. Следовательно, увеличение скорости детали $V_{дет}$ приводит к одновременному уменьшению доли тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и глубины l_2 проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, тогда как увеличение глубины шлифования t приводит к уменьшению доли тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и увеличению глубины l_2. Поэтому увеличение скорости детали $V_{дет}$ в большей степени способствует уменьшению теплового воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали и повышению качества обработки, чем увеличение глубины шлифования t. Это означает, что с точки зрения уменьшения теплового воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали и повышения качества обработки целесообразно ис-

пользовать схему многопроходного шлифования, характеризующегося увеличенными значениями скорости детали $V_{дет}$ и уменьшенными значениями глубины шлифования t. Хотя и схема глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали $V_{дет}$ характеризуется приблизительно такой же интенсивностью теплового воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали. Это связано с тем, что, согласно уравнению (9.43), доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, при условии $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t = const$ с увеличением глубины шлифования t уменьшается, а глубина l_2 проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали увеличивается.

В этом случае одно и то же количество тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, распространяется на большую глубину поверхностного слоя обрабатываемой детали. Очевидно, это не создает температурных перегрузок и не вызывает появления температурных дефектов в поверхностном слое обрабатываемой детали, а всего лишь указывает на большую глубину его прогревания.

Как показано выше, с увеличением безразмерной функции u температура резания θ_{max} и доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, увеличиваются, а доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, уменьшается (рис. 9.8).

Следовательно, рост температуры резания θ_{max} обусловлен увеличением доли тепла, уходящего в образующиеся стружки, что связано с увеличением параметров t, $V_{дет}$ и $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$, входящих в уравнение (9.43).

В табл. 9.5 и табл. 9.6 приведены рассчитанные по зависимости $u = 1{,}19 \cdot \sqrt{\frac{V_{дет} \cdot t}{a}} \cdot \sqrt{\frac{t}{R_{кр}}}$ значения безразмерной функции u для широких диапазонов изменения удельной производительности обработки $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t = 600 \ldots 1\,200$ мм^2/мин $= (1 \ldots 2) \cdot 10^{-5}$ м^2/с и глубины шлифования $t = (0{,}01 \ldots 1{,}0) \cdot 10^{-3}$ м при плоском шлифовании стали ШХ15 (исходные данные: $R_{кр} = 0{,}15$ м; $V_{дет} = 1$ м/с; $a = 8{,}4 \cdot 10^{-6}$ м^2/с), а также расчетные значения первого W_1 и второго W_2 (в %) слагаемых уравнения (9.44).

Таблица 9.5

Расчетные значения безразмерной функции u, первого W_1 и второго W_2 (в %) слагаемых уравнения (9.44) для $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t = 600$ мм^2/мин $= 10^{-5}$ м^2/с

$t \cdot 10^{-6}$, м	0	10	50	100	500	1000
u	0	0,117	0,175	0,21	0,311	0,37
W_1, %	100	89,5	85,1	82,6	76,3	73
W_2, %	0	10,5	14,9	17,4	23,7	27

Таблица 9.6

Расчетные значения безразмерной функции u, первого W_1 и второго W_2 (в %) слагаемых уравнения (9.44) для $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t = 1200$ мм^2/мин $= 2 \cdot 10^{-5}$ м^2/с

$t \cdot 10^{-6}$, м	0	10	50	100	500	1 000
u	0	0,165	0,247	0,297	0,44	0,523
W_1, %	100	85,8	80	77,1	69,4	65,7
W_2, %	0	14,2	20	22,9	30,6	34,3

Как видно, безразмерная функция u увеличивается с увеличением глубины шлифования t, принимая относительно небольшие значения, меньшие 1. Следовательно, температура резания значительно меньше максимально возможной температуры $\theta_{max} \cdot \frac{c_м \cdot \rho}{\sigma} = 1$ (рис. 9.8,а). Это означает, что температура резания для действующих процессов шлифования с увеличением глубины шлифования t или скорости детали $V_{дет}$ будет непрерывно увеличиваться, не достигая максимального значения. Для его достижения необходимо существенно увеличить глубину шлифования t, например, до значений 100 мм и более при заданном значении $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$. Тогда безразмерная функция u, согласно зависимости $u = 1{,}19 \cdot \sqrt{\frac{V_{дет} \cdot t}{a}} \cdot \sqrt{\frac{t}{R_{кр}}}$, увеличится до значения 3,162 (при $t = 100$ мм), а температура резания станет равной $\theta_{max} \cdot \frac{c_м \cdot \rho}{\sigma} = 0{,}76$. Как видно, реализовать на практике максималь-

ное значение температуры резания фактически невозможно, даже многократно увеличивая глубину шлифования t.

Учитывая то, что для действующих процессов шлифования безразмерная функция u принимает значения меньше единицы, с достаточной для практики точностью зависимость (9.45) можно упростить и привести к виду:

$$\theta_{max} = \frac{\sigma}{c_м \cdot \rho} \cdot u. \qquad (9.47)$$

В данном случае температура резания θ_{max} при шлифовании прямо пропорциональна безразмерной функции u.

Из табл. 9.5 и табл. 9.6 следует, что значения первого W_1 слагаемого уравнения (9.44) уменьшаются с увеличением глубины шлифования t, а значения второго W_2 слагаемого, наоборот, увеличиваются, однако в относительно небольших пределах. Из этого можно сделать вывод о том, что основная часть образующегося тепла уходит в обрабатываемую деталь, а в образующиеся стружки уходит небольшая часть тепла. С увеличением удельной производительности обработки $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$ доля тепла, уходящая в образующиеся стружки, возрастает, однако не столь существенно. Поэтому в условиях многопроходного шлифования с достаточной для практики точностью можно считать, что образующееся при шлифовании тепло фактически полностью уходит в обрабатываемую деталь. В связи с этим, в упрощенных расчетах температуры резания θ_{max} при шлифовании тепло, уходящее в образующиеся стружки, можно не рассматривать.

В работе [92] приведено уточненное уравнение для определения температуры резания θ при шлифовании:

$$-\ln(1-z) - z = \frac{V_{дет} \cdot t}{a} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}, \qquad (9.48)$$

где $z = \dfrac{\theta}{\left(\dfrac{\sigma}{c_м \cdot \rho}\right)}$ – относительная величина температуры при шлифовании, изменяющаяся в пределах 0 … 1.

С учетом $u = 1{,}19 \cdot \sqrt{\dfrac{V_{дет} \cdot t}{a}} \cdot \sqrt{\dfrac{t}{R_{кр}}}$ уравнение (9.48) принимает вид:

$$-\ln(1-z)-z=u^2. \qquad (9.49)$$

Полученная аналитическая зависимость (9.34) аналогична уравнению (9.49), рассматривая ее в виде:

$$\theta=\frac{\sigma}{c_м\cdot\rho}\cdot z, \qquad (9.50)$$

где
$$z=\frac{1}{\left(1+0{,}84\cdot\sqrt{\frac{a}{t\cdot V_{дет}}\cdot\sqrt{\frac{R_{кр}}{t}}}\right)}=\frac{1}{\left(1+\frac{1}{u}\right)}. \qquad (9.51)$$

В уравнении (9.47) и зависимости (9.48) величина z является функцией одного аргумента $u=1{,}19\cdot\sqrt{\frac{V_{дет}\cdot t}{a}\cdot\sqrt{\frac{t}{R_{кр}}}}$.

Согласно полученного решения (9.51), величина z описывается простой функцией, а согласно известного решения (9.49) – достаточно сложным уравнением, требующим численных расчетов. Очевидно, разрешить данное уравнение относительно неизвестной величины z в общем виде сложно. Это требует промежуточных вычислений величины z, что затрудняет теоретический анализ температуры резания при шлифовании θ.

В связи с этим, гораздо большими возможностями располагает полученное решение (9.51), в котором величина z явно выражена через функцию u и, соответственно, параметры режима шлифования и другие условия обработки.

Учитывая важность полученного решения, проведем его количественное сравнение с известным решением (9.49) для следующих исходных данных: обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8 ($\lambda=50$ Вт/(м·К); $c_м=175{,}9$ Дж/(кг·К); $\rho=15\cdot10^3$ кг/м^3; $a=18{,}95\cdot10^{-6}$ м^2/с); $R_{кр}=0{,}15$ м; $V_{дет}=0{,}5$ м/с. Глубина шлифования t изменяется в пределах $t=(0{,}02\ldots0{,}1)\cdot10^{-3}$ м (табл. 9.7).

Таблица 9.7

Расчетные значения относительной величины температуры z, полученные на основе зависимости (9.51) и уравнения (9.49)

$t\cdot10^{-3}$, м	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
z по зависимости (4.51)	0,085	0,135	0,174	0,2	0,237
z по уравнению (4.49)	0,09	0,15	0,19	0,24	0,27

Как следует из табл. 9.7, с увеличением глубины шлифования t относительная величина температуры z увеличивается и принимает для двух случаев значения, отличающиеся в пределах 10 … 15 %, что вполне приемлемо для практических расчетов.

Необходимо отметить, что значения z, рассчитанные по зависимости (9.51), всегда меньше значений z, рассчитанных на основе уравнения (9.49). Следовательно, используя упрощенную зависимость (9.51):

$$z = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{u}\right)} \approx u, \qquad (9.52)$$

которая получена без учета тепла, уходящего в образующиеся стружки, можно добиться более высокой сходимости значений z, рассчитанных на основе известного уравнения (9.49) и полученной зависимости (9.52).

Для сравнения в табл. 9.8 приведены расчетные значения z, полученные на основе зависимости (9.52) и уравнения (9.49).

Таблица 9.8

Расчетные значения относительной величины температуры z, полученные на основе зависимости (9.52) и уравнения (9.49)

$t \cdot 10^{-3}$, м	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
z по зависимости (9.52)	0,093	0,156	0,217	0,263	0,31
z по уравнению (9.49)	0,09	0,15	0,19	0,24	0,27

В данном случае значения z, рассчитанные по зависимости (9.52), превосходят значения z, рассчитанные по уравнению (9.49), в пределах 13 %. Следовательно, с достаточной для практики точностью расчеты относительной величины температуры z могут быть произведены как по зависимости (9.51), так и по зависимости (9.52). В одном случае они превосходят значения z, полученные на основе известного решения, а во втором случае, наоборот, они меньше. Однако их расхождение не превышает 15 %. Поэтому для практических расчетов относительной величины температуры z и температуры резания при шлифовании θ могут быть использованы обе зависимости (9.51) и (9.52), которые в отличие от уравнения (9.49) позволяют в явном виде определить значения z и θ.

9.1.5. Определение условий уменьшения температуры резания при шлифовании и повышения качества обработки

Учитывая, что при шлифовании, в отличие от процесса резания лезвийным инструментом, основная часть образующегося тепла уходит в обрабатываемую деталь, температура резания может быть определена на основе упрощенной аналитической зависимости (9.12), которая после преобразования принимает вид:

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_м \cdot \rho \cdot \lambda}} = \sigma \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_м \cdot \rho \cdot \lambda}}. \qquad (9.53)$$

Как видно, наибольшее влияние на температуру резания оказывает плотность теплового потока $q = \sigma \cdot V_{рез}$ за счет изменения параметров σ и $V_{рез}$, т.е. чем больше силовая напряженность процесса резания при шлифовании (определяемая параметром σ) и производительность обработки (определяемая параметром $V_{рез}$), тем больше температура резания θ.

Время контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем τ меньше влияет на температуру резания θ, однако, как будет показано в дальнейшем, является чрезвычайно важным параметром в формировании температуры резания при шлифовании и условий ее уменьшения.

Представляя $V_{рез} = t/\tau$, зависимость (9.53) выразится:

$$\theta = \sigma \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2}{c_м \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{\tau}}. \qquad (9.54)$$

В данном случае уменьшить температуру резания θ можно уменьшением параметров σ, t и увеличением времени контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем τ, например, за счет применения шлифования торцом круга, которое характеризуется увеличенной длиной контакта круга с фиксированным адиабатическим стержнем. Этим объясняется высокая эффективность применения на различных операциях шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов торцовых кругов, которые, исходя из зависимости (9.54), за счет увеличения времени τ позволяют добиться значительного снижения температуры резания при шлифовании и, соответственно, повышения качества обрабатываемых поверхностей.

Такой эффект шлифования можно достичь при условии образования на рабочей поверхности круга заборного конуса, обеспечивающего равномерное распределение съема обрабатываемого материала вдоль всей рабочей поверхности круга. При отсутствии заборного конуса на круге съем обрабатываемого материала будет производить лишь начальный участок круга и время τ уменьшится. Согласно зависимости (9.54), это приведет к увеличению температуры резания θ и указанный выше эффект шлифования торцом круга будет отсутствовать. В итоге процесс торцового шлифования мало чем будет отличаться от процесса обычного шлифования периферией круга.

Необходимо отметить, что глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали (т.е. в адиабатический стержень) $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_м \cdot \rho}}$ с увеличением времени контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем τ увеличивается. Однако при этом градиент температуры $\mathrm{grad}\,\theta$, исходя из зависимости (9.12)

$$\mathrm{grad}\,\theta = \frac{\theta}{l_2} = \frac{q}{\lambda} = \frac{\sigma \cdot V_{рез}}{\lambda}, \qquad (9.55)$$

уменьшается с увеличением времени τ, так как $V_{рез} = t/\tau$ и, соответственно, $q = \sigma \cdot V_{рез} = \sigma \cdot t/\tau$. Тогда

$$\mathrm{grad}\,\theta = \frac{\sigma \cdot t}{\lambda \cdot \tau}. \qquad (9.56)$$

Как видно, основными условиями уменьшения градиента температуры $\mathrm{grad}\,\theta$ и повышения качества обработки являются уменьшение параметров σ, t и увеличение времени τ. Собственно этим и обусловлена эффективность применения шлифования торцом круга взамен шлифования периферией круга с целью обеспечения высококачественной обработки.

При плоском шлифовании периферией круга скорость $V_{рез}$ перерезания шлифовальным кругом адиабатического стержня определяется из условия [121]:

$$\tau = \frac{t}{V_{рез}} = \frac{l_{конт}}{V_{дет}}, \qquad (9.57)$$

где $l_{конт} = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}$ – длина дуги контакта круга с деталью, м.

Откуда

$$V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}. \qquad (9.58)$$

Соответственно,

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c_м \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}} \cdot \frac{Q}{B}}, \qquad (9.59)$$

где $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ – производительность обработки, м^3/с;

B – ширина шлифования, м.

Очевидно, при шлифовании периферией круга время τ меньше, чем при шлифовании торцом круга. Поэтому будет больше градиент температуры gradθ и, соответственно, температура резания, что повышает вероятность образования на обрабатываемой поверхности температурных дефектов.

К такому же результату приходим, анализируя зависимость (9.54) и считая, что время τ при шлифовании периферией круга меньше, чем при шлифовании торцом круга. В этом случае температура резания при шлифовании увеличивается, что может привести к ухудшению качества обрабатываемой поверхности.

Исходя из зависимости (9.59), при фиксированной производительности обработки Q добиться уменьшения температуры резания θ можно главным образом за счет уменьшения условного напряжения резания (энергоемкости обработки) σ и в значительно меньшей мере – за счет применения многопроходного шлифования, осуществляя обработку с небольшой глубиной шлифования t и увеличенной скоростью детали $V_{дет}$. Применение глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали приводит к увеличению температуры резания θ, поэтому основным условием ее уменьшения в этих условиях следует рассматривать уменьшение σ путем применения шлифовальных кругов, характеризующихся высокой режущей способностью. Поскольку параметр σ входит в зависимость (9.59) с большей степенью, чем температура резания θ, то за счет уменьшения σ можно также добиться и увеличения производительности обработки при глубинном шлифовании. Этим подтверждается высокая эффективность применения глубинного шлифования кругами из синтетических сверхтвердых материалов при обработке деталей, изготовленных из материалов с

повышенными физико-механическими свойствами [121; 196]. В особой мере это относится к алмазным кругам на прочных металлических связках, работающим в режиме непрерывной (или периодической) электроэрозионной правки, которая обеспечивает высокую режущую способность кругов и, соответственно, уменьшение параметра σ и температуры резания θ. Кроме того, эти круги обладают высокой износостойкостью и позволяют существенно повысить производительность обработки, в частности, за счет применения схемы глубинного шлифования, не ухудшая качество обрабатываемой поверхности.

Как известно, уменьшить условное напряжение резания (энергоемкость обработки) σ при шлифовании можно различными путями: обеспечением работы шлифовального круга в режиме самозатачивания; применением эффективных методов непрерывной (или периодической) правки круга для поддержания в процессе шлифования его высокой режущей способности; уменьшением интенсивности трения в зоне шлифования за счет применения импрегнированных абразивных кругов и нанесением на рабочую поверхность круга твердых смазок; применением прерывистых кругов и т.д.

В последнем случае в результате ударного характера взаимодействия прерывистого круга с обрабатываемой деталью на рабочих выступах прерывистого круга образуется фронтальная поверхность с развитым режущим рельефом, что способствует снижению силовой напряженности процесса шлифования [196]. Например, абразивные круги, работающие в режиме затупления, в условиях прерывистого шлифования могут длительное время эффективно работать в режиме самозатачивания, обеспечивая снижение силы и температуры резания, повышение качества и производительности обработки. Кроме того, в момент прохождения впадины прерывистого круга в процессе шлифования происходит охлаждение обрабатываемой поверхности, что обеспечивает снижение температуры резания при шлифовании почти в 2 раза и создает эффект повышения качества обработки (исключаются прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты) и, соответственно, производительность обработки. Поэтому прерывистые круги получили особое применение в случаях, когда традиционные методы шлифования не обеспечивают высококачественную обработку, например, на операциях зубошлифования, при шлифовании и заточке твердосплавных режущих инструментов, при обработке

и разрезке неметаллических материалов высокой твердости (мрамора, гранита, различных строительных материалов и т.д.). Как показывает практика, их применение в этих случаях позволяет повысить качество и производительность обработки.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при прерывистом торцовом шлифовании твердосплавных пластин Т30К4, используемых в многолезвийных режущих лезвийных инструментах, производительность обработки может быть увеличена до 5 раз при обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей [131]. Эффект шлифования был достигнут за счет применения прерывистого алмазного круга формы 12А2 45^0 $150\times42\times10\times5\times32$ АС6 160/125 4 В1-13 (производства ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, рис. 9.9), взамен обычного алмазного торцового круга, что позволило снизить температуру резания при шлифовании θ в соответствии с зависимостью (9.71) и градиент температуры $\mathrm{grad}\theta = \mathrm{q}/\lambda$ благодаря уменьшению плотности теплового потока $\mathrm{q} = \sigma \cdot \mathrm{V}_{\text{рез}}$ и времени контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом τ.

Рис. 9.9. Прерывистый алмазный круг

Уменьшение плотности теплового потока $\mathrm{q} = \sigma \cdot \mathrm{V}_{\text{рез}}$ в этом случае достигнуто, главным образом, за счет уменьшения условного напряжения резания (энергоемкости обработки) σ вследствие периодического прерывания процесса торцового шлифования и ударного характера взаимодействия алмазного прерывистого круга с обрабатываемой деталью, что обеспечивает непрерывное восстановление режущих свойств алмазного круга и поддержание его высокой режущей способности в процессе шлифования.

Если обратиться к зависимости (9.55) для определения градиента температуры $\mathrm{grad}\theta = \mathrm{q}/\lambda$, то видно, что при прерывистом шлифовании, вследствие уменьшения времени контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем τ за счет отсутствия процесса резания в момент прохождения впадины прерывистого круга, скорость $\mathrm{V}_{\text{рез}}$ перерезания адиабатического стержня рабочим выступом прерывистого

круга увеличивается. Очевидно, это приведет к увеличению градиента температуры $\mathrm{grad}\theta = q/\lambda$ и температуры резания в соответствии с зависимостью (9.53). Однако при этом, как показано выше, имеет место уменьшение условного напряжения резания (энергоемкости обработки) σ, что с избытком компенсирует увеличение скорости $V_{рез}$ и создает условия уменьшения градиента температуры $\mathrm{grad}\theta = q/\lambda$ и температуры резания [126]. Поэтому увеличение градиента температуры $\mathrm{grad}\theta = q/\lambda$ и температуры резания при прерывистом шлифовании может наблюдаться лишь в начальный момент обработки при использовании вновь заправленных прерывистого и обычного (сплошного) шлифовальных кругов, когда значения условного напряжения резания (энергоемкости обработки) σ приблизительно одинаковы.

Это подтверждается экспериментальными данными, показанными на рис. 9.10 [196]. С течением времени обработки режущая способность обычного шлифовального круга снижается, а прерывистого круга, наоборот, повышается в связи с ударным характером его контакта с обрабатываемым материалом, по сути, не требующим применения процесса правки. В результате градиент температуры $\mathrm{grad}\theta = q/\lambda$ и температура резания при прерывистом шлифовании стабилизируются во времени, а при шлифовании обычным кругом – увеличиваются, вызывая снижение производительности и качества обработки.

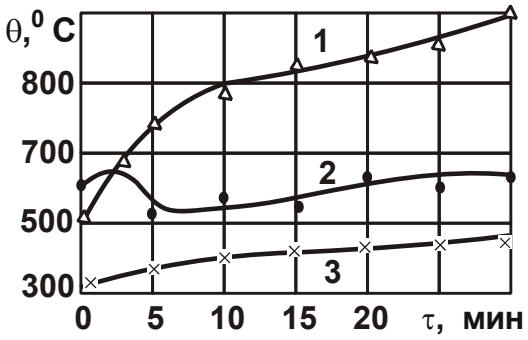


Рис. 9.10. Зависимость температуры в зоне контакта от времени шлифования образцов из стали 40Х3СМВФЮ обычным (1) и прерывистым (2) кругами Э9А40СМ2К, лентой (3) СТЭБ 40 ($V_{кр}$ =38 м/с; t =0,05 мм; $V_{дет}$ =7,5 м/мин)

Импрегнирование абразивных кругов, работающих в условиях шлифования высокоточных деталей авиационной техники, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами, также показало положительные результаты с точки зрения повышения качества и производительности обработки. За счет снижения интенсивности трения в зоне шлифования и повышения режущей способно-

сти абразивного круга достигнуто повышение качества обработки деталей, которые в процессе обычного шлифования абразивными кругами подвергаются интенсивному тепловому воздействию с образованием на обрабатываемых поверхностях деталей различных температурных дефектов.

На основе проведеннях теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно обоснованные рекомендации по выбору оптимальных условий высококачественной финишной механической обработки, созданы эффективные технологические процессы плоского и круглого шлифования, доводки абразивными пастами высокоточных деталей. Это позволило исключить температурные дефекты обработки и обеспечить твердость обрабатываемой поверхности, близкую к исходному значению, при одновременном увеличении производительности обработки, сокращении потребления режущих инструментов (шлифовальных кругов) и снижении трудоемкости последующих операций доводки свободным абразивом.

9.2. Теоретическое определение технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке

9.2.1. Закономерности формирования и условия уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании

При изготовлении высокоточных деталей из труднообрабатываемых материалов постоянно возникают проблемы обеспечения высоких показателей шероховатости поверхности на операциях шлифования. Это связано с тем, что в условиях традиционно применяемой обработки свободным абразивом происходит шаржирование абразивных зерен в обрабатываемую поверхность. Поэтому с целью исключения данного явления и повышения качества обработки, например, высокоточных деталей гидроаппаратуры, а также снижения трудоемкости обработки, рекомендуется вместо процессов обработки свободным абразивом применять процессы обработки инструментом со связанным абразивом (шлифование, хонингование и т.д.) или лезвийный инструмент. Естественно, это требует обеспечения при шлифовании таких же пока-

зателей шероховатости поверхности, как и при обработке свободным абразивом, что является трудноразрешимой задачей. В успешном решении этой задачи важная роль принадлежит совершенствованию технологий шлифования за счет применения новых характеристик абразивных кругов, обладающих высокой режущей способностью и одновременно обеспечивающих повышение чистоты обработки. Как показывает практика прецизионного шлифования, добиться высоких показателей шероховатости поверхности можно путем снижения разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга. Однако теоретических решений, позволяющих обосновать закономерности формирования шероховатости поверхности в этих условиях, фактически нет в научно-технической литературе. Поэтому задачу выбора оптимальных условий обработки и характеристик абразивных кругов по критерию наименьшей шероховатости поверхности на основе снижения разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности круга следует рассматривать актуальной.

Необходимо отметить, что проблеме снижения шероховатости поверхности на операциях шлифования посвящены работы [4; 69; 153], разработан теоретико-вероятностный подход [53; 109; 173], позволяющий с высокой степенью точности описать сложные закономерности формирования шероховатости при шлифовании. Благодаря этим работам появилась возможность обоснованного выбора оптимальных режимов шлифования и характеристик круга с учетом ограничения по шероховатости обработки. Дальнейшим развитием теоретико-вероятностного подхода при шлифовании стали работы [87; 99], используя которые можно решить задачу обоснования влияния разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга на шероховатость обработки и определить оптимальные условия шлифования по критерию наименьшей шероховатости обработки. В связи с этим, решение данной задачи требует проведения теоретических исследований закономерностей формирования шероховатости поверхности при шлифовании как с учетом, так и без учета разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга [127].

Для решения поставленной задачи следует воспользоваться зависимостью, определяющей параметр шероховатости поверхности R_{max} при врезном шлифовании прямолинейной детали, движущейся по нормали к рабочей поверхности круга (рис. 9.3) [99]:

$$R_{max} = \sqrt[3]{\frac{6{,}75 \cdot b \cdot V_{дет}}{k \cdot V_{кр}}}, \qquad (9.60)$$

где b – максимальная высота выступания режущих зерен над уровнем связки круга, м;

k – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности круга, шт./м^2.

Параметры b и k для алмазного круга определяются [4]:

$$b = (1-\varepsilon) \cdot \overline{X}; \qquad (9.61)$$

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot (1-\varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \overline{X}^2}, \qquad (9.62)$$

где m – объемная концентрация зерен круга (для 100 %-й концентрации алмазного круга – $m = 100$);

$\overline{X}$ – зернистость круга, м;

$(1-\varepsilon)$ – безразмерная величина, определяющая степень выступания зерен над уровнем связки круга, изменяется в пределах 0 … 0,5.

Подставляя зависимости (9.61) и (9.62) в (9.60), получено:

$$R_{max} = \overline{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{450 \cdot \pi \cdot V_{дет}}{m \cdot V_{кр}}}. \qquad (9.63)$$

Из зависимости (9.63) вытекает, что наибольшее влияние на параметр R_{max} оказывает зернистость круга $\overline{X}$. Поэтому добиться существенного уменьшения параметра R_{max} можно, прежде всего, за счет уменьшения зернистости круга $\overline{X}$. Уменьшить R_{max} можно увеличением m, $V_{кр}$ и уменьшением $V_{дет}$.

Зависимость (9.60) получена с учетом вероятностного участия зерен в резании и разновысотного расположения их на рабочей поверхности круга. Очевидно, при этом в резании будут участвовать лишь наиболее выступающие над уровнем связки зерна. Их количество относительно небольшое. Поэтому и шероховатость обработанной поверхности при шлифовании принимает, как правило, достаточно большие значения.

Следовательно, уменьшение разновысотности расположения вершин зерен над уровнем связки круга и, соответственно, увеличение количества одновременно работающих зерен является важным фактором уменьшения шероховатости поверхности.

Добиться увеличения количества одновременно работающих зерен в процессе шлифования можно, как отмечалось выше, увеличением их объемной концентрации в круге m. Можно также использовать относительно мягкие связки круга, обеспечивающие "утопание" в них наиболее выступающих зерен под действием возникающих при шлифовании нагрузок. В результате фактически все зерна, выступающие над уровнем связки круга, могут принимать участие в процессе резания, что приведет к уменьшению шероховатости поверхности. Чтобы количественно оценить влияние "утопания" зерен в связку круга на шероховатость поверхности, следует провести анализ вероятностной функции $\Phi(y)$, описывающей вероятность неудаленного металла с поверхности обрабатываемого образца при абразивной обработке [87]. В случае доводки абразивными зернами одинакового размера без учета радиальной подачи обрабатываемого образца вероятностная функции $\Phi(y)$ принимает вид:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2\cdot tg\gamma\cdot n}{B}\cdot y}, \qquad (9.64)$$

где 2γ − угол при вершине конусообразной части режущего зерна;

n – количество зерен, участвующих в процессе резания;

B − ширина обрабатываемого образца, м;

y − координата, отсчитываемая от вершины режущего зерна, м.

При наличии радиальной подачи образца вероятностную функцию $\Phi(y)$ необходимо рассматривать результатом вероятностного суммирования элементарных функций $\Phi_i(y)$, описываемых зависимостью (9.64), от работы зерен, вершины которых расположены в бесконечно малом интервале dy_i на удалении y_i от начала координаты y. Принимая, что количество вершин зерен dn_i, попавших в интервал dy_i, равно $dn_i = n\cdot f(y_i)\cdot dy_i$, а $f(y_i) = 1/b$, после вероятностного суммирования элементарных функций $\Phi_i(y)$ в пределах от 0 до y, получено:

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^{n}\Phi_i(y) = e^{-\int_0^y \frac{2tg\gamma\cdot(y-y_i)\cdot dn}{B}} = e^{-\int_0^y \frac{2tg\gamma\cdot n\cdot(y-y_i)}{B\cdot b}\cdot dy_i} = e^{-\frac{tg\gamma\cdot n}{B\cdot b}\cdot y^2}, \qquad (9.65)$$

где $f(y_i)$ – условная плотность распределения по координате y вершин зерен, оставивших свои проекции на движущемся вглубь рабочей поверхности круга обрабатываемом образце.

Функция $\Phi(y)$, описываемая зависимостью (9.65), определяет вероятность неудаленного материала зернами, которые имеют одинаковую высоту выступания над уровнем связки круга. Поскольку "утопание" зерен в связку круга приводит к фактически одинаковой высоте их выступания над уровнем связки, то можно полагать, что зависимость (9.95) описывает именно данный случай шлифования.

Параметр шероховатости поверхности R_{max}, принимая $b = b_1$, определяется из условия:

$$y = R_{max} = \sqrt{\frac{-\ln\Phi(y = R_{max}) \cdot B \cdot b_1}{tg\gamma \cdot n}}. \qquad (9.66)$$

Для случая $\Phi(y = R_{max}) = 0{,}895$ с учетом $-\ln\Phi(y = R_{max}) = 2{,}25$ имеем:

$$R_{max} = \sqrt{\frac{2{,}25 \cdot B \cdot b_1}{tg\gamma \cdot n}}. \qquad (9.67)$$

Как видно, параметр шероховатости поверхности R_{max} тем меньше, чем меньше параметр b_1 и больше n.

С учетом разновысотного расположения вершин зерен над уровнем связки круга функцию $\Phi(y)$ необходимо рассматривать результатом вероятностного суммирования элементарных функций $\Phi_i(y)$, описываемых зависимостью (9.65), от работы зерен, вершины которых расположены в бесконечно малом интервале dy_i на удалении y_i от начала координаты y. Принимая, что количество вершин зерен dn_i, попавших в интервал dy_i, равно $dn_i = n \cdot f(y_i) \cdot dy_i$, а $f(y_i) = 1/b$, после вероятностного суммирования элементарных функций $\Phi_i(y)$ в пределах от 0 до y функция $\Phi(y)$ выразится:

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^{n} \Phi_i(y) = e^{-\int_0^y \frac{tg\gamma \cdot (y - y_i)^2 \cdot dn}{B \cdot b}} = e^{-\int_0^y \frac{tg\gamma \cdot n \cdot (y - y_i)^2}{B \cdot b^2} \cdot dy_i} = e^{-\frac{tg\gamma \cdot n}{3 \cdot B \cdot b^2} \cdot y^3}. \qquad (9.68)$$

Параметр шероховатости поверхности R_{max} при $b = b_2$ определяется из условия:

$$y = R_{max} = \sqrt[3]{\frac{-3 \cdot \ln\Phi(y = R_{max}) \cdot B \cdot b_2^2}{tg\gamma \cdot n}}. \qquad (9.69)$$

Для случая $\Phi(y = R_{max}) = 0{,}895$ с учетом $-\ln\Phi(y = R_{max}) = 2{,}25$, имеем:

$$R_{max} = \sqrt[3]{\frac{6{,}75 \cdot B \cdot b_2^2}{tg\gamma \cdot n}}. \qquad (9.70)$$

От зависимости (9.70) можно перейти к зависимости (9.63), принимая $n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot b_2 / V_{дет}$ с учетом зависимостей (9.61) и (9.62).

Из полученной зависимости (9.70) следует, что уменьшить параметр шероховатости поверхности R_{max} можно уменьшением параметра b_2 и увеличением n. Как видно, параметры b_1, b_2, n входят в зависимости (9.67) и (9.70) с разными степенями, что указывает на различия в формировании шероховатости поверхности для двух рассматриваемых случаев шлифования.

Обозначая в зависимости (9.67) параметр R_{max} через R_{max1}, а в зависимости (9.70) параметр R_{max} через R_{max2}, после преобразований зависимостей (9.67) и (9.70) имеем:

$$R_{max2} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot b_2^2 \cdot R_{max1}^2}{b_1}}. \qquad (9.71)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость, увязывающая параметры шероховатости поверхности R_{max1} и R_{max2}, которые достигаются при шлифовании кругом с фактически одновысотным выступанием зерен над уровнем связки и кругом с разновысотным выступанием зерен над уровнем связки. Задавая значения параметров R_{max1}, b_1 и b_2, по зависимости (9.71) можно рассчитать значения параметра R_{max2}. На основе сравнения значений параметров R_{max1} и R_{max2} оценивается степень влияния "утопания" зерен в связку круга на шероховатость обработанной поверхности.

Пример расчета. Для исходных данных: $R_{max1} = 1$ мкм; $b_1 = 3$ мкм; $b_2 = 24$ мкм определено значение $R_{max2} = 8{,}3$ мкм. Этим показано, что за счет "утопания" зерен в связку круга параметр шероховатости поверхности R_{max} уменьшился с 8,3 до 1 мкм, т.е. в 8,3 раза. Это указывает на существование значительных резервов уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности при шлифовании в связи с обеспечением "утопания" зерен в связку круга.

Полученное теоретическое решение согласуется с известными экспериментальными данными. Так, в работе [153] экспериментально установлено, что при шлифовании напыленного сплава СНГН торцом

алмазного чашечного круга на металлической связке М1-01 параметр шероховатости обрабатываемой поверхности R_a принимает значительно большие значения (до 10 раз и более), чем при шлифовании алмазными кругами на относительно мягких органических связках Б1 и БР.

Как известно, металлическая связке М1-01 характеризуется большей твердостью по сравнению со связками Б1 и БР. Поэтому алмазные зерна фактически не "утопают" в металлическую связку М1-01 и "утопают" на значительную глубину в связки Б1 и БР, что приводит к увеличению количества одновременно работающих зерен и уменьшению параметра шероховатости R_a.

Такая же закономерность вытекает из зависимости (9.71). Следовательно, используя зависимость (9.71), можно аналитически подходить к оценке влияния глубины "утопания" режущих зерен в связку круга на шероховатость обработанной поверхности при шлифовании.

В связи с этим, при шлифовании ответственных высокоточных деталей гидроаппаратуры с целью уменьшения шероховатости поверхности были использованы абразивные круги, обеспечивающие "утопание" режущих зерен в связку круга и фактически их одновысотное расположение на рабочей поверхности.

Экспериментально установлено, что вследствие разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга весьма сложно стабильно обеспечить выполнение 10–11 классов чистоты при шлифовании деталей гидроаппаратуры, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами и характеризующихся плохой обрабатываемостью резанием и шлифованием. Так, практикой установлено, что для обеспечения чистоты обработки на уровне 11 класса при изготовлении ответственной цилиндрической детали из материала 95Х18 твердостью $HRC_Э \geq 56$ после операции шлифования абразивным кругом ПП $350 \times 40 \times 127$ 14А 16С традиционно применяется ручная доводка на притире абразивной пастой 64С М7. Этим обеспечивается требуемая шероховатость поверхности и точность размера 0,002 мм. Однако технологический процесс характеризуется высокой трудоемкостью обработки. В связи с этим, предложено вместо трудоемкой операции притирки использовать шлифование кругом ПП 300x30x127 16С F320P7V (производство Словении) на современном высокоточном станке Okamoto со съемом при-

пуска 0,01 – 0,02 мм на сторону. В итоге стабильно достигается шероховатость поверхности на уровне 11 класса чистоты, овальность и конусность находятся в пределах 0,005 мм, что вполне соответствует требованиям на обработку.

Необходимо отметить, что эффект обработки достигнут за счет применения шлифовального круга, который отвечает вышеуказанным требованиям с точки зрения снижения шероховатости поверхности путем уменьшения разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга.

Аналогичные цилиндрические детали гидроаппаратуры традиционно обрабатывались шлифованием первоначально абразивным кругом ПП $350\times40\times127$ 14А 25С, затем абразивным кругом ПП $400\times32\times127$ ЕК 320-85 и окончательно на операции доводки концевым притиром и абразивной пастой 64С М7. В результате достигалась шероховатость поверхности $R_a = 0{,}16$ мкм, что соответствует 10 классу чистоты.

С целью снижения трудоемкости обработки предложено после предварительного шлифования выполнить окончательное шлифование на современном высокоточном станке Okamoto абразивным кругом ПП $300\times30\times127$ 16С F320P7V с частотой вращения круга 18000 об./мин. В результате обеспечивается шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0{,}16$ мкм и требуемый допуск радиального биения в пределах 0,005 мм.

Таким образом установлено, что применение кругов, обладающих повышенной режущей способностью и характеризующихся небольшой разновысотностью зерен, позволяет исключить трудоемкую ручную обработку на операциях доводки при обеспечении высоких показателей шероховатости и точности обрабатываемых поверхностей.

9.2.2. Анализ технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при обработке свободным и связанным абразивом

Обеспечение высококачественной обработки деталей машин является важнейшим условием создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. Как известно, параметры качества и точности

обрабатываемых поверхностей деталей формируются на финишных операциях абразивной обработки, осуществляемых методами обработки свободным и связанным абразивом. Наибольшими технологическими возможностями с точки зрения обеспечения качества обработки располагает обработка свободным абразивом. Поэтому операциям обработки свободным абразивом (доводке, полированию и т.д.) всегда предшествуют операции обработки связанным абразивом (шлифование, хонингование, суперфиниширование и т.д.), поскольку лишь на этих операциях можно достичь высоких показателей качества обработки, например, шероховатость поверхности на уровне $R_a \leq 0{,}05$ мкм. Вместе с тем, операции обработки свободным абразивом характеризуются наибольшей трудоемкостью, уменьшить которую можно главным образом путем перехода на обработку связанным абразивом. Однако для этого необходимо обеспечить такие же показатели качества обработки, как и при обработке свободным абразивом. В некоторых случаях это удается, например, достичь при шлифовании шероховатость поверхности на уровне $R_a = 0{,}05 \ldots 0{,}1$ мкм и исключить из технологического процесса обработку свободным абразивом, что резко снижает трудоемкость обработки. Однако в большинстве случаев шлифование гарантированно не обеспечивает таких высоких показателей качества обработки, поэтому приходится применять трудоемкую обработку свободным абразивом. В связи с этим, актуальным является решение задачи изыскания новых технологических возможностей повышения качества обработки при шлифовании и в особенности уменьшения шероховатости поверхности до уровня $R_a = 0{,}05$ мкм и менее, которая достигается в процессе обработки свободным абразивом [128].

В работе [87] установлено, что при одновысотном расположении абразивных зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента, т.е. при доводке, на обрабатываемой поверхности в процессе резания образуется шероховатый слой, который математически может быть описан вероятностной функцией – относительной опорной длиной микропрофиля обработанной поверхности, определяемой зависимостью (9.64).

По физической сути вероятностная функция $\Phi(y)$ определяет долю неснятого материала в шероховатом слое обработанной поверх-

ности по координате y. Как видно, с увеличением y функция $\Phi(y)$ уменьшается и при условии $y = R_{max}$ принимает значение, близкое к нулю, где R_{max} – максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности (стандартный параметр шероховатости поверхности), м.

При условии $y = 0$ функция $\Phi(y = 0) = 1$, т.е. на этом уровне весь материал не снят абразивными зернами. При условии $y = R_{max}$ функция $\Phi(y = R_{max}) = \Phi_0$, где Φ_0 может принимать значения, равные 0,1; 0,05; 0,01 и менее, поскольку функция $\Phi(y)$ является вероятностной и не может быть равна нулю. Тогда, потенцируя зависимость (9.64), с учетом $y = R_{max}$ и $\Phi(y = R_{max}) = \Phi_0$ получено:

$$R_{max} = -\frac{\ln\Phi_0 \cdot B}{2 \cdot tg\gamma \cdot n}. \qquad (9.72)$$

В зависимости (9.72) функция $\ln\Phi_0$ отрицательна, а параметр шероховатости поверхности R_{max} принимает положительные значения. Как видно, уменьшить R_{max} можно главным образом за счет увеличения суммарного количества абразивных зерен, участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности $n = k \cdot B \cdot l_{инстр}$, где k – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности круга, шт./м^2; $l_{инстр}$ – длина рабочей части инструмента, участвующая в формировании шероховатости поверхности, м.

После преобразования зависимость (9.72) принимает вид:

$$R_{max} = -\frac{\ln\Phi_0}{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot l_{инстр}}. \qquad (9.73)$$

Исходя из зависимости (9.73), уменьшить R_{max} можно увеличением двух параметров – k и $l_{инстр}$.

В работе [87] также установлено, что в случае разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента (а это имеет место при шлифовании), вероятностная функция $\Phi(y)$ описывается следующей зависимостью

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot tg\gamma \cdot n}{B} \cdot \frac{y^2}{2b}}, \qquad (9.74)$$

где b – максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки инструмента (шлифовального круга), м.

Потенцируя зависимость (9.74), с учетом $y = R_{max}$ и $\Phi(y = R_{max}) = \Phi_0$ получено:

$$R_{max} = \sqrt{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot B \cdot b}{tg\gamma \cdot n}}. \qquad (9.75)$$

Как видно, зависимость (9.75) принципиально отличается от аналогичной зависимости (9.72). Это связано с наличием в ней параметра b, который может изменяться в широких пределах, вызывая увеличение параметра шероховатости поверхности R_{max}.

Для количественной оценки значений параметра R_{max}, полученных при одновысотном и разновысотном расположении абразивных зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента, обозначим в зависимости (9.72) параметр $R_{max} = R_{max\,1}$, а в зависимости (9.75) – $R_{max} = R_{max\,2}$. Представляя зависимость (9.72) в виде $-\frac{\ln \Phi_0 \cdot B}{tg\gamma \cdot n} = 2 \cdot R_{max\,1}$, и подставляя ее в зависимость (9.75), получено:

$$R_{max\,2} = \sqrt{2 \cdot R_{max1} \cdot b}. \qquad (9.76)$$

В табл. 9.9 и на рис. 9.12 приведены рассчитанные на основе зависимости (9.76) значения $R_{max\,2}$ для разных значений $R_{max\,1}$ и b.

Таблица 9.9

Расчетные значения $R_{max\,2}$ (в мкм)

R_{max1}, мкм	0,05	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0
$R_{max\,2}$ (для b =2 мкм)	0,447	0,632	1,414	2,0	2,5	2,828
$R_{max\,2}$ (для b =5 мкм)	0,707	1,0	2,236	3,162	3,878	4,472
$R_{max\,2}$ (для b =10 мкм)	1,0	1,414	3,162	4,472	5,477	6,328
$R_{max\,2}$ (для b =20 мкм)	1,141	2,0	4,472	6,325	7,746	8,944

Из табл. 9.9 следует, что параметр шероховатости поверхности $R_{max\,2}$ принимает значения, значительно превышающие значения $R_{max\,1}$. Этим объясняется то, что при шлифовании в связи с разновысотным расположением зерен на рабочей поверхности шлифовального круга параметр шероховатости поверхности $R_{max\,2}$ принимает весьма большие значения, несоизмеримые со значениями $R_{max\,1}$, достигаемыми в процессе доводки (обработки свободным абразивом) при одних и тех же значениях параметров n и B. Поэтому основным

путем уменьшения $R_{max\,2}$ следует рассматривать уменьшение разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, т.е. уменьшения параметра $b \to 0$. Это достигается созданием на рабочей поверхности круга плосковершинных зерен за счет их затупления алмазным правящим карандашом [24].

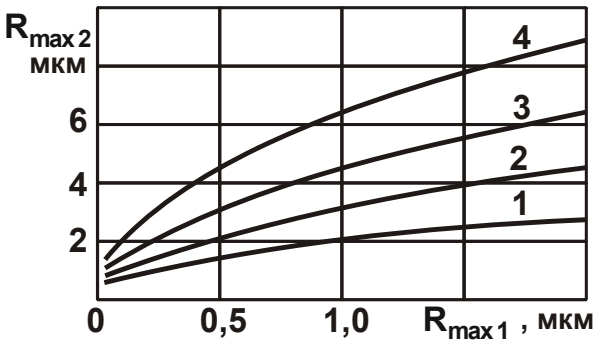


Рис. 9.12. Зависимость параметра шероховатости поверхности $R_{max\,2}$ от $R_{max\,1}$: 1 – $b = 2$ мкм; 2 – $b = 5$ мкм; 3 – $b = 10$ мкм; 4 – $b = 20$ мкм

Обеспечить фактически одновысотное расположение зерен можно электрогальваническим осаждением абразивных или алмазных зерен на рабочую поверхность круга. Уменьшить параметр b можно также изготовлением абразивных или алмазных кругов из зерен одного размера и т.д.

Разновысотное участие абразивных зерен в резании может быть обусловлено как разновысотным расположением зерен на рабочей поверхности инструмента, так и режимом обработки. Например, при одновысотном расположении зерен на рабочей поверхности инструмента и в условиях доводки с радиальной подачей происходит разновысотное участие $n = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot \tau = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot R_{max1} / S$ абразивных зерен в резании, где $V_{инстр}$ – скорость перемещения инструмента, м/с; S – скорость радиальной подачи, м/с; τ – время, в течение которого происходит радиальная подача на величину $R_{max\,1}$.

Подставляя параметр $n = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot R_{max1} / S$ в зависимость (9.72), получено:

$$R_{max\,1} = \sqrt{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot S}{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot V_{инстр}}}. \qquad (9.77)$$

В этом случае разновысотное участие абразивных зерен в резании определяется отношением $S / V_{инстр}$: чем оно больше, тем больше $R_{max\,1}$. Поэтому уменьшить $R_{max\,1}$ можно уменьшением отношения $S / V_{инстр}$ за счет уменьшения S или увеличения $V_{инстр}$.

Как видно, в процессе доводки имеет место разновысотное участие абразивных зерен в резании, что приводит к увеличению параметра шероховатости поверхности $R_{max\,1}$. Основным условием уменьшения $R_{max\,1}$ следует рассматривать осуществление процесса доводки без радиальной подачи за счет создания начального натяга в технологической системе и применения процесса выхаживания. Очевидно, осуществление доводки с радиальной подачей (по жесткой или упругой схемам) увеличивает параметр шероховатости поверхности $R_{max\,1}$ в соответствии с зависимостью (9.77).

Сравнивая аналогичные зависимости (9.73) и (9.77), видно, что в случае разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности инструмента за счет увеличения параметра $l_{инстр}$ при доводке проще добиться требуемой шероховатости поверхности, чем в случае разновысотного участия абразивных зерен в резании, где шероховатость поверхности определяется отношением $S/V_{инстр}$.

Следовательно, применение радиальной подачи при доводке ограничивает возможности уменьшения шероховатости поверхности, т.е. доводку необходимо производить без радиальной подачи, например, реализуя упругую схему с заданным начальным натягом в технологической системе (схему выхаживания). Это позволит в максимальной степени использовать потенциальные возможности доводки с точки зрения достижения требуемой шероховатости поверхности. К еще большему увеличению параметра $R_{max\,2}$ приводит осуществление процесса шлифования с радиальной подачей. В этом случае количество зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности, определяется зависимостью $n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot R_{max2} / V_{дет}$ (рис. 9.3). Подставляя это выражение в зависимость (9.75), имеем

$$R_{max\,2} = \sqrt{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot b \cdot V_{дет}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot R_{max\,2}}}. \qquad (9.78)$$

Откуда

$$R_{max\,2} = \sqrt[3]{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot b \cdot V_{дет}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}. \qquad (9.79)$$

В этом случае разновысотное участие абразивных зерен в резании определяется отношением $V_{дет} / V_{кр}$: чем оно больше, тем больше

$R_{max\,2}$. Уменьшить параметр шероховатости поверхности $R_{max\,2}$ можно, прежде всего, уменьшением радиальной подачи S. Наиболее просто это осуществить в условиях шлифования по упругой схеме с заданным радиальным усилием. Это обеспечивает минимальные значения S и, соответственно, минимальные значения параметра шероховатости поверхности $R_{max\,2}$.

С учетом известных соотношений [4]: $b = (1-\varepsilon)\cdot\overline{X}$; $k = \dfrac{3\cdot m\cdot(1-\varepsilon)}{200\cdot\pi\cdot\overline{X}^2}$ зависимость (9.79) примет вид:

$$R_{max} = \overline{X}\cdot\sqrt[3]{-\frac{200\cdot\pi\cdot\ln\Phi_0\cdot V_{дет}}{3\cdot tg\gamma\cdot m\cdot V_{кр}}}. \qquad (9.80)$$

Исходя из зависимости (9.80), уменьшить параметр шероховатости поверхности $R_{max\,2}$ при шлифовании можно главным образом за счет уменьшения зернистости круга $\overline{X}$, а также за счет уменьшения $V_{дет}$ и увеличения m и $V_{кр}$.

Как показывает практика, изготовление шлифовального круга с весьма малой зернистостью (например, алмазного круга зернистостью 5/3) вызывает значительные технические сложности. Поэтому и реализация значений параметра шероховатости поверхности на уровне $R_{max} = 0{,}1$ мкм при шлифовании фактически невозможна. В этих условиях эффективно применение обработки свободным абразивом, о чем свидетельствуют результаты расчетов, приведенные в табл. 9.9, согласно которым можно гарантированно обеспечить высокие показатели шероховатости поверхности.

Основным условием применения процесса шлифования с целью уменьшения шероховатости поверхности следует рассматривать притупление вершин абразивных зерен и установление их примерно одновысотного выступания над уровнем связки круга. Учитывая, что процесс шлифования, как правило, осуществляется с поперечной подачей, параметр шероховатости поверхности $R_{max\,2}$ в этом случае будет определяться зависимостью (9.77), которая в отличие от зависимости (9.79) приводит к меньшим значениям шероховатости обрабатываемой поверхности. Таким образом, основным условием уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании является снижение разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности круга.

Одним из эффективных решений в этом направлении следует рассматривать наклеивание на рабочую поверхность круга слоя абразивного порошка небольшой зернистости или же увеличение площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью $B \cdot l_{инстр}$ (например, при обработке отверстий), что позволит существенно увеличить количество одновременно работающих зерен $n = k \cdot B \cdot l_{инстр}$, участвующих в формировании шероховатости поверхности.

Необходимо отметить, что аналогичные зависимости для определения параметров шероховатости поверхности были получены в работе [99] другими методами расчета. Это указывает на их достоверность. Принимая значение $\Phi_0 = 0{,}001$, имеем $\ln \Phi_0 = -4{,}6$. После подстановки этого значения в (9.80) получена зависимость:

$$R_{max} = \overline{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{307 \cdot \pi \cdot V_{дет}}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр}}}, \qquad (9.81)$$

которая отличается от аналогичной зависимости, приведенной в работе [99], лишь множителем, равным 1,13.

Следовательно, предложенный в настоящей работе подход к определению параметра шероховатости поверхности R_{max} позволяет существенно упростить расчеты и получить зависимости, аналогичные известным зависимостям, что открывает новые возможности анализа и оптимизации условий абразивной обработки по критерию наименьшей шероховатости поверхности. Полученные теоретические решения использованы при разработке и внедрении в производство эффективных финишных операций абразивной обработки. Установлено, что применение мелкозернистых абразивных кругов, обладающих повышенной режущей способностью, позволяет в ряде случаев уменьшить шероховатость поверхности до уровня $R_a = 0{,}05$ мкм и произвести замену трудоемкой обработки свободным абразивом.

9.2.3. Общие закономерности формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке и условия ее уменьшения

Для обоснования условий уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке важно провести теоретический анализ

технологических возможностей методов доводки и шлифования для научно обоснованного определения условий их дальнейшего совершенствования, т.е. теоретического определения условий уменьшения шероховатости поверхности для различных кинематических схем обработки связанным и свободным абразивом.

Как известно, при лезвийной обработке шероховатость поверхности формируется в результате копирования профиля режущего лезвия инструмента с учетом кинематики его движения. При абразивной обработке шероховатость поверхности формируется в результате массового наложения и перекрытия проекций зерен на обрабатываемую поверхность. Чем больше зерен участвует в процессе резания, тем больше перекрытий проекций зерен и меньше максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности. Поэтому с целью уменьшения максимальной высоты микронеровностей обработанной поверхности необходимо использовать методы абразивной обработки и абразивные инструменты, которые обеспечивают максимально возможное количество одновременно работающих зерен. В этом плане метод круглого наружного шлифования кругом прямого профиля (ПП) является наименее эффективным (рис. 9.13,а), поскольку характеризуется относительно небольшой длиной дуги контакта круга с обрабатываемой деталью и соответственно относительно высокой максимальной высотой микронеровностей обработанной поверхности.

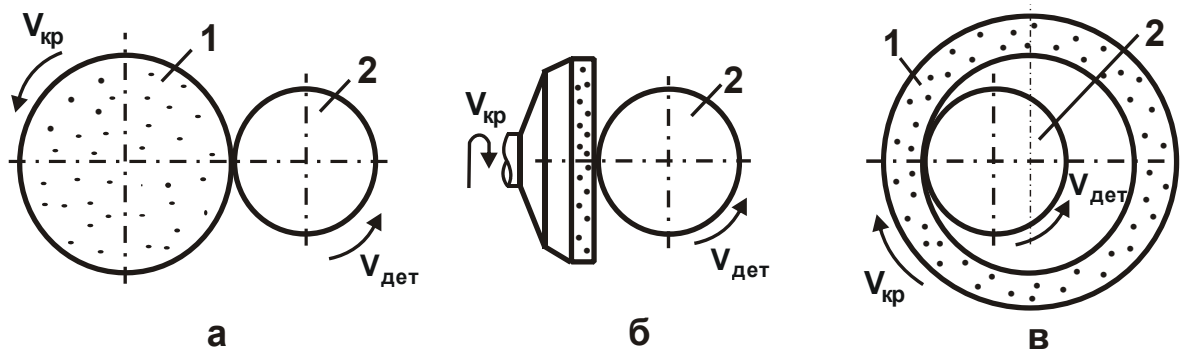


Рис. 9.13. Кинематические схемы шлифования:
1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь

Применение кругов чашечной формы (рис. 9.13,б) при круглом наружном шлифовании позволяет увеличить длину дуги контакта круга с обрабатываемой деталью, увеличивая количество одновременно работающих зерен и уменьшая максимальную высоту микронеровнос-

тей обработанной поверхности. Еще эффективнее использовать метод охватывающего шлифования (рис. 9.13,в), который характеризуется увеличенной длиной дуги контакта круга с обрабатываемой деталью и меньшей шероховатостью обрабатываемых поверхностей. Однако в этом случае диаметр рабочей части круга, как правило, меньше диаметра круга формы ПП, соответственно меньше площадь рабочей поверхности круга, что снижает его работоспособность вследствие быстрого засаливания и износа (по аналогии с кругами небольшого диаметра, используемыми при внутреннем шлифовании).

Следует отметить, что увеличение количества одновременно работающих зерен шлифовального круга является необходимым, но недостаточным условием уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности. Важно обеспечить примерно одновысотное выступание вершин зерен над уровнем связки круга, что достигается, например, применением алмазных кругов на металлических связках с плосковершинными зернами [24], образованными в результате электроэрозионной правки круга и его последующего обтачивания алмазным правящим карандашом. В этом случае при шлифовании твердых сплавов может быть достигнута шероховатость поверхности на уровне $R_a = 0{,}1$ мкм без уменьшения производительности обработки.

Эффективно также применение алмазных и абразивных кругов на относительно мягких связках, обеспечивающих "утопание" в них режущих зерен. В результате происходит переход от разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности круга к фактически одновысотному, что увеличивает количество одновременно работающих зерен и уменьшает шероховатость обработанной поверхности.

С целью увеличения количества зерен, расположенных на рабочей поверхности круга, применяют технологию электрогальванического нанесения зерен на рабочую поверхность круга. По сравнению с обычными абразивными и алмазными кругами, изготовленными традиционными методами, эти круги имеют на рабочей поверхности значительно больше зерен, что позволяет увеличить количество одновременно работающих зерен и уменьшить шероховатость обработанной поверхности. Например, изготовленные электрогальваническим методом алмазные круги, предназначенные для огранки природных алмазов в бриллианты, дополнительно подвергают "укатыванию" алмазных зерен в металлическую связку путем их вдавливания поликристаллическим

сверхтвердым материалом. Это обеспечивает, по сути, одновысотное выступание зерен над уровнем связки круга и соответственно уменьшение шероховатости обработанной поверхности, что чрезвычайно важно для высококачественной обработки природных алмазов.

Наиболее перспективным решением задачи увеличения количества одновременно работающих зерен и уменьшения шероховатости обработанной поверхности является применение метода обработки свободным абразивом (доводки) с использованием алмазных паст (рис. 9.14 [24]).

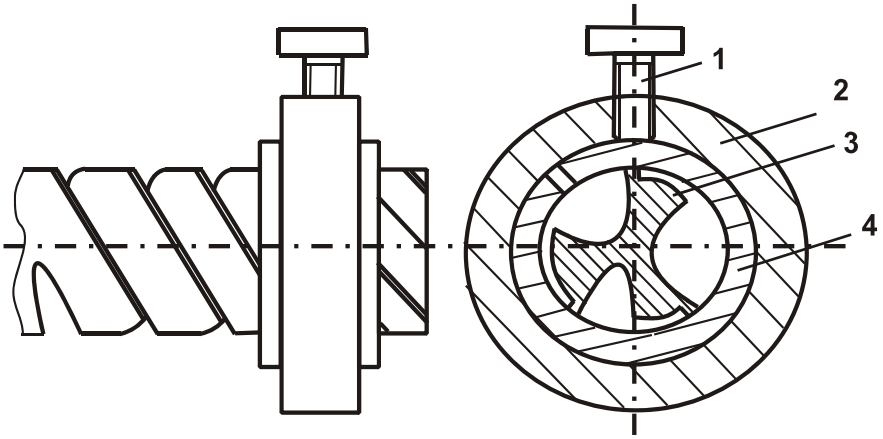


Рис. 9.14. Схема доводки наружной поверхности твердосплавного многолезвийного инструмента:
1 − винт; 2 – кольцо; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – притир [24]

Однако, как показывает производственный опыт, продолжительность операции доводки наружных поверхностей твердосплавных многолезвийных инструментов при съеме припуска 0,02 мм на сторону составляет 3 … 12 минут, тогда как продолжительность операции круглого наружного шлифования при съеме припуска величиной до 2 мм на сторону составляет 1 … 5 минут. Следовательно, операция доводки является достаточно трудоемкой, хотя при этом и решается задача получения шероховатости поверхности на уровне $R_a = 0{,}05 \ldots 0{,}1$ мкм и менее, чего нельзя достичь при шлифовании.

Очевидно, для эффективного ведения процесса доводки необходимо добиться уменьшения продолжительности этой операции, хотя бы до уровня операции круглого наружного шлифования. Это может быть достигнуто, например, за счет применения мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П. Экспериментально установлено, что в условиях внутреннего шлифо-

вания на токарном станке модели 1М63 с частотой вращения шпинделя 200 об./мин и шлифовального круга 1400 об./мин обеспечивается существенное уменьшение шероховатости поверхности без снижения производительности обработки.

В особой мере эффект обработки проявляется при установке оси вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия детали (цилиндра), рис. 9.15. Так, за 30 минут обработки может быть достигнута шероховатость поверхности $R_a = 0{,}04$ мкм, чего нельзя добиться при обычном внутреннем шлифовании абразивными и алмазными кругами. В этом случае в результате увеличения площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, а также возможного "утопания" режущих зерен в мягкую связку круга и снижения разновысотного выступания зерен, увеличивается количество одновременно работающих зерен, что и создает эффект уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a.

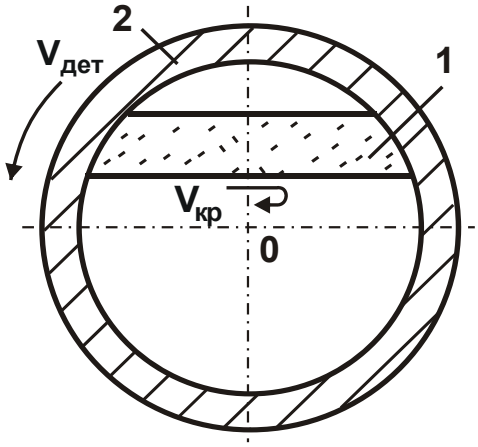


Рис. 9.15. Схема шлифования с перпендикулярным расположением осей вращения круга и детали: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь

Необходимо отметить, что наибольший эффект обработки отверстия может быть достигнут при внутреннем продольном шлифовании торцовой поверхностью круга, имеющей форму окружности и обеспечивающей наибольшую площадь контакта с обрабатываемым отверстием. Количество одновременно работающих зерен в процессе обработки равно:

$$n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau = k \cdot B^2 \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}}, \qquad (9.82)$$

где $\tau = l_{конт} / V_{дет} = B / V_{дет}$ – время контакта фиксированного сечения обрабатываемой поверхности детали с шлифовальным кругом, с;

$l_{конт} = B$ – длина дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью детали, м.

Как видно, наибольшее влияние на количество одновременно работающих зерен n оказывает параметр B, входящий в зависимость во второй степени. Поэтому наибольший эффект обработки достигается прежде всего за счет его увеличения.

Увеличить количество одновременно работающих зерен n можно также увеличением параметров k, $V_{кр}$ и уменьшением $V_{дет}$. Уменьшение скорости вращения детали $V_{дет}$ предполагает применение схемы глубинного шлифования, осуществляемой с глубиной шлифования, равной величине снимаемого припуска. Чем больше глубина шлифования и меньше скорость вращения детали $V_{дет}$, тем значительнее может быть уменьшен параметр шероховатости поверхности R_a. При этом производительность обработки может быть увеличена по сравнению с обычным продольным многопроходным шлифованием.

Для определения параметра шероховатости поверхности R_{max} при абразивной обработке следует воспользоваться зависимостью (9.64), описывающей вероятностную функцию неснятого металла по глубине поверхностного слоя обрабатываемой детали, определяемую координатой y (отсчитывая ее от вершины режущего зерна) [87].

При условии $y = 0$ функция $\Phi(y = 0) = 1$, т.е. на этом уровне весь материал не снят абразивными зернами. При условии $y = R_{max}$ функция $\Phi(y = R_{max}) = \Phi_0$, где Φ_0 может принимать значения, равные 0,1; 0,05; 0,01 и менее. Тогда, потенцируя зависимость (9.64), может быть получена зависимость (9.72). Поскольку функция $\ln\Phi_0$ в зависимости (9.72) отрицательна, то параметр шероховатости поверхности R_{max} принимает положительные значения.

Подставляя в (9.72) зависимость (9.82), имеем:

$$R_{max} = -\frac{\ln\Phi_0 \cdot V_{дет}}{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot B \cdot V_{кр}}. \qquad (9.83)$$

Как видно, уменьшить параметр шероховатости поверхности R_{max} можно уменьшением скорости вращения детали $V_{дет}$ и увеличе-

нием параметров k, B и $V_{кр}$. По сути, характер изменения параметра R_{max} обусловлен изменением количества одновременно работающих зерен n: чем больше n, тем меньше R_{max}. Однако, в отличие от зависимости (9.82), зависимость (9.83) содержит параметр B первой степени, т.е. все входящие в зависимость (9.83) параметры в одинаковой степени влияют на R_{max}. Установленные выше закономерности позволяют объяснить эффект уменьшения шероховатости поверхности в процессе хонингования отверстия, когда в резании участвует вся рабочая поверхность абразивного инструмента (хона), а его диаметр равен диаметру обрабатываемого отверстия. Весьма эффективным следует рассматривать процесс хонингования по упругой схеме, реализующий обработку с начальным натягом в технологической системе, т.е., по сути, традиционную схему выхаживания.

Как установлено опытами, данная схема обработки позволяет в несколько раз уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a и в условиях шлифования по жесткой схеме (круглое наружное и внутреннее шлифование, плоское шлифование). Однако шлифование по схеме выхаживания не позволяет в полной мере реализовать кинематические возможности рабочей поверхности круга в формировании шероховатости поверхности из-за разновысотного выступания зерен над уровнем связки круга, в результате чего лишь небольшая часть наиболее выступающих зерен участвует в процессе резания, что не позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности. Кроме того, как установлено экспериментальными исследованиями, это приводит к появлению на обрабатываемых поверхностях отдельных рисок-царапин, которые сложно удалить на последующей операции доводки.

Существенным ограничением условий уменьшения шероховатости поверхности в процессе выхаживания является также возникновение в технологической системе упругих перемещений и колебаний, которые как-бы условно увеличивают разновысотное расположение зерен на рабочей поверхности круга и, соответственно, шероховатость обработанной поверхности.

Поэтому наибольший эффект от применения схемы выхаживания может быть достигнут в процессе хонингования, когда необходимо обеспечить одновременно высокие показатели точности и шероховатости поверхности.

Выводы

1. На основе полученных аналитических зависимостей для определения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания проведено сравнение параметров силовой напряженности процессов шлифования прерывистыми и обычными сплошными кругами. Показано, что при прерывистом шлифовании в связи с периодическим ударным характером контакта прерывистого круга с обрабатываемым материалом на его рабочей поверхности образуется развитый режущий рельеф, обеспечивающий снижение силы и температуры резания. В результате сила и температура резания с течением времени обработки остаются фактически неизменными, тогда как при обычном шлифовании они существенно увеличиваются в связи с затуплением круга, увеличивая энергоемкость обработки и ухудшая параметры качества.

2. Теоретически установлено, что при прерывистом шлифовании существует оптимальное значение времени контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом, обеспечивающее достижение минимальной температуры резания, и которое может быть использовано для расчета оптимального количества рабочих выступов и впадин на рабочей поверхности прерывистого круга, их протяженности и соответственно основных технико-экономических показателей прерывистого шлифования. Установлено, что в этом случае экстремальные значения длин рабочего выступа и впадины прерывистого круга одинаковы. Доказана эффективность применения глубинного прерывистого шлифования, позволяющего многократно уменьшить температуру резания по сравнению с глубинным шлифованием обычным сплошным кругом.

3. В работе, на основе упрощенного подхода к расчету температуры резания при шлифовании, получены новые оптимальные решения по определению температуры резания в условиях финишной обработки по методу многопроходного шлифования с учетом распределения тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки. Показано, что основная часть образующегося при многопроходном шлифовании тепла уходит в обрабатываемую деталь, а в образующиеся стружки уходит небольшая часть тепла. Поэтому учет тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, приводит в соответствие теорию и практику шлифования. Установлено, что основным условием

уменьшения температуры резания при шлифовании является уменьшение условного напряжения резания, которое оказывает наибольшее влияние на температуру резания.

4. Получены новые оптимальные решения об условиях уменьшения шероховатости поверхности в процессе шлифования как с учетом, так и без учета разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга. Это позволило определить основные условия уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании. Теоретически доказано, что, обеспечивая при шлифовании "утопание" зерен в связку круга, можно существенно уменьшить шероховатость поверхности. Эффект обработки в этом случае состоит в том, что фактически исключается разновысотное расположение абразивных зерен на рабочей поверхности круга и тем самым обеспечивается увеличение количества одновременно работающих зерен. Приведенные примеры практической реализации теоретических решений указывают на их достоверность, а также на возможность существенного уменьшения шероховатости поверхности (до уровня обработки свободным абразивом) на операциях шлифования высокоточных деталей при одновременном снижении трудоемкости обработки. Это позволило в ряде случаев заменить шлифованием традиционную обработку свободным абразивом, при которой происходило шаржирование абразивных зерен в обрабатываемую поверхность.

5. Получены оптимальные решения по определению наименьшей шероховатости поверхности при обработке свободным и связанным абразивом с позиции теории вероятностей упрощенным методом расчета. Теоретически показано, что разновысотное расположение зерен на рабочей поверхности круга существенно ограничивает возможности достижения требуемых показателей шероховатости поверхности при шлифовании по сравнению с процессами обработки свободным абразивом. Основными условиями уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании являются уменьшение зернистости круга, создание на круге примерно одновысотного расположения зерен, наклеивание на рабочую поверхность круга слоя абразивного порошка небольшой зернистости, увеличение площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Показано, что добиться существенного уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании за счет регулирования параметрами режима резания фактически

невозможно в связи с ограниченностью пределов их изменения. Значительно большими возможностями с этой точки зрения располагает схема шлифования с начальным натягом в технологической системе, т.е. схема выхаживания. Показано, что при обработке свободным абразивом с поперечной подачей эффективно использовать упругую схему с фиксированной поперечной подачей, которая обеспечивает уменьшение шероховатости поверхности.

6. Аналитически обоснованы условия уменьшения шероховатости поверхности отверстия для различных методов абразивной обработки. Установлено, что внутреннее шлифование, являясь эффективным методом финишной обработки отверстий, не обеспечивает шероховатость поверхности на уровне $R_a = 0{,}05$ мкм в связи с разновысотным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности круга. Определены условия существенного уменьшения шероховатости поверхности за счет применения глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью вращения детали, а также за счет создания площадок на вершинах зерен. Расчетами установлено, что обеспечение одновысотного выступания зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и увеличение количества зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности, являются основными условиями уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке. Выполнить эти условия можно применением доводки свободным абразивом, а также шлифованием абразивными кругами с примерно одновысотным выступанием зерен над уровнем связки, что достигается, например, изменением оси вращения круга – она должна быть направлена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали.

Раздел 10
Условия создания конкурентоспособной машиностроительной продукции

10.1. Повышение конкурентоспособности машиностроительной продукции на основе снижения себестоимости металлообработки

За последние 15 лет на рынке металлорежущего инструмента в Украине начали активно использовать новейшие инструменты, произведенные за рубежом. С каждым годом все больше появляется дилеров, внедряющих эти инструменты. Поэтому использование новых методик по рациональному применению инструментов способно улучшить процесс обработки и уменьшить себестоимость изготовления деталей машин [11].

В процессе внедрения новейших технологий обработки металлорежущий инструмент является одним из важнейших компонентов. Желая улучшить конкретную технологическую операцию обработки, инжиниринговые фирмы проводят испытания инструментов разных производителей. Как показывает практика внедрения инструментов, на операции обработки, где испытывается от трех и более инструментов разных производителей, эффективность металлообработки будет значительно выше. Это достигается за счет выбора рациональных геометрических параметров инструмента, износостойких покрытий, режимов резания и т.п. [83].

Однако такие испытания инструментов происходят крайне редко из-за наличия нескольких ограничивающих факторов. Во-первых, инжиниринговые фирмы испытывают значительные затраты в связи с необходимостью проведения дополнительных испытаний для выбора инструментов и режимов резания. Во-вторых, на проведение испытаний отвлекается большое количество специалистов со стороны промышленного предприятия на длительное время. В-третьих, необходима большая партия деталей для проведения испытаний. В результате в испытаниях на предприятии принимают участие всего 1 – 3 инжиниринговых фирмы, уже успевших себя зарекомендовать.

Наиболее часто производят испытания современного инструмента с целью замены им инструмента, произведенного еще по советским ГОСТам. В таком случае любой современный инструмент зарубежного производства заведомо лучше, т.к. испытания производятся на таких же или незначительно увеличенных режимах резания. В итоге достигается следующий результат: стойкость современного инструмента и производительность обработки им значительно выше применяемого инструмента.

Примером тому является испытание резца производства Tungaloy (Япония) CNMG 120408 – HMM AH905 с целью замены резца, изготовленного из твердого сплава ВК8. В итоге установлено, что японский инструмент позволяет увеличить скорость резания с 5,0 м/мин до 15,7 м/мин, а также стойкость с 1 до 3-х деталей, т.е. в результате проведения испытаний удалось повысить стойкость инструмента и производительность обработки. Однако дальнейших испытаний по определению оптимальных режимов резания не производили. Они были установлены инженером–технологом на основе его собственного опыта. Вполне вероятно, что из-за недостаточной квалификации технолога эти режимы резания могут быть малоэффективны и не позволят в полной мере реализовать потенциальные возможности инструментов, которые заложены их разработчиками в Японии, Германии, Израиле и других странах.

В случаях, когда испытывается несколько инструментов или необходимо улучшить уже подобранный зарубежный инструмент, выбор оптимального варианта инструмента может быть произведен более качественно. Это связано с тем, что испытывается инструмент, подобранный по четко установленным критериям.

Эти выводы подтверждаются результатами испытания инструментов следующих фирм-производителей: Seco, Tungaloy, Stellram, Ceratizit при обработке материала ВЖЛ14. При одинаковых режимах резания инструменты производства фирм Seco, Tungaloy и Ceratizit показали одинаковую стойкость (20 мин), а инструмент производства фирмы Stellram – на 50 % выше (30 мин).

Эффективность применения современного инструмента зависит от технологов инжиниринговых фирм, их профессионализма и опыта работы. Более крупные инжиниринговые фирмы за годы работы на

рынке разработали множество различных технических решений, с помощью которых повышают свою конкурентоспособность. Но все же основной целью деятельности инжиниринговых фирм является "выигрыш" испытаний и возможность поставки партии инструмента на предприятие заказчика. Экономическое обоснование проведенного испытания необходимо для того чтобы показать преимущества одного инструмента над другим.

Возможность повышения эффективности деятельности промышленного предприятия в такой конкурентной борьбе не учитывается, т.е. промышленное предприятие является инструментом в противостоянии инжиниринговых фирм между собой, получая при этом незначительный эффект от их конкурентной борьбы.

Такие выводы можно сделать из того, что многие инжиниринговые фирмы при проведении испытаний, получив положительный результат по сравнению с применяемым инструментом, останавливаются и не проводят дальнейшие испытания с целью определения оптимальных режимов резания. Крайне редко они занимаются исследованиями технических возможностей своего инструмента.

Внедряемый инструмент имеет значительный потенциал, и поэтому большая часть его технологических возможностей не используется. Например, при обработке стали 20Л резцом Cnmm 250924 tus T9125 производства фирмы Tungaloy на режимах резания $V = 77$ м/мин; $S = 1$ мм/об.; $t = 10$ мм его стойкость составила 11 мин. При повторных испытаниях резца на скорости резания $V = 66$ м/мин его стойкость составила 36,75 мин, т.е. при уменьшении скорости резания на 16,6 % стойкость инструмента повысилась на 234 %. Исходя из того, что стойкость резца изменяется в 14 раз (234/16,6 %) интенсивнее скорости резания, можно сделать вывод, что данный резец был первоначально подобран не эффективно. Как показывает опыт внедрения инструмента, его стойкость должна в оптимальных условиях изменяться в среднем в 2 раза быстрее скорости резания. Если же это условие не выполняется, то инструмент был подобран не верно, и эффективность его применения может быть отрицательна за счет высокого перерасхода.

В качестве примера неэффективного внедрения инструмента можно привести результаты испытания резца производства фирмы

Iscar. Так, для обработки канавки был подобран резец и установлены режимы резания. Однако после увеличения режимов резания стойкость резца изменилась на 250 % вместо ожидаемых 100 % (по сравнению с изменением скорости резания), т.е. в дальнейшем, если предприятие решит увеличить производственные мощности всего на несколько процентов, то затраты на инструменты возрастут в разы. Проанализировав данные испытаний, инжиниринговой фирме удалось подобрать инструмент, который обеспечил реализацию технического потенциала внедряемого инструмента на технологической операции. Как видно, решить данную проблему удалось за счет анализа потенциальных возможностей инструмента и стремления инжиниринговой фирмы повысить не собственную результативность, а эффективность работы заказчика. Добиться положительного результата удалось, применяя математические методы и значительный опыт проведения испытаний инструмента.

Для улучшения технологических процессов механической обработки необходимо изменить концепцию внедрения металлорежущего инструмента. В настоящее время специалисты инжиниринговых фирм при проведении испытаний пытаются превзойти любой ценой конкурента. При этом не уделяется должное внимание оптимизации процесса обработки и получению максимальной отдачи от внедряемого инструмента. Поэтому необходимо изменить представление о процессе проведения испытаний внедряемого инструмента.

Понятие "эффективные режимы резания" для импортного лезвийного инструмента довольно расплывчатое, поскольку отсутствуют критерии, определяющие, что один режим резания эффективный, а другой – не эффективный. В большинстве случаев эффективность режимов резания определяется спецификой производства или поставленной задачей. На одном предприятии критерием эффективности может выступать достижение определенного качества обработанной поверхности, на другом – максимальная производительность обработки, на третьем – соотношение нескольких критериев.

На многих предприятиях при установлении режимов резания опираются на экономический критерий, но в довольно специфической форме. Экономический критерий выступает как производный от других критериев: максимальной стойкости и производительности инструмента,

высокой точности обработки и минимальной шероховатости (для устранения потерь от брака). Выполнение этих критериев обеспечивает снижение себестоимости обработки детали, однако не отвечает на вопрос – минимальная ли это себестоимость обработки для данной операции?

На одном из крупнейших машиностроительных заводов Украины для эффективного использования режущего инструмента изначально была установлена стойкость, равная 45 мин. Специалисты завода обосновывали эту стойкость тем, что при ней достигается минимальное соотношение "затраты на инструмент/производительность". После нескольких лет использования инструмента специалисты завода пришли к выводу, что стойкость инструмента, равная 45 мин, ведет к высокому потреблению лезвийного инструмента, из-за чего затраты на него выходят за рамки установленного бюджета по данной статье расходов, и среднюю стойкость по заводу приняли равной 120 мин.

Из приведенного примера следует, что даже одно из крупнейших предприятий Украины (имеющее высококвалифицированные кадры и собственную лабораторию резания) не способно ответить на вопрос: какие режимы резания должны использоваться в металлообработке для достижения максимальной эффективности обработки.

Это связано с тем, что при расчете режимов резания рассматриваются технологические параметры и не рассматриваются экономические статьи затрат: затраты на инструмент (сменную пластину, державку, оснастку) и заработную плату рабочего (с учетом премий, налогов и сборов). Их учет позволил бы установить режимы резания, обеспечивающие минимальную себестоимость обработки и максимально возможную производительность при одновременном достижении высокого качества обрабатываемых поверхностей.

Возможность применения различных режимов резания на практике обусловлена наличием широкого диапазона режимов резания, при которых используемое оборудование способно выполнять обработку с допустимой нагрузкой, определяемой отношением фактического и предельного значений мощности привода станка (в процентах) [85]. Этот показатель является физическим ограничивающим фактором при выборе или корректировке рациональных режимов резания.

На рис. 10.1 показана зависимость изменения нагрузки на привод оборудования от изменения режимов резания.

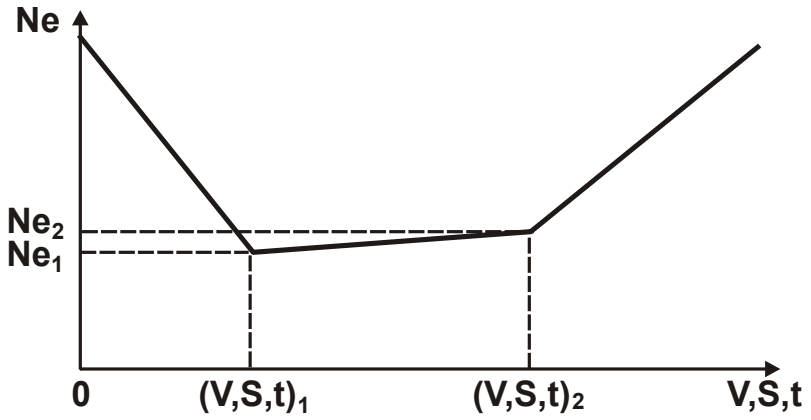


Рис. 10.1. Зависимость нагрузки на оборудование от режимов резания

Как видно, в диапазоне 0 … $(V,\ S,\ t)_1$ нагрузка высокая, а затем резко снижается с увеличением параметров режимов резания. В этом диапазоне происходит процесс обработки, близкий к процессу строгания с относительно небольшой температурой резания. После достижения режима резания $(V,\ S,\ t)_1$ этот процесс переходит в процесс интенсивного резания, из-за чего нагрузка существенно уменьшается до значения Ne_1 [11]. В диапазоне режимов резания $(V,\ S,\ t)_1$ … $(V,\ S,\ t)_2$ нагрузка практически не изменяется. После достижения режима резания $(V,\ S,\ t)_2$ происходит переход в область высокоскоростного резания, которое характеризуется высокой температурой резания и повышенной нагрузкой. Этот диапазон эффективно использовать при высоких показателях жесткости оборудования и инструментов, что, к сожалению, редко встречается на предприятиях Украины. Исходя из этого, эффективно производить обработку в диапазоне режимов резания $(V,\ S,\ t)_1$ … $(V,\ S,\ t)_2$.

В зависимости от применяемого оборудования, режущего инструмента и обрабатываемого материала диапазон режимов резания $(V,\ S,\ t)_1$ … $(V,\ S,\ t)_2$ может смещаться в область меньших или больших значений (т.е. влево или вправо), а так же может сжиматься или расширяться.

При испытаниях, проведенных в ПАО "Волчанский агрегатный завод" на фрезерном станке Spinner с использованием инструмента (фрезы) производства фирмы Iscar, получены результаты, приведенные в табл. 10.1. При уменьшении частоты вращения инструмента

(фрезы) от 1200 до 1080 об./мин (на 10 %) нагрузка практически не изменилась, а при уменьшении частоты вращения инструмента от 1200 до 960 об./мин (на 20 %) – нагрузка значительно увеличилась (приблизительно в 2 раза).

Таблица 10.1

Результаты испытаний, проведенных в ПАО "ВАЗ"

№	Частота вращения инструмента, об./мин	Подача, мм/мин	Глубина резания, мм	Нагрузка на привод, %
1	1200	480	4,0	30-40
2	1080	480	4,0	30-40
3	960	480	4,0	70-80

Полученные данные подтверждаются и визуально: при уменьшении частоты вращения инструмента на 10 % вибрации, действующие на пол, не изменились, а при уменьшении частоты вращения инструмента на 20 % они в значительной степени увеличились.

Проведенные испытания показали, что первоначально были выбраны разные режимы резания относительно кривой, представленной на рис. 10.1. Так, при первом испытании с уменьшением частоты вращения инструмента (фрезы) от 1200 об./мин до 1080 об./мин (т.е. на 10 %) нагрузка на привод станка не вышла за пределы работоспособных режимов резания $(V,\ S,\ t)_1 \ldots (V,\ S,\ t)_2$. При втором испытании с уменьшением частоты вращения инструмента (фрезы) от 1200 до 960 об./мин (т.е. на 20 %) нагрузка на привод станка вышла за пределы работоспособных режимов резания $(V,\ S,\ t)_1 \ldots (V,\ S,\ t)_2$.

При испытаниях, проведенных в ООО "ТЦ "ВариУс" на токарном станке Doosan с использованием резца производства фирмы TaeguTec (при условии обеспечения одинаковой производительности обработки), получены следующие результаты (табл. 10.2).

Таблица 10.2

Результаты испытаний, проведенных в ООО "ТЦ "ВариУс"

№	Скорость резания, м/мин	Подача, об./мм	Глубина резания, мм	Нагрузка на привод, %
1	180	0,12	1,0	13-14
2	144	0,144	1,0	12-13
3	216	0,096	1,0	12-14

В этом случае уменьшение скорости резания от 180 до 144 м/мин (т.е. на 20 %) и увеличение скорости резания от 180 до 216 м/мин (т.е. на 20 %) не привело к значительному увеличению силы резания. Это означает, что все три рассмотренные режимы резания находятся в диапазоне $(V,\ S,\ t)_1 \ldots (V,\ S,\ t)_2$. На практике технологи стремятся попасть в рабочий диапазон режимов резания, но далее не стремятся определить наиболее эффективную точку в этом диапазоне.

Если же рассматривать выше приведенный пример со значениями стойкости инструмента, равными 45 мин и 120 мин, то они попадают в диапазон режимов резания $(V,\ S,\ t)_1 \ldots (V,\ S,\ t)_2$, который обеспечивает диапазон стойкости инструмента $T_1 \ldots T_2$ (рис. 10.2). Однако при этом нет уверенности, что стойкость инструмента, равная 120 мин, является максимально эффективной.

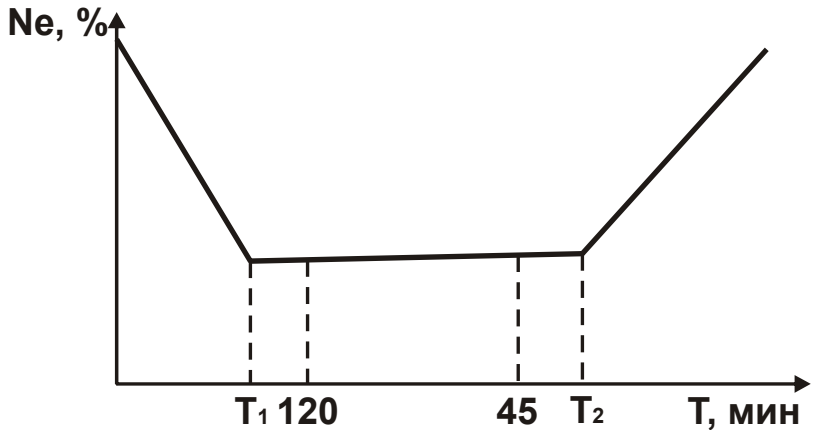


Рис. 10.2. Нагрузка на оборудование при разной стойкости инструмента

Установление нормативной величины стойкости инструмента для всех технологических операций, осуществляемых на предприятии, является не совсем обосновано, поскольку режимы резания в меньшей степени влияют на силу резания по сравнению с обрабатываемостью материала и типом инструмента.

Для эффективной обработки необходимо для каждой операции рассчитывать режимы резания с учетом таких параметров, как цена инструмента, заработная плата рабочего, обрабатываемость материала. После же получения нормативной стойкости для конкретной операции можно установить максимальную производительность, используя графическую зависимость, представленную на рис. 10.1.

К сожалению, задача определения диапазона режимов резания $(V,\ S,\ t)_1 \ldots (V,\ S,\ t)_2$, показанного на рис. 10.1, в научно-технической литературе не обоснована. Так же отсутствует объективная информация о причинах резкого изменения нагрузки на привод станка в точках $(V,\ S,\ t)_1$ и $(V,\ S,\ t)_2$ на рис. 10.1. При этом достаточно полно изучен вопрос корректировки режимов резания для достижения необходимой стойкости инструмента без потери производительности.

При испытаниях, проведенных в ООО "ТЦ "ВариУс" на токарном станке Doosan с использованием инструмента TaeguTec, оценивалась также возможность повышения стойкости инструмента при одинаковой производительности. Обработка проводилась в течение 31 мин. Как следует из табл. 10.3, наименьший износ инструмента, также как и наименьшая нагрузка на привод станка, достигались при скорости резания 144 м/мин.

Таблица 10.3

Результаты испытаний, проведенных в ООО "ТЦ "ВариУс"

№	Скорость резания, м/мин	Подача, об/мм	Глубина резания, мм	Износ инструмента по задней поверхности, мм
1	180	0,12	1,0	0,209
2	144	0,144	1,0	0,122
3	216	0,096	1,0	0,245

Аналогичные испытания проводились в ПАО "Волчанский агрегатный завод" на фрезерном станке Spinner с использованием инструмента Iscar (табл. 10.4).

Таблица 10.4

Результаты испытаний, проведенных в ПАО "ВАЗ"

№	Частота вращения инструмента, об/мин	Подача, мм/мин	Глубина резания, мм	Нагрузка на привод в начале испытания, %	Нагрузка на привод через 13 мин, %
1	1 200	480	4,0	30 – 40	70 – 80
2	1 080	480	4,0	30 – 40	40 – 45

Как показали испытания, за счет изменения скорости резания и подачи возможно увеличение или уменьшение стойкости инструмента. При испытаниях, проведенных в ООО "ТЦ "ВариУс", в результате уменьшения скорости резания на 20 % и повышения на 20 % подачи

удалось уменьшить износ инструмента на 58 % и тем самым повысить эффективность обработки. Испытания также показали, что коэффициент влияния скорости резания на стойкость инструмента волнообразный и зависит от конкретной величины скорости резания.

Согласно теории резания металлов, при увеличении износа инструмента увеличивается сила резания. Как видно из результатов испытаний, проведенных в ПАО "ВАЗ", за счет корректировки режимов резания удалось уменьшить рост нагрузки на привод станка от 110 % до 20 %. Это означает, что интенсивность износа инструмента значительно уменьшилась.

10.2. Условия эффективного применения современных режущих инструментов на машиностроительных предприятиях

Опыт внедрения инструментов зарубежного производства показал, что рекомендуемые режимы резания, как правило, нерациональны, и поэтому технологи предприятия-поставщика и предприятия-заказчика постоянно пытаются выбрать оптимальные режимы резания. Однако при таком выборе режимов резания нет четкого критерия, по которому определяется их оптимальность. В основном стремятся увеличить производительность обработки или повысить стойкость инструмента, а иногда и оба параметра одновременно.

При этом не обращается внимание на затраты, которые несет предприятие при изменении режимов резания. Критерий минимизации себестоимости обработки в данном случае является второстепенным, поскольку при ручном выборе режимов резания технологи стремятся уменьшить машинное время обработки и увеличить стойкость инструмента. В их понимании все это должно дать минимизацию затрат, хотя в действительности себестоимость обработки изменяется совершенно по другим более сложным законам и для ее минимизации необходимо располагать соответствующими экономическими знаниями и методиками расчета. Однако технологи владеют в основном техническими знаниями и недостаточно уделяют внимания учету изменения себестоимости обработки: в каких случаях она снижается, а в каких увеличивается за счет увеличения режимов резания.

В результате проведенных экспериментов установлена связь между стойкостью инструмента и скоростью резания (рис. 10.3). Как видно, с увеличением скорости резания V стойкость инструмента T непрерывно уменьшается, причем для зарубежного инструмента с износостойкими покрытиями – с меньшей интенсивностью. Это позволяет обработку производить с увеличенной скоростью резания – до 500 м/мин, тогда как отечественным инструментом – всего со скоростью резания до 200 м/мин. Однако, как известно, увеличение скорости резания V приводит к увеличению технологической себестоимости обработки детали C. Поэтому важно провести анализ изменения технологической себестоимости обработки от скорости резания и выбрать наилучший вариант обработки.

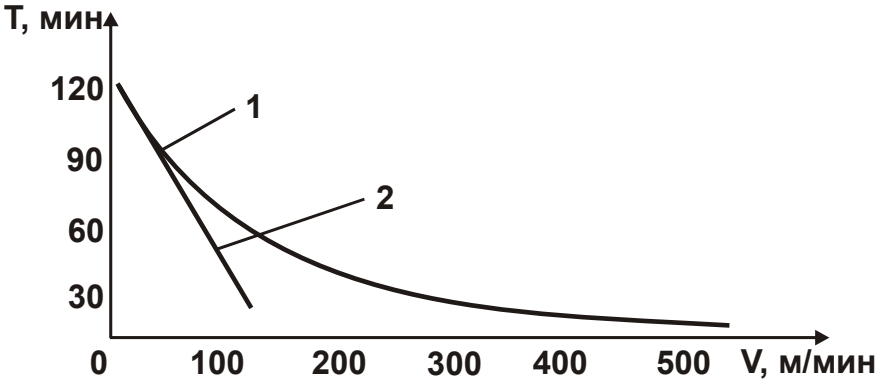


Рис. 10.3. Зависимость стойкости инструмента от скорости резания: 1 – зарубежный инструмент; 2 – отечественный инструмент

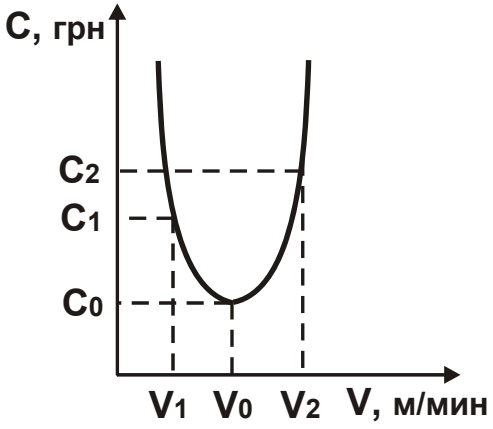


Рис. 10.4. Зависимость технологической себестоимости обработки детали от скорости резания

Расчетами установлено, что изменение технологической себестоимости обработки от скорости резания происходит по экстремальной зависимости (в виде параболы, рис. 10.4), т.е. при достижении скорости резания V_0 технологическая себестоимость принимает минимальное значение C_0. Этим объясняется то, что технолог, выбирая режимы резания вручную, как правило, попадает на левую или правую ветви параболы, а это приводит к увеличению технологической себестои-

мости обработки. Например, если технолог выбрал скорость резания V_1, то технологическая себестоимость обработки будет равна значению C_1 и, следовательно, предприятие недоиспользует возможности инструмента, а производительность не максимальная и у предприятия существуют резервы повышения производственной мощности. Если же технолог выбрал скорость резания V_2, то технологическая себестоимость будет равна значению C_2. В этом случае инструмент используется сверх нормы, и имеет место его перерасход, что значительно увеличивает технологическую себестоимость обработки.

Определить экстремальное (минимальное) значение технологической себестоимости обработки C_0 на основе лишь производственного опыта технолога практически не возможно. Необходимы еще и аналитические исследования. Без них любая операция будет характеризоваться заведомо увеличенной технологической себестоимостью.

При внедрении нового инструмента (например, зарубежного производства) на предприятии зачастую используют те же режимы резания (скорость резания), которые применялись ранее при обработке традиционными конструкциями инструментов (например, отечественного производства). Естественно, это не позволяет в максимальной степени реализовать потенциальные возможности нового более качественного инструмента. Подтверждением тому являются графики зависимостей изменения технологической себестоимости обработки от скорости резания для новой и традиционно применяемой конструкций инструментов (рис. 10.5).

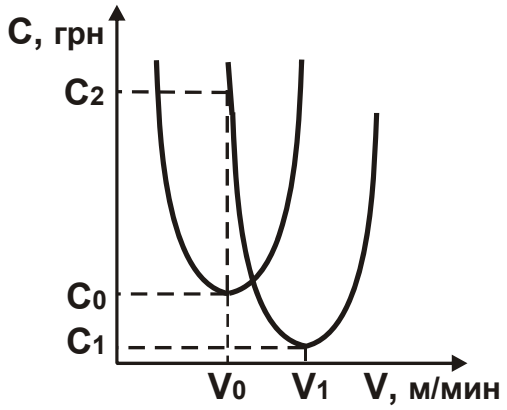


Рис. 10.5. Зависимости технологической себестоимости обработки от скорости резания для новой и традиционно применяемой конструкций инструментов

Как видно, минимум технологической себестоимости для традиционно применяемой конструкции инструмента достигается при скорости резания V_0, а для новой конструкции инструмента – при скорости резания V_1. Следовательно, минимальное значение технологической себестоимости C_1 меньше минимального значения C_0, т.е. применение нового инструмента позволяет уменьшить минимальное значение технологической себестоимости обработки.

Однако это справедливо при обработке с оптимальными скоростями резания – V_1 и V_0. Если же обработку новым инструментом производить со скоростью V_0, то технологическая себестоимость резко увеличится до значения $C_2 > C_0$.

При исследовании работоспособности инструмента необходимо применять прогрессивные математические модели и методы анализа. Например, при определении условий уменьшения технологической себестоимости обработки C можно использовать аналитическую зависимость, в которой рассматриваются две изменяющиеся статьи затрат, связанные с заработной платой рабочего-станочника и расходом режущих инструментов [31; 106]:

$$C = N \cdot \tau_o \cdot S_1 \cdot k_Д + N_1 \cdot Ц, \qquad (10.1)$$

где N − количество обрабатываемых деталей;

τ_o − основное технологическое время обработки одной детали, час;

S_1 − тарифная ставка рабочего, грн/час;

$k_Д$ − коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на тарифную ставку рабочего;

N_1 – количество режущих инструментов, необходимое для обработки N деталей;

Ц − цена режущего инструмента, грн.

С учетом соотношения $N_1 = N \cdot \tau_0 / T$ зависимость (10.1) принимает вид:

$$C = N \cdot \tau_o \cdot (S_1 \cdot k_Д + Ц_1), \qquad (10.2)$$

где T – стойкость режущего инструмента, час;

$Ц_1 = Ц / T$ – стоимость 1 часа работы режущего инструмента, грн/час.

Из зависимости (10.2) следует, что уменьшить технологическую себестоимость обработки С для заданного значения N можно уменьшением параметров τ_o, S_1 и $k_Д$. С учетом того, какая из величин: $S_1 \cdot k_Д$ или $Ц_1$ будет преобладать, можно сделать вывод об ее удельном весе в общей технологической себестоимости обработки. Так, произведение $S_1 \cdot k_Д$ можно рассматривать фактически постоянной величиной, а $Ц_1$ – переменной, зависящей от многих технологических факторов и в первую очередь от параметров Ц и Т. Очевидно, для современных зарубежных режущих инструментов параметры Ц и Т будут больше, чем для отечественных инструментов. Однако, как показывает опыт использования зарубежных инструментов, отношение $Ц_1 = Ц / Т$ для них меньше, чем для отечественных, также как и меньше произведение $S_1 \cdot k_Д$. Следовательно, удельный вес затрат на режущие инструменты в технологической себестоимости обработки С меньше удельного веса затрат на заработную плату рабочего-станочника. Этим объясняется тот факт, что удельный вес затрат на режущие инструменты в технологической себестоимости обработки С принимает весьма малые значения и может достигать 3 %.

В условиях резкого скачка курса валют себестоимость продукции увеличивается за счет увеличения затрат на импортный инструмент и импортное сырье. Уровень увеличения себестоимости зависит от величины импорта в структуре продукции.

Увеличение затрат на режущие инструменты влияет на себестоимость продукции, которая включает затраты на заработную плату основных рабочих и социальные отчисления, затраты на инструменты и электроэнергию для технологических нужд. Затраты на электроэнергию меньше других статей затрат, поэтому ими при расчете технологической себестоимости можно пренебречь.

В табл. 10.5 приведены основные затраты, определяющие технологическую себестоимость 100 нормо-часов производства одного вида деталей при одинаковых режимах резания, но разных курсах валют. В расчетах используется: часовая заработная ставка рабочего – 20,0 грн., социальные отчисления – 22 % от размера заработной платы, стоимость 1 режущей кромки сменной металлорежущей пластины (СМП) – 2,7 доллара США, стоимость державки инструмента – 247

долларов США (стойкость – 400 кромок СМП). Стойкость 1 режущей кромки СМП – 2,5 часа.

Таблица 10.5

Технологическая себестоимость 100 нормо-часов обработки деталей, грн

Курс доллара США	Затраты на заработную плату основных рабочих	Затраты на социальные отчисления основных рабочих	Затраты на державку	Затраты на СМП	Всего
8,1	2 000,00	440,00	200,07	874,80	3 514,87
24,0	2 000,00	440,00	592,80	2 592,00	5 624,80

Из табл. 10.54 следует, что при увеличении курса валют на 196 %, технологическая себестоимость 100 нормо-часов увеличилась на 60 %. На рынке с высокой конкуренцией повышение технологической себестоимости изготовления детали на 19,2 % приводит к тому, что выпускаемая продукция неконкурентоспособна. В результате предприятие-производитель несет убытки.

Решением данной проблемы может стать использование методики, описанной выше [89; 93; 95]. На ее основе можно рассчитать режимы резания и другие условия обработки с учетом изменения курса валют без уменьшения производительности. В табл. 10.6 приведены результаты расчетов технологической себестоимости 100 нормо-часов обработки деталей с учетом применения предложенной методики для тех же исходных данных, которые приведены в табл. 10.5.

Таблица 10.6

Технологическая себестоимость 100 нормо-часов обработки деталей, грн

Курс доллара США	Стойкость, час	Затраты на заработную плату основных рабочих	Затраты на социальные отчисления основных рабочих	Затраты на державку	Затраты на СМП	Всего
8,10	2,5	2 000,00	440,00	200,07	874,80	3 514,87
24,00	4,5	2 000,00	440,00	329,33	1 438,56	4 207,89

Стойкость сменной металлорежущей пластины (СМП) с применением новых режимов резания составляет 4,5 часа.

Из табл. 10.6 следует, что за счет применения новой методики расчета режимов резания с учетом изменения (увеличения) курса валют, технологическую себестоимость не удалось вывести на прежний уровень, но удалось значительно уменьшить ее рост (с 60 % до 19,7 %) при одинаковой производительности обработки.

10.3. Определение оптимальных режимов резания инструментами с твердосплавными пластинами геометрии WIPER

Тенденции развития современного машиностроения требуют постоянного повышения качества обрабатываемых поверхностей деталей, связанного в первую очередь с улучшением шероховатости поверхности. Это предполагает создание и применение новых технологий, нового оборудования и инструментов.

Особый интерес представляет теоретический анализ закономерностей формирования шероховатости поверхности и условий ее уменьшения с учетом изменения геометрии режущих твердосплавных пластин при точении [84]. Одним из эффективных решений является применение лезвийного металлорежущего инструмента с закругленной вершиной режущей части. Поэтому в настоящее время практически весь металлорежущий инструмент выпускается со стандартными углами закругления режущей части. Благодаря этому техническому решению удалось на операциях точения существенно улучшить шероховатость поверхности.

Вместе с тем, в научно-технической литературе, используемой для обучения молодых специалистов-технологов, в основном рассматривается традиционно применяемый лезвийный металлорежущий инструмент, оснащенный пластинами с вершиной режущей части без закругления.

Для расчета параметра шероховатости поверхности $R_{z\,p}$ при точении этим инструментом в работе [11] предложена следующая аналитическая зависимость:

$$R_{z\,p} = \frac{S \cdot \sin\varphi \cdot \sin\varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}, \qquad (10.3)$$

где S – подача, мм/об.;

φ – главный угол резца в плане;

φ_1 – вспомогательный угол резца в плане.

Естественно, использовать эту зависимость в современном металлообрабатывающем производстве, когда токарная обработка производится резцами, оснащенными пластинами с закругленной вершиной режущей части, не представляется возможным.

Мировые производители лезвийных инструментов в своих каталогах предлагают краткую информацию о технологии металлообработки. В ней также приведена универсальная формула для расчета параметра шероховатости поверхности $R_{z\,p}$ при точении новыми инструментами, оснащенными режущими пластинами с закругленной вершиной [111]:

$$R_{z\,p} = \frac{S^2}{8 \cdot R}, \qquad (10.4)$$

где R – радиус закругления вершины режущей пластины, мм.

В основу этой формулы, по сути, положен расчет шероховатости поверхности при фрезеровании цилиндрической фрезой, приведенный в работе [11]:

$$R_{z\,p} = \frac{S_z^{\,2}}{4 \cdot D}, \qquad (10.5)$$

где S_z – подача на зуб, мм/зуб;

D – диаметр закругления вершины режущей пластины, мм.

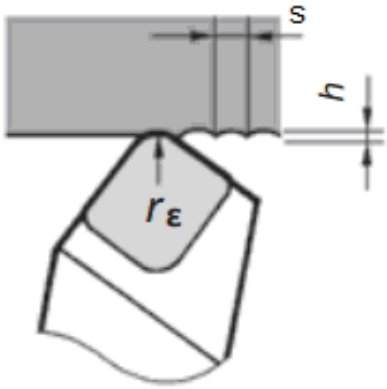


Рис. 10.6. Схема образования шероховатости поверхности при точении [111]

Для оценки достоверности рассмотренной формулы (10.4) было проведено ее математическое моделирование с помощью программного пакета Компас 3D. Как следует из рис. 10.6, впадины, образующие на обрабатываемой поверхности при точении, имеют форму окружности. Однако если исходить из графического представления реальных условий образования шероховатости поверхности при точении резцами с закругленной вершиной, то

геометрическая схема впадины, показанная на рис. 10.6, образуется только в некоторых случаях.

В остальных случаях геометрическая схема впадины представляет собой не форму окружности, а более сложную форму (рис. 10.7), например полученную при точении резцом (рис. 10.8,а) с использованием режущей пластины с углом режущей части 80^0, радиусом закругления 1,2 мм и вспомогательным углом резца в плане $\varphi_1 = 5^0$ (рис. 10.8,б). В этом случае шероховатость поверхности образуется как от работы радиусной части вершины пластины, так и от работы вспомогательного лезвия резца, расположенного под углом $\varphi_1 = 5^0$ к обрабатываемой поверхности.

Рис. 10.7. Схема образования шероховатости поверхности при точении, полученная на основе моделирования

а б

Рис. 10.8. Применяемый инструмент для моделирования [111]

На основе графического моделирования образования шероховатости поверхности при точении было установлено, что с увеличением подачи центр впадины смещается влево, образуя сложную фигуру, отличающуюся от окружности. С учетом этого фактора (пренебрегая влиянием других факторов) реально полученная шероховатость поверхности будет отличаться от шероховатости поверхности, рассчитанной по формуле (10.4).

Следовательно, использование формулы (10.4) будет приводить к существенным погрешностям при расчете шероховатости поверхности и поэтому ее применять нецелесообразно.

В связи с этим представляет интерес аналитическое определение параметра шероховатости поверхности $R_{z\ p}$ для данного случая точения [149]. Исходя из расчетной схемы, приведенной на рис. 10.9, положение вспомогательного лезвия резца в системе координат хоу может быть описано зависимостью: $y = -b + tg\varphi_1 \cdot x$. Величина b определяется из условия касания в точке А прямой, описываемой зависимостью $y = -b + tg\varphi_1 \cdot x$, и окружности радиусом R с центром в точке O_1: $\frac{R}{(R+b)} = \cos\varphi_1$. Откуда $b = R \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos\varphi_1}\right)$.

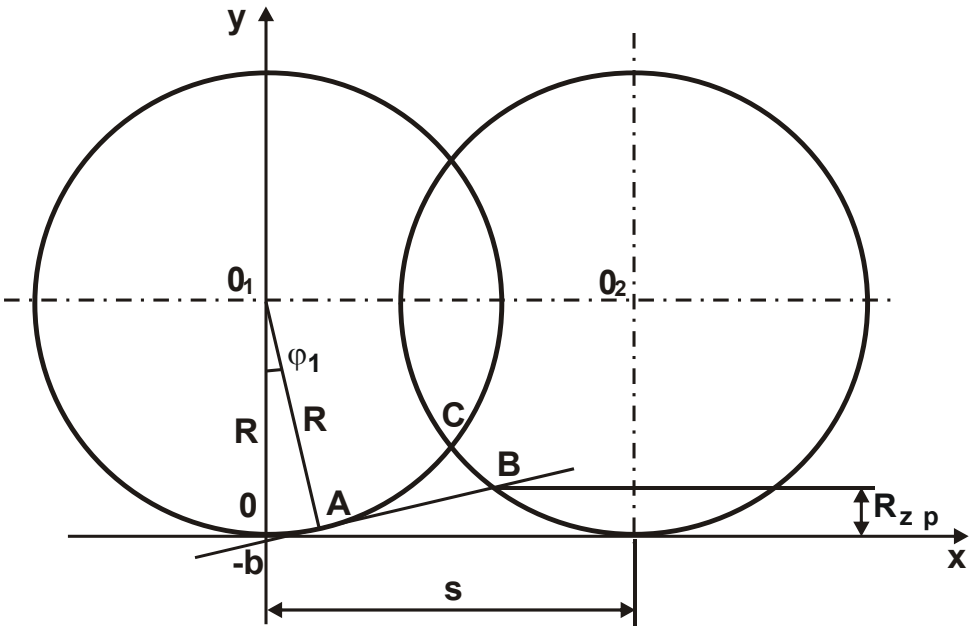


Рис. 10.9. Расчетная схема определения параметра шероховатости поверхности $R_{z\ p}$

Параметр шероховатости поверхности $R_{z\ p}$ определяется из условия пересечения в точке В прямой, описываемой зависимостью $y = -b + tg\varphi_1 \cdot x$, и окружности радиусом R с центром в точке O_2. Окружности с центрами в точках O_1 и O_2 расположены на удалении, равном величине подачи S. Исходя из этого, составлена система уравнений, включающая уравнение окружности радиусом R с центром в точке O_2 и уравнение прямой линии, проходящей через точку А:

$$\begin{cases} (x - S)^2 + (y - R)^2 = R^2, \\ y = -b + tg\varphi_1 \cdot x. \end{cases} \qquad (10.6)$$

Подставляя второе уравнение в первое уравнение системы, после преобразований получено квадратное уравнение относительно неизвестной величины x:

$$x^2 + p \cdot x + q = 0, \qquad (10.7)$$

где $p = -\left(S + R \cdot \frac{tg\varphi_1}{\cos\varphi_1}\right) \cdot \cos^2\varphi_1$;

$q = \left(S^2 + R^2 \cdot tg^2\varphi_1\right) \cdot \cos^2\varphi_1$.

Решение квадратного уравнения:

$$x = -\frac{p}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q} = \left(S + R \cdot \frac{tg\varphi_1}{\cos\varphi_1}\right) \cdot \cos^2\varphi_1 - \\ - \sqrt{\left(S + R \cdot \frac{tg\varphi_1}{\cos\varphi_1}\right)^2 \cdot \cos^4\varphi_1 - \frac{\cos^2\varphi_1}{2} \cdot \left(S^2 + R^2 \cdot tg^2\varphi_1\right)}. \qquad (10.8)$$

Величина $y = R_{z\ p}$, исходя из системы уравнений (10.6), определяется зависимостью:

$$y = R_{z\ p} = R \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos\varphi_1}\right) + tg\varphi_1 \cdot x. \qquad (10.9)$$

Очевидно, при условии пересечения в точке А двух окружностей радиусами R с центрами в точках O_1 и O_2 параметр шероховатости поверхности $R_{z\ p}$ будет определяться зависимостью (10.4), поскольку формирование шероховатости поверхности будет происходить лишь от работы радиусной части вершины пластины. В этом случае справедливо отношение $\frac{x}{R} = \sin\varphi_1$, откуда $x = R \cdot \sin\varphi_1$; $S = 2 \cdot x = 2 \cdot R \cdot \sin\varphi_1$.

Расчетами установлено, что для исходных данных $R = 1{,}2$ мм и $\varphi_1 = 5^0$ подача $S = 0{,}21$ мм/об., а для $R = 0{,}8$ мм и $\varphi_1 = 5^0$ соответственно подача $S = 0{,}14$ мм/об.

С увеличением подачи S, начиная с полученных значений, параметр шероховатости поверхности $R_{z\ p}$ необходимо определять на основе зависимостей (10.8) и (10.9), учитывающих работу как радиусной части вершины пластины, так и работу вспомогательного лезвия резца, расположенного под углом $\varphi_1 = 5^0$ к обрабатываемой поверхности. В результате форма микронеровностей, образуемых на обрабатывае-

мой поверхности, будет принимать вид, показанный на рис. 10.7, рассматривая движение резца в противоположном направлении. Очевидно, параметр $R_{z\ p}$, определяемый из условия пересечения прямой и окружности в точке В, будет всегда меньше параметра $R_{z\ p}$, определяемого пересечением двух окружностей в точке С. Следовательно, участие в работе вспомогательного лезвия резца приводит к уменьшению шероховатости поверхности.

На рис. 10.10 и в табл. 10.7 приведены рассчитанные по зависимостям (10.4) и (10.9) значения параметра шероховатости поверхности $R_{z\ p}$ для $R = 0{,}8$ мм и $\varphi_1 = 5^0$.

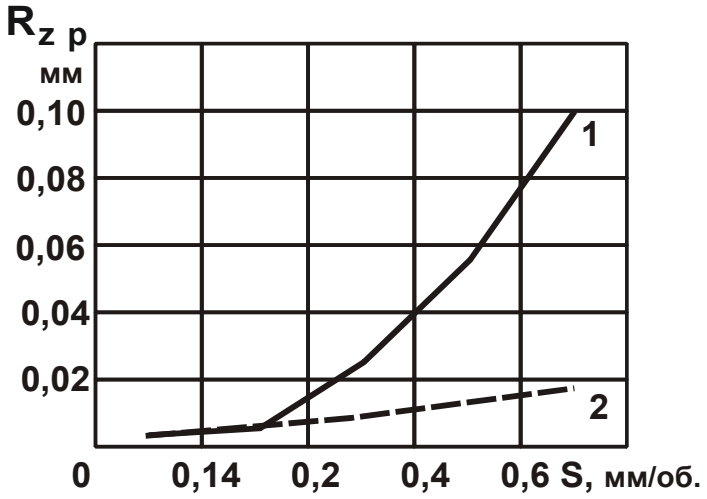


Рис. 10.10. Графики изменения параметра шероховатости поверхности $R_{z\ p}$ от подачи S: а – расчет по зависимости (10.4);

б – расчет по зависимости (10.9)

Таблица 10.7

Расчетные значения параметра шероховатости поверхности $R_{z\ p}$

S, мм/об.	0,14	0,2	0,4	0,6	0,8
$R_{z\ p}$ по зависимости (10.4), мм	0,003	0,0063	0,025	0,056	0,1
$R_{z\ p}$ по зависимости (10.9), мм	0,003	0,0068	0,0087	0,0126	0,0172

Как видно, с увеличением подачи S параметр $R_{z\ p}$, рассчитанный по зависимости (10.9), увеличивается, однако не столь существенно по сравнению с увеличением параметра $R_{z\ p}$, рассчитан-

ного по упрощенной зависимости (10.4). При этом параметр $R_{z\ p}$, рассчитанный по (10.4), увеличивается по квадратичной зависимости, а параметр $R_{z\ p}$, рассчитанный по зависимости (10.9), увеличивается фактически линейно. Следовательно, величина погрешности шероховатости поверхности с увеличением подачи изменяется нелинейно, что ограничивает возможности применения зависимости (10.4). При подаче $S = 0{,}8$ мм/об. отношение значений параметра шероховатости поверхности $R_{z\ p}$, рассчитанных по зависимостям (10.4) и (10.9), составляет 5,81, что указывает на существенное влияние положения вспомогательного лезвия резца на формирование шероховатости поверхности и условия ее уменьшение.

Таким образом, в работе получена аналитическая зависимость для определения параметра шероховатости поверхности $R_{z\ p}$ с учетом совместной работы радиусной части вершины пластины и вспомогательного лезвия резца, что позволило уточнить известное решение, учитывающее лишь работу радиусной части вершины пластины. Полученная зависимость позволяет научно обоснованно определить параметры режима резания и условия их повышения. Это фактически исключает необходимость в процессе обработки деталей корректировать режимы резания для заданной шероховатости поверхности.

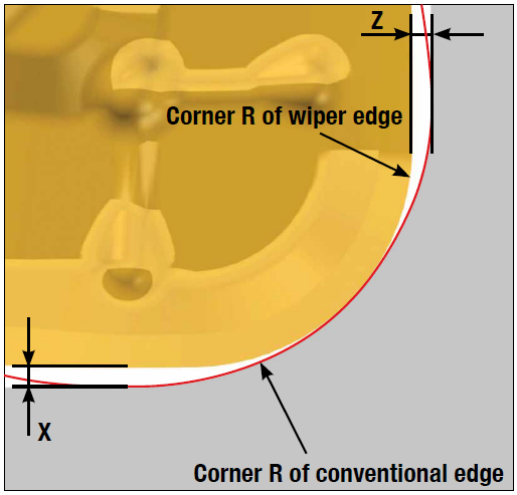
Предложенный в работе подход применим на операциях черновой и получистовой обработки, т.к. на большинстве операций чистовой обработки применяются пластины с технологией Wiper [111]. Эта технология предусматривает на сменных металлорежущих пластинах создание вершины режущей части из нескольких закруглений (рис. 10.11). В этом случае вершина режущей части ближе подходит к углу, образованному снимаемым материалом и обработанной деталью.

Эффект повышения качества обработки от применения технологии Wiper заключается в создании счесанных краев режущей части сменной пластины. Преобразование радиусного закругления сменной пластины в прямую линию позволяет при определенной подаче исключать образование геометрической шероховатости, которая имеет наибольшее влияние на шероховатость обрабатываемой поверхности.

Испытания обычной геометрии пластины и пластины с геометрией Wiper, проведенные ТЦ "ВариУс", показали, что при одинаковой по-

даче (S = 0,17 мм/об.) значения параметра шероховатости поверхности R_a значительно отличаются. Так, для обычной геометрии пластины параметр $R_a = 2{,}13$ мкм, а для пластины с геометрией Wiper – $R_a = 0{,}67$ мкм. Эти же испытания показали, что изменение параметра шероховатости поверхности R_a происходит нелинейно.

При изменении подачи в пределах $S = 0{,}09 \ldots 0{,}2$ мм/об. параметр шероховатости поверхности R_a изменяется практически пропорционально: $R_a = 0{,}52 \ldots 0{,}91$ мкм. При подаче $S = 0{,}3$ мм/об. параметр шероховатости поверхности $R_a = 3{,}0$ мкм, т.е. произошло значительное увеличение параметра R_a.



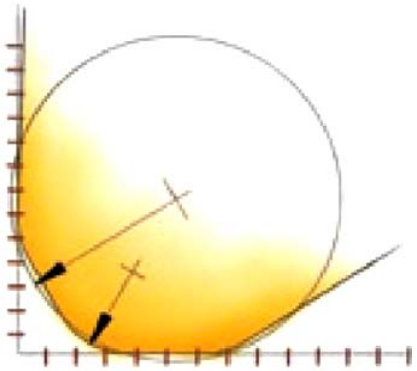


Рис. 10.11. Схемы инструмента с геометрией режущей части типа Wiper

Научным центром НТК "Эльбор" было проанализировано это увеличение R_a и установлено, что при подаче до $S = 0{,}245$ мм/об. не образуется геометрическая шероховатость, а с увеличением подачи ($S > 0{,}245$ мм/об.) появляется геометрическая шероховатость и происходит значительное увеличение конечной шероховатости поверхности.

Данный результат позволяет для пластины DNMG 130504 WA TT8115 теоретически определить максимально эффективную подачу, которая обеспечивает требуемое качество обработанной детали – при испытании требовалось обеспечить $R_a \leq 1{,}6$ мкм. Теоретический расчет исключает необходимость подбора на станке подачи, что уменьшает время на внедрение инструмента и снижает затраты как предприятия-заказчика, так и поставщиков инструментов.

10.4. Механическая обработка – "узкое место" в планировании себестоимости проектирования детали

В процессе проектирования и конструирования новой детали определяется себестоимость ее изготовления, на основании которой анализируется эффективность выпуска данной детали. После же запуска в производство себестоимость изготовления детали может постоянно изменяться как от внутренних, так и от внешних факторов.

Спрогнозировать затраты на производство одной детали полностью невозможно. Можно спрогнозировать затраты на сырье и комплектующие, поскольку масса заготовки указана в чертеже детали или ее легко можно определить по известным формулам. Затраты на заработную плату основных рабочих рассчитываются на основании машинного и вспомогательного времени. Зная величину машинного времени, рассчитываются затраты на электроэнергию для оборудования и смазочно-охлаждающей жидкости. Остальные затраты в основном рассчитываются пропорционально сумме затрат на сырье, заработную плату, металлорежущие инструменты, электроэнергию и смазочно-охлаждающие жидкости [19; 82].

Наибольшую проблему в расчете затрат составляют затраты на металлорежущие инструменты. Ранее в основном использовались отечественные инструменты, регламентированные ГОСТами и изученные на основе проведения многочисленных испытаний и описанные в справочниках по использованию каждого вида инструмента на разных операциях и в разных условиях. С помощью данных из справочников можно было устанавливать оптимальные режимы резания, прогнозировать стойкость инструмента. Все это позволяло перед началом обработки детали знать норму расхода инструмента, на основе которой определялись затраты на инструмент.

В настоящее время в индустриально развитых странах созданы и изготавливаются принципиально новые конструкции режущих инструментов, которые по своим техническим характеристикам превосходят отечественный инструмент. Этот инструмент уже около 15 лет активно используется на отечественных предприятиях и позволяет им получать прибыль. Но за весь период применения импортного инструмента получено мало информации об его технологических возможностях. За-

рубежные производители всю основную техническую информацию о материале инструмента, о покрытии и способах ее нанесения засекречивают, ссылаясь на коммерческую тайну. Потребитель получает информацию о наименовании покрытия и материала в виде кодированного обозначения (например: материал CVD, покрытие T9105). Потребитель, получив данные об инструменте в виде такого обозначения, понимает, что данный инструмент производится в Японии предприятием Tungaloy, а сплав предназначен для точения стали с минимальным содержанием углерода и без дополнительных добавок.

Производитель по "доброй воле" указывает диапазон режимов резания, с помощью которых можно достичь максимальной производительности, не теряя при этом режущей способности инструмента. Но, как показала практика внедрения инструментов на отечественных предприятиях, весьма малое количество оборудования способно выполнять обработку в диапазоне рекомендуемых режимов резания из-за большого износа основных фондов предприятий. При этом установлено, что, применяя рекомендуемые режимы резания на современном оборудовании, статья затрат на инструмент повышается и перекрывает эффект от увеличения производительности и производственных мощностей в целом по предприятию.

Часто встречается ситуация, когда применяются режимы резания такие же, как и при использовании отечественного инструмента или увеличенные в два раза. В результате такого подхода к организации производственного процесса качество обработки детали и стойкость инструмента повышаются. Это позволяет уменьшить потери от брака, снизить затраты на приобретение инструмента, уменьшая тем самым себестоимость готовой детали. Если же новые режимы резания позволяют увеличить производительность, то в значительной степени снижаются затраты на заработную плату основных рабочих и социальные отчисления.

Исходя из этого, возникают два вопроса: почему именно эти режимы резания, а не другие, и что будет при других режимах резания, какова будет стойкость инструмента?

В данный момент ответить на вопрос – какова стойкость конкретного инструмента на конкретных режимах резания при обработке конкретной детали – никто не может. Исходя из многолетней практики

внедрения инструмента определенного производителя, технологи поставщика могут лишь приблизительно сказать о стойкости инструмента на основании полученных опытных данных.

Выбор режимов резания в основном происходит исходя из поставленной задачи, однако практически всегда сводится к одному − показать лучший результат по сравнению с конкурентами [47]. При таком подходе к установлению режимов резания потребитель получает несовершенные режимы резания, что не позволяет достичь максимально экономичной эффективности обработки.

Многие попытки создать автоматизированные системы управления производством оставались нереализованными или же реализовывались, но не полностью. Проблемы реализации автоматизированных систем, а так же выбор оптимальных режимов резания, при которых может достигаться максимальный экономический эффект, в основном состоит в невозможности прогнозировать норму расхода металлорежущего инструмента. Получается, что при составлении затрат на производство детали установить точную величину себестоимости невозможно. Она определяется лишь после осуществления обработки детали и подсчета реально истраченных средств во время обработки.

Исходя из невозможности определить точную величину затрат на инструмент, фактически невозможно максимально точно спрогнозировать величину необходимого инструмента, который требуется закупить. Из-за этого у предприятия возникают два варианта: иметь финансовый резерв на случай экстренной закупки недостающего инструмента или же опираться на имеющиеся средства в каждой конкретной ситуации. Если же опираться на второй вариант, то не всегда предприятие сможет экстренно закупить недостающий инструмент в необходимом количестве.

Сбои в поставке инструмента на рабочее место создают сбои и в выполнении плана обработки партий деталей, что ведет к сбою всей производственной цепочки. Оперативно решая проблему недостачи инструмента, часто возникает ситуация, когда применяется инструмент, не позволяющий обеспечить качественную обработку детали, и за счет этого себестоимость изготовления детали увеличивается.

Система снабжения на промышленных предприятиях построена недостаточно эффективно, поскольку она не позволяет обеспечить

производство по принципу "Точно вовремя" [39]. Из-за нарушения одного звена в системе снабжения может разрушиться вся система предприятия.

Решением проблемы снабжения предприятий могут быть следующие направления деятельности предприятий:

− импортозамещение металлорежущего инструмента;

− более глубокое изучение технических возможностей зарубежных инструментов за счет новых подходов к их использованию.

К сожалению, направление, связанное с импортозамещением металлорежущего инструмента, в данный момент времени практически невозможно, поскольку отечественная инструментальная промышленность не в состоянии конкурировать с зарубежными производителями и производить инструмент, отвечающий мировым требования качества.

Более глубокое изучение технических возможностей инструментов является более реальным. Основной проблемой в этом направлении является нежелание крупных инструментальных предприятий государства заниматься данным вопросом. При этом ученые-энтузиасты не могут произвести полноценное изучение технических возможностей зарубежных инструментов из-за отсутствия статистических данных работы инструментов на разных режимах резания на разных операциях. Полномасштабный контакт ученых и инструментальных предприятий практически невозможен из-за нежелания последних раскрывать информацию, которую они считают коммерческой. Крайне редко удается получить информацию о работе инструмента от инструментальных или от промышленных предприятий. Собрав такую информацию, специалистам НТК "Эльбор" удалось разработать новый подход к выбору оптимальных режимов резания для современных инструментов.

Предложенный подход к выбору режимов резания позволяет решить многие проблемы, описанные выше. Появилась возможность прогнозировать норму расхода инструмента до начала его использования. Выбранные режимы резания базируются не только на технических, но и на экономических факторах.

Необходимость учета экономических факторов при выборе режимов резания обусловлена изменением внешней среды. Отечественная экономика уже много лет функционирует в условиях рынка, на ко-

тором выживают сильнейшие предприятия. Для этого необходимо применять технологии, позволяющие минимизировать затраты на производство [86].

Традиционный подход к выбору режимов резания (который используется в данный момент на всех предприятиях) предусматривает ситуацию, когда изготовленную продукцию обязательно приобретут и за ее реализацию не нужно бороться. Устанавливаются режимы резания, которые позволяют быстро и качественно выполнить обработку. Многие технологи считают, что фактор себестоимости производства не влияет на работу инструмента. Поэтому более чем 95 % всех режимов резания, которые используются в производстве, эффективны только с технической точки зрения. При этом экономическая эффективность не является максимально возможной.

Как показали результаты исследований режимов резания, установленные специалистами НТК "Эльбор", при дополнительном учете соотношения цены инструмента и тарифной часовой ставки основного рабочего, предприятие способно сократить себестоимость металлообработки от нескольких процентов до нескольких раз. При этом не требуется вложения дополнительных средств. Новый подход позволяет минимизировать "слепое" копирование зарубежных технологий, которые были разработаны под экономику иностранных государств. Специалисты же НТК "Эльбор" на основании анализа технического и экономического состояния предприятия, разрабатывают технологии металлообработки, которые наиболее эффективны для конкретного предприятия.

Выводы

1. Показана эффективность применения современных режущих твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства. В то же время, отсутствие методик испытаний этих инструментов и выбора рациональных режимов резания затрудняет максимальное использование их потенциальных возможностей. Это связано, в первую очередь, с ограниченными представлениями о реальной стойкости таких инструментов (которая значительно превышает стойкость традиционных инструментов) и условиях достижения

минимальной себестоимости обработки. В связи с этим предложена методика выбора и корректировки рациональных режимов резания на основе допустимой нагрузки, действующей на оборудование с учетом стойкости инструмента. Показано, что ограничениями по изменению режимов резания в основном выступает сила резания, которая имеет разную интенсивность увеличения с изменением режимов резания. Поэтому существует широкий диапазон режимов резания, способных обеспечить нормальную обработку деталей и повысить эффективность применения на предприятиях импортного лезвийного инструмента.

2. Определены условия снижения себестоимости обработки. Предложена методика выбора оптимальных режимов резания по критерию минимальной себестоимости обработки. Показано, что применение современных режущих твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства позволяет уменьшить себестоимость обработки и повысить конкурентоспособность изготавливаемой машиностроительной продукции. Обосновано влияние курса валют на себестоимость обработки. Так, установлено, что с увеличением курса доллара США с 8,1 до 24,0 грн (т.е. на 196 %) себестоимость обработки увеличилась на 60 %, а это привело к неконкурентоспособности выпускаемой продукции. Поэтому применена новая методика расчета режимов резания с учетом изменения курса валют, благодаря которой удалось уменьшить рост себестоимости обработки с 60 % до 19,7 % при одинаковой производительности обработки и обеспечить изготовление конкурентоспособной продукции.

3. На основе полученных аналитических зависимостей и графического моделирования с помощью программного пакета Компас 3D проведен теоретический анализ закономерностей формирования шероховатости поверхности при точении резцами, оснащенными твердосплавными пластинками с закругленной вершиной режущей части. Установлено, что формирование шероховатости поверхности может происходить как от работы лишь радиусной части пластины, так и от совместной работы радиусной части пластины и вспомогательного лезвия резца, расположенного под некоторым углом к обрабатываемой поверхности. Показано, что в случае совместной работы радиусной части пластины и вспомогательного лезвия резца шероховатость поверхности меньше. Причем, чем меньше вспомогательный

угол в плане резца, тем значительнее уменьшение шероховатости поверхности. Приведены характеристики современных режущих пластин, позволяющие существенно уменьшить шероховатость поверхности при точении.

4. Разработан новый подход к выбору оптимальных режимов резания для современного инструмента, позволяющий прогнозировать норму расхода инструмента до начала его использования. Выбранные режимы резания базируются не только на технических, но и на экономических факторах, что открывает новые возможности разработки технологий металлообработки, которые наиболее эффективны для конкретного предприятия. Определены условия рационального применения режущих инструментов на машиностроительных предприятиях с учетом конкурентной борьбы инжиниринговых фирм, занимающихся внедрением в производство современных дорогостоящих зарубежных режущих инструментов различных фирм-производителей.

5. Показано, что промышленные предприятия, которые активно сотрудничают с инжиниринговыми организациями, развиваются быстрее, чем предприятия, которые опираются на собственные силы в решении всех производственных вопросов. Поэтому каждому промышленному предприятию, которое ставит перед собой задачу реального развития и выхода на мировые рынки, следует проанализировать возможности тесного сотрудничества с инжиниринговыми организациями. Это связано с тем, что в таких организациях работают квалифицированные сотрудники, имеющие богатый практический опыт по внедрению и эксплуатации предоставляемого нового оборудования и инструментов, обучению специалистов предприятий работе с ними. Показано также, что вложение средств в модернизацию производственных фондов предприятий является одним из наиболее выгодных, однако долгосрочных (2 – 3 года) вложений.

Общие выводы

В работе показана важная роль проведенных в Харькове в период 2000–2017 гг. ежегодных международных научно-практических конференций "Физические и компьютерные технологии" в методологическом обеспечении разработки и создании новых технологий производства, направленных на повышение эффективности производства и создание конкурентоспособной на мировом рынке продукции, а также на усиление подготовки инженеров, менеджеров и экономистов. Отмечается особая заслуга научной технологической школы профессора Якимова А. В. и творческого научного коллектива кафедры техники и технологий Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеца в организации и проведении конференций, подготовке коллективного научного 10-томного издания "Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения" (под общей редакцией профессоров Новикова Ф. В. и Якимова А. В.), которое выполнено на фундаментальном научном уровне и вооружает инженеров-технологов новыми знаниями о технологиях машиностроения, качестве и производительности обработки деталей машин.

Настоящая монография является дальнейшим развитием этого издания. В ней приведены новые теоретические решения об эффективном использовании современных режущих лезвийных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства на предприятиях Украины. Приведены новые конструкции этих инструментов и условия их рационального применения для обработки различных материалов. Обоснован выбор оптимальных режимов резания по критерию наименьшей себестоимости обработки. Показана возможность осуществления высокоскоростного резания, за счет применения сборных режущих лезвийных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями, обеспечивающего многократное увеличение производительности и снижение себестоимости обработки.

Приведены новые математические модели тепловых процессов, возникающих при резании и шлифовании материалов, и на их основе доказана возможность стабилизации температуры резания с течением времени обработки. Показано, что в условиях лезвийной обработки

вполне возможна реализация данной закономерности вследствие существенного уменьшения энергоемкости обработки. Это открывает новые перспективы повышения производительности лезвийной обработки фактически без увеличения температуры резания и снижения качества обработки.

Установлено, что основным условием уменьшения температуры резания при шлифовании является уменьшение энергоемкости обработки на основе повышения режущей способности круга и снижения интенсивности трения в зоне шлифования. Получены новые аналитические зависимости для определения энергоемкости обработки при резании и шлифовании материалов. Показано определяющее влияние отношения толщины среза к радиусу округления режущей кромки инструмента на снижение энергоемкости обработки, особенно, в условиях шлифования. Установлено, что добиться увеличения отношения толщины среза к радиусу округления режущей кромки инструмента и, соответственно, снижения энергоемкости обработки и температуры резания можно за счет применения прерывистого шлифования. В этом случае существует экстремальное значение отношения длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга, равное единице, при котором температура резания принимает минимальное значение. Расчетами установлено, что наибольший эффект прерывистого шлифования с точки зрения уменьшения температуры резания достигается в условиях глубинного шлифования.

Приведены результаты исследований и разработанные на их основе новые способы и средства технологического обеспечения стабильного процесса абразивного полирования оптических металлоизделий, которые позволили разработать технологические процессы изготовления оптических металлоизделий с заданными оптическими характеристиками за счет осуществления сглаживания неровностей поверхностного слоя. Исследованиями установлена тесная взаимосвязь между параметрами шероховатости поверхности, физико-химическим состоянием и оптическими характеристиками поверхностных слоев.

Приведены новые эффективные технологии непрерывного профилирования давлением листовых материалов, изготовления гнутых профилей настилов с поверхностью противоскольжения. Разработаны имитационные модели при проектировании импульсных беспрессовых методов изготовления изделий.

Список использованных источников

1. Алимочкин В. М. Анализ контактных процессов при механической обработке композиционных материалов / В. М. Алимочкин // Контактные процессы при больших пластических деформациях: темат. сб. науч. трудов. – Харьков : ХАИ, 1982. – С. 87–94.
2. Алимочкин В. М. Технологические особенности процесса чистовой обработки деталей гибким абразивным инструментом / В. М. Алимочкин, В. Д. Проскурин // Прогрессивные технологические процессы, оборудование и инструмент: темат. сб. науч. трудов. – Харьков : ХАИ, 1987. – С. 132–135.
3. Алмазная обработка: учебное пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков и др. – К. : ІЗМН, 1996. – 168 с.
4. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 390 с.
5. Анділахай О. О. Наукові основи ефективної оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями: автореф. дис. … докт. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / О. О. Анділахай. – Одеса : ОНПУ, 2013. – 47 с.
6. А. С. 478067 СССР, М. Кл. С23В 5/68. Устройство для гальванической обработки изделий электроконтактным способом / П. Д. Дудко, Ю. Ф. Назаров, Д. А. Стороженко, В. Г. Шкурупий, О. С. Кирзунов (СССР). – № 1977546/22–1. Опубл. 25.07.75. Бюл. № 27 // Открытия. Изобретения. – 1975. – № 27. – С. 80.
7. А. С. 905256 СССР, М.Кл^3. С09К3НЧ. Доводочный алмазно-абразивный состав / П. Д. Дудко, Ю. Ф. Назаров, В. Г. Шкурупий, В. С. Коваленко, В. М. Рубан, А. И. Соловьев (СССР). – № 2861281/23-26. Опубл. 15.02.82. Бюл. № 6 // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 6. – С. 121.
8. Бабей Ю. И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна / Ю. И. Бабей. – К. : Наукова думка, 1988. – 237 с.
9. Балановська Т. І. Особливості функціонування малого підприємництва в Україні / Т. І. Балановська, О. П. Гогуля, К. Л. Тужик // Інноваційна економіка. – 2012. – № 8 (34). – С. 22 – 31.
10. Беззубенко Н. К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в

форме электрических разрядов: автореф. дис. … докт. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Н. К. Беззубенко. – Харьков : ХГТУ, 1995. – 56 с.
11. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
12. Богомолов Н. И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла : дис. … докт. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Н. И. Богомолов. – К.: КПИ, 1967. – 133 с.
13. Браташевский А. Ю. Подготовка специалистов, обладающих новым мышлением – острейшая проблема времени / А. Ю. Браташевский, А. Г. Крюк, П. Д. Дудко // Проблемы теории и практики технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки : труды Междунар. научн.-техн. конф., 22−26 мая 2000 г., Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2000. − С. 406–408.
14. Брижан Т. М. Обеспечение точности лезвийной и абразивной обработки отверстий в деталях гидравлической аппаратуры: автореф. дис. … канд. техн. наук: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" / Т. М. Брижан. − Одесса : ОНПУ, 2015. – 21 с.
15. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М. Ф. Семко, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др. – К. : Вища школа, 1979. – 230 с.
16. Гидровзрывная штамповка элементов судовых конструкций / В. Г. Степанов, П. М. Сипилин и др. – Ленинград : Судостроение, 1966. – 292 с.
17. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С. С. Силин, В. А. Хрульков, А. В. Лобанов и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 62 с.
18. Грановский Г. И. Резание металлов : учебник / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высшая школа, 1985. – 304 с.
19. Гриньова В. М. Організація виробництва : підручник / В. М. Гриньова, М. М. Салун. – Харків : ВД "ІНЖЕК", 2007. − 576 с.
20. Гуцаленко Ю. Г. Доцільність і особливості організації торцевого планетарного шліфування у електрофізикохімічних технологіях / Ю. Г. Гуцаленко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 106. – С. 134–140.

21. Даниелян А. М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов / А. М. Даниелян. – М. : Машгиз, 1954. – 275 с.
22. Дитиненко С. А. Определение оптимальных условий высококачественной обработки при алмазном шлифовании / С. А. Дитиненко, А. Г. Крюк // Физические и компьютерные технологии : труды 14-й Междунар. научн.-техн. конф., 24-25 сентября 2008 г., Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2008. − С. 128–131.
23. Дитиненко С. А. Повышение эффективности доводки поверхностей деталей пастами и суспензиями / С. А. Дитиненко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2006. – Вип. 42. – С. 239–245.
24. Дитиненко С. А. Повышение эффективности технологии финишной обработки цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий : автореф. дис. … канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / С. А. Дитиненко. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2005. – 20 с.
25. Дудко П. Д. Закономерности формирования параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке / П. Д. Дудко, В. Г. Шкурупий, О. С. Кленов // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2008. − Вып. 74. − С. 133–139.
26. Дудко П. Д. Исследование процесса доводки стальных цилиндрических деталей свободным абразивом с осциллирующим движением притира : автореф. дис. … канд. техн. наук / П. Д. Дудко. – Харьков : ХПИ, 1959. – 14 с.
27. Дудко П. Д. Некоторые аспекты технологии на исходе второго тысячелетия / П. Д. Дудко // Вестник : научный журнал. – Харьков: ХГЭУ, 1998. – №1 (5). – С. 65–66.
28. Евсеев Д. Г. Физические основы процесса шлифования / Д. Г. Евсеев, А. И. Сальников. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1978. – 128 с.
29. Евсеев Д. Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д. Г. Евсеев. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1975. –127 с.
30. Жовтобрюх В. А. Определение условий уменьшения себестоимости обработки деталей машин / В. А. Жовтобрюх // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6/7 (54). – С. 50–53.
31. Жовтобрюх В. А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных

параметров операций по критерию себестоимости: дис. … канд. техн. наук : специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" / Жовтобрюх Валерий Алексеевич. − Мариуполь: ПГТУ, 2012. – 233 с.
32. Жовтобрюх В. А. Разработка и внедрение эффективных технологических процессов механической обработки / В. А. Жовтобрюх // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О. В. – Д. : ЛІРА. – 2015. – С. 92–105.
33. Жовтобрюх В. А. Теоретический анализ себестоимости обработки / В. А. Жовтобрюх // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/1 (56). – С. 18–21.
34. Жовтобрюх В. А. Теоретический анализ условий уменьшения себестоимости механической обработки / В. А. Жовтобрюх // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2011. – Вип. 115. – С. 68–73.
35. Жовтобрюх В. А. Теоретическое определение теплового баланса и температуры резания при механической обработке / В. А. Жовтобрюх // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/5 (53). – С. 51–54.
36. Захаренко И. П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И. П. Захаренко. – К. : Наукова думка, 1981. – 300 с.
37. Иванов И. Е. Высокоэффективная технология изготовления резьбовых отверстий в горловинах баллонов на автоматических линиях : монография / И. Е. Иванов, Ф. В. Новиков, Е. И. Иванов. − Мариуполь : Изд. ПГТУ, 2011. − 209 с.
38. Иванов И. Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства : автореф. дис. … канд. техн. наук : специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" / И. Е. Иванов. – Мариуполь : ПГТУ, 2008. – 21 с.
39. Имаи Масааки. Гемба кайдзен : Путь к снижению затрат и повышению качества / Масааки Имаи; пер. с англ. − М. : "Альпина Бизнес Букс", 2005. − 346 с.
40. Ипполитов Г. М. Абразивно-алмазная обработка / Г. М. Ипполитов. – М. : Машиностроение, 1969. – 331 с.

41. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э. В. Рыжов, А. А. Сагарда, В. Б. Ильицкий и др. – К. : Наукова думка, 1979. – 244 с.
42. Кащук В. А. Справочник шлифовщика / В. А. Кащук, А. Б. Верещагин. − М. : Машиностроение, 1988. − 480 с.
43. Кедров С. М. Средства повышения производительности доводки металлов / С. М. Кедров // Станки и инструмент. – 1987. – № 6. – С. 10–13.
44. Кириченко Л. Р. Научная школа профессора ПИХТОВНИКОВА РОСТИСЛАВА ВЯЧЕСЛАВОВИЧА / Л. Р. Кириченко, В. К. Борисевич, Н. Ф. Савченко // Физические и компьютерные технологии : труды 13-й Междунар. научн.-техн. конф., 19–20 апреля 2007 г., Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2007. − С. 271–276.
45. Кленов О. С. Повышение производительности и качества механической обработки на основе применения прогрессивных режущих инструментов / О. С. Кленов, Ф. В. Новиков, А. Г. Крюк // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ "ХПІ". − 2013. − № 42 (1015). − С. 90–95.
46. Кленов О. С. Технологічне забезпечення бездефектної обробки деталей гідроапаратури на фінішних операціях: автореф. дис. … канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / О. С. Кленов. – Одеса: ОНПУ, 2011. – 21 с.
47. Кленов О. С. Условия эффективного применения современных режущих инструментов на машиностроительных предприятиях / О. С. Кленов, Д. Ф. Новиков // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О. В. – Д. : ЛІРА, 2015. – С. 188–192.
48. Клочко А. А. Технологические процессы формирования поверхностного слоя зубчатых колес тяжелых токарных станков с ЧПУ / А. А. Клочко, Е. В. Мироненко, О. А. Анциферова и др. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2015. – Вип. № 37. – С. 105–111.
49. Кобрин В. Н. Некоторые аспекты технологических аспектов сборки в космосе с использованием манипуляторов / В. Н. Кобрин, А. Ю. Андрианов // Вестник : научный журнал. – Харьков: ХГЭУ, 1998. – №1(5). – С. 89–93.

50. Колев К. С. Точность обработки и режимы резания / К. С. Колев, Л. М. Горчаков. – М. : Машиностроение, 1976. – 144 с.
51. Колупаев И. Н. Количественная обработка цифровых изображений микроструктур (система MatLab): учеб. метод. пособие / И. Н. Колупаев, И.Г. Шипкова. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2006. – 84 с.
52. Кононенко В. В. Разработка оптимальных организационно-технологических решений при внедрении станков с ЧПУ / В. В. Кононенко, А. И. Усс // Экономические аспекты механизации и автоматизации производства. – К. : Знание, 1977. – С. 102–138.
53. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 212 с.
54. Криворуков В. А. Обрабатываемость резанием жаропрочных и титановых сплавов. – М. : Издательство машиностроительной литературы, 1961. – 245 с.
55. Крюк А. Г. Инновации в развитии технологии машиностроения / А. Г. Крюк, А. Ю. Браташевский, П. Д. Дудко // Вестник Инженерной академии Украины. − Киев, 2000. − Спецвыпуск. − С. 80−85.
56. Крюк А. Г. Комбинированная технология изготовления гнутых профилей настилов с поверхностью противоскольжения // Фізичні та комп'ютерні технології : матеріали XXII Міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 грудня 2016, м. Харків. – Д. : ЛІРА, 2016. – С. 261–266.
57. Крюк А. Г. Обеспечение выхода на рынок промышленной и интеллектуальной продукции / А. Г. Крюк, А. Ю. Браташевский, П. Д. Дудко // Физические и компьютерные технологии: труды 10-й Междунар. научн.-техн. конф., 28–30 сентября 2004 г., Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2004. – С. 184–184.
58. Крюк А. Г. Прогрессивный способ обработки металлов давлением – непрерывное профилирование давлением листовых материалов / А. Г. Крюк, В. В. Стрелецкий // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии : труды IV научн.-техн. конф., 7–9 ноября 2012 г., Харьков. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2012. – С. 80–82.
59. Крюк А. Г. Роль науки и технологий в развитии Украины / А. Г. Крюк, А. Ю. Браташевский, П. Д. Дудко // Физические и компьютерные технологии : труды 12-й Междунар. научн.-техн. конф., 7−8 июня 2006 г., Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2006. – С. 35–38.

60. Кузьмин Б. А. Металлургия. Металловедение и конструкционные материалы / Б. А. Кузьмин, А. И. Самохоцкий, Т. Н. Кузнецова. – М. : Высшая школа, 1977. – 176 с.
61. Лавриненко В. И. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки : монография / В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод. – Каменское: ДГТУ, 2016. – 529 с.
62. Ларшин В. П. Управление ресурсом стойкости режущего инструмента / В. П. Ларшин, Н. В. Лищенко, А. В. Якимов // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2010. – Вип. 101. – С. 56–64.
63. Лебедев В. Г. Имитационная модель автоматического управления контактной температурой шлифования / В. Г. Лебедев, Н. Н. Клименко, Т. В. Чумаченко и др. // Фізичні та комп`ютерні технології. Матеріали XXII Міжнар. науково-практ. конф., 7–9 грудня 2016, м. Харків. – Д. : ЛІРА, 2016. – С. 236–240.
64. Линчевский П. А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П. А. Линчевский, Т. Г. Джугурян, А. А. Оргиян. – К. : Техника, 2001. – 300 с.
65. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. − М. : Машиностроение, 1982. – 320 с.
66. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Ленинград : Машиностроение, 1984. – 103 с.
67. Малыхин В. В. Повышение эффективности шлифования вольфрамосодержащих твердых сплавов совместно со сталью алмазными кругами : дис. … канд. техн. наук : специальность 05.03.01 "Процессы и машины обработки материалов резанием; автоматические линии" / Малыхин Виталий Викторович. – Харьков: ХПИ, 1985. – 266 с.
68. Марчук В. И. Технологические основы качества рабочих поверхностей колец роликоподшипников: автореф. дис. … докт. техн. наук : специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" / В. И. Марчук. – Одесса : ОНПУ, 2004. – 36 с.
69. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 319 с.
70. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности машин / А. А. Маталин. – К. : Техника, 1977. – 169 с.

71. Маталин А. А. Технология машиностроения : учебник / А. А. Маталин. – Ленинград : Машиностроение, 1985. – 496 с.
72. Маталин А. А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А. А. Маталин. − М. : Машиностроение, 1970. – 390 с.
73. Менеджмент организации / Под редакцией З. П. Румянцевой, Н. А. Соломатина. – М. : ИНФРА – М., 1995. – С. 159.
74. Моделирование систем : монография / Г. А. Оборский, А. Ф. Дащенко, А. В. Усов и др. – Одесса : Астропринт, 2013. – 664 с.
75. Морозенко В. Н. Исследование процесса доводки и полирование металлов свободным абразивом : дис. … канд. техн. наук : специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" / В. Н. Морозенко. – Одесса : ОПИ, 1968. – С. 64–95.
76. Надтверді матеріали в механообробні : енциклопедичний довідник / В. І. Лавріненко, М. В. Новіков; за заг. ред. М. В. Новікова. – К. : ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.
77. Назаров Ю. Ф. Особенности полирования зеркал из меди и алюминиевых сплавов / Ю. Ф. Назаров, В. М. Рубан // Оптико-механическая промышленность. – 1983. – № 11. – С.15–17.
78. Невлюдов И. Ш. Исследование явлений, протекающих при алмазно-абразивной доводке высокоточных деталей и установление основных закономерностей процесса : дис. … канд. техн. наук: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" / И. Ш. Невлюдов. – Саратов : Сарат. политехн. ин-т, 1974. – С. 168.
79. Неделин Ю. Л. Алмазное хонингование легированной стали 30ХГСА / Ю. Л. Неделин // Резание и инструмент. Респ. межвед. темат. науч.-техн. сборник. – Харьков : Вища школа, Изд-во при Харьк. ун-те, 1972. – Вып. 5. – С. 62–66.
80. Неделин Ю. Л. Исследование процесса стружкообразования при хонинговании / Ю. Л. Неделин // Резание и инструмент. Респ. межвед. темат. науч.-техн. сборник. – Харьков: Вища школа, Изд-во при Харьк. ун-те, 1976. – Вып. 16. – С. 86–88.
81. Новиков Г. В. Теоретический анализ путей повышения точности и качества алмазно-абразивной обработки / Г. В. Новиков, С. А. Дитиненко // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків : ХДТУСГ, 2002. – Вип. 10. – С. 197–202.

82. Новиков Д. Ф. Инвестиционная деятельность при модернизации машиностроительных предприятий / Д.Ф. Новиков // Физические и компьютерные технологии : труды 19-й Междунар. научн.-практ. конф., 25–26 июня 2014, г. Харьков. – Харьков: ГП ХМЗ "ФЭД", 2014. − С. 153-156.
83. Новиков Д. Ф. Повышение конкурентоспособности машиностроительной продукции на основе снижения себестоимости металлообработки / Д. Ф. Новиков, А. К. Оспищева // Физические и компьютерные технологии : труды 19-й Междунар. научн.-практ. конф., 25–26 июня 2014, г. Харьков. – Харьков: ГП ХМЗ "ФЭД", 2014. − С. 157–159.
84. Новиков Д. Ф. Определение шероховатости поверхности при точении резцами с закругленной вершиной режущей части // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2015. – Вип. 37. – С. 40–46.
85. Новиков Д. Ф. Условия выбора эффективных режимов резания / Д. Ф. Новиков // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении : материалы междунар. научн.-техн. конф., 21–23 сентября 2016, г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2016. – С. 131–135.
86. Новіков Д. Ф. Інвестиційне планування технічного переозброєння промислового підприємства / Д. Ф. Новіков // Молодіжний економічний вісник ХНЕУ ім. С. Кузнеця : Електронний журнал. – № 12, грудень 2015. – С. 311–313.
87. Новиков Ф. В. Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятностей / Ф. В. Новиков, В. Г. Шкурупий // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. – Харків : НТУ "ХПІ", 2004. − № 44. − С. 140–149.
88. Новиков Ф. В. Механика круглого алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями и пути ее оптимального управления : автореф. дис. … канд. техн. наук: специальность 05.03.01 "Процессы и машины обработки материалов резанием; автоматические линии" / Ф. В. Новиков. – К. : ИСМ, 1984. – 21 с.
89. Новиков Ф. В. Оптимальные решения в металлообработке : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Д.: ЛИРА, 2017. − 476 с.
90. Новиков Ф. В. Оптимизация структуры процесса съема припуска при механической обработке / Ф. В. Новиков, А. Н. Ковальчук // Віс-

ник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Х. : НТУ "ХПІ", 2005. − № 37. – С. 169–176.
91. Новиков Ф. В. Основы повышения качества и производительности механической обработки : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Д. : ЛИРА, 2017. − 452 с.
92. Новиков Ф. В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф. В. Новиков, С. М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: труды 13-й Междунар. научн.-техн. конф., 19–20 апреля 2007, г. Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8–20.
93. Новиков Ф. В. Разработка эффективных технологий механической обработки деталей машин / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. – Харьков : ХНАДУ, 2011. – Вып. 29. – С. 212–215.
94. Новиков Ф. В. Расчет температуры шлифования с учетом неустановившегося во времени теплового процесса / Ф. В. Новиков, И. А. Рябенков, В. И. Полянский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – Курск : ЮЗГУ, 2014. – №1. – С. 34–38.
95. Новиков Ф. В. Современные экологически безопасные технологии производства : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Д. : ЛИРА, 2017. − 372 с.
96. Новиков Ф. В. Теоретическое обоснование условий повышения эффективности высокоскоростной обработки / Ф. В. Новиков, О. С. Кленов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ", 2014. − № 42(1085). – С. 106–111.
97. Новиков Ф. В. Условия уменьшения температуры резания при точении / Ф. В. Новиков, В. И. Полянский, А. А. Андилахай // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць. – Маріуполь : ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т", 2016. – Вип. 33. – С. 87–92.
98. Новиков Ф. В. Условия уменьшения удельной работы процесса механической обработки резанием / Ф. В. Новиков, В. И. Полянский // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія : Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. − № 5(1177). − С. 75–80.
99. Новиков Ф. В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования : автореф. дис. … докт. техн.

наук: специальность 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Ф. В. Новиков. – Одесса : ОГПУ, 1995. – 36 с.
100. Новиков Ф. В. Эффективное применение современных технологий механической обработки / Ф. В. Новиков, О.С. Кленов, Д. Ф. Новиков // Вісник НТУ "ХПІ". Серія : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – № 33(1205). – С. 127–132.
101. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування : монографія / Ф. В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2014. − 412 с.
102. Новіков Ф. В. Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / Ф. В. Новіков, В. В. Нежебовський, В. Г. Шкурупій // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ "ХПІ", 2013. − № 5(979). − С. 199–210.
103. Новіков Ф. В. Механічна обробка великогабаритних деталей зі зносостійкими наплавочними матеріалами : монографія / Ф. В. Новіков, В. О. Анділахай, І. Є. Іванов, Д. Ф. Новіков; під ред. Ф. В. Новікова. – Харків : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. − 315 с.
104. Новіков Ф. В. Основи обробки металевих виробів з оптичними властивостями: монографія / Ф. В. Новіков, В. Г. Шкурупій. – Харків: Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. − 388 с.
105. Новіков Ф. В. Основи струминно-абразивної обробки дрібних деталей : монографія / Ф. В. Новіков, О. О. Анділахай. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2014. − 348 с.
106. Новіков Ф. В. Оцінка економічної ефективності технологічних процесів обробки деталей / Ф. В. Новіков, Ю. В. Шкурупій // Економіка розвитку. Науковий журнал. – Харків: ХНЕУ, 2011. − №1(57). – С. 22–24.
107. Новіков Ф. В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
108. Новіков Ф. В. Фінішна обробка деталей різанням : монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 270 с.
109. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 232 с.

110. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец и др.; под общей редакцией С. А. Клименко. – К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.
111. Общий каталог TaeguTec. Cat.No: 6114802. Russion Version: CT 03/2013. TaeguTec LTD.
112. Определение зависимости усилия холодного выдавливания с помощью корреляционного анализа / В. В. Кононенко, И. П. Алдохин, Н. А. Михайленко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 10. – С. 44–56.
113. Орлов П. Н. Технологическое обеспечение параметров качества деталей при абразивной доводке : дис. … докт. техн. наук: специальность 05.03.01 "Процессы и машины обработки материалов резанием; автоматические линии" / П. Н. Орлов. – М.; 1981. – 509 с.
114. Пермяков А. А. Анализ погрешностей технологических процессов обработки отверстий с перекрещивающимися и пересекающимися осями в корпусных деталях тяжелых токарных станков / А. А. Пермяков, А. А. Клочко, М. И. Гасанов // Обладнання і технології сучасного машинобудування : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Україна, м. Тернопіль, 11–12 травня 2017. – Тернопіль : Тернопільский нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя, 2017. – С. 188.
115. Пихтовников Р. В. Безбассейновая листовая штамповка взрывом / Р. В. Пихтовников, Б. А. Хохлов. – Харьков : Прапор, 1972. – 168 с.
116. Погребной Н. А. Импульсное упрочнение стали в процессе алмазно-искрового шлифования / Н. А. Погребной, С. М. Шевченко, С. А. Дитиненко // Резание и инструмент в технологических системах : сборник статей. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2005. – Вып 68. – С. 323–327.
117. Погребной М. А. Металографічний аналіз якості обробки твердих сплавів при алмазному шліфуванні / М. А. Погребной, С. М. Шевченко, В. П. Ткаченко // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : труды 7-й Междунар. научн.-техн. конф., 27–28 мая 2003, г. Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2003. – С. 103–106.
118. Полянський В. І. Технологічне забезпечення якості та продуктивності механічної обробки отворів в деталях гідроапаратури : автореф. дис. … канд. техн. наук : спеціальність 05.02.08 "Технологія машинобудування" / В. І. Полянський. − Маріуполь : ДВНЗ "Приазовський державний технічний університет", 2012. – 21 с.

119. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – М. : Машиностроение, 1977. – 263 с.
120. Производство гнутых профилей (оборудование и технология) / И. С. Тришевский, А. Б. Юрченко, В. С. Марьин и др. – М. : Металлургия, 1982. – С. 52–55.
121. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
122. Ресурсосбережение промышленных предприятий / Н. И. Иванов, А. В. Бреславцев, Л. Т. Хижняк и др. – Донецк : ИЭПНАН Украины, 1999. – 356 с.
123. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: навчальний посібник / За редакцією А. І. Грабченка. – Харків : ХДПУ, 1999. – 436 с.
124. Рубан В. М. Оптимизация процесса абразивной обработки зеркальных металлических поверхностей / В. М. Рубан, Ю. Ф. Назаров, Г. Б. Лурье // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1981. – Вып. 4. – С. 11–12.
125. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – М. : Машиностроение, 1979. – 175 с.
126. Рябенков И. А. Закономерности снижения силовой и тепловой напряженности прерывистого шлифования / И. А. Рябенков // Перспективні технології та прилади : збірник наукових праць. – Луцьк : Луцький НТУ, 2017. – № 10 (1). – С. 193–198.
127. Рябенков И. А. Закономерности формирования и условия уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании деталей гидроаппаратуры / И. А. Рябенков, Ф. В. Новиков, Т. М. Брижан // Захист металургійних машин від поломок : збірник наукових праць. – Маріуполь : ПГТУ, 2014. – Вип. 16. – С. 195–200.
128. Рябенков И. А. Обоснование технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при обработке свободным и связанным абразивом / И. А. Рябенков // Високі технології в машинобудуванні : збірник наукових праць. − Харків: НТУ "ХПІ", 2016. − Вип. 1(26). − С. 81–90.
129. Рябенков И. А. Определение минимально возможной температуры резания при прерывистом шлифовании / И. А. Рябенков // Фи-

зические и компьютерные технологии : труды 21-й Междунар. научн.-практ. конф., 24–25 декабря 2015, г. Харьков. – Д. : ЛИРА, 2015. – С. 100–106.
130. Рябенков І. О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій : автореф. дис. … канд. техн. наук : спеціальність 05.02.08 "Технологія машинобудування" / І. О. Рябенков. – Одеса : ОНПУ, 2009. – 21 с.
131. Рябенков И. А. Теоретический подход к расчету и анализу температуры резания при прерывистом шлифовании / И. А. Рябенков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2015. – Вип. № 37. – С. 64–70.
132. Савченко М. Ф. До розробки методології проектування гнучких технологічних систем попередження і ліквідації аварій (ГТС ПЛА) / М. Ф. Савченко // Фізичні та комп'ютерні технології : праці XXII Міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 грудня 2016, м. Харків. – Д. : ЛІРА, 2016. – С. 323–327.
133. Савченко Н. Ф. Беспрессовая штамповка в системе ресурсо- и энергосберегающих технологий заготовительно-штамповочного производства / Н. Ф. Савченко, В. Г. Чистяк, Н. Н. Савченко // Вестник Инженерной академии Украины. − Киев, 2000. – Спецвыпуск. – С. 75−79.
134. Савченко Н. Ф. Беспрессовая штамповка как вариант адаптационного развития предприятия / Н. Ф. Савченко // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии : труды IV научн.-техн. конф., 7–9 ноября 2012, г. Харьков. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2012. – С. 98–100.
135. Савченко Н. Ф. Изготовление крупногабаритных деталей емкостей и резервуаров / Н. Ф. Савченко // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків : ХДТУСГ, 2003. – Вип. 18. – С. 179–183.
136. Сагарда А. А. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишнаевский. – К. : Техніка, 1974. – 179 с.
137. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков: ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с.

138. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин. – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с.
139. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В. Н. Бакуля. – К. : Наукова думка, 1976. – 351 с.
140. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – М. : Машиностроение, 1978. – 166 с.
141. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов : учебник / С. Н. Корчак, А. А. Кошин, А. Г. Ракович и др. ; Под общ. ред. С. Н. Корчака. – М. : Машиностроение, 1988. – 352 с.
142. Системы технологий : учебное пособие / Под ред. П. Д. Дудко. – Харьков : ООО Изд. "Бурун Книга", 2003. – 336 с.
143. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием : справочник / Л. В. Худобин, А. П. Бабичев, Е. М. Булыжов и др.; Под общ. ред. Л. В. Худобина. − М. : Машиностроение, 2006. − 544 с.
144. Сорокин В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. З. Волосникова и др.; Под. общ. ред. Сорокина В. Г. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.
145. Статистика науки инноваций. Краткий терминологический словарь / Под ред. Л. М. Гохберга. – М. : Центр исследований статистики науки, 1996. – 560 с.
146. Сулима А. М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А. М. Сулима, М. П. Евстигнеев. – М. : Машиностроение, 1974. – 189 с.
147. Тараненко М. Е. Интенсификация процесса ЭГ-штамповки листовых коробчатых деталей / М. Е. Тараненко. – М. : Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – № 9. – С. 19–23.
148. Теоретические основы резания и шлифования материалов : учебное пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков и др. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
149. Теоретические основы технологии машиностроения : учебник / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, А. А. Якимов и др. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 491 с.
150. Теория экономического развития / И. Шумпетер. – М. : Прогресс, 1982. – 52 с.

151. Тепловые и механические процессы при резании металлов: учебное пособие / Ф. В. Новиков, А. А. Якимов, Г. В. Новиков и др. – Одесса : ОГПУ, 1997. – 179 с.
152. Теплофізика механічної обробки : підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник та ін. – Одеса: Астропринт, 2000. – 256 с.
153. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов. − К. : Наукова думка, 1984. − 272 с.
154. Тимофеев Ю. В. О композиционном проектировании агрегатированных технологических систем / Ю. В. Тимофеев, А. А. Пермяков, О. Ю. Приходько // Авиационно-космическая техника и технология : труды Гос. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского "ХАИ". – Харьков : ХАИ, 2000. − Вып. 14. – С. 51–53.
155. Ткаченко В. П. Підвищення ефективності технології прецизійної обробки ущільнювальних кілець із композиційного матеріалу на основі реліту : автореф. дис. … канд. техн. наук : спеціальність 05.02.08 "Технологія машинобудування" / В. П. Ткаченко. – Харків : НТУ "ХПІ", 2003. – 21 с.
156. Товароведение / Под ред. П. Д. Дудко и А. Г. Крюка. – Харьков : Издательский Дом "ИНЖЕК", 2005. – 456 с.
157. Тришевский О. И. Профили высокой жесткости с периодически повторяющимися гофрами / О. И. Тришевский, А. Г. Крюк // Металлургия и коксохимия, 1981. – Вып. 71. – С. 10–14.
158. Тришевский О. И. Снижение металлоемкости гнутых профилей за счет деформационного упрочнения / О. И. Тришевский, Е. Г. Полстянкин, Р. Ю. Дебердеев // Сталь. – 1988. – № 8. – С. 36–37.
159. Тришевский И. С. Теория и технология производства экономичных гнутых профилей проката / И. С. Тришевский, Л. Н. Котелевский // Гнутые профили проката: сборник трудов. – Харьков: УкрНИИМет, 1971. – № 15. – С. 226–231.
160. Узунян М. Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М. Д. Узунян. – Харків : НТУ "ХПІ", 2003. – 359 с.
161. Усов А. В. Управление технологическими процессами по критериям качества рабочих поверхностей / А. В. Усов, Э. Донев // Високі технології в машинобудуванні : збірник наукових праць НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ", 2002. – Вип. 1(5). – С. 259–276.
162. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и

А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.
163. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2003. – Т. 2. "Теплофизика резания материалов". – 625 с.
164. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2003. – Т. 3. "Резание материалов лезвийными инструментами". – 546 с.
165. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов". – 802 с.
166. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2004. – Т. 5. "Обработка металлов методами пластического деформирования". – 522 с.
167. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 6. "Качество обработки деталей машин". – Одесса : ОНПУ, 2005. – 716 с.
168. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 7. "Точность обработки деталей машин" – Одесса : ОНПУ, 2004. – 546 с.
169. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2004. – Т. 8. "Оптимизация технологических процессов в машиностроении". – 508 с.
170. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2005. – Т. 9. "Проектирование технологических процессов в машиностроении". – 584 с.

171. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т.10. "Концепции развития технологии машиностроения". – Одесса : ОНПУ, 2005. – 565 с.
172. Фукс М.Я. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльбровой обработки / М. Я. Фукс, Н. К. Беззубенко, Б. М. Свердлова. – К. : Вища школа, 1979. – 158 с.
173. Хусу А. П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Витенберг, В. А. Пальмов. – М. : Изд-во "Наука", 1975. – 343 с.
174. Чистяк В. Г. Исследование качества заклепочных соединений / В. Г. Чистяк // Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко. – Харьков : ХНТУСХ, 2006. – Вып. 42. – С. 151–154.
175. Чупров И. Ф. Уравнения математической физики с приложениями к задачам нефтедобычи и трубопроводного транспорта газа : учебное пособие / И. Ф. Чупров, Е. А. Канева, А. А. Мордвинов. – Ухта : УГТУ, 2004. – 128 с.
176. Швец В. В. Некоторые вопросы теории технологии машиностроения / В. В. Швец. – М. : Машиностроение, 1967. – 63 с.
177. Шевченко С. М. Исследование макроструктуры и шероховатости поверхности стали при алмазно-искровом шлифовании / С. М. Шевченко, А. Л. Плотников, С. А. Дитиненко и др. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2011. – Вип. 118. – С. 158–162.
178. Шелковой А. Н. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Вісник СевНТУ : збірник наукових праць. Серія: "Машиноприладобудування та транспорт". – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 203–210.
179. Шкурупий В. Г. Аналитическое описание и технологическое обеспечение параметров шероховатости обработки / В. Г. Шкурупий, Ф. В. Новиков // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. научн.-техн. сборник. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2004. – Вып. 67. – С. 46–56.

180. Шкурупий В. Г. Влияние состава абразивной среды на процесс формирования полированой поверхности / В. Г. Шкурупий // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2010. – Вип. 106. – С. 149–153.
181. Шкурупий В. Г. Изучение механизма формирования поверхности при обработке резанием / В. Г. Шкурупий // Сучасні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць. − Вип. 5. – Харків : НТУ "ХПІ", 2010. − С. 114–121.
182. Шкурупий В. Г. Исследование процесса полирования свободным абразивом / В. Г. Шкурупий // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". − 2016. − № 5(1177). − С. 87–89.
183. Шкурупий В. Г. Перспективы развития абразивной обработки поверхностей деталей в нанотехнологии / В. Г. Шкурупий // Високі технології в машинобудуванні : збірник наукових праць НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ", 2008. − Вип. 2 (17). − С. 469–474.
184. Шкурупий В. Г. Светопоглощательная способность поверхностей после полирования алмазно-абразивными пастами / В. Г. Шкурупий // Алмазы и сверхтвердые материалы. Сборник. − М. : НИИМАШ, 1978. − С. 11–12.
185. Шкурупий В. Г. Сглаживание поверхностного слоя деталей из меди и алюминия при их абразивном полировании / В. Г. Шкурупий, Ю. Ф. Назаров // Захист металургійних машин від поломок. Збірник наукових праць. – Маріуполь : ПГТУ, 2010. – Вип. 12. – С. 281–285.
186. Шкурупий В. Г. Технологическая среда абразивной обработки сверхгладких поверхностей деталей / В. Г. Шкурупий // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2009. − Вып. 76. − С. 218–224.
187. Шкурупий В. Г. Эффективность применения финишных методов обработки материалов / В. Г. Шкурупий, П. Д. Дудко, Ю. Ф. Назаров. – К. : ДНТП, 1979. – 24 с.
188. Шкурупій В. Г. Вибір зернистості абразиву для зменшення шорсткості оброблених поверхонь / В. Г. Шкурупій // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ", 2008. − № 23. − С. 27–31.

189. Шкурупій В. Г. Вплив зернистості абразива на інтенсивність згладжування поверхонь / В. Г. Шкурупій // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2009. – Вип. 81. – С. 146–150.
190. Шкурупій В. Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок: автореф. дис. … канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / В. Г. Шкурупій. – Одеса : ОНПУ, 2006. – 21 с.
191. Шубников А. В. Элементарные механические явления при шлифовании и полировании / А. В. Шубников // Качество поверхности деталей машин. – М. : Изд. АН СССР, 1957. – №3. – С. 32–35.
192. Экономика и статистика фирм / Под редакцией С. А. Ильенковой. – М. : Финансы и статистика, 1996. – С. 121.
193. Электроалмазное шлифование инструментальных материалов : монография / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, Н. В. Левченко и др. – К. : Издательское объединение "Вища школа", 1974. – 120 с.
194. Якимов А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1984. – 212 с.
195. Якимов А. В. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, А. А. Якимов. – К. : Техніка, 1993. –152 с.
196. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1975. – 175 с.
197. Якимов А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – Киев–Одесса : Изд. объед. "Вища школа", 1986. – 175 с.
198. Якимов А. В. Физическая сущность и технологические возможности прерывистого шлифования / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков // Сучасні системи технологій у машинобудуванні : збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О. В. – Д. : ЛІРА, 2015. – С. 38–43.
199. Ящерицын П. И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П. И. Ящерицын, А. К. Цокур, М. Л. Еременко. – Минск : Наука и техника, 1973. – 184 с.
200. Ящерицын П. И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев. – Минск : Наука и техника, 1976. – 326 с.

201. Ящерицын П. И. Шлифование металлов / П. И. Ящерицын, Е. А. Жалнерович. – Минск : Беларусь, 1970. – 464 с.
202. Ikawa Naoya, Inami Yasushi. “Сэймицу кикай, I, Iap. Soc. Presis. End.”, 1973. – № 11. − P. 1151–1157.
203. Difference in Grinding Mechanism between Up-and Down-cut Creep Feed Grindings / Shiozaki S., Furukawa Y., Ohishi S. // “Сэймицу кикай, I. Iap. Soc. Precis. End.” 1979, 45, № 5. − 599–606.
204. Werner G. Technologische und Konstruktive Voraussatzungen fur das Tiefschleifen / Werner G. − "Werkstattstechnik", 1979. – Nr. 10. – s. 613–620.

Приложение А
Температурное поле в деталях, имеющих форму пластин (решение профессора Якимова А. В.)

Рассматривая процесс шлифования как разновидность скоростного резания, можно считать, что огромное число высокотемпературных очагов зоны контакта шлифовального круга с деталью представляет собой единый источник тепла. Он действует непрерывно, перемещаясь по поверхности детали с постоянной скоростью. Формы и размеры теплового источника характеризуются поверхностью контакта шлифовального круга и детали. При шлифовании деталей, имеющих форму пластины, источник тепла можно считать полосовым, состоящим из бесконечно большого числа линейных источников, движущихся одновременно.

При большой скорости перемещения теплового источника можно пренебречь влиянием теплоотдачи и считать поверхность изолированной. Из работ Резникова А. Н., Сипайлова В. А., Совкина В. Ф., Исаева А. И. известно, что при шлифовании без охлаждения теплоотдача в воздух вблизи зоны резания невелика. Если сделать допущение, что теплообмен отсутствует, то точность расчета температур снижается всего лишь на 1 – 2 %, но при этом получаются значительно более простые и удобные для практического решения формулы.

Уравнение для расчета максимальной температуры в зоне контакта. Если пренебречь рассеянием теплового потока по направлению движения источника (ось Z на рис. А.1), то деталь можно условно разбить на ряд адиабатических стержней, а определение температуры в зоне контакта свести к решению дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial\theta(x,\tau)}{\partial\tau} = a\cdot\frac{\partial^2\theta(x,\tau)}{\partial x^2}. \qquad (A.1)$$

При начальных и краевых условиях:

$$\theta(x,\tau)\big|_{\tau=0} = \theta_0; \quad \theta(x,\tau)\big|_{x=0} = \theta_u; \quad \left.\frac{\partial\theta(x,\tau)}{\partial x}\right|_{x=0} = 0, \qquad (A.2)$$

где θ_0 – начальная температура детали, равная температуре среды;

θ_u − температура зоны контакта;

τ − время действия теплового источника, с.

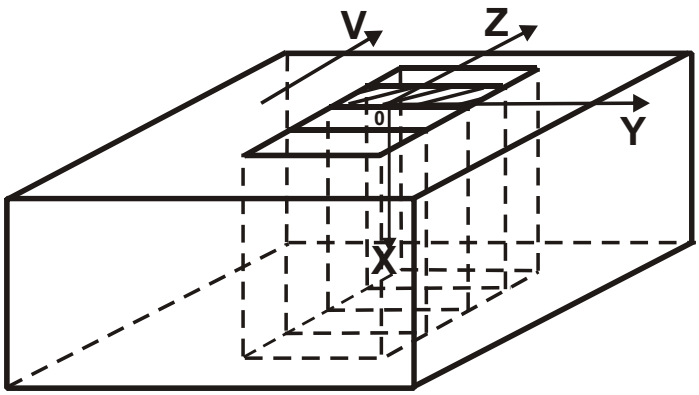


Рис. А.1. Расчетная схема

Задачу нахождения $\theta(x,\tau)$ решаем методом разделения переменных величин. В результате получим функцию:

$$\frac{\theta(x,\tau)-\theta_u}{\theta_0-\theta_u}=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot\int_0^{\frac{2}{2\sqrt{a\tau}}} e^{-u^2}\cdot du=\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right), \qquad (A.3)$$

где $\mathrm{erf}(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot\int_0^x e^{-u}\cdot du$ − интеграл вероятности Гаусса.

Количество теплоты, перешедшей в стержень за время $d\tau$ через единицу площади, можно представить в виде:

$$dQ=\lambda\cdot\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)\Bigg|_{x=0}; \qquad (A.4)$$

$$dQ=\lambda\cdot(\theta_u-\theta_0)\cdot\left\{\frac{\partial\theta}{\partial x}\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right)\right]\right\}_{x=0}, \qquad (A.5)$$

где λ − коэффициент теплопроводности материала обрабатываемой детали;

a − коэффициент температуропроводности.

Так как

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\cdot\tau}}\right)\right]=\frac{1}{\sqrt{\pi\cdot a\cdot\tau}}\cdot\exp\left(-\frac{x^2}{4\cdot a\cdot\tau}\right), \qquad (A.6)$$

то

$$dQ=\sqrt{\lambda\cdot c\cdot\gamma}\cdot(\theta_u-\theta_0)\cdot\frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}\cdot d\tau, \qquad (A.7)$$

где c − удельная теплоемкость;

γ − плотность материала обрабатываемой детали.

Количество теплоты, полученное деталью в конечный промежуток времени, определится при интегрировании выражения (А.7) от 0 до τ:

$$Q = \int_0^{\tau} \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \gamma} \cdot (\theta_u - \theta_0) \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \tau}} \cdot d\tau = \frac{2\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \gamma}}{\sqrt{\pi}} \cdot (\theta_u - \theta_0) \cdot \sqrt{\pi}. \qquad (A.8)$$

Учитывая время воздействия источника теплоты на торец выделенного элементарного стержня $\tau = \frac{2h}{V}$ (где $2h$ и V − соответственно ширина и скорость источника) и плотность теплового потока q, равную количеству теплоты, полученной деталью через единицу площади в единицу времени, найдем формулу, позволяющую рассчитать температуру в зоне шлифования:

$$\theta_u - \theta_0 = \frac{q}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\lambda \cdot c \cdot \gamma \cdot V}}. \qquad (A.9)$$

Распределение температуры по глубине можно рассчитывать по формуле:

$$\theta_y = \frac{q}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\lambda \cdot c \cdot \gamma \cdot V}} \cdot \left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x \cdot \sqrt{V}}{2 \cdot \sqrt{a \cdot h}}\right)\right]. \qquad (A.10)$$

Область применения полученных уравнений определялась экспериментально на установке, моделирующей процесс шлифования. Модель представляла собой образец размерами $40 \times 100 \times 700$ мм из стали 12Х2Н4А. По верхней грани образца с помощью специального ходового винта перемещалась угольная пластина, моделирующая схему контакта абразивного круга с деталью. В образце по среднему сечению были приварены хромель-копелевые термопары на разных расстояниях от поверхности с координатами по глубине 0, 10, 20, 30, 40, 50 мм. Зона контакта между угольной пластиной и образцом нагревалась электрическим током, который пропускался через контакт от специального трансформатора. Мощность источника и скорость его перемещения подбирались такими, чтобы температурное поле было доступным для исследования, а образец можно было рассматривать как полубесконечное тело, т.е. противоположная источнику грань совершенно не должна нагреваться. Практически температурное поле гасло уже на глубине 50 мм при всех исследуемых режимах. Запись

наблюдений выполнялась электронным потенциометром ЭПП-09 одновременно в трех точках с интервалом времени между соседними точками 0,75 с.

Увеличение скорости при прочих равных условиях приводит к общему понижению температуры на всех глубинах и изменению характера температурного поля (рис. А.2). С увеличением скорости максимальная температура поверхности все больше смещается к задней кромке источника. Температурное поле модели посредством теории подобия можно перестроить для реальных условий шлифования.

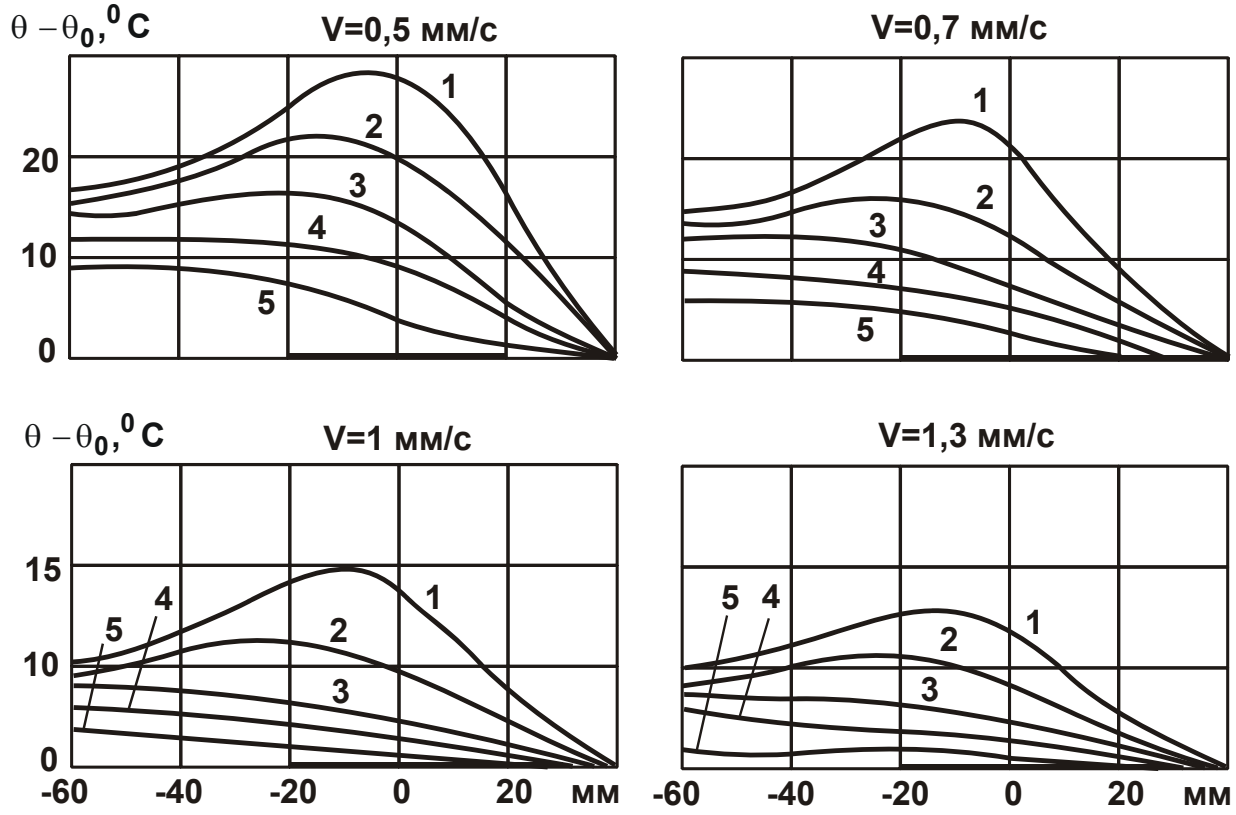


Рис. А.2. Влияние скорости перемещения источника на температурное поле при разных глубинах:
1 – 0; 2 – 10 мм; 3 – 20 мм; 4 – 30 мм; 5 – 40 мм

Для нахождения критериального уравнения введем линейную плотность теплового потока и безразмерные комплексы: $\theta_{\text{отн}} = \dfrac{4 \cdot \lambda \cdot \theta}{q}$ – относительная температура; $P_e = \dfrac{V \cdot h}{a}$ – критерий Пекле.

После подстановки их в выражение (А.9), получим уравнение в критериальном виде:

$$\theta_{\text{отн}} = \sqrt{\frac{\pi}{\text{Pe}}}\,. \qquad (A.11)$$

При $\frac{V \cdot h}{a} = 8$ расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышают 2 %. Эта точка соответствует скорости V=0,7 м/мин при ширине зоны контакта круга с деталью 2h=2 мм.

Учитывая, что реальные скорости перемещения теплового источника при плоском шлифовании значительно больше, а протяженность пятна контакта не менее 1 мм, можно считать результаты, полученные по формулам (А.9) и (А.10), достаточно точными. Следует отметить, что уравнение (А.9) можно использовать для расчета максимальной поверхностной температуры при обычном шлифовании без охлаждения.

Приложение Б

Министерство высшего образования УССР
Харьковский политехнический институт им. В. И. Ленина
П. Д. Дудко

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ДОВОДКИ СТАЛЬНЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ
С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ДВИЖЕНИЕМ
ПРИТИРА**

АВТОРЕФЕРАТ
Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Харьков, 1959 г.

Приобретают большое значение методы отделочной механической обработки, обеспечивающие высокое качество рабочих поверхностей деталей машин.

Среди различных отделочных методов механической обработки наиболее высокую точность и качество поверхности обеспечивает доводка металлов абразивами.

За последние годы в технологии обработки металлов и других материалов процессы абразивной отделки находят все более широкое применение.

Поставленная в настоящее время задача широкого применения технологических процессов, исключающих большие припуски как-то штамповки, литья под давлением и точного литья, а также все более широкое применение твердых и прочных материалов, обработка которых связана с обязательным применением абразивных инструментов, требует особого внимания к изучению абразивных процессов обработки.

Основные исследование процессов холодной обработки металлов резанием касаются точения, фрезерования, сверления и, в значительно меньшей степени, шлифования. Процессы же отделочной обработки, несмотря на большую важность этого вопроса, исследованы крайне недостаточно. До настоящего времени отсутствует строго установленная терминология по отделочным операциям.

Имеющиеся исследования по доводке металлов свободным абразивом С. М. Кедрова, М. Я. Шегал, И. Н. Хабарина, П. П. Панасова носят преимущественно экспериментальный характер и не охватывают всех вопросов, относящихся к этому процессу.

Поэтому теоретическое и экспериментальное исследование абразивных процессов доводки деталей машин, а также механизация этих чрезвычайно трудоемких процессов, часто осуществляемых вручную, является в настоящее время весьма актуальным вопросом.

Доводка деталей машин может производиться абразивными брусками или свободным абразивом. При доводке абразивными брусками деталей, особенно с прерывистыми поверхностями, нередко отмечается интенсивный износ брусков, их выкрашивание и образование на обработанных поверхностях глубоких царапин. В этом случае более приемлемой является доводка свободным абразивом, так как при правильном подборе материала притира и режима обработки в первую

очередь изнашиваются сами абразивные зерна, а притир продолжительное время сохраняет форму, что повышает точность обработки.

Процесс доводки металлов свободным абразивом является чрезвычайно сложным процессом резания, имеющим свои особенности, которыми он отличается как от процессов резания металлов металлическим инструментом с определенной геометрией, так и от шлифования. Сложность процесса и свободное перемещение абразивных зерен в зоне резания создают большие трудности при экспериментальном и теоретическом его исследовании. Это является причиной многих противоречивых результатов исследований, приведенных в литературе, что затрудняет выбор оптимального режима обработки при доводке металлов свободным абразивом.

Представляет значительный интерес исследование процесса доводки деталей машин с применением осциллирующего движения притира, которое способствует повышению производительности процесса доводки металлов и улучшению чистоты обработанной поверхности.

Выяснение механизма резания-царапания при доводке металлов свободным абразивом позволит установить условия получения повышенного съема металла и высокой чистоты поверхности, определить оптимальный режим обработки. В настоящей работе подвергнуты рассмотрению следующие вопросы:

1. Состояние вопроса о методах отделочной обработки металлов.
2. Влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей машин.
3. Кинематика абразивных зерен в процессе доводки свободным движением притира.
4. Выяснение механизма процесса резания-царапания при доводке металлов свободным абразивом.
5. Исследование процесса доводки цилиндрических стальных деталей свободным абразивом с осциллирующим движением притира с целью выяснения условия повышенного съема металла и достижения высокой частоты поверхности.
6. Изменение геометрической формы детали в процессе доводки свободным абразивом с осциллирующим движением притира.
7. Влияние жидкости, входящей в состав абразивной смеси, на съем металла и чистоту поверхности при доводке деталей свободным абразивом.

8. Влияние материалов притира на съем металла и чистоту поверхности при доводке металлов.

Исследования производились с учетом влияния следующих основных факторов процесса:

а) физико-механических свойств материала притира;

б) физико-механических свойств обрабатываемого материала;

в) свойства абразивной смеси;

г) удельного давления притира;

д) скорости вращения обрабатываемой детали;

е) скорости и характера движения притира;

ж) величины микронеровностей от предшествующей обработки;

з) продолжительности обработки.

В процессе исследования необходимые опыты проводились на специальной установке, смонтированной на круглошлифовальном станке, у которого вместо шлифовальной бабки была установлена гидравлическая головка. Гидравлическая головка имела широкий диапазон плавного регулирования как числа колебаний притира от 0 до 1500 двойных ходов в минуту с длиной хода от 2,5 до 10 мм, так и продольной подачи каретки с притиром от 0 до 200 двойных ходов в минуту с величиной хода от 10 до 150 мм.

Для возможности плавного регулирования скорости вращения детали был установлен электрический привод бесступенчатого регулирования числа оборотов детали в широком диапазоне скоростей. Кроме бесступенчатого регулирования числа оборотов шпинделя, была предусмотрена возможность обработки деталей в два перехода путем автоматического изменения числа оборотов шпинделя в процессе обработки. Для опытов использовались производственные детали и специальные образцы. Образцы перед доводкой подвергались термообработке с последующим шлифованием. Твердость образцов после термической обработки составляла: для стали 20Х R_C = 61 – 64, для стали 40Х R_C = 53 – 56 и для стали 45 R_C = 51 – 54 и 34 – 36. При доводке применялись порошки белого электрокорунда зернистостью от 100 до М7, зеленого карборунда и карбида бора. В качестве жидкости, входящей в состав абразивной смеси, использовались: керосин, вероятнее масло № 2, смеси этих жидкостей и активные добавки. Абразивные смеси в зону резания подавались через полный притир из смесительного бака. Материалом притиров был серый чугун перлитоферритовой структуры твердостью НВ=150.

Процесс доводки цилиндрических деталей свободным абразивом с осциллирующим движением притира имеет сложную кинематику. Для случая, когда деталь совершает вращательное, а притир одновременно возвратно-поступательное движение вдоль оси детали и осциллирующее движение в том же направлении, траекторией абразивных зерен, шаржированных на рабочей поверхности притира, будет синусоида с большим периодом от возвратно-поступательного движения притира, на которую накладывается синусоида меньшим периодом от осциллирующего движения притира. Однако, учитывая, что большая часть зерен, находящихся в зоне резания, не шаржирует поверхность притира, а свободно перекатывается, траектория их движения будет отличаться от синусоиды в сторону неопределенности (хаотичности).

Сложный характер траектории движении абразивных зерен при доводке с осциллирующим движением притира должен оказать положительное действие на процесс обработки. При этом более полно используются режущие свойства абразивных зерен, что должно способствовать увеличению съема металла. Кроме того, изменение направления движения зерен обеспечивает частичное освобождение их от налипающей стружки, обеспечивает пересекание микроцарапин и интенсивное обламывание острых царапающих элементов зерен, что должно вызывать повышение чистоты обрабатываемой поверхности.

Скорость рабочего движения при доводке цилиндрических деталей с осциллирующим движением притира является величиной переменной. Средняя скорость рабочего движения может быть вычислена по следующей формуле:

$$V = \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot Д_и \cdot n_и}{1000}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot H_к \cdot n_к}{1000} + \frac{2 \cdot a \cdot n_{осц}}{1000}\right)^2}, \text{ м/мин}$$

где $Д_и$ – диаметр обрабатываемой поверхности в мм.

$n_и$ – число оборотов детали в минуту;

$H_к$ – длина хода каретки в мм;

$n_к$ – число двойных ходов каретки;

a – длина хода притира при осциллирующем движении в мм.

$n_{осц}$ – число двойных ходов притира при осциллирующем движении в мм.

Выполненное исследование подтверждает, что абразивные зерна, находящиеся в зоне резания при доводке металлов свободным аб-

разивом при непрерывной подаче абразивной смеси, имеют самый разнообразный характер движения относительно обрабатываемой поверхности и рабочей поверхности притира. Однако из всего многообразия этого движения можно выделить две основные схемы:

1-я схема – абразивные зерна совершают скольжение относительно обрабатываемой поверхности, шаржируя поверхность притира;

2-я схема – абразивные зерна совершают качение, притормаживаясь поверхностью притира или поверхностью детали.

Зерна абразивов, применяемых при доводке металлов, имеют форму неправильных многогранников с округленными вершинами, которые являются режуще-царапающими элементами.

При доводке металлов зерна срезают особо тонкие слои металла. При этом резание-царапание осуществляется преимущественно округленной частью царапающего элемента абразивного зерна при большом отрицательном переднем угле.

Фактический передний угол режуще-царапающего элемента зерен зависит от толщины срезаемого слоя, радиуса закругления округленной части.

В зависимости от отношения толщины срезаемого слоя металла к радиусу закругления царапающего элемента зерна и физико-механических свойств обрабатываемого металла может происходить два совершенно различных процесса. Процесс сминания металла, когда образуется царапина без снятия стружки, и процесс царапания, когда образуется царапина путем срезания стружки.

При доводке пластичных металлов получает большое развитие процесс сминания, что приводит к увеличению высоты выступов (навалов) по краям царапин и ухудшению чистоты поверхности.

При доводке металлов режуще-царапающие элементы абразивных зерен всегда имеют большие передние отрицательные углы, а поэтому вертикальная составляющая усилия резания значительно больше горизонтальной. Это приводит к тому, что процесс стружкообразования совершается путем сжатия металла в радиальном направлении по контору окруженной части царапающего элемента зерна. В срезаемом слое металла при доводке в основном будут возникать сжимающие напряжения.

При доводке металлов свободным абразивом зерна перекатываются, врезаясь в обрабатываемую поверхность царапающим эле-

ментами с различной заостренностью, а имеющиеся микровыступы на поверхности детали способствуют постоянному изменению толщины царапаемого слоя металла. В результате отношение толщины среза к радиусу закругления царапающего элемента будет величиной переменной. Это приводит к тому, что царапающие элементы зерна совершают попеременно и скольжение по обрабатываемой поверхности, сминая металл, и резание-царапание.

Из-за значительного развития процесса сминания металла поверхностный слой чрезвычайно малой толщины при доводке испытывает высокую степень деформации.

Степень углубления абразивных зерен обрабатываемый металл при одинаковом давлении притира зависит от размера абразивных зерен, так как изменяется давление, испытываемое отдельными зернами. Произведенный нами расчет показывает, что если принять давление, испытываемое каждым активным зерном, абразива М7 при постоянном давлении притира за единицу, то для абразива № 320 оно будет равным примерно 31, для абразива № 180 примерно 162 и для абразива № 100 примерно 420. Эти числа отражают характер относительного изменения давления, под действием которого зерна врезаются в обрабатываемый материал, а от степени углубления зерен зависит съем металла и чистота обработанной поверхности.

Следовательно, размер абразивных зерен является особо важным фактором, оказывающим влияние на эффект доводки металлов свободным абразивом.

Исследования показали, что съем металла и чистота обработанной поверхности при доводке металлов свободным абразивом с осциллирующим движением притира зависят от ряда технологических факторов, из которых основными являются: свойства обрабатываемого металла, удельное давление притира, скорость резания, принятая кинематика станка, род и зернистость абразивных порошков, жидкость, входящая в состав абразивной смеси, и продолжительность обработки.

При доводке деталей из закаленных сталей марок 20Х, 40Х и 45 установлено, что съем металла с увеличением твердости обрабатываемого материала уменьшается, а чистота обработанной поверхности улучшается. Однако нет прямой зависимости между твердостью обрабатываемого материала и достигаемым съемом металла и чистотой поверхности. Необходимо учитывать химический состав и структу-

ру материала. Так, при доводке образцов из сталей 45 и 40Х, термически обработанных примерно до одной и той же твердости, более высокий съем металла и хуже чистота поверхности достигались на образцах из стали 45. Наличие в стали хрома способствовало уменьшению съема металла.

Влияние удельного давления притира при доводке зависит от размера абразивных зерен. На основании проведенных опытов можно сделать вывод, что существует оптимальное давление притира по съему металла, которое определяется в основном динамической прочностью абразивных зерен и **ус**ловиями проникания абразивной смеси в зазор между притиром и обрабатываемой поверхностью. Опыты показали, что при применении абразивной смеси, состоящей из порошка электрокорунда и керосина, в зависимости от размера абразивных зерен наибольший съем металла достигался при следующих удельных давлениях притира: для порошка зернистостью № 100 примерно при 2 кг/см^2, для порошка № 180 примерно при 3 кг/см^2 и для порошков зернистостью № 320, М28 и М7 при 4 кг/см^2. Однако следует учитывать, что с повышением удельного давления притира выше определенного предела, чистота обработанной поверхности ухудшается.

Изменение составляющих скорости рабочего движения, как показали опыты, влияет на результаты обработки следующим образом.

Увеличение окружной скорости детали при доводке повышает съем металла, т. к. увеличивается длина пути, проходимого абразивными зернами относительно обрабатываемой поверхности, а также возрастает динамическое воздействие абразивных зерен на обрабатываемую поверхность. Однако повышение окружной скорости выше 25 м/мин. вызывает нагрев обрабатываемой поверхности и неравномерное поступление абразивной смеси в зону резания, что ухудшает чистоту обработанной поверхности.

В связи с этим, с целью повышения производительности, можно рекомендовать ступенчатый процесс доводки, при котором вначале обработка производится при повышенной окружной скорости детали порядка 50 – 75 м/мин, а затем окончательная обработка при окружной скорости порядка 25 м/мин.

Наличие возвратно-поступательных движений притира вдоль оси обрабатываемой детали способствует увеличению съема металла, т.к. увеличивается скорость рабочего движения и более полно исполь-

зуются режущие свойства абразивных зерен за счет изменения направления резания. Особенно повышается съем металла и улучшается чистота обработанной поверхности с введением осциллирующего движения притира, обеспечивающего сложный характер траектории движения абразивных зерен относительно обрабатываемой поверхности.

Увеличение частоты колебаний осциллирующего движения притира до 800 колебаний в минуту при амплитуде 5 мм повышает съем металла. Дальнейшее увеличение частоты колебаний не приводит к росту съема металла, т.к. чрезмерно усиливается процесс дробления абразивных зерен.

Эффект от введения осциллирующего движения притира понижается с увеличением размера абразивных зерен, входящих в состав абразивной смеси. Это объясняется меньшей относительной динамической прочностью более крупных зерен, что приводит к интенсивному их дроблению в процессе доводки, трудностью их шаржирования на поверхности притира, а также худшим проникновением крупных зерен в зазор между притиром и обрабатываемой поверхностью.

Так, введение осциллирующего движения притира для оптимальных условий обработки закаленной стали 20Х повышает съем металла при доводке абразивом ЭБ №100 примерно в 1,1 раза, абразивом ЭБ М28 в 1,5 раза и абразивом ЭБ М7 в 2 раза.

Введение осциллирующего движения при доводке способствует также улучшению чистоты поверхности, последняя имеет более равномерную сетку рисок, чем при доводке без осциллирования.

Чистота поверхности при доводке закаленных сталей с введением осциллирующего движения улучшается примерно на один класс по ГОСТу 2789-51.

Род и зернистость абразивных порошков, а также жидкость, входящая в состав абразивной смеси, оказывают значительное влияние на съем металла и чистоту обработанной поверхности.

В зависимости от размера зерен абразива, входящего в состав смеси, при доводке закаленных сталей с осциллирующим движением притира, съем металла заметно повышается для абразивов от ЭБ М7 до ЭБ М28 при применении в качестве жидкости керосина. Для абразивных смесей с веретенным маслом № 2 съем металла повышается от ЭБ М7 до ЭБ № 280. Более крупнозернистые абразивы обеспечивают незначительное повышение съема металла.

Чистота обработанной поверхности ухудшается с увеличением размера абразивных зерен.

Выбор зернистости абразивов при доводке закаленных сталей следует производить, исходя из требований чистоты поверхности.

При доводке детали с непрерывной подачей абразивной смеси в зону резания существует оптимальное содержание абразива в смеси для каждых конкретных условий доводки.

Физическая сущность оптимального содержания абразива и смеси состоит в том, что в этом случае зазор между обрабатываемой поверхностью и притиром заполняется абразивными зернами с максимально возможной плотностью для данных условий обработки.

Для применявшихся в проведенном исследовании условий доводки установлено, что устойчивые результаты по производительности процесса получаются при содержании абразива не менее 60 г на один литр керосина.

Повышение съема металла достигается изменением вязкости жидкостей. При исследовании влияния вязкости смеси керосина с веретенным маслом № 2 на съем металла при доводке закаленной стали 20Х наибольший съем металла был получен при вязкости смеси Е – 2,48, состоящей из 34 % керосина и 66 % веретенного масла № 2. По сравнению с чистым керосином съем металла повышается до 1,3 раза.

Степень влияния вязкости жидкости на съем металла зависит от размера абразивных зерен, входящих в состав смеси. С уменьшением размера абразивных зерен при применении жидкости повышенной вязкости съем металла уменьшается.

Введение поверхностно-активных веществ в состав жидкости также значительно повышает съем металла. При применении керосина с оптимальным содержанием олеиновой кислоты, равным 2 %, съем металла повышается почти в 1,5 раза.

Осциллирующее движение притира усиливает действие поверхностно-активных веществ в процессе резания-царапания металлов свободным абразивом, повышая съем металла. Так, например, при доводке закаленной стали 20Х применение жидкостей, содержащих поверхностно-активные вещества, обеспечивало повышение съема металла в среднем на 19 – 20 % при обработке без осциллирования притира, а при обработке с осциллированием притира на 27 – 33 %.

В зависимости от состава жидкости чистота обработанной поверх-

ности при доводке изменяется в пределах разрядов ГОСТа 2789-51. Введение в жидкость поверхностно-активных веществ ухудшает чистоту поверхности.

Продолжительность обработки при оптимальных условиях оказывает влияние на съем металла и чистоту обработанной поверхности в первые минуты доводки, когда происходит снятие начальной шероховатости. Затем процесс доводки стабилизируется и съем металла в равные отрезки времени становится одинаковым, а чистота поверхности практически не изменяется.

Материал притира, обладая различной износоустойчивостью и шаржируемостью, оказывает существенное действие на процесс доводки металлов свободным абразивом. Высокая точность и чистота поверхности при доводке достигается притирами из серого чугуна с мелкими графитовыми включениями и прочной металлической основой.

В проведенном исследовании хорошие результаты получены при доводке закаленной стали притиром из серого чугуна твердостью НВ=150 с перлито-ферритовой структурой.

В процессе доводки с осциллирующим движением притира за счет большой площади соприкосновения притира с обрабатываемой поверхностью и правильной его установки на станке исправляются погрешности геометрической формы деталей. Овальность уменьшалась в среднем на 45 %, конусность на 33 % и полностью устранилась гранность.

Поверхности, доведенные свободным абразивом с осциллированием притира, при оптимальной высоте шероховатости обладают повышенной износоустойчивостью из-за благоприятного расположения обработанных рисок, хорошо удерживающих масляную пленку.

Обработка результатов экспериментального исследования позволила установить ряд зависимостей, представленных в виде графиков и формул, облегчающих их использование в производственных условиях, так, например: для стали 20Х твердостью R = 61 – 64 съем металла в зависимости от зернистости абразивов при доводке с осциллирующим движением притира может быть определен по следующей формуле:

$$\delta = 10{,}6 \cdot d_3^{0{,}18},$$

а средняя высота микронеровностей:

$$H_{ср} = 0{,}14 \cdot d_3^{0{,}54},$$

где δ – съем металла по диаметру в мкм;

d_3 – средний размер зерен абразива в мкм;

$H_{ср}$ – средняя высота микронеровностей в мкм.

Аналогичные зависимости были получены и для других исследованных марок сталей.

Выводы

Результаты теоретического и экспериментального исследования сводятся к следующему.

1. Доводка металлов свободным абразивом – сложный процесс резания, зависящий от большого числа факторов. Наиболее сильное влияние на процесс оказывают: физико-механические свойства материала обрабатываемой детали, состав абразивной смеси, удельное давление притира, скорость рабочего движения, а также характер движения притира.

2. Среди разновидностей этого метода обработки доводка металлов свободным абразивом с применением металлических притиров обеспечивает наиболее высокую точность и чистоту поверхности. Особенно эффективен этот процесс при доводке деталей с прерывистыми поверхностями, обработка которых абразивными брусками большей частью не дает хороших результатов из-за интенсивного износа брусков.

3. На основании проведенного анализа выяснена кинематика доводки цилиндрических деталей свободным абразивом с осциллирующим движением притира, а также исследован механизм резания-царапания металлов с учетом особенностей геометрии абразивных зерен, шаржируемости притира, влияния на процесс жидкости, входящей в состав абразивной смеси, удельного давления и характера движения притира.

4. Для определения скорости резания при доводке свободным абразивом предложена формула.

5. Установлено, что при доводке свободным абразивом цилиндрических деталей с прерывистыми поверхностями осциллирующее движение притира значительно превышает съем металла и улучшает чистоту поверхности. Погрешности геометрической формы деталей исправляются: уменьшаются овальность, конусность и полностью устраняется гранность.

6. Установлена степень влияния основных технологических факторов на съем металла и чистоту поверхности. Выбран рациональный режим обработки для доводки деталей из закаленных сталей марок 20Х, 40Х и 45.

7. Проведенные исследования влияния жидкости на процесс доводки показали возможность повышения съема металла в 1,5 раза за счет применения поверхностно-активных жидкостей.

8. Обработка результатов экспериментального исследования позволила установить ряд зависимостей, представленных в виде графиков и формул, которые могут быть использованы при составлении руководящих материалов по выбору оптимальных режимов доводки свободным абразивом деталей из закаленных сталей.

9. Результаты работы опубликованы в виде отдельных статей:

1) "Исследование влияния твердости стали на производительность при доводке свободным абразивом стальных деталей", Труды ХПИ им. В. И. Ленина, т. XXI, вып. 4, 1959.

2) "Доводка с осциллированием притира и непрерывной подачей абразивной смеси", "Станки и инструмент", №12, 1958.

3) "Влияние материала притира на эффект доводки свободным абразивом стальных деталей", Труды ХПИ им. В. И. Ленина, т. XXI, вып. 4, 1959.

4) "Влияние механической обработки на износоустойчивость стальных деталей машин", Труды ХПИ им. В. И. Ленина, т. IX, вып. 1, 1957.

5) "К вопросу о схватывании при граничном трении деталей машин", Труды ХПИ им. В. И. Ленина, т. XXI, вып. 4, 1959.

6) "Доводка абразивными порошками деталей из стали 4Х13", Труды ХПИ им. В. И. Ленина, т. XXI, вып. 4, 1959.

7) "Способ доводки цилиндрических прерывистых поверхностей с осциллированием притира и устройством для непрерывной подачи абразивной смеси в зону резания", авторское свидетельство по заявке от 2/VII-1958 г. № 603045, кл. 67, подкл. а, гр. 9.

Содержание

Введение …….…… 3
Раздел 1. Этапы становлення технологических знаний ……... 5
1.1. Науку в производство ……..…….. 5
1.2. Научная технологическая школа профессора Якимова Александра Васильевича ……..…… 26
1.3. Творческий научный коллектив кафедры техники и технологий Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеца ……..……. 42
1.4. Некоторые концепции подготовки инженеров-технологов 75
Выводы …….…….. 78
Раздел 2. Научные предпосылки создания и применения эффективных технологий производства ……..… 80
2.1. Подготовка специалистов, обладающих новым мышлением – острейшая проблема времени …….…. 80
2.2. Роль науки и технологий в развитии Украины …….…. 83
2.3. Экологическая культура – один из важнейших вопросов вузовской подготовки ……..……..……. 87
2.4. Инновации в развитии технологии машиностроения …. 93
2.5. Обеспечение выхода на рынок промышленной и интеллектуальной продукции …….…….. 99
2.6. Некоторые особенности доводочного шлифования свободным абразивом ……..……. 102
2.7. Повышение эффективности метода непрерывного профилирования давлением листовых материалов ...…. 108
2.8. Комбинированная технология изготовления гнутых профилей настилов с поверхностью противоскольжения 111
Выводы ……. 118
Раздел 3. Современные технологии машиностроения ……..……. 120
3.1. Высокоэффективные технологии фрезерования материалов ……. 120
3.1.1. Эффективность применения нового инструментального износостойкого сплава от компании TaeguTec для высокоскоростного фрезерования чугунов …… 121

3.1.2. Новые монолитные фрезы STARMILL для фрезерования труднообрабатываемых материалов ..… 125
3.1.3. Повышение производительности обработки при фрезеровании на оборудовании с недостаточной мощностью …….. 127
3.1.4. Обработка закаленных сталей фрезами HardMill 130
3.1.5. Антикризисные решения от компании TaeguTec для фрезерования ……..…….. 133
3.1.6. Обновленная серия торцевых фрез ……..……. 137
3.1.7. Новые разработки компании TaeguTec для фрезерования ……... 140
3.1.8. Обновленные треугольные пластины Mill2Rush для тяжелой черновой обработки …….…… 143
3.2. Высокоэффективные технологии металлообработки на токарных операциях ……..…… 147
3.2.1. Эффективность применения рациональных конструкций режущих инструментов на токарных операциях ……..…. 147
3.2.2. Новые сплавы Life+ продлевают стойкость инструмента …… 152
3.3. Высокоэффективная серия сверл TOPDRILL ……. 155
3.4. Применение эффективной CAM-системы для управления осью B на токарно-фрезерных операциях … 159
3.5. Эффективность использования программного обеспечения Doosan Easy Operation Package (EOP) …. 168
3.6. Почему выгодно объединять станки в локальную сеть Ethernet …… 171
Выводы ……. 173
Раздел 4. Оптимизация технологических процессов механической обработки деталей машин …. 175
4.1. Выбор оптимальных вариантов технологических процессов механической обработки по критерию наименьшей себестоимости …… 175
4.2. Концепции повышения производительности и снижения технологической себестоимости механической обработки деталей машин …….….. 181

4.3. Эффективное применение современных технологий механической обработки …… 193
4.4. Повышение эффективности высокоскоростной обработки на основе температурного фактора ……..…. 202
4.5. Теплонапряженность процесса шлифования …….. 209
4.6. Проблемы решения технологических задач с применением компьютерной техники ……... 219
Выводы ……..……. 223
Раздел 5. Высокопроизводительные технологии алмазного шлифования ……..…. 227
5.1. Существующие подходы к оптимизации структуры и параметров технологических процессов финишной механической обработки ……... 227
5.2. Аналитическое определение шероховатости поверхности при шлифовании ……..….. 231
5.3. Определение оптимальных условий высококачественной обработки при алмазном шлифовании …… 237
5.4. Исследование связи возникающих в технологической системе упругих перемещений с точностью и производительностью механической обработки ……. 242
5.5. Теоретический анализ путей повышения точности и качества алмазно-абразивной обработки …… 248
5.6. Металлографический анализ качества обработки твердых сплавов при алмазном шлифовании …..…….. 253
5.7. Исследование макроструктуры и шероховатости поверхности стали при алмазно-искровом шлифовании . 261
5.8. Повышение эффективности доводки поверхностей деталей пастами и суспензиями ……..… 266
Выводы ……..…….. 273
Раздел 6. Разработка мобильных малогабаритных устройств беспрессовой штамповки для малых предприятий …. 276
6.1. Предпосылки и история создания импульсных технологий ……. 276
6.2. Основные направления и области использования импульсных технологий …… 283

6.3. Особенности разработки новых изделий с позиций малого предприятия …… 288
6.4. Разработка имитационных моделей при проектировании импульсных беспрессовых методов изготовления изделий …….. 291
Выводы ……. 311
Раздел 7. Теоретические и экспериментальные исследования условий уменьшения высоты микронеровностей и повышения оптических свойств обрабатываемых поверхностей прецизионных деталей ……. 313
7.1. Общий подход к технологическому обеспечению оптических характеристик металлоизделий ……. 313
7.2. Аналитическое определение условий уменьшения шероховатости поверхности при абразивном полировании …….….. 314
7.3. Закономерности взаимодействия инструмента-полировальника и обрабатываемого металла при абразивном полировании …….……. 322
7.4. Технологические рекомендации по обработке поверхностей полированием …….…….. 330
7.5. Технологическое обеспечение параметров поверхностей штанг систем пассивной ориентации ИСЗ ….. 336
7.6. Технологическое обеспечение деталей устройств терморегуляции отсеков летательных аппаратов ...… 340
7.7. Технологическое обеспечение отражательной способности зеркал лазерных установок …….. 349
Вывод …… 352
Раздел 8. Обоснование условий повышения эффективности механической обработки …… 356
8.1. Условия уменьшения температуры резания при лезвийной обработке …… 356
8.2. Уточненный расчет температуры резания при лезвийной обработке …… 362
8.3. Сравнение температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке …….. 370

8.4. Условия повышения эффективности высокоскоростного фрезерования на основе снижения энергоемкости обработки ……. 380
8.5. Основные направления уменьшения шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании … 388
8.6. Разработка и изготовление высокоточной формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности …….. 393
Выводы ……. 396
Раздел 9. Определение оптимальных параметров процессов абразивной обработки ……..… 399
9.1. Технологические закономерности и условия повышения эффективности прерывистого и обычного шлифования ……..…… 399
9.1.1. Физические эффекты прерывистого шлифования 399
9.1.2. Закономерности снижения силовой и тепловой напряженностей прерывистого шлифования ...…. 406
9.1.3. Определение температуры резания при финишной обработке шлифованием ……..……. 411
9.1.4. Установление взаимосвязей температуры резания с параметрами теплового процесса при шлифовании ……. 421
9.1.5. Определение условий уменьшения температуры резания при шлифовании и повышения качества обработки ……..….. 429
9.2. Теоретическое определение технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке ……..…….. 435
9.2.1. Закономерности формирования и условия уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании …….……. 435
9.2.2. Анализ технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при обработке свободным и связанным абразивом 442
9.2.3. Общие закономерности формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке и условия ее уменьшения ……. 449

Выводы ……. 456
Раздел 10. Условия создания конкурентоспособной машиностроительной продукции ……. 459
10.1. Повышение конкурентоспособности машиностроительной продукции на основе снижения себестоимости металлообработки ……..…… 459
10.2. Условия эффективного применения современных режущих инструментов на машиностроительных предприятиях ……..…… 468
10.3. Определение оптимальных режимов резания инструментами с твердосплавными пластинами геометрии WIPER …….……. 474
10.4. Механическая обработка – "узкое место" в планировании себестоимости проектирования детали …….. 482
Выводы …….…… 486
Общие выводы ……..……. 489
Список использованных источников ……. 491
Приложение А ……. 512
Приложение Б ……. 517

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Новіков Федір Васильович
Жовтобрюх Валерій Олексійович
Дитиненко Станіслав Олександрович
Крюк Анатолій Григорович
Савченко Микола Федорович
Шкурупій Валентин Григорович
Полянський Володимир Іванович
Рябенков Ігор Олександрович
Новіков Дмитро Федорович

ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ

Монографія

(Російською мовою)

Відповідальний за випуск **Новіков Ф. В.**

В авторській редакції

Підписано до друку 22.03.2018 р.
Формат 60х84/16. Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 31,16.
Наклад 300 пр. Зам. № 076.

Видавництво і друкарня ПП "Ліра ЛТД"
49107, м. Дніпро, вул. Наукова, 5
Свідоцтво про внесення до Держреєстру
ДК № 6042 від 26.02.2018.