

Ф. В. Новиков
В. А. Жовтобрюх
Г. В. Новиков

СОВРЕМЕННЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА

Монография



*Ф. В. Новиков
В. А. Жовтобрюх
Г. В. Новиков*

**СОВРЕМЕННЫЕ
ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА**

Монография

Днепр / **ЛИРА** / 2017

УДК 621.91

ББК 34.63

Н73

Рецензенты: докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой "Технология машиностроения" ГВУЗ "Приазовский государственный технический университет" *Андилахай А. А.*; 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, 2, выводы; канд. техн. наук Жовтобрюх В. А. – разделы 6, 7; канд. техн. наук Новиков Г. В. – разделы 3, 4, 5.

Новиков Ф. В.

Н73 Современные экологически безопасные технологии производства : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Д. : ЛИРА, 2017. – 372 с.

ISBN 978-966-383-829-8

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований технологических и экологических показателей алмазного шлифования металлических и неметаллических материалов повышенной твердости (твердые сплавы, износостойкие наплавки и покрытия, алмазы, керамики и ферриты, техническое стекло и хрусталь, и т.д.) с введением в зону резания или автономно к алмазному кругу на металлической связке дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов. Обоснованы оптимальные условия обработки и обобщен практический опыт широкого внедрения разработанных современных экологически чистых и безопасных технологий алмазного шлифования в производство. Предложены новые экологически чистые и безопасные технологии механической обработки сборными твердосплавными и керамическими режущими лезвийными инструментами с износостойкими покрытиями на современных металлорежущих станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр". Даны практические рекомендации по их рациональному использованию на предприятиях Украины.

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

УДК 621.91

ББК 34.63

© Новиков Ф. В., Жовтобрюх В. А.,
Новиков Г. В., 2017

© ЛИРА, 2017

ISBN 978-966-383-829-8

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно в промышленности широко используются различные материалы повышенной твердости (твердые сплавы, износостойкие наплавки и покрытия, алмазы, керамики и ферриты, техническое стекло и хрусталь, и т.д.), обработка которых вызывает значительные трудности. Основным методом их обработки является абразивная обработка, включающая обработку связанным и свободным абразивом (шлифование, хонингование, доводку, притирку, полирование и т.д.). В 1960-е годы в связи с промышленным освоением синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов получила применение алмазно-абразивная обработка, в особенности алмазными кругами на металлических связках, которые, обладая высокой режущей способностью, обеспечивают эффективное шлифование неметаллических и металлических материалов повышенной твердости. Однако, как показывает практика, эти круги в силу прочного удержания алмазных зерен в металлической связке быстро затупляются, засаливаются и теряют режущую способность. Поэтому для непрерывного восстановления их режущей способности в процессе шлифования необходимо использовать эффективные методы правки, из которых наибольшее применение получил метод электрохимической правки, основанный на электрохимическом растворении металлической связки в среде электролита. Еще большими технологическими возможностями располагает метод электрохимического шлифования, основанный на непрерывном электрохимическом воздействии на обрабатываемый материал и металлическую связку алмазного круга, что обеспечивает непрерывную правку алмазного круга и повышение производительности и качества обработки. Вместе с тем, использование сильных электролитов в процессе электрохимического шлифования и электрохимической правки круга ограничивает их применение, так как это, во-первых, вызывает коррозию металлорежущего оборудования и преждевременный выход его из строя, во-вторых, отрицательно сказывается на здоровье рабочего. Так, установлено, что при обработке в зоне шлифования образуется туман из электролита, содержащий вредные составляющие для организма человека, который необходимо удалять вытяжными устройствами.

Получил также применение метод химического травления режущей поверхности алмазного круга на металлической связке. Для его реализации алмазный круг на металлической связке М2-01 помещают в кон-

центрированную кислоту (в 42 процентный раствор азотной кислоты) и выдерживают определенное время. После химического травления алмазный круг промывают с целью предохранения связки от коррозии и нейтрализации процесса травления. Этот метод достаточно эффективен, не требует сложного оборудования и приспособлений, кроме вентиляционных устройств, однако не является экологически безопасным методом. Поэтому вместо электрохимического шлифования, электрохимической правки и химического травления алмазного круга предложено применять электроэрозионную правку алмазного круга, основанную на введении в зону резания или автономно к кругу дополнительной электрической энергии в виде электрических разрядов, что приводит к ударно-термическому разрушению металлической связки и интенсивному обновлению режущего рельефа круга. В результате обеспечивается высокая режущая способность алмазного круга, и достигается повышение производительности и качества обработки в процессе шлифования.

Необходимо отметить, что метод электроэрозионной правки алмазного круга не требует применения вредных электролитов – он протекает с использованием обычной технической воды, которая не вызывает отрицательного воздействия на рабочего как это имеет место при электрохимической правке алмазного круга. Следовательно, метод электроэрозионной правки алмазного круга является экологически чистым и безопасным, т.е. замена вредных для здоровья рабочих сильных электролитов безвредной обычной технической водой в процессе электроэрозионной правки открывает новые технологические и экологические возможности в использовании алмазных кругов на высокопрочных металлических связках.

Метод электроэрозионной правки алмазного круга в зависимости от интенсивности его износа и затупления (засаливания) в процессе шлифования может осуществляться непрерывно и периодически во времени. При интенсивном затуплении и засаливании алмазного круга в процессе шлифования целесообразно использовать непрерывную электроэрозионную правку, так как при использовании периодической электроэрозионной правки алмазный круг не будет успевать восстанавливать свою режущую способность, что приведет к существенному снижению производительности обработки, увеличению силы и температуры резания, ухудшению качества обрабатываемой поверхности.

Получил широкое применение на практике эффективный метод электроэрозионного шлифования (алмазно-искрового шлифования) ал-

мазными кругами на металлических связках, основанный на непрерывном введении в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов, который также как и метод электроэрозионной правки алмазного круга осуществляется с применением лишь безвредной обычной технической воды. В результате действия электрических разрядов в зоне резания происходит ударно-термическое разрушение металлической связки алмазного круга и обрабатываемого материала, что обеспечивает постоянное поддержание на рабочей поверхности круга развитого режущего рельефа и соответственно его высокой режущей способности. Это приводит к снижению сил и температуры резания, повышению производительности и качества обработки.

Таким образом, метод алмазного электроэрозионного шлифования в отличие от метода алмазного электрохимического шлифования является экологически чистым и безопасным, обеспечивающим высокие технико-экономические показатели обработки. Он получил применение при обработке материалов повышенной твердости, в особенности на операциях шлифования и заточки твердосплавных инструментов. Поэтому настоящая работа посвящена обоснованию оптимальных условий алмазного электроэрозионного шлифования различных металлических и неметаллических материалов повышенной твердости, включая электрические и механические параметры обработки, которые обеспечивают высокие технико-экономические показатели шлифования при одновременном улучшении экологии производства. На их основе разработаны и внедрены в производство эффективные и экологически чистые и безопасные технологии алмазного электроэрозионного шлифования и электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках при обработке изделий из твердых сплавов, износостойких наплавов и покрытий, керамик и ферритов, технического стекла и хрусталя, при обработке натуральных алмазов в бриллианты и т.д.

В работе также значительное внимание уделено теоретическому и экспериментальному определению технологических возможностей алмазного шлифования с точки зрения повышения производительности, качества и точности обработки за счет применения прогрессивных кинематических схем и условий шлифования. Показано, что наибольшую производительность обработки изделий из твердых сплавов при круглом наружном шлифовании с учетом ограничений по относительно расходу алмаза и параметрам качества и точности обработки можно достичь в условиях глубинного шлифования с относительно небольшой скоро-

стью детали (в пределах 0,5 ... 5 м/мин) и долевой продольной подачей, близкой к единице. Для уменьшения силы и температуры резания в этих условиях необходимо строго регламентировать величину линейного износа алмазных зерен до момента их объемного разрушения и последующего выпадения из связки алмазного круга за счет подвода в зону шлифования или автономно дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов. Доказано, что для каждого режима шлифования и каждой характеристики алмазного круга и обрабатываемого материала существует оптимальное значение этой величины, при котором относительный расход алмаза принимает минимальное значение. Поэтому поддержание в процессе алмазного электроэрозионного шлифования оптимальной величины линейного износа алмазных зерен и соответственно оптимального режущего рельефа алмазного круга обеспечивает его высокую режущую способность и позволяет повысить технико-экономические и экологические показатели обработки.

В работе приведены современные эффективные и экологически чистые и безопасные технологии механической обработки лезвийными режущими инструментами и обобщен практический опыт их внедрения в производство, накопленный в Техническом Центре "ВариУс" (г. Днепр). Теоретически обоснованы оптимальные условия осуществления высокоскоростного резания, предложены новые конструкции металлорежущих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и сборных твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями, в частности, производства южно-корейской компании TaeguTec. Даны практические рекомендации по их рациональному использованию на различных операциях механической обработки деталей, изготовленных из материалов повышенной твердости.

Приведенные в работе технологии механической обработки получили широкое применение в промышленности и внедрены, в частности, в ПАО "Свет шахтера" (г. Харьков), ГП ХМЗ "ФЭД", ПАО "Днепрполимермаш" (г. Днепр) и на многих других предприятиях Украины.

Результаты исследований широко используются в учебном процессе на кафедре "Естественные науки и технологии" Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця при изучении дисциплин технологического назначения на основе STEM концепции, а также дисциплин, связанных с разработкой экологически чистых и безопасных технологий, технологий защиты окружающей среды и при выполнении дипломных работ.

Раздел 1

Технологические и экологические проблемы алмазной обработки материалов повышенной твердости

1.1. Концепции развития механической обработки материалов и создания металлорежущих станков

Создание современной конкурентоспособной машиностроительной продукции требует широкого применения новых наукоемких технологий механической и физико-технической обработки материалов, обеспечивающих многократное повышение производительности труда, качества, точности и экономичности изготовления деталей и машин [5; 65; 72; 78; 139; 145; 147; 164; 165; 170]. Для того чтобы оценить основные наиболее эффективные направления развития механических технологий обработки, следует провести анализ аналитической зависимости для определения производительности обработки Q :

$$Q = S \cdot V = \frac{P_z}{\sigma} \cdot V, \quad (1.1)$$

где S – площадь поперечного сечения среза, м^2 ;

V – скорость резания, м/с ;

P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н ;

σ – условное напряжение резания, Н/м^2 .

Увеличить производительность обработки Q можно увеличением параметров S и V или увеличением P_z , V и уменьшением σ . Увеличение тангенциальной составляющей силы резания P_z – это осуществление силового резания, а увеличение скорости резания V – осуществление скоростного (высокоскоростного и сверхвысокоскоростного) резания. Уменьшение условного напряжения резания σ – осуществление управления процессом стружкообразования при резании и в первую очередь контактными процессами, происходящими на рабочих поверхностях инструмента.

Условное напряжение резания σ описывается аналитической зависимостью:

$$\sigma = 2 \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot \text{tg}(\psi - \gamma), \quad (1.2)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²;

ψ – условный угол трения на передней поверхности инструмента ($\text{tg} \psi = f$ – коэффициент трения);

γ – передний угол инструмента.

Уменьшить условное напряжение резания σ можно уменьшением угла $\psi - \gamma$, т.е. уменьшением условного угла трения ψ (коэффициента трения f) и увеличением переднего угла инструмента γ . При определенных условиях $\psi - \gamma \rightarrow 0$, что позволяет существенно уменьшить условное напряжение резания σ и увеличить площадь поперечного сечения среза S и производительности обработки Q . Однако увеличение S при резании лезвийными инструментами ограничено прочностью его режущей части. Поэтому более предпочтительным путем увеличения производительности обработки Q следует рассматривать увеличение скорости резания V , согласно зависимости (1.1).

Как известно, с увеличением скорости резания V уменьшается коэффициент трения f на передней поверхности инструмента, что способствует уменьшению условного напряжения резания σ и увеличению производительности обработки Q . Средняя температура образующейся стружки θ определяется приближенной зависимостью:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{h}{a}\right)}, \quad (1.3)$$

где c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/кг·К;

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³;

a – толщина среза, м;

h – толщина нагретого слоя обрабатываемой поверхности, м;

$$\frac{h}{a} = \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot a \cdot V \cdot \text{tg} \beta}}, \quad (1.4)$$

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;

β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

С увеличением скорости резания V условный угол сдвига обрабатываемого материала β увеличивается, а отношение h/a уменьшается. Следовательно, уменьшается количество тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и увеличивается количество тепла, уходящего в образующуюся стружку. Средняя температура стружки θ (равная приблизительно температуре поверхностного слоя обрабатываемой детали) с увеличением скорости резания V увеличивается, асимптотически приближаясь к значению $\sigma/c \cdot \rho$ (рис. 1.1), т.к. согласно зависимости (1.3) множитель $(1+h/a) \rightarrow 1$. В этом состоит суть физического эффекта высокоскоростного и сверхвысокоскоростного резания, осуществляемого со скоростями резания свыше 100 м/с, поскольку в этом случае температура поверхностного слоя обрабатываемой детали остается фактически постоянной с увеличением скорости резания V .

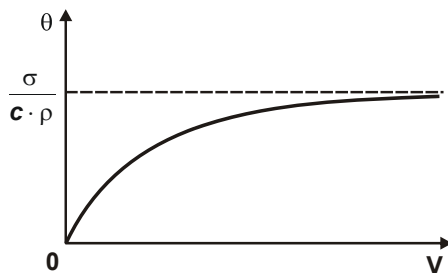


Рис. 1.1. Зависимость температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали θ от скорости резания V

Необходимо отметить, что традиционные методы обработки лезвийными инструментами реализуют скорости резания, как правило, не более 2 м/с. Как показывает опыт ведущих иностранных станкостроительных фирм, переход в область высокоскоростного резания позволяет более чем в 10 раз увеличить производительность обработки при одновременном повышении качества и точности обрабатываемых поверхностей, что является кардинальным решением проблемы механической обработки материалов.

Для практической реализации этих процессов обработки необходимо создание отечественных станков, работающих со скоростями резания порядка 10 000 м/мин. В связи с этим, важно направить усилия ученых–технологов на глубокое изучение процессов высокоскоростного и сверхскоростного резания и разработку рекомендаций по оптимизации

режимов резания, научно обоснованному выбору, проектированию и изготовлению прогрессивных конструкций инструментов, работающих при больших скоростях резания. Необходимо в кратчайшие сроки освоить и внедрить в производство эффективные процессы высокоскоростного и сверхвысокоскоростного точения, растачивания, фрезерования, сверления и т.д. Это станет важным шагом подъема производства, повышения конкурентоспособности машиностроительной продукции и увеличения производительности труда.

Выявленные закономерности справедливы при резании металлических материалов. При резании неметаллических материалов практически все тепло уходит на нагревание режущего инструмента. В этом случае увеличение скорости резания ограничено и определяется уровнем силовой напряженности процесса и условиями теплоотвода из зоны резания, т.е. теплопроводностью инструментального материала.

При шлифовании материалов, в связи с отрицательными передними углами режущих зерен круга, зависимость (1.2) принимает вид:

$$\sigma = 2 \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot \text{tg}(\psi + \gamma). \quad (1.5)$$

При условии $(\psi + \gamma) \rightarrow 90^\circ$ имеем $\text{tg}(\psi + \gamma) \rightarrow \infty$ (рис. 1.2). Для уменьшения условного напряжения резания σ необходимо уменьшить углы ψ и γ , применяя эффективные технологические среды (снижающие коэффициент трения), обеспечивая высокую остроту режущих зерен и т.д.

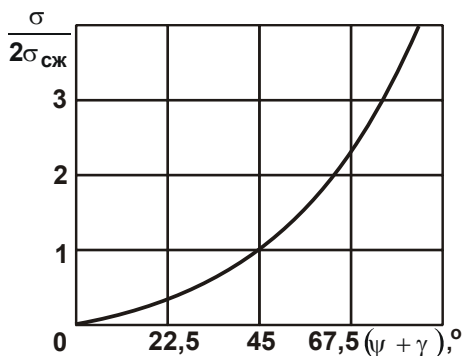


Рис. 1.2. Зависимость отношения $\sigma/2\sigma_{\text{сж}}$ от угла $(\psi + \gamma)$

Сравнивая зависимости (1.2) и (1.5), видно, что при лезвийной обработке условное напряжение резания σ меньше, чем при шлифовании. При шлифовании меньше суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами $S = Q/V_{кр}$ и, соответственно, производительность обработки Q . Поэтому увеличить Q можно увеличением скорости круга $V_{кр}$.

В общем виде при шлифовании материалов производительность обработки Q определяется зависимостью:

$$Q = \frac{P_y \cdot V_{кр} \cdot K_{ш}^2}{2 \cdot \sigma_{сж}}, \quad (1.6)$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания, Н;

$K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования.

Исходя из зависимости (1.6), увеличить производительность обработки Q можно, прежде всего, увеличением коэффициента шлифования $K_{ш}$ за счет повышения режущей способности круга ($K_{ш}$ изменяется в пределах $f \dots 1$, где f – коэффициент трения зерен круга с обрабатываемым материалом). Параметры P_y и $V_{кр}$ оказывают одинаковое влияние на производительность обработки Q , т.е. эффективно применение как силового (глубинного), так и высокоскоростного (сверхвысокоскоростного) шлифования. Эффект усиливается в случае совмещения глубинного и высокоскоростного шлифования.

В настоящее время ведущими иностранными станкостроительными фирмами освоено производство шлифовальных станков, работающих со скоростями резания порядка 300 м/с. Необходимо отметить, что в 1987 – 1991 годы в Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС, г. Москва) с участием авторов работы разрабатывались технические проекты по созданию гаммы станков для сверхвысокоскоростного резания, в том числе шлифовальных станков, реализующих скорости резания до 600 м/с. Однако в связи с распадом СССР этим решениям не удалось осуществиться, что в конечном итоге привело к отставанию отечественного станкостроения. Поэтому важной и актуальной задачей следует рассматривать создание станков для высокоскоростного и сверхскоростного шлифования. В этом направлении имеются эффективные научные разработки, которые могут

быть использованы при создании новых станков [2; 56; 65; 64; 66; 69; 73; 76; 106; 107; 108; 110; 123].

Процессы механической обработки чрезвычайно сложны и мало изучены. К сожалению, и в настоящее время отсутствует четкое научное представление о механике поведения технологической системы при обработке. Это ограничивает возможности проектирования новых станков и создания высокоэффективных методов обработки. Для выработки новых решений необходимо перейти от традиционных эмпирических к научным аналитическим подходам, используя огромные достижения науки в области механики деформируемых систем. Например, рассчитывая величину упругого перемещения y и производительность обработки Q при круглом наружном шлифовании, удалось получить интересное и важное решение:

$$Q = Q_{\text{ном}} - (Q_{\text{ном}} - Q_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau);} \quad (1.7)$$

$$y = y_{\text{уст}} - (y_{\text{уст}} - y_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}, \quad (1.8)$$

где $Q_{\text{ном}}$ – номинальная производительность обработки, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_0 = \frac{y_0 \cdot V_{\text{кр}} \cdot K_{\text{ш}} \cdot c}{\sigma}$ – производительность обработки при достижении

начального натяга в технологической системе y_0 , $\text{м}^3/\text{с}$;

y_0 – начальный натяг в технологической системе, м ;

$V_{\text{кр}}$ – скорость круга, $\text{м}/\text{с}$;

$K_{\text{ш}} = P_z / P_y$;

P_z , P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н ;

c – жесткость технологической системы, $\text{Н}/\text{м}$;

$$\bar{\beta} = \frac{V_{\text{кр}} \cdot K_{\text{ш}} \cdot c}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}} \cdot \sigma};$$

$D_{\text{дет}}$, $l_{\text{дет}}$ – диаметр и длина обрабатываемой детали, м ;

τ – время обработки, с ;

$y_{\text{уст}} = \frac{\sigma \cdot Q_{\text{ном}}}{V_{\text{кр}} \cdot K_{\text{ш}} \cdot c}$ – установившаяся величина упругого перемеще-

ния в технологической системе, м .

Характер изменения параметров Q и y с течением времени обработки показан на рис. 1.3а,б. При $Q_{\text{ном}} < Q_0$ и $y_{\text{уст}} < y_0$ выполняются условия $Q > Q_{\text{ном}}$ и $y > y_{\text{уст}}$ (кривая 1). При $Q_{\text{ном}} > Q_0$ и $y_{\text{уст}} > y_0$ выполняются условия $Q < Q_{\text{ном}}$ и $y < y_{\text{уст}}$ (кривая 3). При $Q_{\text{ном}} = Q_0$ и $y_{\text{уст}} = y_0$ выполняются условия $Q = Q_{\text{ном}}$ и $y = y_{\text{уст}}$ (кривая 2).

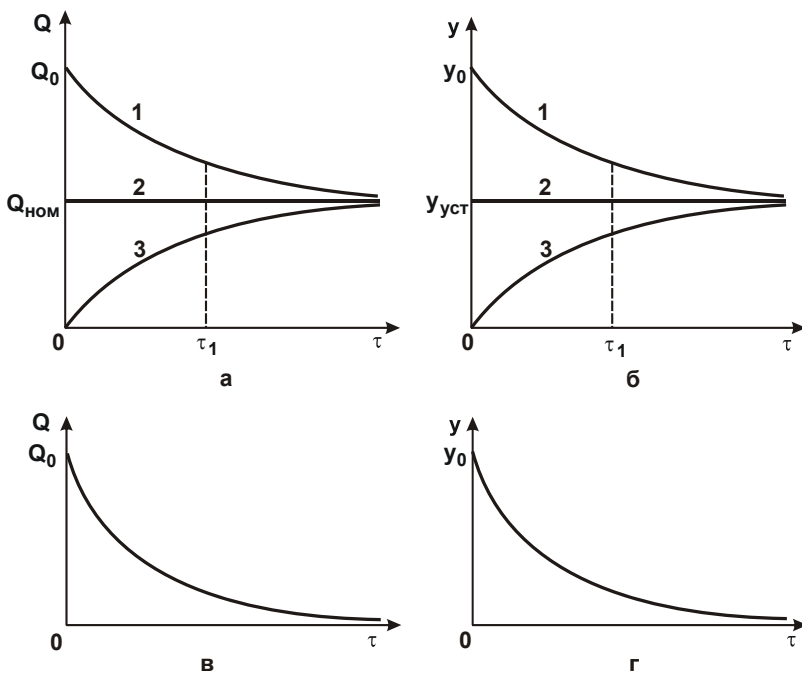


Рис. 1.3. Зависимости производительности обработки Q (а, в) и упругого перемещения y (б, г) от времени обработки τ

Средняя производительность обработки за время τ_1 для трех кривых, представленных на рис. 1.3а, будет различна. Так, если через фиксированную точку с координатами Q , τ_1 провести семейство кривых $Q-\tau$, то наибольшая средняя производительность обработки будет иметь место при условии $y_{\text{уст}} < y_0$, а наименьшая – при условии $y_0 = 0$ (рис. 1.3б).

Очевидно, чем больше начальный натяг в технологической системе y_0 , тем больше средняя производительность обработки.

Из преобразованной зависимости (1.8)

$$y = y_{\text{уст}} \cdot \left[1 - e^{(-\beta \cdot \tau)} \right] + y_0 \cdot e^{(-\beta \cdot \tau)}$$

следует, что наибольшее значение y_0 (для заданных значений y и $\tau = \tau_1$) достигается при условии $y_{\text{уст}} = 0$. Следовательно, наиболее производительной схемой обработки с учетом ограничения по точности обработки (определяемой величиной упругого перемещения y) является схема шлифования без поперечной подачи ($Q_{\text{ном}} = 0$) с начальным натягом y_0 в технологической системе. Текущие значения Q и y в данном случае определяются зависимостями (рис. 1.3в,г):

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\frac{V_{\text{кр}} \cdot K_{\text{ш}} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}} \cdot \sigma}}; \quad (1.9)$$

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{V_{\text{кр}} \cdot K_{\text{ш}} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}} \cdot \sigma}}. \quad (1.10)$$

Чем больше значения $V_{\text{кр}}$, $K_{\text{ш}}$, c и меньше y_0 , $D_{\text{дет}}$, $l_{\text{дет}}$, σ , тем быстрее достигается заданная точность обработки. Очевидно, наибольшее значение y_0 может быть равно величине снимаемого припуска P . Для выполнения этого условия, исходя из зависимости (1.9), необходимо, чтобы максимально возможная производительность обработки Q , обусловленная режущими свойствами шлифовального круга, была равна или соизмерима со значением Q_0 при условии $\tau = 0$.

Зависимости (1.9) и (1.10) описывают "идеальную" схему резания с точки зрения обеспечения точности и производительности обработки, т.е. схему резания, которая в будущем может стать основной при механической обработке материалов. Из приведенных данных вытекает, что, создавая в технологической системе предварительный натяг y_0 , можно реализовать условие $Q > Q_{\text{ном}}$ [146].

С учетом устойчивости процесса шлифования во времени эффективно также реализовать случай $Q = Q_{\text{ном}}$, т.е. условие

$$Q_{\text{ном}} = \frac{y_0 \cdot V_{\text{кр}} \cdot K_{\text{ш}} \cdot c}{\sigma}. \text{ Существуют два пути его осуществления:}$$

1. Ускоренное врезание шлифовального круга в обрабатываемую деталь до создания требуемого натяга y_0 в технологической системе, а затем шлифование с номинальной производительностью обработки $Q = Q_{\text{НОМ}}$ (этап чернового шлифования). Для обеспечения требуемой точности обработки, равной величине y , необходимо уменьшить начальный натяг в технологической системе от значения y_0 до значения y . Это достигается введением этапа выхаживания (шлифования с отключенной поперечной подачей, т.е. $Q_0 = 0$). В результате реализуется известный автоматизированный цикл круглого наружного шлифования (кривая 1, рис. 1.4 [70]), включающий этап ускоренного врезания шлифовального круга в обрабатываемую деталь (участок АВ), затем этап чернового шлифования (участок ВС) и этап выхаживания (участок СЕ). На рис. 1.4 показан также характер изменения упругого перемещения с течением времени обработки для неустановившегося процесса шлифования (кривая 2).

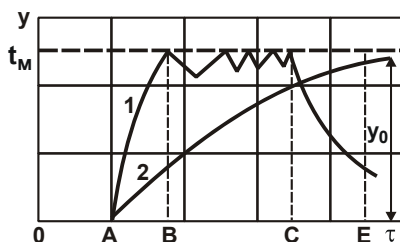


Рис. 1.4. Характер изменения упругого перемещения с течением времени обработки

Условные обозначения: 1 – автоматизированный цикл шлифования; 2 – неустановившийся процесс шлифования.

На практике рассматриваемый автоматизированный цикл круглого наружного шлифования применяется при съеме относительно небольших припусков на доводочных операциях. В действительности его возможности значительно шире и он может быть использован при съеме больших припусков, которые, например, остаются после предварительной лезвийной и окончательной абразивной обработки. Эффект этого цикла шлифования состоит в обеспечении максимально возможной производительности для заданной точности обработки, а основным его ограничением является создание начального натяга в технологической системе, равного величине снимаемого припуска, который может дости-

гать больших значений 1 ... 2 мм и более. В этих условиях на практике принято основную часть припуска удалять по жесткой схеме с заданной радиальной или продольной подачей инструмента и лишь небольшую часть припуска – по рассматриваемой схеме (с начальным радиальным перемещением y_0).

2. Шлифование по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием $P_{y_0} = c \cdot y_0 = \frac{Q_0 \cdot \sigma}{V_{кр} \cdot K_{ш}}$, которое позволяет стабилизировать во времени процесс шлифования и обеспечить заданную производительность обработки.

Таким образом, кардинальным решением проблемы повышения производительности обработки при недостаточной жесткости технологической системы является применение автоматизированных циклов шлифования по жесткой схеме с предварительным созданием натяга y_0 , а также применение упругой схемы шлифования с фиксированным радиальным усилием.

Необходимо отметить, что обработка по жесткой схеме (кривая 2 на рис. 1.3б) ведет к увеличению величины упругого перемещения (снижению точности обработки). Следовательно, применяемые на практике методы обработки лезвийными и абразивными инструментами по жесткой схеме с точки зрения обеспечения точности обработки являются малопродуктивными. Необходимо использовать схему без подачи с начальным радиальным перемещением, уменьшая припуски под обработку и ограничиваясь финишными операциями с применением абразивных и лезвийных инструментов. По сути, применяемые на практике жесткие схемы резания являются вынужденной мерой в связи с необходимостью съема относительно больших припусков.

1.2. Проблемы алмазного шлифования деталей из твердых сплавов и высокопрочных сталей

С момента промышленного освоения алмазных кругов их основным потребителем стало инструментальное производство: операции шлифования и заточки твердосплавных и быстрорежущих инструментов. Это обусловлено, во-первых, высокими требованиями к качеству обработки инструментов (исключение традиционных для абразивного шлифования дефектов в виде трещин, сколов и прижогов и обеспечение высокой чи-

стоты и точности обработки), во-вторых, большим объемом потребления твердосплавных и быстрорежущих инструментов. Длительное время применение алмазных кругов ограничивалось операциями чистового и доводочного шлифования, съемов небольших припусков, что связано с относительно высоким износом круга и низкой производительностью обработки [47; 57; 114; 115; 126; 140; 144]. С созданием алмазных кругов на прочных металлических связках, обеспечивающих снижение расхода алмаза и повышение производительности, появилась возможность перехода на полную алмазную обработку твердосплавных и быстрорежущих инструментов без предварительного шлифования кругами из обычных абразивов [21; 22; 47; 57; 121; 168]. Это позволило в ряде случаев кардинально решить проблему высококачественной обработки за счет исключения дефектов шлифования, образующихся на операциях предварительной обработки кругами из обычных абразивов, которые, как правило, трудно устранить последующей алмазной доводкой [48; 118; 121; 124; 140; 141; 143; 154; 160].

Вместе с тем, в полной мере проблема высококачественной обработки инструментов алмазными кругами на металлических связках на практике не решена. Это обусловлено, во-первых, чрезвычайно высоким уровнем производительности, достигнутым на операциях предварительного абразивного шлифования (например, на операциях круглого наружного и плоского шлифования он составляет 20 ... 40 тыс. мм³/мин, что в несколько раз выше производительности алмазного шлифования), во-вторых, низкой стойкостью алмазных кругов на металлической связке в условиях высокопроизводительного шлифования (вследствие их быстрого затупления, засаливания и потери режущей способности, в особенности при совместной обработке твердого сплава со сталью).

Для повышения производительности алмазного шлифования разработаны методы глубинного шлифования [21; 47; 103; 142]. Их эффект состоит в возможности увеличения производительности обработки без увеличения расхода алмаза. Причем, с увеличением величины снимаемого припуска, эффективность шлифования возрастает.

По данным работ [103; 143], применение метода глубинного круглого наружного алмазного шлифования твердосплавных инструментов позволяет повысить производительность обработки до уровня 20 тыс. мм³/мин и выше при экономически обоснованном расходе алмаза (рис. 1.5, рис. 1.6). Это достигается за счет увеличения глубины шлифования до значений $t \approx 0,5$ мм и выше при одновременном уменьшении

скорости детали (в пределах $V_{\text{дет}} = 0,5 \dots 5$ м/мин) и шлифовании с долевой продольной подачей, близкой к единице.

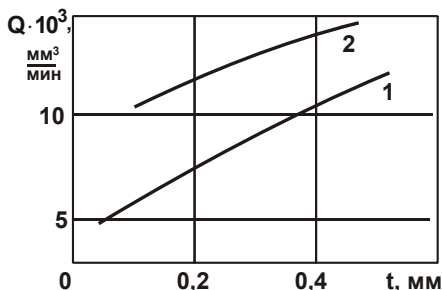


Рис. 1.5. Зависимость производительности обработки Q от глубины шлифования t при фиксированной скорости линейного износа круга h

Условия обработки: 1 – $h = 0,005$ мм/мин; 2 – $h = 0,01$ мм/мин; обрабатываемый материал – ВК8; круг – 1А1 300×25 АС6 250/200 М1–01 4; $V_{\text{кр}} = 35$ м/с; $S_{\text{д}} = 0,9$.

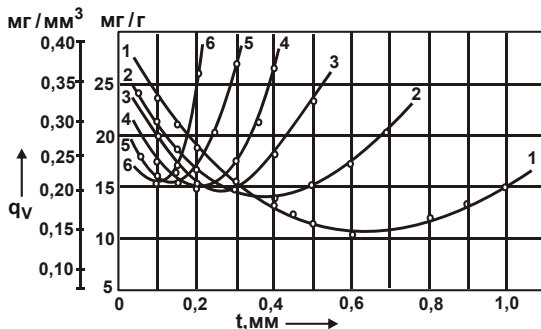


Рис. 1.6. Зависимость удельного расхода алмаза q от глубины шлифования t

Условия обработки: 1, ..., 6 – $V_{\text{дет}} = 1, \dots, 6$ м/мин; обрабатываемый материал – ВК15; круг – 1А1 300 25 АС6 250/200 М1–01 4; $V_{\text{кр}} = 35$ м/с; $S_{\text{д}} = 0,9$.

В работах Захаренко И. П. [47; 115; 137] предлагается глубинное круглое наружное алмазное шлифование твердосплавных инструментов осуществлять с такой же скоростью детали, как и при обычном многопроходном шлифовании ($V_{\text{дет}} = 30$ м/мин), но с небольшой продольной подачей ($S_{\text{прод}} = 0,05$ м/мин), табл. 1.1. По сравнению с многопроходным шлифованием это обеспечивает уменьшение в два раза удельного рас-

хода алмаза при одинаковой производительности обработки. Для осуществления глубинного шлифования рекомендуется использовать алмазные круги на металлических связках М1-01, М1-10 и т.д., которые склонны к самозатачиванию. Применение более прочных металлических связок (типа М2-01) оказалось малоэффективно в связи с быстрой потерей режущей способности круга в процессе шлифования.

Важным резервом повышения эффективности обработки твердосплавных и быстрорежущих инструментов стало использование электрохимического и электроэрозионного шлифования, сочетающих механическое резание алмазными зернами, электрохимическое растворения материала и электроэрозионное разрушение продуктов обработки и металлической связки алмазного круга [9; 10; 16; 22; 25; 47; 77; 168]. Такое сочетание физических процессов обеспечивает повышение производительности и качества обработки, снижение сил и температуры резания, устраняет засаливание алмазного круга и повышает его режущую способность.

Таблица 1.1

Зависимость относительного расхода алмаза от способа шлифования

(Условия обработки: круг 1А1 300×16×203 АС4 125/100 МО4 4, диаметр заготовки – 100 мм)

Способ шлифования	$V_{кр}$, м/с	$V_{дет}$, м/мин	$S_{прод}$, м/мин	t , мм	Расчетная производительность Q , мм ³ /мин	Относительный расход алмаза q , мг/г
Многопроходное (дв. ход)	35	22	1,0	0,02	3 140	26,44
Глубинное (ход)	35	22	0,033	0,4	4 145	13,15

Метод электрохимического шлифования осуществляется на специальных или переоборудованных шлифовальных станках, укомплектованных источником технологического тока. Для его реализации к алмазному кругу (катоде) подключается отрицательный полюс источника тока, а к обрабатываемой детали (аноду) – положительный полюс (рис. 1.7). В зону контакта круга с деталью подается электролит, который замыкает электрическую цепь и обеспечивает протекание процесса электрохимического растворения и электроэрозии. В качестве электролита следует

применять водные растворы азотнокислого натрия и калия, так как они достаточно электропроводны, обеспечивают сравнительно интенсивное электролитическое растворение металла и не обладают агрессивными свойствами, как например, кислота или некоторые соли. В работе [17] показано, что при электрохимическом шлифовании с напряжением 14 В температура электролита иногда достигает 80 °С. В этих условиях электролит может закипать, что резко снижает интенсивность электрохимического растворения и повышает расход алмазов.

Наиболее широкое применение метод электрохимического шлифования получил на операциях заточки, круглого и плоского многопроходного шлифования инструментов [3; 22; 68; 121; 168]. В работе [57] показано, что при электрохимическом шлифовании используются: небольшое напряжение 6 ... 8 В и относительно высокая плотность тока 60 ... 100 А/см², которые позволяют интенсифицировать механический режим шлифования.

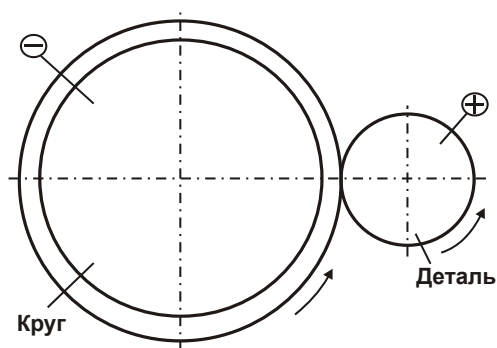


Рис. 1.7. Принципиальная схема алмазного электрохимического шлифования

Однако, вследствие недостаточно интенсивного электрохимического воздействия на рабочую поверхность круга в процессе шлифования полное восстановление его режущей способности, не происходит. Поэтому эффективно использовать лишь алмазные круги на металлических связках, которые склонны к самозатачиванию. Например, алмазный круг на связке М2-01 (как и при обычном шлифовании) быстро теряет режущую способность, и использовать его не эффективно, в особенности при повышенных глубинах шлифования (т.е. в условиях глубинного шлифования).

Как показывает практика, повысить режущую способность алмазных кругов на металлических связках можно за счет применения автономной непрерывной электрохимической правки [24; 114; 142]. Здесь положительным электродом (анодом) является алмазный круг, а отрицательным электродом – специальный катод, выполненный в виде изогнутой пластинки из меди, прилегающей к кругу по дуге. В зазор между алмазным кругом и электродом через щель в электроде, перекрывающую всю высоту круга (т.е. через внутреннюю полость), подается электролит. Величина зазора устанавливается посредством микрометрического винта, расположенного перпендикулярно оси круга. Это позволяет регулировать технологический ток в цепи и соответственно интенсивность электрохимической правки.

В качестве электролита может быть использован водный раствор, содержащий: нитрат натрия NaNO_3 – 5 %; нитрат натрия NaNO_2 – 0,5 %; углекислый натрий Na_2CO_3 – 2 %, а в качестве источника тока – однофазный или трехфазный выпрямитель с выходными напряжениями до 20 В и силой тока до 50 А.

Метод автономной непрерывной электрохимической правки алмазного круга на металлической связке получил применение при заточке инструментов, в особенности инструментов из синтетических поликристаллических материалов [24; 23; 138; 157]. На его основе разработан прогрессивный процесс продольного круглого наружного алмазного шлифования быстрорежущих и твердосплавных многолезвийных инструментов (фрез, разверток, зенкеров и т.д.), характеризующийся высоким качеством обработки и съемом припуска до 1,2 мм на сторону за один проход [125].

В отличие от существующих процессов глубинного шлифования, где продольная подача на оборот детали V_1 не превышает 0,1 ширины круга B , а скорость вращения детали $V_{\text{дет}}$ составляет 20 ... 30 м/мин, шлифование по предлагаемой схеме осуществляется с $B_1 = 0,9 \cdot B$ и $V_{\text{дет}} = 1,5$ м/мин, что позволяет при экономически приемлемых затратах на расход алмазного материала в 1,5 ... 2 раза повысить производительность обработки Q .

Эффективность применения такого метода шлифования стала возможной благодаря специально разработанным принципам назначения параметров режима резания, согласно которым для любого рельефа круга независимо от зернистости и концентрации существует допу-

стимая (прочностная) толщина среза максимально выступающим зерном, при достижении которой удельный расход алмаза принимает минимальное значение, и поэтому поиск оптимальных режимов шлифования следует производить из условия обеспечения полного съема металла на уровне допустимой (прочностной) толщины среза.

Выполненные аналитические исследования показали, что между основными параметрами шлифования существует однозначная связь и для определения оптимального режима шлифования достаточно знать допустимую (прочностную) толщину среза $H_{\max}$, которая устанавливается расчетно-экспериментальным путем (рис. 1.8):

$$V_{\text{дет}} = \frac{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{кр}} \cdot H_{\max}^3}{9 \cdot b \cdot \sqrt{2} \cdot t \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{\text{дет}}} + \frac{1}{R_{\text{кр}}}}}, \quad (1.11)$$

где 2γ – угол при вершине зерна;

k – поверхностная концентрация зерна, шт./м²;

b – максимальная высота выступания зерен над связкой, м;

$R_{\text{дет}}, R_{\text{кр}}$ – радиусы детали и круга, м;

t – глубина шлифования, м.

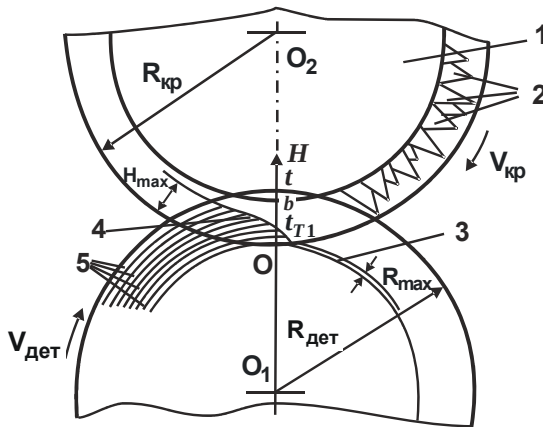


Рис. 1.8. Расчетная схема параметров круглого наружного шлифования

Условные обозначения: 1 – круг; 2 – режущие зерна круга; 3 – слой остаточной шероховатости обработанной поверхности; 4 – линия полного съема материала; 5 – элементарные цилиндрические оболочки припуска.

Для сравнения предложенной схемы и применяемой на практике схемы глубинного шлифования получена аналитическая зависимость для определения $H_{\max}$:

$$H_{\max} = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{кр}}}} \cdot \sqrt[6]{\frac{2 \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{дет}}} + \frac{1}{R_{\text{кр}}} \right) \cdot V_{\text{дет}} \cdot Q}{B}}, \quad (1.12)$$

которая подтверждает эффективность уменьшения скорости детали $V_{\text{дет}}$ с точки зрения увеличения производительности обработки Q и, следовательно, преимущество схемы шлифования с продольной подачей B_1 , приблизительно равной ширине круга B , в условиях повышенных глубин шлифования.

Максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности (параметр шероховатости поверхности) $R_{\max}$ определяется:

$$R_{\max} = H_{\max} \sqrt[5]{\frac{H_{\max}}{4t} \cdot \frac{B}{B_1}} = \sqrt[5]{\frac{18 \cdot 10^4 \cdot \pi \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{\text{дет}}^2 \cdot B \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{дет}}} + \frac{1}{R_{\text{кр}}} \right)}{\operatorname{tg}^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot B_1}}, \quad (1.13)$$

где $\bar{X}$ – зернистость круга, мкм;

m – объемная концентрация алмазного круга (100; 50; 25; и т.д.).

Достоверность аналитической зависимости (1.13) оценивалась экспериментально на основе параметра шероховатости поверхности $R_a \approx 0,2 \cdot R_{\max}$. В табл. 1.2 приведены экспериментальные и рассчитанные по зависимости (1.13) значения R_a , которые показывают достаточную степень сходимости полученных результатов. Исходные данные: алмазный круг – 1А1 300×25×5 АС6 250/200 М1-01 4; обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8; $R_{\text{дет}} = 100$ мм; $\bar{X} = 200$ мкм; $m = 100$; $\operatorname{tg} \gamma = 1$; $V_{\text{кр}} = 30$ м/с; $B_1 = 20$ мм/об.; $t = 0,1$ мм/ход.

Как видно, с уменьшением скорости вращения детали $V_{\text{дет}}$ (в условиях глубинного шлифования) параметр шероховатости поверхности R_a уменьшается, что позволяет обеспечить высокое качество обра-

ботки при одновременном увеличении производительности алмазного шлифования более чем в 2 раза и уменьшении износа алмазного круга.

Таблица 1.2

**Расчетные и экспериментальные значения параметра
шероховатости поверхности R_a**

$V_{\text{дет}}, \text{ м/мин}$	1	3	4	6
$R_a^{\text{экс}}, \text{ мкм}$	1,1	1,65	2,05	2,17
$R_a^{\text{рас}}, \text{ мкм}$	1,36	2,11	2,36	2,78

Удельная режимная производительность обработки различных типоразмеров твердосплавных многолезвийных инструментов в условиях предлагаемого процесса алмазного шлифования (с непрерывной автономной электрохимической правкой алмазного круга на металлической связке) составляет 800 ... 1 000 мм³/мин·мм, а инструментов из быстрорежущей стали – 700 и более мм³/мин·мм при экономически приемлемом износе алмазных кругов, что позволяет полностью исключить применение традиционных абразивных материалов на операциях круглого обдирочного шлифования. Шероховатость обработанной поверхности не превышает R_a – 0,5 ... 1,5 мкм. Отсутствие на обработанных поверхностях прижогов и микротрещин в этом случае приводит к ликвидации брака в производстве и к минимальному объему последующих финишных операций. Экспериментально установлено, что процесс шлифования протекает в виброустойчивом режиме, припуск снимается за один проход круга, а электрохимической правкой удаляются продукты засаливания алмазного круга, и постоянно поддерживается его высокая режущая способность.

С использованием метода автономной непрерывной электрохимической правки алмазного круга на металлической связке разработан и внедрен в производство эффективный процесс алмазного глубинного круглого наружного шлифования режущих плашек из закаленной стали ХВСГ на станке-автомате, изготовленном на базе станка модели ЗБ12, т.е. в автоматическом цикле. Процесс обеспечивает съем припуска до 0,2 мм на сторону за один продольный ход круга, что увеличивает про-

изводительность обработки до 12 тыс. мм³/мин, т.е. в 6 раз [143]. Размерная стойкость круга из кубонита 1А1 300×25×5 КР 200/160 4 МО-16 гарантирует высококачественную обработку 2 000 плашек типоразмеров М5 – М12 без подналадки или 150 000 плашек одним кругом. В процессе шлифования поддерживается "острый" режущий рельеф круга, устраняется засаливание стружками рабочей поверхности круга и обеспечивается его высокая режущая способность. Шлифование осуществляется с режимами резания: $t = 0,1 \dots 0,3$ мм; $V_{\text{дет}} = 30$ м/мин; $V_{\text{кр}} = 30 \dots 35$ м/с; долевая продольная подача – $0,2 \dots 0,5$.

Наряду с положительными сторонами, электрохимическая правка обладает существенными недостатками, связанными с ухудшением экологии производства [91]. В процессе обработки образуется туман из электролита, что оказывает вредное воздействие на организм рабочего, а также приводит к коррозии и преждевременному выходу из строя шлифовального оборудования. Это требует создания дополнительных вытяжных устройств и других средств защиты рабочего места.

Поэтому для обработки инструментальных и конструкционных материалов широко используется метод электроэрозионного шлифования, сущность которого состоит в том, что обработку ведут в среде диэлектрика, а между алмазным кругом и обрабатываемой деталью возбуждают импульсные электрические разряды (рис. 1.9) [8; 9; 10].

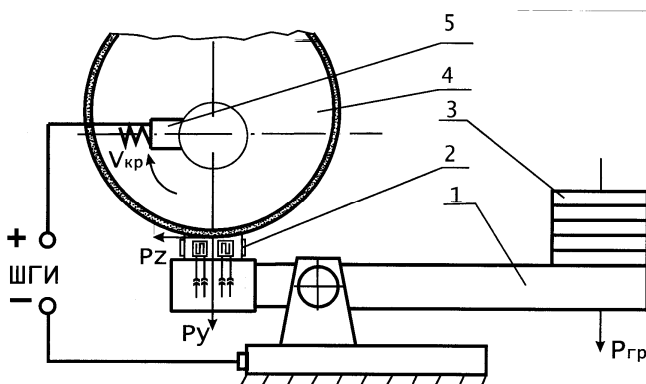


Рис. 1.9 . Схема алмазного электроэрозионного шлифования и экспериментальная установка для определения силы резания при обработке по упругой схеме

Условные обозначения: 1 – балка; 2 – тензометрические датчики; 3 – груз; 4 – алмазный круг; 5 – токоподводное устройство.

Это позволяет постоянно поддерживать высокую режущую способность круга. В качестве рабочей среды могут быть использованы простые по составу безвредные технологические жидкости (например, обычные применяемые при шлифовании эмульсии), рекомендуется 2 ... 3 процентный водный раствор каустической соды. Источниками питания служат высокочастотные генераторы импульсов (типа ШГИ), специальные генераторы ИТТ, в некоторых случаях выпрямители (типа ВАКР).

Производительность электроэрозионного алмазного шлифования составляет 800 ... 5 000 мм³/мин на операциях круглого наружного шлифования, 300...1 100 мм³/мин на операциях внутреннего шлифования, 500 ... 1 600 мм³/мин на операциях плоского шлифования. По сравнению с обычным шлифованием производительность возрастает в 1,5 ... 5 раз при одинаковом удельном расходе алмаза, а продолжительность работы инструмента (без правки) увеличивается в десятки раз.

По имеющимся данным, процесс электроэрозионного шлифования эффективно протекает при использовании алмазных кругов на малопрочных (склонных к самозатачиванию) металлических связках, что не решает, например, в полной мере проблемы высокопроизводительного шлифования алмазными кругами на более прочной связке М2-01, поскольку круг работает в режиме затупления (энергии электрических разрядов недостаточно для его эффективной правки). Из этого можно заключить, что решение проблемы повышения производительности шлифования за счет применения алмазных кругов на прочных металлических связках (типа М2-01) является актуальной, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Одним из перспективных путей ее решения следует рассматривать использование крупногабаритных кругов, характеризующихся увеличенными значениями диаметра, ширины и, соответственно, площади режущей поверхности, что позволяет уменьшить интенсивность затупления и засаливания круга, повысить его стойкость. В сочетании с непрерывным электроэрозионным воздействием на круг это обеспечивает поддержание развитого режущего рельефа круга и существенное увеличение производительности обработки.

Необходимо отметить, что указанный выше высокий уровень производительности предварительного абразивного шлифования твердосплавных инструментов (20 ... 40 тыс. мм³/мин) достигнут с применением крупногабаритных абразивных кругов (диаметром 600 мм и более). Естественно, добиться такой высокой производительности на операциях

алмазного шлифования можно лишь с использованием аналогичных крупногабаритных алмазных кругов, так как применяемые на практике алмазные круги прямого профиля диаметром 300 мм и менее оказались не конкурентоспособными. Отсутствие опыта эксплуатации крупногабаритных алмазных кругов на прочных металлических связках при шлифовании твердосплавных и быстрорежущих инструментов, а также других деталей из твердых сплавов и высокопрочных сталей требует проведения комплекса исследований по определению технологических возможностей крупногабаритных алмазных кругов, условий подготовки их к работе и эффективной эксплуатации.

Существенным ограничением повышения производительности шлифования следует рассматривать в ряде случаев низкую жесткость технологической системы в связи с невозможностью жесткого крепления деталей на станке. Установлено, например, что вследствие низкой жесткости технологической системы при шлифовании твердосплавных и быстрорежущих инструментов, матриц, вставок и других деталей производительность и точность обработки снижаются в несколько раз, а удельный расход алмаза существенно возрастает. Это указывает на необходимость разработки высокопроизводительных процессов шлифования на основе управления упругими перемещениями в технологической системе (с учетом ограничений по силовой напряженности шлифования) путем применения эффективных автоматизированных циклов шлифования. Необходимость данных решений обусловлена тем, что рекомендуемые оптимальные условия алмазного шлифования получены в основном для установившегося процесса и не отражают специфику переходного периода, который соизмерим с длительностью обработки конкретной детали на станке.

1.3. Методы восстановления режущей способности алмазных кругов на металлических связках

Особое место в расширении области эффективного применения алмазного шлифования занимают методы восстановления режущей способности алмазных кругов. Поскольку в настоящее время разработана достаточно большая номенклатура связок алмазного круга, которые значительно отличаются между собой по прочности и другим физико-механическим и химическим характеристикам, то и мера воздействия на них должна быть различной. Основной задачей правки алмазного круга

является удаление слоя связки на определенную глубину и вскрытие новых режущих зерен.

Наиболее простым, нашедшим повсеместное применение, является механический метод правки абразивными брусками. Он позволяет обнажить новые слои режущих зерен в алмазных кругах на относительно мягких органических и керамических связках. Применение этого метода для правки алмазных кругов на металлических связках является малоэффективным, так как приводит к большому расходу алмазов и не позволяет обеспечить высокую режущую способность круга.

Эффективным методом правки алмазного круга, как показано в п. 1.2, следует рассматривать электрохимический метод правки, основанный на технологическом использовании основных законов электрохимии, устанавливающих возможность перевода металла в ионное состояние, т.е. разрушение металла путем воздействия на него электрическим током в среде электролита.

При правке алмазный круг соединяется с положительным, а правящий электрод с отрицательным полюсами низковольтного источника технологического тока. После подачи электролита в зону правки в результате электролиза металлическая связка алмазосодержащего слоя круга подвергается растворению, что приводит к вскрытию новых режущих зерен. Чем меньше потери технологического тока, тем выше производительность съема металла связки. Однако, на практике добиться этого сложно, так как часть энергии расходуется на образование на аноде соединений растворяемого металла, обладающих повышенным электрическим сопротивлением (пассивация анода), электролиз воды, нагрев электролита и т.д. В зависимости от плотности тока интенсивность съема алмазосодержащего слоя круга достигает 1 000 мм³/мин и более [22; 52; 68; 121; 168]. Электрохимическую правку алмазного круга можно производить как непосредственно в зоне шлифования, так и автономно вне зоны обработки.

Наряду с положительными сторонами, электрохимическая правка имеет ряд недостатков. В первую очередь это связано с вредностью работы при осуществлении правки. Как отмечалось в п. 1.2, в процессе правки образуется туман из электролита, который содержит вредные для организма человека составляющие и который необходимо удалять вытяжными устройствами. Электролит отрицательно воздействует на оборудование: приводит к коррозии станка и преждевременному выходу его из строя.

Применение метода алмазного электроэрозионного шлифования (алмазно-искрового шлифования, рис. 1.10а) [7; 8; 9; 10; 53; 55; 58; 116; 118; 153], автономной электроэрозионной правки алмазного круга (рис. 1.10бв) и алмазного электроэрозионного шлифования с непрерывной автономной электроэрозионной правкой алмазного круга (рис. 1.10г, д) позволяет добиться более значительного технологического и экологического эффектов, что объясняется специфическими особенностями электроэрозионного воздействия на алмазный круг и обрабатываемую деталь [117]. Наличие зазора между взаимодействующими поверхностями позволяет осуществлять бесконтактное формирование режущей поверхности круга с минимальным усилием и износом правящего электрода; избирательность и дискретность процесса обеспечивает необходимую точность обработки и качество режущей поверхности; термический характер коррозии не ставит данный метод правки в зависимость от физико-механических свойств алмазосодержащего слоя круга [9; 27; 58; 77; 79; 86; 116; 118; 135; 159; 161; 166; 167].

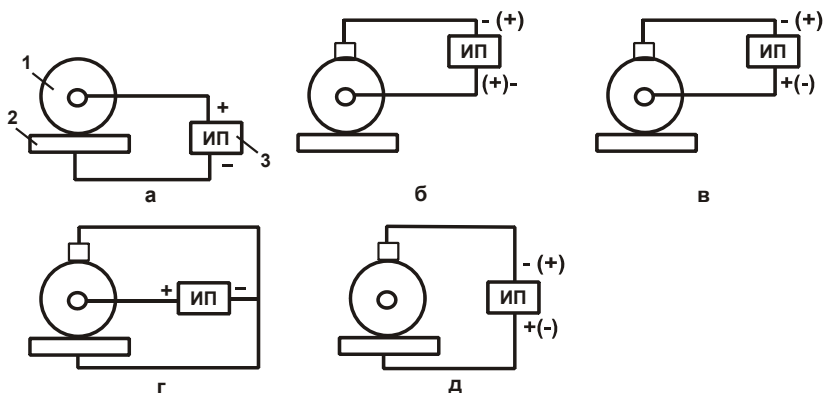


Рис. 1.10. Электрические схемы подключения источника питания к зоне электроэрозионного воздействия на алмазный круг [117]

Условное обозначение: 1 – алмазный круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – источник питания технологического тока.

Для нормального осуществления метода электроэрозионной правки алмазного круга необходимо положительный заряд от источника технологического тока подать через токопроводящее устройство на алмазный круг (анод), а отрицательный заряд – на правящий электрод (катод).

В настоящее время промышленность изготавливает большое количество различных источников технологического тока, которые могут успешно использоваться для электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке. К ним следует отнести высокочастотные генераторы импульсов тока типа ШГИ и источники постоянного тока.

Сущность электроэрозионной правки алмазного круга при использовании высокочастотного генератора электрических импульсов представляется следующим образом. При сближении правящего электрода с алмазосодержащим слоем круга и подачей в зазор СОТС (используется техническая вода с антикоррозионной добавкой, 1,5 – 3 процентный содовый раствор) по кратчайшим расстояниям между токопроводящими участками металлической связки круга и электрода при наличии потенциала происходят разряды (рис. 1.11). Термическое воздействие импульсного разряда приводит к эрозии участков связки и образованию лунок. Продукты эрозии связки в виде застывших частиц вымываются из зоны обработки межэлектродной среды. В результате суммарного эрозионного воздействия электрических разрядов удаляется определенное количество связки, что приводит к обнажению зерен и восстановлению режущей способности алмазного круга на металлической связке [85].

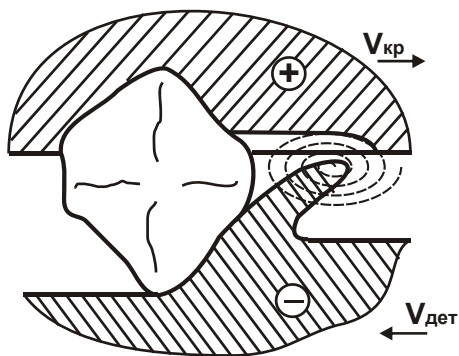


Рис. 1.11. Схема электроэрозионного действия на металлическую связку алмазного круга

В процессе шлифования на режущей поверхности алмазного круга скапливается много продуктов обработки в виде образующихся микростружек. При прохождении разрядного тока через межэлектродный промежуток часть энергии расходуется на эрозионные процессы, происходящие на стружках. В итоге образующиеся стружки частично испаряют-

ся, частично оплавляются и с охлаждающей жидкостью удаляются с поверхности круга. Непрерывное электроэрозионное воздействие на алмазный круг в процессе шлифования обеспечивает его высокую режущую способность на протяжении всего технологического процесса обработки (рис. 1.12).

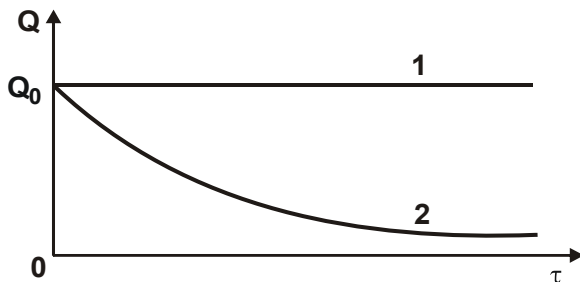


Рис. 1.12. Зависимость производительности обработки Q от времени обработки τ

Условные обозначения: 1 – алмазное электроэрозионное шлифование; 2 – алмазное шлифование.

Необходимо отметить важность применения высокочастотных генераторов импульсов для осуществления процесса электроэрозионной правки. В генераторах такого типа амплитуда, длительность, частота и форма импульсов при работе фактически не зависят от физического состояния эрозионного промежутка. Это позволяет в широком диапазоне варьировать электрические режимы правки, значительно повысить производительность правки, управлять точностью и качеством режущей поверхности круга. Основными электрическими параметрами процесса правки являются частота следования импульсов и их скважность.

Часто в качестве источника технологического тока используют источник постоянного тока. Существуют некоторые особенности при работе с этим источником. При соприкосновении правящего электрода с алмазным кругом режущие зерна срезают с поверхности электрода элементарные стружки, которые при определенных условиях переключают межэлектродный зазор. Под влиянием высокой температуры, развивающейся при прохождении через ограниченную площадку контакта стружки со связкой, замыкающий ее конец расплавляется, что приводит к возникновению электрического разряда, оставляющего эрозионный след в связке.

Алмазные зерна ограничивают возможность непосредственного контакта связки с электродом. При правке алмазного круга в результате его вращения достигается прерывание электрических разрядов. С увеличением скорости вращения круга увеличивается количество элементарных стружек, снимаемых зернами в единицу времени, а, следовательно, увеличивается количество возникающих разрядов и уменьшается длительность их действия. Однако конкурировать по частоте следования импульсов с высокочастотным генератором весьма сложно. Вместе с тем, электроэрозионный способ правки от постоянного источника тока все же нашел применение при шлифовании различных труднообрабатываемых материалов.

Наряду с методом периодической электроэрозионной правки алмазного круга, как показано в п. 1.2, на практике получил применение метод алмазного электроэрозионного шлифования (метод алмазно-искрового шлифования [10; 53; 55; 58; 116; 118; 153]). В этом случае электрическая энергия в форме электрических разрядов непрерывно подводится в зону шлифования, что позволяет непрерывно во времени восстанавливать режущую способность алмазного круга. Применение метода алмазного электроэрозионного шлифования целесообразно при интенсивном затуплении и засаливании рабочей поверхности алмазного круга, например при обработке сталей, высокопрочных покрытий и наплавов, когда имеет место интенсивное засаливание рабочей поверхности круга образующимися стружками. Применение метода алмазного электроэрозионного шлифования в условиях обработки хрупких материалов, например твердых сплавов, может оказаться экономически необоснованным в связи с повышенным относительным расходом алмаза. В этом случае для уменьшения относительного расхода алмаза целесообразно использовать периодическую электроэрозионную правку алмазного круга [10; 11; 71; 85; 118; 167]. Однако при этом может иметь место ухудшение качества обработки в связи с недостаточно высокой режущей способностью алмазного круга. Поэтому актуальна задача определения условий эффективного использования алмазного электроэрозионного шлифования и периодической электроэрозионной правки алмазного круга.

Для решения этой задачи проведен комплекс экспериментальных исследований алмазного электроэрозионного шлифования твердосплавных инструментов (фрез, разверток, зенкеров и других) на круглошлифовальном станке после его модернизации: электроизоляции

шпинделя круга и подключения источника технологического тока. Обработка производилась алмазным кругом на металлической связке 1А1 300×25×5 АС6 125/100 4 М1-01. В качестве источника технологического тока использовался специальный генератор импульсов повышенной мощности (до 4 кВт), а в качестве рабочей среды использованы простые по составу безвредные технологические жидкости (1 – 3 процентный раствор соды). Первоначально в течение 20 минут производено вскрытие алмазносного слоя алмазного круга и устранено его биеение. При этом положительный полюс источника технологического тока подключался к щетке на круге, а отрицательный полюс – к корпусу задней бабки шлифовального станка.

Установлено, что шлифование вновь заправленным алмазным кругом с отключенным источником технологического тока обеспечивает высокопроизводительный съём припуска и шероховатость обработанной поверхности на уровне 7 – 8 классов чистоты. Через 30 – 40 минут работы круга необходимо производить его электроэрозионную правку (т.е. подводить электрическую энергию в зону резания) в течение 1 – 5 минут с разрядным током 20 – 40 А. Для обеспечения 9 класса чистоты необходимо после электроэрозионной правки произвести притупление алмазных зерен круга алмазным карандашом типа "Славутич" или алмазным резцом (рис. 1.13) [29; 91; 94]. Этим обеспечивается эффективность применения алмазных кругов на металлических связках на операциях как предварительного, так и окончательного шлифования.

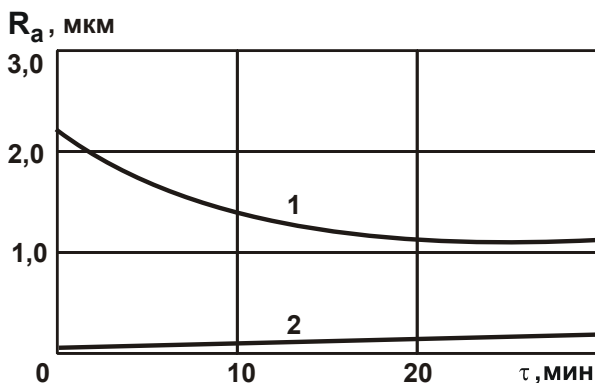


Рис. 1.13. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности R_a от времени обработки τ

Условные обозначения: 1 – после электроэрозионной правки алмазного круга; 2 – после притупления алмазных зерен круга.

Установлено, что после шлифования (с отключенным источником технологического тока) на обрабатываемой поверхности отсутствуют следы прижогов и микротрещин, однако имеют место отдельные микросколы режущей кромки твердосплавной пластины инструмента, что, несомненно, снижает качество обработки. Основным путем их устранения является повышение режущей способности алмазного круга за счет осуществления более частой его электроэрозионной правки.

Необходимо отметить, что при шлифовании с непрерывно включенным источником технологического тока и обеспечении высокой режущей способности алмазного круга, микросколы на режущей кромке твердосплавной пластины инструмента фактически отсутствуют. Однако данный вариант обработки приводит к повышенному износу алмазного круга.

Такая же закономерность наблюдалась и на операции заточки твердосплавного инструмента алмазным кругом на металлической связке 12A2 45° 150×10×3×32 AC6 125/100 4 M1-01. При постоянно включенном источнике технологического тока микросколы на режущей кромке твердосплавной пластины инструмента фактически отсутствуют, а при периодическом включении источника технологического тока в процессе шлифования – появляются вследствие затупления алмазного круга. Более частая правка круга фактически исключает появление микросколов.

Поэтому при предварительном шлифовании электроэрозионную правку алмазного круга целесообразно производить через 30 – 40 минут его работы, а при окончательном шлифовании – чаще.

Очевидно, на операциях окончательного шлифования целесообразно использовать алмазные круги на более мягких связках (органических и керамических), которые работают в режиме самозатачивания, не требуют правки и обеспечивают более высокие показатели качества обработки, чем алмазные круги на металлических связках [46; 47; 48; 130; 132; 134]. Следовательно, алмазные круги на металлических связках эффективно использовать лишь на операциях предварительного шлифования в режиме периодической электроэрозионной правки. Таким образом, на основе проведенных экспериментальных исследований обоснованы рациональные условия использования алмазных кругов на металлических связках, работающих в режиме периодической электроэрозионной правки.

Для практической реализации предварительного круглого наружного продольного шлифования алмазными кругами на металлических

связках целесообразно использовать схему многопроходного шлифования, осуществляемую со скоростью вращения круга 25 – 30 м/с; скоростью вращения детали 20 – 60 м/мин; скоростью продольной подачи 10 – 20 мм/об. при высоте круга 25 мм; скоростью поперечной подачи 0,1 мм/ход. При круглом врезном шлифовании скорость поперечной подачи необходимо устанавливать до 6 мм/мин.

Для практической реализации круглого наружного глубинного шлифования скорость вращения детали необходимо устанавливать в пределах 0,5 – 5 м/мин; скорость продольной подачи 0,02 – 0,2 м/мин; глубину шлифования – до 1 мм на проход. При этом скорость вращения детали необходимо уменьшать за счет применения на станке редуктора. Экспериментально установлено, что использование глубинного шлифования позволяет увеличить производительность обработки до 5 раз при одновременном уменьшении износа круга и улучшении качества обработанной поверхности (главным образом уменьшения шероховатости поверхности).

При электроэрозионном шлифовании целесообразно использовать алмазные круги диаметром 300 – 400 мм и высотой 20 – 40 мм зернистостью 100/80 и ниже (с целью уменьшения шероховатости поверхности), концентрацией зерен 50 – 100 % на медно-алюминиевой (металлической) связке М1-01. Применение алмазных кругов на медно-оловянистых связках М2-01 при обработке твердых сплавов, высокопрочных наплавов и сталей возможно лишь в условиях непрерывного интенсивного электроэрозионного воздействия на них (т.е. в условиях электроэрозионного шлифования), поскольку эти круги быстро засаливаются и теряют режущую способность.

1.4. Теоретическое обоснование условий эффективного применения электроэрозионной правки алмазных кругов

Для эффективного применения электроэрозионной правки алмазных кругов требуется определение в каждом конкретном случае оптимальных условий обработки, т.е. проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований для выявления новых технологических возможностей обработки.

В общем случае глубина внедрения режущего зерна в обрабатываемый материал H определяется твердостью (по Виккерсу) обрабаты-

ваемого материала HV и радиальным усилием P_{y1} , действующим на режущее зерно, которое представлено в виде конуса с углом 2γ при его вершине:

$$H = \sqrt{\frac{P_{y1}}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot HV}}. \quad (1.14)$$

Как следует из зависимости (1.14), чем больше твердость обрабатываемого материала HV и меньше сила P_{y1} , тем меньше глубина внедрения зерна H. Следовательно, при шлифовании труднообрабатываемых материалов глубина H будет небольшой. Коэффициент $(1-\varepsilon) = H/\bar{X}$, определяющий степень выступания зерна над уровнем связки алмазного круга и изменяющийся в пределах 0 ... 1, при условии $b = H$ также будет небольшим (где b – максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки круга, м; $\bar{X}$ – зернистость круга, м). Однако из этого не следует уменьшение производительности обработки Q, определяемой зависимостью [158]:

$$Q = \frac{S \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{\text{кр}} \cdot (1-\varepsilon)^3 \cdot (1-\eta^2)}{600 \cdot \pi}, \quad (1.15)$$

где S – площадь поперечного сечения обрабатываемой прямолинейной детали (пластины), движущейся с постоянной скоростью $V'_{\text{дет}}$ по нормали к рабочей поверхности алмазного круга, м² (рис. 1.14);

$\eta = x/H$ – безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления зерен, изменяется в пределах 0 ... 1 ($\eta \rightarrow 0$ – для острого зерна, $\eta \rightarrow 1$ – для затупленного зерна);

x – величина линейного износа максимально выступающего над уровнем связки круга алмазного зерна, м;

H – условная максимальная глубина внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга, отсчитываемая от уровня максимально выступающего (неизношенного) зерна, м.

Это связано с тем, что одновременно с уменьшением максимальной высоты выступания вершин зерен над уровнем связки круга $b = H$ уменьшается безразмерный коэффициент

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot V'_{\text{дет}}}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{кр}} \cdot b^2}}, \quad (1.16)$$

а это позволяет компенсировать снижение производительности обработки Q с учетом уменьшения безразмерного коэффициента $(1 - \varepsilon)$, где $V'_{\text{дет}}$ – скорость движения обрабатываемого образца по нормали к рабочей поверхности круга, м/с; k – поверхностная концентрация зерен круга, шт./м².

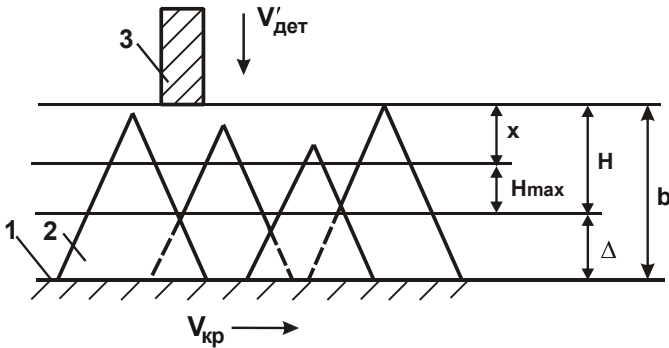


Рис. 1.14. Расчетная схема параметров процесса шлифования

Условные обозначения: 1 – уровень связки; 2 – режущее зерно; 3 – обрабатываемый образец.

Таким образом установлено, что основным условием повышения производительности обработки Q при шлифовании материалов высокой твердости является поддержание на алмазном круге "острого" режущего рельефа ($\eta \rightarrow 0$). Это достигается работой алмазного круга в режиме самозатачивания путем применения относительно малопрочных органических или керамических связок, или работой алмазного круга на прочных металлических связках в режиме его непрерывной электроэрозионной правки.

Известно, что с увеличением зернистости алмазного круга прочность зерна на раздавливание (определяемой разрушающей нагрузкой, равной P_1) увеличивается по зависимости $P_1 = \alpha \cdot A^\beta$, где α и $\beta < 1$ – постоянные. Тогда коэффициент $(1 - \varepsilon) = H / \bar{X}$ с учетом зависимости (1.14) определится:

$$(1-\varepsilon) = \frac{1}{\bar{X}^{(1-0,5\beta)}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot HV}}. \quad (1.17)$$

Как видно, коэффициент $(1-\varepsilon)$ тем больше, чем меньше зернистость круга $\bar{X}$ и больше параметр α , который определяет относительную прочность зерен различных марок алмазов. Следовательно, добиться повышения производительности обработки Q , согласно зависимости (1.15), при обработке материалов высокой твердости можно за счет применения мелкозернистых алмазных кругов с повышенной прочностью алмазных зерен. С учетом того, что параметры $\bar{X}$ и HV входят в зависимость (1.17) примерно с одинаковой степенью (равной 0,5), зернистость алмазного круга следует выбирать обратно пропорциональной твердости обрабатываемого материала.

Уменьшение зернистости круга $\bar{X}$, согласно зависимости (1.17), приводит к увеличению коэффициента $(1-\varepsilon)$, т.е. повышению степени выступания зерна над уровнем связки круга и уменьшению части зерна, расположенной в связке круга. Поэтому прочность удержания зерна уменьшится и для ее увеличения необходимо использовать более прочные металлические связки алмазного круга.

Стойкость алмазных кругов определяется диапазоном изменения безразмерного коэффициента $\eta = 0 \dots \eta_1 < 1$. Чем больше значения η_1 , тем выше стойкость круга. Увеличение значения η_1 требует увеличения параметра H , согласно зависимости

$$H = 3 \sqrt[3]{\frac{9b \cdot V'_{\text{дет}}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{кр}} \cdot (1-\eta^2)}}, \quad (1.18)$$

и коэффициента $(1-\varepsilon)$, согласно зависимости (1.17). Следовательно, увеличить стойкость алмазного круга можно за счет увеличения высоты выступания зерен над уровнем связки, применения более прочных металлических связок и методов вскрытия алмазного слоя круга, например, электроэрозионной правки.

В общем случае для более правильного представления о технологических возможностях алмазного шлифования в расчетной схеме, приведенной на рис. 1.14, параметр b следует рассматривать в виде суммы двух слагаемых: $b = H + \Delta$, где Δ – высота межзеренного пространства

круга, занимаемая стружками и другими продуктами обработки, определяется зависимостью: $\Delta = \xi \cdot \Delta_0$; ξ – коэффициент, учитывающий степень заполнения стружкой межзеренного пространства круга ($\xi > 1$); Δ_0 – толщина условного слоя "расплавленного" обрабатываемого материала, который образуется за одно вращение круга, м.

Для круглого продольного шлифования справедливы соотношения:

$$\Delta_0 = \frac{S_{\text{мгн}}}{B} = \frac{Q}{V_{\text{кр}} \cdot B} = \frac{B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t}{V_{\text{кр}} \cdot B} = \frac{V_{\text{дет}} \cdot t}{V_{\text{кр}}}, \quad (1.19)$$

где $S_{\text{мгн}} = Q/V_{\text{кр}}$ – мгновенная суммарная площадь среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²;

B – ширина круга, м.

Очевидно, чем меньше параметр Δ , тем больше производительность обработки Q при шлифовании. Следовательно, в идеале необходимо стремиться к выполнению двух условий: $\xi \rightarrow 1$; $b \approx H$.

По данным проведенных теоретических исследований для обычного алмазного шлифования твердосплавных деталей коэффициент ξ изменяется от 100 до 1 000 и более. Поэтому его уменьшение, например в 10 раз, позволит во столько же раз повысить производительность обработки. При алмазном шлифовании различных сталей, титановых сплавов и других пластичных материалов, коэффициент ξ еще больше, и эффект обработки от уменьшения ξ для таких материалов может быть еще выше. Добиться существенного уменьшения коэффициента ξ можно путем применения различных методов вибрационного и ультразвукового дробления стружки, улучшающих ее размещение на рабочей поверхности алмазного круга.

Гораздо большими технологическими возможностями в ряду других комбинированных методов шлифования, обеспечивающих растворение, оплавление или сгорание стружки в зоне резания, располагает алмазное электроэрозионное шлифование. При оптимальных условиях алмазного электроэрозионного шлифования коэффициент ξ можно уменьшить до $\xi = 1$ и превратить режущий рельеф алмазного круга в полностью активно работающий, у которого полный съем (срез) подводимого в зону резания обрабатываемого металла производится на уровне связи круга.

Таким образом, при правильном назначении механических и электрических режимов алмазного электроэрозионного шлифования, благодаря управляющему воздействию энергии электрических разрядов на связку алмазного круга и стружку, обеспечивается развитый режущий рельеф и высокая стойкость алмазного круга при максимальной реализации его потенциальных возможностей.

С учетом сказанного, важно провести анализ круглого наружного алмазного шлифования (рис. 1.14) для условий: $\xi \rightarrow 1$; $b \approx H$, которые можно реализовать при алмазном электроэрозионном шлифовании. В этом случае параметры H , η и Q определяются зависимостями [146]:

$$H = 3 \sqrt{\frac{9b \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{кр}} \cdot (1 - \eta^2)}}; \quad (1.20)$$

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{кр}} \cdot b^2}}; \quad (1.21)$$

$$Q = S_0 \cdot V_{\text{дет}} \cdot t = \frac{S_0 \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot k^2 \cdot b^4 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot (1 - \eta^2)^2}{162 \cdot V_{\text{дет}} \cdot \rho}, \quad (1.22)$$

где $V_{\text{дет}}$ – скорость детали, м/с;

$$V'_{\text{дет}} = V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho};$$

t – глубина шлифования, м;

S_0 – продольная подача, м/об.;

$$\rho = \frac{1}{R_{\text{кр}}} + \frac{1}{R_{\text{дет}}};$$

$R_{\text{кр}}$, $R_{\text{дет}}$ – радиусы круга и детали, м.

Как показано выше, увеличение твердости обрабатываемого материала HV приводит к уменьшению параметра $b = H$, коэффициента $(1 - \varepsilon)$, а, следовательно, производительности обработки Q в соответствии с зависимостью (1.22). Добиться увеличения производительности обработки Q можно путем уменьшения безразмерного коэффициента η в соответствии с зависимостью (1.21), реализуя режим самозатачивания алмазного круга на органической или керамической связках, или режим

автономной электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке. Очевидно, второй подход более универсален, так как допускает выполнение условия $b = H$ за счет выбора оптимальной связки, обеспечивающей работу алмазного круга в режиме самозатачивания.

Важным условием повышения производительности при шлифовании труднообрабатываемых материалов следует также рассматривать уменьшение скорости детали $V_{\text{дет}}$ и увеличение продольной подачи S_0 в зависимости

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot \sqrt{2 \cdot V_{\text{дет}} \cdot Q \cdot \rho}}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{кр}} \cdot b^2 \cdot \sqrt{S_0}}} \quad (1.23)$$

в связи с уменьшением параметра b , сохраняя параметры η и Q постоянными. С учетом $Q = S_0 \cdot V_{\text{дет}} \cdot t = \text{const}$ глубина шлифования t увеличится. Следовательно, с увеличением твердости обрабатываемого материала эффективно использовать схему глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали $V_{\text{дет}}$ при продольной подаче $S_0 \cong B$ (где B – высота круга, м). Исходя из этого, схема глубинного круглого наружного алмазного шлифования была использована для разработки эффективного технологического процесса обработки колец из высокопрочных графитов, которые применяются для изготовления торцовых уплотнений насосных агрегатов гидравлических систем.

По сравнению с действующим процессом обычного многопроходного круглого наружного алмазного шлифования, предложенный процесс глубинного круглого наружного алмазного шлифования позволил в 2 ... 5 раз повысить производительность обработки, в 2 ... 3 раза уменьшить износ алмазных кругов на металлических связках при одновременном выполнении технических требований к качеству обработки графитовых колец. Установлено, что съем припуска величиной до 4 мм на сторону можно осуществить за один продольный ход алмазного круга, обеспечивая высокое качество обработки. Это позволяет объединить предварительное и окончательное шлифование в одну операцию и существенно снизить трудоемкость изготовления торцовых уплотнений гидравлических систем.

Учитывая нетокопроводность графита, электроэрозионная правка алмазного круга выполнялась автономно с применением специального

катодного устройства и специального малогабаритного генератора импульсного тока. Это обеспечило высококачественную очистку алмазного круга от продуктов обработки и его высокую режущую способность. Шлифование осуществлялось с глубиной шлифования $t > 1$ мм; $V_{\text{дет}} = 0,5 \dots 2$ м/мин; $S_0 = 0,9 \cdot B$; $V_{\text{кр}} = 35 \dots 40$ м/с и силой тока $I = 30 \dots 50$ А. Применение разработанного процесса шлифования позволило эффективно использовать алмазные круги формы 1А1 300×25 на металлических связках М1-01 и М2-01.

Установлено, что процесс шлифования допускает применение периодической правки алмазного круга. В связи с этим необходимо провести анализ торцового алмазного шлифования керамических деталей на плоскошлифовальном станке с вращающимся столом.

При алмазном шлифовании материалов высокой твердости, характеризующемся небольшим значением максимальной высоты выступания вершин зерен над уровнем связки алмазного круга b , повысить производительность обработки Q , исходя из зависимости (1.22), можно уменьшением скорости детали $V_{\text{дет}}$ при сохранении значений η и Q в зависимости (1.23). Уменьшение $V_{\text{дет}}$ при условии $Q = \text{const}$ допускает увеличение глубины шлифования t . Наибольший эффект достигается при условии $t = R_{\text{дет}}$. Реализовать это условие можно при прорезке глубоких пазов, шлифовании глубоких канавок, разрезке материалов отрезными кругами, а также при плоском шлифовании торцовым кругом с вращающимся столом станка, рассматривая в качестве ширины шлифования параметр $t = R_{\text{дет}}$, а в качестве глубины шлифования – параметр S_0 , которые входят в зависимость (1.23).

Предложенная схема шлифования является наиболее производительной при шлифовании материалов повышенной твердости. Поэтому она была положена в основу создания плоскошлифовальных станков с вращающимся столом, в частности, станков модели 3102 для двустороннего шлифования, используемые для обработки небольших по размерам деталей из высокотвердых керамик, ферритов и других труднообрабатываемых материалов, которые для обработки укладывают на вращающемся столе станка.

Для обработки деталей из указанных материалов используются алмазные круги на металлических связках, которые в условиях отсутствия истирания связки быстро затупляются и теряют режущую способ-

ность, что вызывает увеличение силы, мощности и температуры резания. В результате воздействия больших нагрузок радиально-упорные подшипники шпиндельных узлов станка модели 3102 часто выходят из строя, а обрабатываемые керамические пластинки разрушаются, что приводит к значительным потерям от брака. Применение электроэрозионной правки алмазного круга позволило решить проблему повышения его режущей способности, снижения сил резания и улучшения качества и точности обработки. Кроме того, шлифование "острым" алмазным кругом обеспечивает повышение производительности обработки и снижение износа круга. Для правки торцовых алмазных кругов использовались специальные конструкции правящих устройств.

Важно также провести теоретический анализ шлифования деталей из прочных ферритов торцовыми крупногабаритными алмазными кругами на станках с вращающимся столом. Как известно, увеличить производительность торцового шлифования можно за счет создания на алмазном круге заборного конуса длиной, равной высоте рабочей части круга. В результате производительность обработки увеличивается в B/S_0 раз за счет увеличения количества зерен, участвующих в резании.

Согласно зависимости (1.21), это приводит к увеличению концентрации зерен k в B/S_0 раз. Для обеспечения заданного значения безразмерного коэффициента η с учетом условия $t = R_{\text{дет}}$ скорость детали $V_{\text{дет}}$ должна увеличиться в B/S_0 раз. Очевидно, производительность обработки Q , определяемая зависимостью (1.22), увеличится в B/S_0 раз, поскольку концентрация k входит в зависимость (1.22) с большей степенью, чем скорость детали $V_{\text{дет}}$. Этим показано, что создание на алмазном круге заборного конуса позволяет повысить производительность обработки Q , при этом увеличение Q пропорционально высоте рабочей части торцового круга.

Например, при высоте круга $B = 40$ мм и $S_0 = 1$ мм производительность обработки может быть увеличена в 40 раз (без увеличения износа алмазного круга). Данная схема торцового шлифования использована при пакетной обработке плоскостей мелких деталей из прочных ферритов, что позволило многократно увеличить производительность обработки. Вместе с тем, возможности прогрессивной схемы используются не полностью. Это связано, во-первых, с отсутствием эффективных методов создания на торце алмазного круга заборного конуса на всю его

высоту, во-вторых, с быстрым затуплением алмазного круга на металлической связке, в-третьих, с большой трудоемкостью устранения разноразности алмазных элементов, которая образуется на этапе сборки крупногабаритного алмазного круга диаметром до 1 000 мм.

Применяемые методы механической правки за счет использования обычных абразивных кругов не позволяют решить указанные проблемы, так как режущая способность алмазного круга после правки относительно низкая вследствие небольшого выступания зерен над уровнем связки круга. На алмазном круге в процессе шлифования не происходит образование заборного конуса, а это приводит практически к точечному контакту режущей части круглых алмазных элементов круга с обрабатываемым материалом и ухудшению качества и точности обработки.

Применение специальной технологии электроэрозионной правки круга позволило повысить его режущую способность, решить проблему высококачественной обработки, а также исключить потребность в дефицитных абразивных кругах для правки. Кроме того, применение электроэрозионной правки позволило сократить время правки и повысить стойкость алмазного круга до 10 раз. При этом электроэрозионная правка осуществляется один раз в 2 ... 3 рабочие смены, тогда как обычная механическая правка продолжительностью до 20 ... 30 минут выполняется несколько раз в смену.

Электроэрозионная правка алмазного круга обеспечивает значительное выступание зерен над уровнем связки, что практически исключает контакт обрабатываемого феррита со связкой круга и улучшает специальные свойства обработанных деталей. Разработанная технология электроэрозионной правки обеспечивает образование на торце алмазного круга заборного конуса, позволяет повысить режим шлифования и производительность обработки без увеличения износа круга и ухудшения качества и точности обработки.

1.5. Новые кинематические схемы шлифовальных станков для алмазного шлифования

Для выявления новых технологических возможностей высокопроизводительного алмазного шлифования разработана формализованная физическая теория шлифования, основанная на установлении передаточных функций между входными и выходными параметрами процесса с учетом внутренних (физических) параметров. Оптимизация передаточ-

ных функций позволила определить общую закономерность изменения предельной производительности обработки Q от глубины шлифования t при заданной нагрузке на зерно. Установлено, что зависимость $Q - t$ носит экстремальный характер (рис. 1.15а) в связи с уменьшением скорости детали $V_{\text{дет}}$ (рис. 1.15б). Минимум производительности обработки Q обусловлен существованием самой короткой стружки и достигается при условии $t = a_z$, где a_z – толщина единичного среза. Поэтому, реализуя условия $t > a_z$ и $t < a_z$, можно существенно (до 10 раз и более) повысить производительность обработки.

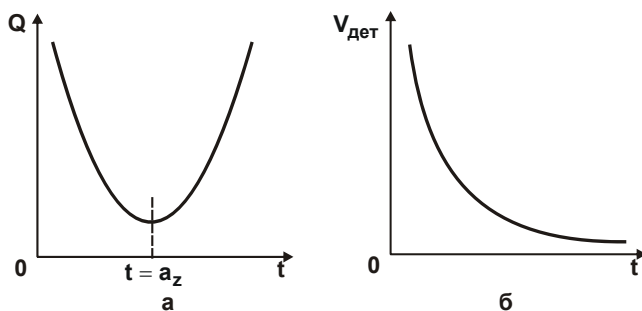


Рис. 1.15. Зависимости производительности обработки Q (а) и скорости детали $V_{\text{дет}}$ (б) от глубины шлифования t

Установлено, что применяемые на практике схемы абразивного и алмазного шлифования реализуются в основном в области минимума производительности обработки Q . Это свидетельствует о неиспользовании потенциальных возможностей процесса шлифования. Правая ветвь зависимости $Q - t$ частично реализована в процессах глубинного шлифования. Левая ветвь зависимости $Q - t$ достаточного практического воплощения не получила. Для ее реализации необходимо существенно увеличить скорость детали $V_{\text{дет}}$ вплоть до скорости круга, что в некоторой степени реализовано в кинематической схеме внутришлифовального станка модели 3М227ВЭРФ2 с ЧПУ и системами правки алмазных кругов на металлических связках для реализации метода алмазно-искрового шлифования (алмазного электроэрозионного шлифования) [112]. Проведенные на этом станке экспериментальные исследования процесса алмазно-искрового шлифования твердых сплавов ВК8, ВК15 и магнитного сплава ЮНДК24Т2 подтвердили эффективность применения

схемы шлифования с увеличенной скоростью детали (табл. 1.3), обеспечивающей увеличение производительности обработки.

Таблица 1.3

Характер изменения производительности алмазно-искрового шлифования твердых сплавов ВК8, ВК15 и магнитного сплава ЮНДК24Т2 в связи с увеличением окружной скорости детали

Скорость детали, м/с	Производительность, мм ³ /мин		
	ВК8	ВК15	ЮНДК24Т2
0,5	180	115	55
5,0	205	150	80
Рост, %	13,9	30,4	45,5

Реализация левой ветви зависимости $Q - t$ также предполагает использование дополнительных высокочастотных возвратно-поступательных движений круга или детали. Например, по имеющимся данным, эффект наложения на алмазный круг или обрабатываемую деталь вибраций и ультразвуковых колебаний связан в определенной степени с реализацией левой ветви зависимости $Q - t$. Поэтому выполнение условия $t < a_z$ – одно из перспективных направлений станкостроения, основанное на использовании физических эффектов в зоне резания. На основе данного решения разработан ряд новых высокопроизводительных схем и способов шлифования, в том числе на уровне изобретений.

Учитывая, что реализация условия $t < a_z$ требует создания нового шлифовального оборудования, более простым и эффективным путем следует рассматривать реализацию условия $t > a_z$, что может быть осуществлено на действующем оборудовании. Как отмечалось выше, условие $t > a_z$ предполагает переход в область высокопроизводительного глубинного шлифования. Для обоснования путей повышения производительности обработки Q (для условия $t > a_z$) воспользуемся известной зависимостью [90]:

$$Q = V_{кр} \cdot S_{мгн}, \quad (1.24)$$

где $S_{мгн} = n_p \cdot S$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²;

n_p – количество одновременно работающих зерен;

$S = P / \sigma$ – площадь поперечного сечения среза отдельным зерном, m^2 ;

P – нагрузка, действующая на отдельное зерно, в тангенциальном направлении, Н;

$\sigma = f\left(\frac{a_z}{\rho}, A\right)$ – условное напряжение резания, Па;

a_z – толщина среза, m^2 ;

$\rho = \varphi(x)$ – радиус округления режущей части зерна, м;

x – величина линейного износа зерна, м;

A – параметр, определяющий прочностные свойства обрабатываемого материала.

В общем виде производительность обработки Q можно представить функцией от шести параметров [103]:

$$Q = \psi(V_{кр}, n_p, a_z, x, P, A). \quad (1.25)$$

Следует отметить, что в теории шлифования известны и реализованы на практике условия повышения производительности обработки Q путем регулирования кинематическими параметрами $V_{кр}$, n_p , a_z . Технологические возможности повышения производительности обработки Q путем регулирования физическими параметрами x и P не обоснованы. Однако, результаты экспериментальных исследований, полученные в Институте сверхтвердых материалов имени В. Н. Бакуля НАН Украины, а также других научных центрах, свидетельствуют о существовании тесной корреляции между производительностью обработки, удельным расходом алмаза, шероховатостью обработки, прочностными свойствами рабочей поверхности круга (обобщенно определяемыми параметром P) и степенью износа выпавших из связки алмазных зерен (определяемой параметром x).

Например, экспериментально установлено, что с увеличением поперечной подачи количество зерен с площадками износа и со сколами уменьшается, а количество выпавших из связки круга зерен без заметного изменения формы и размеров – увеличивается. Такая закономерность прослеживается для всех рассматриваемых пар "абразив – обрабатываемый материал". Для кругов из малопрочного кубонита характерен незначительный процент зерен с площадками износа. Для кругов из

прочных марок AC15 этот процент выше, а для малопрочных алмазов марки AC2 – практически равен нулю. Это указывает на то, что алмазные зерна AC2 разрушаются и выпадают из связки практически не претерпев линейного износа. Меньшему линейному износу зерен AC2 соответствует чрезвычайно высокий удельный расход алмаза, достигающий значений 150 мг/см^3 и более, тогда как при тех же условиях обработки кругом с алмазными зернами AC15 удельный расход алмаза на порядок меньше. Из этого вытекает четкая корреляция между процентом зерен с площадками износа и удельным расходом алмаза.

Для иллюстрации сделанного вывода проанализируем зависимость $P = S \cdot \sigma$. Вполне очевидно, что с ростом поперечной подачи увеличивается параметр S , а предельное значение P (из условий прочности зерна и связки) будет достигаться при меньших значениях условного напряжения резания σ . Физически это возможно при резании более острым зерном, т.е. когда величина линейного износа зерна x меньше. При фиксированном значении S (при заданной поперечной подаче) меньшее значение P (для алмазов марки AC2) будет достигаться также при меньшем значении условного напряжения резания σ , что возможно при резании более острым зерном, т.е. когда величина линейного износа зерна x меньше. Этим показано, что при постоянном предельном значении P переменной величиной в процессе шлифования является величина линейного износа зерна x , изменение которой и связано с изменением удельного расхода алмаза.

Профессор Сагарда А. А. показал, например, что обработка более прочной стали P12Ф5М (по сравнению со сталью ШХ15) характеризуется меньшим процентом зерен с площадками износа и большим удельным расходом алмаза, т.е. разрушение и выпадение из связки зерен при обработке стали P12Ф5М происходит при меньшем их линейном износе (меньшем значении величины x). При шлифовании алмазными кругами на органических связках на зернах образуются меньшие по размеру площадки износа, чем при шлифовании алмазными кругами на металлических связках. Меньшим площадкам износа соответствует больший удельный расход алмаза. Из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что, с изменением величины x в процессе шлифования (также как и параметра P) и применением для этого соответствующих оптимальных режимов шлифования кругами из сверхтвердых материалов, появляется возможность более полного использования уникальных режущих свойств таких кругов.

В качестве примера ниже приведено решение об определении максимально возможной производительности обработки Q и реализующих ее параметров режима шлифования $V_{\text{дет}}$ и $V_{\text{кр}}$ с учетом ограничения по температуре резания θ :

$$Q = \frac{0,074 \cdot B \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho_M \cdot \theta^2 \cdot (1-\eta)^{1,8}}{A^2 \cdot \psi^2 \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}} \cdot \left(\frac{P}{A}\right)^{1,2}; \quad (1.26)$$

$$V_{\text{заг}} = \frac{Q}{B \cdot t}; \quad (1.27)$$

$$V_{\text{кр}} = \frac{330,6 \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho_M \cdot \bar{X}^3 \cdot \theta^2 \cdot (1-\eta)^{0,2}}{m \cdot A^2 \cdot \psi^2 \cdot t} \cdot \left(\frac{A}{P}\right)^{1,2}, \quad (1.28)$$

где ψ – коэффициент, показывающий, какая часть работы переходит в теплоту, поглощаемую деталью;

B – ширина шлифования, м;

$$\rho = \frac{1}{R_{\text{кр}}} + \frac{1}{R_{\text{дет}}};$$

$R_{\text{кр}}$, $R_{\text{дет}}$ – соответственно радиусы круга и детали, м;

ρ_M – плотность обрабатываемого материала, кг/м³;

m – объемная концентрация алмазного круга (100; 50; 25; и т.д.).

Следуя зависимости (1.26), с увеличением глубины шлифования t (при $\theta = \text{const}$ и $P = \text{const}$) производительность обработки Q уменьшается. Компенсировать уменьшение Q можно за счет снижения безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$ и увеличения нагрузки P , действующей на отдельное зерно, поскольку эти два параметра входят в зависимость (1.26) со значительно большей степенью, чем глубина шлифования t .

Важным условием повышения производительность обработки Q при глубинном шлифовании следует рассматривать также уменьшение скорости круга $V_{\text{кр}}$ в соответствии с зависимостью (1.28) в связи с увеличением глубины шлифования t и нагрузки P , действующей на отдельное зерно. Поэтому для поддержания скорости круга $V_{\text{кр}}$ на традиционном уровне 30 – 50 м/с необходимо увеличивать зернистость круга и уменьшать концентрацию зерен круга, что согласуется с практикой

обычного абразивного глубинного шлифования, основанного на применении крупнозернистых высокопористых кругов.

Реализация правой ветви зависимости $Q-t$ (рис. 1.15а) предполагает совершенствование процессов глубинного шлифования на основе повышения режущей способности алмазных кругов на металлических связках путем использования электроэрозионной правки; управления тепловыми потоками при шлифовании, идущими в стружку, деталь, круг и охлаждающую жидкость; создания автоматизированных циклов шлифования, увеличения скорости круга до 600 м/с.

С физической точки зрения эффекты обработки обусловлены применением новых соотношений между толщиной, шириной и длиной единичных срезов, управлением величиной линейного износа зерен до момента их разрушений и выпадения из связки круга и т.д.

Теоретические решения экспериментально подтверждены, прошли промышленную апробацию и широко внедрены в производство на существующем модернизированном и серийно выпускаемом оборудовании. На их основе разработан и освоен ряд новых прогрессивных технологических процессов комбинированного алмазного шлифования с введением в зону резания дополнительной энергии постоянного тока и ультразвука. Если действие электрических разрядов обеспечивает формирование рабочего рельефа инструмента и поддержание его режущих свойств в процессе шлифования, то ультразвук влияет на состояние межэлектродного зазора, способствует инициированию разрядов и повышению их равномерности, изменяет кинематику режущих элементов (их траекторию, геометрию). Колебания создают кавитацию в жидкости, активизируя ее поверхностно-смазывающие и очищающие действия, что снижает трение, устраняет наросты и налипания. В результате облегчается процесс микрорезания, и улучшаются условия формирования обработанной поверхности.

1.6. Условия снижения энергоемкости и повышения производительности обработки при алмазном шлифовании твердых сплавов

При алмазном шлифовании твердых сплавов чрезвычайно актуальны вопросы определения условий снижения энергоемкости и повышения производительности обработки. Эти вопросы важны при шлифо-

вании твердых сплавов алмазными кругами на металлических связках, которые в большинстве случаев используются лишь на операциях окончательного шлифования при съеме небольших припусков. Вместе с тем, как показывает практика, данные круги располагают большими технологическими возможностями в плане повышения их износостойкости и производительности обработки и, следовательно, могут эффективно использоваться на операциях предварительного шлифования при съеме больших припусков. Для этого необходимо обосновать оптимальные условия шлифования, в первую очередь теоретическим путем на основе разработанных математических моделей алмазного шлифования. Поэтому в настоящем подразделе теоретически определены условия снижения энергоемкости и повышения производительности обработки твердых сплавов алмазными кругами на металлических связках и произведена экспериментальная оценка полученных теоретических результатов. Для этого установлены аналитические зависимости определения условного напряжения резания σ (энергоемкость обработки) и радиальной составляющей силы резания, действующей на отдельное зерно, при микрорезании P_{y_1} [101]:

$$\sigma = 3 \cdot \sqrt[3]{\frac{HV \cdot \sin \gamma}{\cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)} \cdot \frac{\eta}{(1 - \eta)} \cdot \tau_{сдв}^2}; \quad (1.29)$$

$$P_{y_1} = 3 \cdot x^2 \cdot \sqrt[3]{\left[\frac{HV \cdot \sin \gamma}{\cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)} \right]^2 \cdot \frac{(1 - \eta)}{\eta} \cdot \tau_{сдв}}, \quad (1.30)$$

где HV , $\tau_{сдв}$ – твердость по Виккерсу и предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м²;

γ – половина угла при вершине исходного (неизношенного) режущего зерна, представленного в виде конуса ($\gamma = 45^\circ$);

ψ – условный угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ($\operatorname{tg} \psi = f$ – коэффициент трения);

η – безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления режущего зерна, $0 \dots 1$ ($\eta = 0$ – для острого зерна, $\eta \rightarrow 1$ – для затупленного зерна);

x – величина линейного износа зерна, представленного в расчетах в форме конуса, м.

Исходя из зависимости (1.29), энергоемкость обработки σ вполне однозначно определяется безразмерным коэффициентом η . С его увеличением ($\eta \rightarrow 1$) параметр σ неограниченно увеличивается. Безразмерный коэффициент η является обобщенным параметром и зависит от условий обработки. Для его определения следует воспользоваться зависимостью для расчета максимальной толщины среза $H_{\max} = a_z$:

$$H_{\max} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{t \cdot \rho} \cdot (1 - \eta^2)}{m \cdot V_{\text{кр}}}}, \quad (1.31)$$

где $\bar{X}$ – зернистость круга, м;

m – объемная концентрация зерен круга;

$$\rho = \frac{1}{R_{\text{кр}}} + \frac{1}{R_{\text{дет}}};$$

$R_{\text{кр}}$, $R_{\text{дет}}$ – радиусы круга и детали, м.

В работе [146] приведена аналитическая зависимость, устанавливающая связь между параметрами a_z , x и η :

$$a_z = x \cdot \frac{(1 - \eta)}{\eta}. \quad (1.32)$$

Преобразуя зависимость (1.30) с учетом зависимостей (1.31) и (1.32), имеем:

$$\frac{\eta^5}{(1 - \eta)} = \frac{P_{y_1}^3}{27 \cdot \tau_{\text{сдв}}} \cdot \left[\frac{\cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)}{HV \cdot \sin \gamma} \right]^2 \cdot \left(\frac{m \cdot V_{\text{кр}}}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}} \right)^2. \quad (1.33)$$

Учитывая определяющую роль числителя в соотношении $\eta^5 / (1 - \eta)$, уменьшить безразмерный коэффициент η (с целью снижения условного напряжения резания σ) можно уменьшением параметров m , $V_{\text{кр}}$, P_{y_1} и увеличением $\bar{X}$, $V_{\text{дет}}$, t . Принимая параметр P_{y_1} равным прочности зерна на раздавливание, с учетом известной зависимости $P_{y_1} = \alpha \cdot \bar{X}$ (где α – безразмерный коэффициент, характеризующий прочность зерна), зависимость (1.33) выразится:

$$\frac{\eta^5}{(1-\eta)} = \frac{\alpha^3}{27 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \bar{X}^3} \cdot \left[\frac{\cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)}{HV \cdot \sin \gamma} \right]^2 \cdot \left(\frac{m \cdot V_{\text{кр}}}{630 \cdot \pi \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}} \right)^2. \quad (1.34)$$

Безразмерный коэффициент η тем меньше, чем меньше параметры α , m , $V_{\text{кр}}$ и больше $\bar{X}$, $V_{\text{дет}}$, t . При заданной производительности обработки $Q = B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$ зависимость (1.34) примет вид:

$$\frac{\eta^5}{(1-\eta)} = \frac{\alpha^3}{27 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \bar{X}^3} \cdot \left[\frac{\cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)}{HV \cdot \sin \gamma} \right]^2 \cdot \left(\frac{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot \sqrt{B}}{630 \cdot \pi \cdot \sqrt{V_{\text{дет}} \cdot Q \cdot \rho}} \right)^2. \quad (1.35)$$

Уменьшить безразмерный коэффициент η при условии $Q = \text{const}$ можно уменьшением параметров α , m , $V_{\text{кр}}$ и увеличением $\bar{X}$, $V_{\text{дет}}$ при изменении глубины шлифования t по зависимости $t = Q/B \cdot V_{\text{дет}}$.

Наибольшее влияние на безразмерный коэффициент η оказывает коэффициент α . Это предопределяет необходимость правильного выбора связки и прочности зерна.

При глубинном шлифовании (при небольших значениях скорости детали $V_{\text{дет}}$) коэффициент α необходимо уменьшить, применяя круги с менее прочными алмазами и связками, или увеличить зернистость круга $\bar{X}$ и уменьшить концентрацию круга m . Этим объясняется применение при глубинном шлифовании крупнозернистых высокопористых абразивных кругов.

При многопроходном шлифовании (при относительно высоких значениях скорости детали $V_{\text{дет}}$), наоборот, коэффициент α необходимо увеличить, применяя более прочные связки и алмазные зерна, или уменьшить зернистость круга $\bar{X}$ и увеличить концентрацию круга m .

Для обеспечения одинаковой энергоемкости многопроходного и глубинного шлифования ($\eta = \text{const}$) необходимо выполнить условие $V_{\text{дет}} \cdot Q = \text{const}$. При уменьшении скорости детали $V_{\text{дет}}$ от 10 м/мин (при многопроходном шлифовании) до 0,1 м/мин (при глубинном шлифовании) производительность обработки Q увеличивается в 100 раз. Следовательно, глубинное шлифование при заданном значении безразмерного коэффициента η допускает существенное увеличение Q .

Исходя из преобразований зависимости (1.31)

$$H_{\max} = 3 \sqrt{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{V_{\text{дет}} \cdot Q \cdot \rho}}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot \sqrt{B}}} \quad (1.36)$$

(при доленой продольной подаче $S_d = 1$), условие $V_{\text{дет}} \cdot Q = \text{const}$ выполняется для $H_{\max} = \text{const}$.

Для определения условий повышения производительности обработки Q с учетом ограничения по энергоемкости шлифования следует разрешить (1.35) относительно производительности обработки

$$Q = \left[\frac{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot \cos \psi \cdot (1 - \sin \gamma)}{630 \cdot \pi \cdot HV \cdot \sin \gamma} \right]^2 \cdot \left[\frac{\alpha^3}{27 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \bar{X}^3} \cdot \frac{(1 - \eta)}{\eta^5} \cdot \frac{B}{V_{\text{дет}} \cdot \rho} \right]. \quad (1.37)$$

Как видно, увеличить производительность обработки Q можно увеличением параметров α , m , $V_{\text{кр}}$, B и уменьшением $\bar{X}$, $V_{\text{дет}}$, η , ψ . Чем прочнее и тверже обрабатываемый материал, тем больше производительность обработки Q . Наибольшее влияние на производительность обработки Q оказывает безразмерный коэффициент η , регулировать которым можно, изменяя глубину шлифования $t = Q/B \cdot V_{\text{дет}}$ с учетом зависимости (1.37).

При работе алмазного круга в режиме самозатачивания безразмерный коэффициент η стабилизируется во времени, а при работе алмазного круга в режиме затупления – безразмерный коэффициент η увеличивается во времени $\eta \rightarrow 1$ и приводит к уменьшению производительности обработки Q . Это требует применения непрерывной правки алмазного круга, реализуемой, например, в процессе алмазного электроэрозионного шлифования. Обобщенные условия повышения производительности обработки при шлифовании представлены на рис. 1.16.

С целью проверки теоретических решений проводились экспериментальные исследования на плоскошлифовальном станке модели 3Е711В, модернизированном под алмазное электроэрозионное шлифование [101]. Обрабатывались твердосплавные пластинки из ВК8 и Т15К10 по схеме плоского врезного шлифования всей шириной алмазного круга на металлической связке 1А1 200×20×5 АС6 160/125 М2-01 4 с относительно не-

большой скоростью детали $V_{\text{дет}} = 3,3$ м/мин, скоростью круга $V_{\text{кр}} = 15,7$ м/с и глубиной шлифования, изменяющейся в пределах $0 \dots 0,1$ мм. Это позволило в определенной степени реализовать условия однопроходного (глубинного) шлифования, обеспечивающего, согласно структурной схеме (рис. 1.16), повышение производительности обработки с учетом ограничения по энергоемкости шлифования.



Рис. 1.16. Структурная схема условий повышения производительности обработки при шлифовании

Экспериментально установлено, что с течением времени обработки τ эффективная мощность N и энергоемкость обработки σ при обычном шлифовании (без подвода электрического тока в зону резания) непрерывно увеличиваются, а производительность обработки – уменьшается (рис. 1.17).

Исходя из зависимости (1.29), увеличение энергоемкости шлифования σ обусловлено увеличением безразмерного коэффициента η вследствие затупления зерен алмазного круга и увеличения величины линейного износа зерен x . Увеличение безразмерного коэффициента η , согласно зависимости (1.37), приводит к уменьшению производительно-

сти обработки Q . Мощность шлифования $N = \sigma \cdot Q$ увеличивается в связи с тем, что интенсивность увеличения энергоемкости обработки σ выше интенсивности уменьшения производительности обработки Q . Таким образом, теоретические зависимости согласуются с экспериментальными данными.

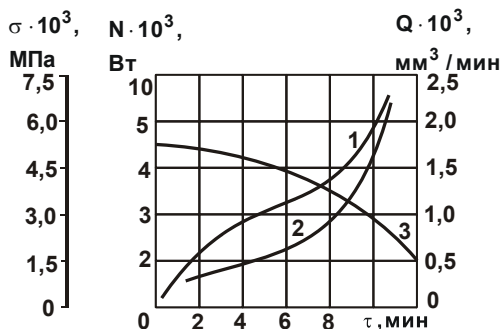


Рис. 1.17. Зависимости мощности N (1), энергоемкости σ (2) и производительности Q (3) обработки от времени шлифования τ
Условные обозначения: обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8; $t = 0,03$ мм

При алмазном электроэрозионном шлифовании с увеличением времени τ эффективная мощность N первоначально увеличивается, затем, несколько уменьшается и в дальнейшем остается постоянной (кривая 1, рис. 1.18).

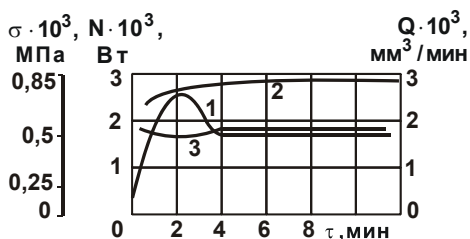


Рис. 1.18. Зависимости мощности N (1), энергоемкости σ (2) и производительности Q (3) обработки от времени шлифования τ при алмазном электроэрозионном шлифовании
Условные обозначения: обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8; $t = 0,03$ мм

Производительность обработки Q в начальный момент времени уменьшается, затем, несколько увеличивается и стабилизируется (кри-

вая 3, рис. 1.18). Энергоемкость шлифования σ первоначально увеличивается, затем, остается постоянной (кривая 2, рис. 1.18).

В отличие от обычного алмазного шлифования, при алмазном электроэрозионном шлифовании через определенное время рассмотренные параметры стабилизируются. Согласно зависимости (1.29), это обусловлено стабилизацией во времени безразмерного коэффициента η и соответственно величины линейного износа зерен x . С физической точки зрения это соответствует стабилизации параметров режущего рельефа алмазного круга в результате выполнения условия равенства скоростей износа зерен и связки. Скорость износа связки определяется интенсивностью электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность круга, которая эквивалентна количеству дополнительной электрической энергии, подводимой в зону резания от источника технологического тока. Очевидно, чем больше количество подводимой электрической энергии, тем больше скорость термического разрушения металлической связки от действия электрических разрядов в межэлектродном зазоре (между алмазным кругом и обрабатываемым материалом) и меньше величина линейного износа зерен x и соответственно безразмерный коэффициент η , т.е. острее алмазный круг. Поэтому, увеличивая интенсивность электроэрозионного воздействия на алмазный круг, можно существенно уменьшить безразмерный коэффициент η и, согласно зависимостям (1.29) и (1.37), увеличить производительность Q и уменьшить энергоемкость обработки σ .

Некоторое уменьшение мощности шлифования N , а также увеличение производительности обработки Q в период времени, предшествующий стабилизации указанных параметров (рис. 1.18), обусловлен особенностями процесса электроэрозии, который начинает интенсивно протекать в момент достижения максимальной мощности шлифования при использовании специального генератора импульсного тока (частота 22 кГц, скважность – 9/10). Таким образом, экспериментально установлено, что введение в зону резания дополнительной энергии в виде электрических разрядов позволяет за счет термического разрушения металлической связки алмазного круга (а также продуктов обработки) стабилизировать во времени показатели шлифования. Данная закономерность установлена для различных глубин шлифования (рис. 1.19): при $t = 0,03$ мм мощность шлифования стабилизируется на уровне 180 Вт, при $t = 0,05$ мм – на уровне 400 Вт, при $t = 0,08$ мм – на уровне 1,9 кВт.

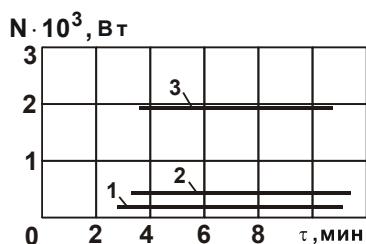


Рис. 1.19. Зависимости мощности шлифования N от времени обработки τ при алмазном электроэрозионном шлифовании

Условные обозначения: обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8.

Условия обработки: 1 – $t=0,03$ мм; 2 – $t=0,05$ мм; 3 – $t=0,08$ мм.

При изменении глубины шлифования t в пределах 0,03 ... 0,05 мм энергоемкость шлифования σ остается почти постоянной, а с увеличением t до 0,08 мм – увеличивается (рис. 1.20). Это связано с тем, что с увеличением глубины шлифования t увеличиваются нагрузки, действующие на алмазные зерна, и интенсивность их линейного износа. Поэтому, при заданном значении скорости износа связки, определяемом интенсивностью электроэрозионного воздействия на алмазный круг, условия равенства скоростей износа связки и зерен с увеличением глубины шлифования t достигаются при больших значениях x и η , т.к. с увеличением x и η скорость износа зерен уменьшается.

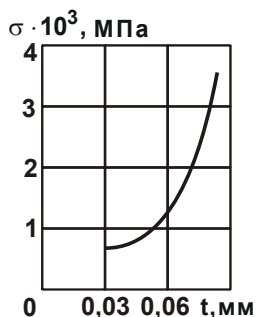


Рис. 1.20. Зависимости условного напряжения резания σ от глубины шлифования t

Условные обозначения: обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8.

Аналогичные закономерности экспериментально получены при алмазном электроэрозионном шлифовании пластин из твердого сплава Т5К10 (рис. 1.21). При глубине шлифования $t=0,03$ мм "всплеск" мощ-

ности шлифования отсутствует, тогда как при глубине шлифования $t = 0,05$ мм он имеет место. В диапазоне изменения $t = 0,03 \dots 0,05$ мм энергоемкость шлифования σ остается почти постоянной.

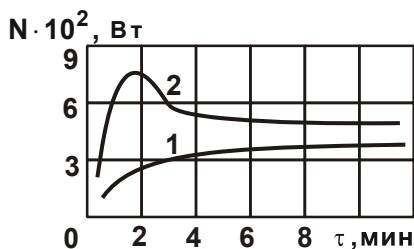


Рис. 1.21. Зависимости мощности шлифования N от времени обработки τ

Условные обозначения: обрабатываемый материал — твердый сплав Т5К10; 1 — $t = 0,03$ мм; 2 — $t = 0,05$ мм.

Установлено, что энергоемкость шлифования твердого сплава Т5К10 выше энергоемкости шлифования твердого сплава ВК8. Это связано с более высокими значениями механических характеристик твердого сплава Т5К10. Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретической зависимостью (1.29), откуда следует, что с увеличением твердости HV и прочности $\tau_{сдв}$ обрабатываемого материала энергоемкость шлифования σ увеличивается.

Таким образом, показано, что за счет применения алмазного электроэрозионного шлифования можно управлять параметрами x и η , стабилизируя во времени мощность (энергоемкость) шлифования для различных условий обработки, включая режимы обработки с увеличенными глубинами шлифования t . Это обеспечивает увеличение производительности обработки.

Из полученных результатов следует важный вывод, состоящий в том, что алмазное электроэрозионное шлифование твердых сплавов позволяет эффективно использовать алмазные круги на прочной металлической связке М2-01, которые обычно при шлифовании твердых сплавов и других металлических материалов быстро затупляются, засаливаются и теряют режущую способность. Причем, появилась возможность их эффективного применения в условиях увеличенных глубин шлифования (в условиях, близких к глубинному шлифованию), что открывает широкие перспективы интенсификации процессов обработки.

1.7. Оценка энергий, затрачиваемых на резание и трение в общем энергетическом балансе процессов алмазного и алмазно-искрового шлифования

Общеизвестно, что энергоемкость процесса шлифования зависит от соотношения работ, которые затрачиваются на резание и трение. Для разработки эффективных путей совершенствования процесса алмазного шлифования важно знать доли энергий, затрачиваемых на резание и трение в общем энергетическом балансе обработки. Необходимость такой оценки связана с тем, что традиционно процесс шлифования рассматривается с позиций общей теории резания без отдельного учета доли энергии резания и трения. Это приводит к дисбалансу подводимой и отводимой при шлифовании энергии и не позволяет объективно оценить физические закономерности процесса шлифования. Для решения данной задачи необходимо знать коэффициент "чистого резания" $K_{ш.рез}$ (аналогичный коэффициенту шлифования) $K_{ш}$ и коэффициент трения f алмазного круга с обрабатываемым материалом [14; 84]:

$$K_{ш.рез} = \sqrt{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \frac{K_{ш}}{\sigma}}; \quad f = K_{ш} - K_{ш.рез}, \quad (1.38)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м².

Зная параметр $K_{ш.рез}$, тангенциальную составляющую силы резания P_z можно упрощенно представить:

$$P_{z.рез} = K_{ш.рез} \cdot P_y; \quad P_{z.тр} = P_z - P_{z.рез}, \quad (1.39)$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания, Н;

$P_{z.рез}$, $P_{z.тр}$ – составляющие силы P_z , обусловленные процессами резания и трения при шлифовании, Н.

Доля трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования равна отношению $f/K_{ш}$. Зная параметр $K_{ш.рез}$, можно определить безразмерный коэффициент η , учитывающий степень затупления зерен круга и изменяющийся в пределах $0 \dots 1$ ($\eta \rightarrow 0$ – для острых зерен, $\eta \rightarrow 1$ – для затупленных зерен):

$$\eta = 1 - \frac{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV}{4 \cdot \sigma_{\text{сж}}} \cdot K_{\text{ш,рез}}^2 \quad (1.40)$$

На основе экспериментальных значений σ и $K_{\text{ш}}$, приведенных в табл. 1.4, можно оценить доли энергетических затрат на резание и трение при алмазном шлифовании (АШ) и алмазно-искровом шлифовании (АИШ) твердого сплава ТН-20 совместно со сталью 45 алмазным кругом 12А2 45° АС6 100/80 М1-01 4; $P_{\text{н}} = 1$ МПа; $V_{\text{кр}} = 20$ м/с [71].

Таблица 1.4

Экспериментальные значения параметров σ и $K_{\text{ш}}$

Продолжительность обработки, мин	$\sigma \cdot 10^4$, МПа		K _ш	
	Метод шлифования			
	АШ	АИШ	АШ	АИШ
2	13,8	6,2	0,42	0,26
4	14,4	7,4	0,34	0,24
6	14,8	8,4	0,28	0,23
8	15,3	8,3	0,26	0,23
10	15,7	8,5	0,24	0,24
12	16,0	8,4	0,23	0,23
14	16,4	8,5	0,21	0,23

В табл. 1.5 приведены расчетные значения параметров $K_{\text{ш,рез}}$, f , $f/K_{\text{ш}}$, η при алмазном шлифовании (АШ) и алмазно-искровом шлифовании (АИШ) твердого сплава ТН-20 совместно со сталью 45 (исходные данные: $\operatorname{tg} \gamma = 1,732$; $\sigma_{\text{сж}} = 4\,000$ МПа; $HV = 30\,000$ МПа). При алмазном шлифовании за 14 мин шлифования коэффициент трения f изменился от 0,264 до 0,109, а безразмерный коэффициент η – от 0,75 до 0,894.

При алмазно-искровом шлифовании в результате частичного сгорания образующихся стружек и продуктов обработки практически исключается контакт обрабатываемого материала со связкой круга. При этих условиях доля энергетических затрат на трение и коэффициент трения f уменьшаются практически вдвое по сравнению с обычным алмазным шлифованием. При непрерывном поддержании режущей способности круга увеличивается так же параметр $K_{\text{ш,рез}}$. При создании на рабочей

поверхности круга острого режущего рельефа уменьшается безразмерный коэффициент η , увеличивается производительность обработки и уменьшается теплонапряженность процесса шлифования. При алмазно-искровом шлифовании безразмерный коэффициент η меньше, а параметр $K_{ш,рез}$ больше, чем при обычном алмазном шлифовании.

Таблица 1.5

Расчетные значения параметров

Длительность обработки, мин	K _{ш.рез}		f		f /K _ш , %		η	
	Метод шлифования							
	АШ	АИШ	АШ	АИШ	АШ	АИШ	АШ	АИШ
2	0,156	0,183	0,264	0,07	62,8	29,6	0,751	0,66
4	0,137	0,162	0,203	0,078	59,6	32,7	0,809	0,732
6	0,123	0,148	0,157	0,082	56,0	35,7	0,822	0,776
8	0,117	0,149	0,143	0,081	55,2	35,3	0,855	0,773
10	0,11	0,15	0,129	0,089	53,9	37,3	0,878	0,77
12	0,107	0,148	0,122	0,082	53,3	35,7	0,881	0,776
14	0,101	0,147	0,109	0,083	51,8	36,0	0,894	0,78

Нормальное давление P_H неоднозначно влияет на распределение энергетического баланса работ, которые затрачиваются на резание и трение. Например, при увеличении P_H от 0,2 до 0,8 МПа (табл. 1.6) доля энергии, затрачиваемой на трение $f/K_{ш}$, уменьшается от 27 до 24,2 %, а при увеличении P_H в интервале 0,8 ... 1,2 МПа параметр $f/K_{ш}$ увеличивается от 24,2 до 35,8 %. Доля энергетических затрат на резание, которая оценивается параметром $K_{ш,рез}$, наоборот, в интервале изменения $P_H = 0,2 \dots 0,8$ МПа увеличивается от 0,183 до 0,226, а в интервале $P_H = 0,8 \dots 1,2$ МПа – уменьшается от 0,226 до 0,195. Это связано с тем, что при алмазно-искровом шлифовании при изменении P_H от 0,2 до 0,8 МПа коэффициент трения не изменяется.

Значения коэффициента трения соответствуют условиям трения твердого сплава с алмазом ($f = 0,07 \dots 0,075$), а параметр $K_{ш,рез}$ с увеличением толщин срезов зернами увеличивается. При дальнейшем увеличении нормального давления P_H доля трения увеличивается, и эффективность алмазно-искрового шлифования уменьшается. Это проис-

ходит по двум причинам. Во-первых, в контакт с обрабатываемым материалом вступает металлическая связка алмазного круга, а во-вторых, увеличиваются нагрузки, действующие на зерна, в результате чего происходит их интенсивное затупление, увеличивается безразмерный коэффициент η и уменьшается $K_{ш,рез}$. Следовательно, существует оптимальное значение P_H , при котором обеспечивается наибольшая производительность обработки.

Таблица 1.6

Экспериментальные значения параметров σ , $K_{ш}$ и расчетные значения параметров $K_{ш,рез}$, f , $f/K_{ш}$, η для алмазно-искрового шлифования твердого сплава Т15К6 совместно со сталью 45

(Условия обработки: $tg\gamma = 1,732$; $\sigma_{сж} = 3\ 900$ МПа; $HV = 29\ 000$ МПа)

P_H	$\sigma \cdot 10^4$, МПа	$K_{ш}$	$K_{ш,рез}$	f	$f/K_{ш}$, %	η
0,2	6,0	0,250	0,183	0,067	27,0	0,660
0,4	5,2	0,280	0,208	0,072	25,9	0,560
0,8	4,7	0,300	0,226	0,074	24,2	0,481
1,0	5,5	0,305	0,210	0,094	30,9	0,551
1,2	6,5	0,310	0,195	0,115	35,8	0,614

Превышение нормальным давлением P_H оптимального значения требует увеличения электрических параметров процесса. С увеличением интенсивности электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность алмазного круга восстанавливается режущая способность алмазных зерен, снижаются доля энергии трения и безразмерный коэффициент η , увеличивается параметр $K_{ш,рез}$. С увеличением скорости круга доля энергии трения $f/K_{ш}$ при алмазно-искровом шлифовании твердого сплава Т15К6 совместно со сталью 45 ($P_H = 1$ МПа) непрерывно увеличивается (табл. 1.7).

Коэффициент трения при изменении скорости круга в диапазоне 15 ... 40 м/с практически остается постоянным, однако существенно увеличивается безразмерный коэффициент η , который характеризует затупление зерен. Это снижает режущую способность круга $K_{ш,рез}$ и эффективность шлифования.

Таблица 1.7

**Экспериментальные значения параметров σ , $K_{\text{ш}}$
и расчетные значения параметров $K_{\text{ш,рез}}$, f , $f/K_{\text{ш}}$, η**

$V_{\text{кр}}, \text{м/с}$	$\sigma \cdot 10^4, \text{МПа}$	$K_{\text{ш}}$	$K_{\text{ш,рез}}$	f	$f/K_{\text{ш}}, \%$	η
15	4,6	0,32	0,236	0,084	26,3	0,342
20	5,7	0,31	0,209	0,101	32,7	0,554
25	6,8	0,29	0,185	0,105	36,3	0,651
30	8,1	0,27	0,163	0,107	39,5	0,729
35	9,4	0,24	0,143	0,097	40,5	0,792
40	10,9	0,21	0,124	0,086	40,9	0,841

В табл. 1.8 приведены результаты исследований процесса микро-резания единичным зерном AC50 твердого сплава T15K6 с толщиной среза 8 мкм. С увеличением скорости круга в пределах 15 ... 35 м/с коэффициент трения изменяется в пределах 0,17 ... 0,042. В диапазоне 25 ... 35 м/с коэффициент трения принимает значения 0,085 ... 0,042, что соответствует значениям коэффициента трения при алмазно-искровом шлифовании. Это свидетельствует об отсутствии контакта связки круга с обрабатываемым материалом при алмазно-искровом шлифовании. С увеличением скорости круга $V_{\text{кр}}$ доля энергии трения $f/K_{\text{ш}}$ уменьшается до 8,7 %, параметр $K_{\text{ш,рез}}$ почти не изменяется. Эти данные согласуются с данными, приведенными в табл. 1.7.

Таблица 1.8

**Экспериментальные значения параметров σ , $K_{\text{ш}}$
и расчетные значения параметров $K_{\text{ш,рез}}$, f , $f/K_{\text{ш}}$, η**

$V_{\text{кр}}, \text{м/с}$	$\sigma \cdot 10^4, \text{МПа}$	$K_{\text{ш}}$	$K_{\text{ш,рез}}$	f	$f/K_{\text{ш}}, \%$
15	2,6	0,59	0,43	0,170	28,4
20	2,4	0,55	0,428	0,122	22,1
25	2,2	0,52	0,435	0,085	16,4
30	2,1	0,50	0,436	0,064	12,7
35	2,0	0,48	0,438	0,042	8,7

Таким образом установлено, что эффект алмазно-искрового шлифования связан, во-первых, с поддержанием на алмазном круге развитого режущего рельефа благодаря его непрерывной электроэрозионной правке, а во-вторых, с уменьшением доли энергетических затрат на трение алмазного круга с обрабатываемым материалом.

1.8. Разработка и внедрение эффективных процессов круглого наружного и плоского алмазного электроэрозионного шлифования материалов повышенной твердости

Известные технологии алмазного электроэрозионного шлифования материалов повышенной твердости (инструментальных материалов) реализованы с использованием алмазных кругов диаметром не более 300 мм. Это, как правило, не позволяет достичь уровня производительности обычного абразивного шлифования на операциях предварительной обработки и решить проблему перехода на полную алмазную обработку с целью повышения качества шлифованных поверхностей. В связи с этим предложено круглое наружное предварительное (съем припуска до 2 мм на сторону) твердосплавных и быстрорежущих инструментов выполнять с применением крупногабаритных алмазных кругов на металлической связке М2-01 формы 1А1 и диаметром 500 мм, характеризующихся большой рабочей поверхностью, что в сочетании с непрерывной электроэрозионной правкой обеспечивает увеличение стойкости круга, производительности и качества обработки.

Повышение режущей способности круга позволяет снизить силы и температуру резания и интенсифицировать режим шлифования за счет применения увеличенных глубин резания (переход в область глубинного шлифования).

Данная технология алмазного шлифования апробирована и внедрена в инструментальном производстве ПО "Стрела" (г. Оренбург), а также принята для широкого внедрения на предприятиях отрасли, курируемых ПО "Стрела", на операциях круглого наружного шлифования твердосплавных и быстрорежущих многолезвийных инструментов (фрез, разверток, зенкеров, протяжек, сверл и т.д.). В результате решена проблема повышения качества и точности обработки при обеспечении высокого уровня производительности и экономически обоснованного рас-

хода алмаза. Использована схема продольного шлифования с долевой продольной подачей, равной 0,5, глубиной шлифования 0,1 ... 0,2 мм и скоростью вращения обрабатываемого инструмента до 5 м/мин. Выбор оптимальной долевой продольной подачи $S_d = 0,5$ связан с обеспечением качественной очистки алмазного круга от продуктов обработки, т.к. созданы условия эффективной периодической электроэрозионной правки "неработающей" половины ширины круга в процессе шлифования. Данный момент играет исключительно важную роль в обеспечении высокой режущей способности круга на протяжении обработки. В особой мере это проявилось на операции шлифования длинных быстрорежущих протяжек. В связи с недостаточно высокой режущей способностью абразивного круга диаметром 600 мм и упругими перемещениями не достигалась требуемая точность обработки (не выше 0,01 мм). Применение новой технологии за счет повышения "остроты" алмазного круга позволило гарантированно обеспечить точность обработки в пределах 0,01 мм, исключить прижоги и другие шлифовальные дефекты обработки.

На этом же предприятии внедрена разработанная технология круглого наружного алмазного шлифования торцом круга задней поверхности крупногабаритных твердосплавных сверл с относительно небольшой скоростью вращения обрабатываемого инструмента (до 5 м/мин) и повышенной глубиной резания (до 0,15 мм). Реализация данной схемы глубинного алмазного шлифования кругом на связке М2-01 стала возможной благодаря организации эффективной электроэрозионной правки, в результате чего решена проблема повышения качества обработки, имевшая место при абразивном шлифовании. Из технологического цикла шлифования исключены абразивные круги, производительность алмазного шлифования стала выше производительности абразивного шлифования.

Разработанная технология круглого наружного и плоского алмазного электроэрозионного шлифования режущих инструментов в период 1986 – 2000 годов внедрена на многих предприятиях: Липецком станкоинструментальном заводе, Тульском патронном заводе, Харьковском машиностроительном заводе "ФЭД", ОАО завод "Потенциал", Харьковском электроаппаратном заводе, Харьковском тракторном заводе, Мелитопольском компрессорном заводе и ПО "Холодмаш", Курском заводе тракторных запчастей и других. Технология торцового алмазного шлифования (включая заточку инструментов) с повышенными глубинами резания внедрена на Ярославском и Вильнюсском заводах топливной ап-

паратуры. Оренбургском тепловозремонтном заводе, Ульяновском автомобильном заводе и других с высокой эффективностью. Заслуживает особого внимания комплексный подход к решению проблемы алмазной обработки в инструментальном производстве ПО "Куйбышевбурмаш". На этом предприятии длительное время обработка всей номенклатуры изготавливаемых твердосплавных и быстрорежущих инструментов производилась с использованием алмазного электрохимического шлифования, а также обычного абразивного шлифования. Относительно низкая производительность электрохимического шлифования и вредность работы с электролитами предопределили необходимость использования разработанных нами технологий алмазного электроэрозионного шлифования с повышенными глубинами резания. Благодаря возможности увеличения производительности обработки решена проблема перехода на полную алмазную обработку на всех операциях шлифования: круглого, внутреннего, плоского шлифования и заточки инструментов. Станки (более 20 единиц) переоборудованы под электроэрозионное шлифование, укомплектованы изготовленными нами малогабаритными специальными генераторами импульсного тока, реализующими оптимальный электрический режим обработки. В результате внедрения улучшены условия труда и экология производства, снижены потери от брака инструмента на операциях шлифования.

На Гомельском ПО "Кристалл" внедрена эффективная технология плоского алмазного шлифования твердосплавных матриц, используемых в оснастке синтеза алмазов. При шлифовании "чистого" твердого сплава (без присутствия стали), как правило, отсутствует необходимость осуществления непрерывной электроэрозионной правки алмазного круга в силу отсутствия его интенсивного засаливания – здесь достаточно ограничиться периодической правкой. С этой целью разработано специальное устройство для правки круга, которое аналогично алмазному карандашу удерживается в руке рабочего в момент правки и к которому подводится электрический ток от специального генератора импульсного тока. С помощью устройства можно периодически производить подправку алмазного круга, восстанавливая его режущую способность. Установлено, что данный способ правки эффективен с периодичностью правки от 15 минут и выше, в особенности при алмазном шлифовании хрупких материалов, не вызывающих интенсивного засаливания круга. Однако требуется переоборудование станка под электроэрозионное шлифование. Способ правки чрезвычайно прост и надежен. Широкая

апробация и внедрение разработанных технологий алмазного шлифования в инструментальных производствах показали, что решение проблемы перехода на полную алмазную обработку без применения абразивных кругов в большинстве случаев требует использования крупнобаритных алмазных кругов на металлических связках, т.к. энергии электрических разрядов (при правке) недостаточно для обеспечения высокой режущей способности круга в условиях высокопроизводительного съема материала. Это предопределяет важность и актуальность разработанных технологий шлифования и электрооборудования для их осуществления.

Схема круглого наружного глубинного продольного шлифования использована для создания технологии алмазного шлифования колец из высокопрочных (неметаллических) силицированных графитов для изготовления торцевых уплотнений насосных агрегатов. Электроэрозионная правка алмазного круга на металлической связке осуществляется вне зоны резания с помощью специального правящего устройства. Внедрение технологии на Бердянском заводе "Южгидромаш" позволило в 2 ... 5 раз увеличить производительность обработки и в 2 ... 3 раза уменьшить расход алмаза, обеспечить съем всего припуска (до 2 мм и более на сторону) за один продольный ход стола станка с высоким качеством обработки.

Выводы к разделу 1

1. Установлено, что основным условием снижения силовой и тепловой напряженности процесса шлифования является повышение режущей способности алмазного круга и снижение интенсивности трения в зоне резания, особенно трения связки круга с обрабатываемым материалом, которое является основным источником образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях в виде прижогов, микротрещин, микросколов и т.д. Показана высокая эффективность применения алмазного шлифования для обработки деталей, изготовленных из металлических и неметаллических материалов повышенной твердости. Раскрыты особенности эффективного применения алмазных кругов на прочных металлических связках за счет их своевременной электроэрозионной и электрохимической правки и обеспечения высокой режущей способности. Отмечается, что при электроэрозионной правке происходит ударно-термическое разрушение металлической связки, а при элек-

трохимической правке – растворение металлической связки, чего невозможно достичь при обычной механической правке абразивными брусками. Показано, что алмазные круги после электроэрозионной или электрохимической правки располагают значительными технологическими возможностями с точки зрения повышения производительности, качества и точности обработки. Однако, наряду с положительными сторонами, электрохимическая правка обладает существенными недостатками, связанными с ухудшением экологии производства, так как в процессе обработки образуется туман из электролита, что оказывает вредное воздействие на организм рабочего, а также приводит к коррозии и преждевременному выходу из строя шлифовального оборудования. Это требует создания дополнительных вытяжных устройств и других средств защиты рабочего места. Поэтому более эффективной с экологической точки зрения следует рассматривать электроэрозионную правку, не требующую применения вредных для здоровья рабочего и оборудования сильных электролитов, поскольку процесс правки осуществляется с применением безвредной обычной технической воды.

2. В работе теоретически обоснованы методы повышения эффективности процессов алмазно-абразивной обработки (шлифования), а для сравнения и лезвийной обработки. Это позволило с единых позиций оценить технологические возможности механической обработки материалов резанием и на этой основе произвести выбор наиболее эффективных методов и условий обработки изделий, изготовленных из материалов повышенной твердости, с использованием электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках, обеспечивающих повышение производительности и качества обработки, улучшение экологии производства.

3. Теоретически и экспериментально доказана эффективность применения схемы глубинного алмазного электроэрозионного шлифования деталей из металлических и неметаллических материалов повышенной твердости, которая при круглом наружном шлифовании требует уменьшения скорости вращения детали до значений 0,5 ... 5 м/мин и установления долевой продольной подачи, близкой к единице. В результате обеспечивается повышение производительности обработки и снижение расхода алмаза при высоком качестве обработанных поверхностей. Эффект обработки достигается за счет уменьшения максимальной толщины среза отдельным зерном круга и постоянного поддержания высокой режущей способности алмазного круга.

Раздел 2

Эффективная технология прецизионной алмазно-абразивной обработки уплотнительных колец из композиционного материала на основе твердого сплава "Релит"

2.1. Научные предпосылки повышения качества и производительности обработки уплотнительных колец из композиционного материала на основе твердого сплава "Релит"

Уплотнительные металлические кольца получили широкое применение в машиностроении. Для герметизации вращающихся валов гидрозащитных глубинных электродвигателей (используемых в электробуровой технике) в ОАО завод "Потенциал" (г. Харьков) разработаны эффективные конструкции торцовых уплотнений (рис. 2.1, рис. 2.2 [88; 151]), по техническим характеристикам превосходящие зарубежные аналоги, в которых применяются пары трения "сталь – бронза", "углеграфит 2П100Ф – минералокерамика ЦМ-332".

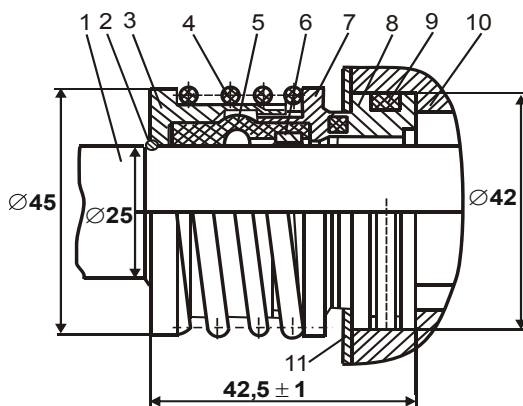


Рис. 2.1. Уплотнение 1Р25

Условные обозначения: 1 – вал протектора; 2 – запорное кольцо; 3 – упор (обжимное кольцо); 4 – пружина; 5 – сильфон; 6 – распорное кольцо; 7 – вращающееся кольцо; 8 – не вращающееся кольцо; 9 – кольцо уплотнительное; 10 – корпус протектора; 11 – кольцо.



Рис. 2.2. Детали торцового уплотнения

Эффект достигается благодаря применению в качестве пары трения двух сопрягаемых колец, рабочие (трущиеся) поверхности которых выполнены из композиционного материала на основе твердого сплава "Релит" и медной связки – методом спекания в вакуумной печи. Твердый сплав "Релит" представляет собой зерна литого карбида вольфрама размером 0,18 – 0,28 мм, предназначенный для изготовления деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного износа. Перед спеканием в вакуумной печи зерна твердого сплава "Релит" и медный порошок в пропорции 9 : 1 засыпают в кольцевую канавку прямоугольного сечения, выполненную на торце кольца из нержавеющей стали, затем прессуют с удельным давлением 3 – 4 т/см². Разработанные релитовые торцовые уплотнения, в которых оба кольца имеют одинаковую трущуюся поверхность, обладают высокой износостойкостью благодаря большой твердости зерен релита и хорошим антифрикционным свойствам, что определяется присутствием медной связки.

Основная особенность способа получения износостойкой поверхности состоит в том, что кольца торцового уплотнения изготавливаются из любой стали (в том числе нержавеющей стали) и лишь на торцевой поверхности выполняется рабочий износостойкий релитовый слой, прочно связанный со стальной основой. Преимущество релитовых торцовых уплотнений состоит еще и в том, что наряду с высокой износостойкостью и антифрикционностью они лишены хрупкости и склонности к термораскрекиванию и являются наиболее технологичными и ремонтпригодными по сравнению с зарубежными аналогами.

Организация массового производства релитовых торцовых уплотнений оказалась достаточно сложной проблемой в связи с трудностями механической обработки торцовых поверхностей колец, состоящих, по сути, из композиции трех материалов: твердого сплава "Релит", меди и нержавеющей стали (т.е. из композиционного материала на основе твердого сплава "Релит"). Проблема обусловлена, во-первых, необходимостью съема достаточно большого припуска (до 2 мм) труднообра-

батываемого композиционного материала на основе твердого сплава "Релит", характеризующегося повышенной твердостью. Во-вторых, необходимостью его прецизионной обработки: параметр шероховатости поверхности $R_a = 0,1$ мкм, неплоскостность обработки – меньше 0,9 мкм. В-третьих, спецификой технологии обработки торцовых поверхностей деталей типа "кольцо" и отсутствием научно обоснованных условий их эффективной обработки.

Применение традиционной технологии абразивной обработки, включающей операции предварительного и окончательного абразивного плоского шлифования и последующей притирки абразивным (алмазным) порошком, оказалось малоэффективным в связи с относительно низкой производительностью и высокой себестоимостью обработки. Как известно, наибольшими возможностями обладает технология алмазно-абразивной обработки, включающей операции алмазного шлифования и последующей алмазной притирки. Однако, для разработки эффективной технологии алмазно-абразивной обработки торцовых поверхностей уплотнительных колец из композиционного материала на основе твердого сплава "Релит" необходимо установить оптимальные варианты технологических маршрутов и параметры технологических операций, т.е., по сути, провести структурно-параметрический анализ и синтез технологического процесса. Это требует разработки математических (аналитических) моделей, описывающих наиболее важные стороны функционирования технологического процесса, и проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований.

2.2. Кинематика формообразования торцовой поверхности вращающегося кольца при шлифовании

При обработке торцовых поверхностей деталей типа "кольцо" эффективно применение схемы врезного шлифования торцом круга, сообщая детали вращательное движение, а кругу – дополнительную врезную подачу. Данная схема шлифования практически исключает неплоскостность обработки, обеспечивает качественную подготовку обрабатываемой плоской поверхности к последующей операции притирки – для достижения высоких показателей шероховатости и точности обработки. Схема шлифования получила применение в производстве, однако в теоретическом плане изучена не достаточно, что не позволяет в полной мере оценить ее технологические возможности.

Отличительной особенностью этой схемы шлифования является сложность кинематики формообразования торцевой поверхности кольца, т.к. сьем материала и формирование шероховатости поверхности происходит в результате сложения трех кинематических движений: вращения кольца со скоростью $V_{\text{дет}}$, вращения круга со скоростью $V_{\text{кр}}$ и врезной (радиальной) подачи круга со скоростью $V'_{\text{дет}}$ [89; 102; 152]. Для анализа схемы рассмотрены закономерности формирования шероховатости поверхности в результате сложения двух вращательных движений детали и круга (рис. 2.3). Параметр шероховатости поверхности R_{max} определяется из условия (рис. 2.4):

$$2 \cdot R_{\text{max}} \cdot \text{tg} \gamma \cdot n = B, \quad (2.1)$$

где γ – половина угла при вершине режущего зерна;

$n = k_0 \cdot B \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau$ – количество зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности;

k_0 – поверхностная концентрация зерен, шт./м²;

B – ширина рабочей части круга, м;

$\tau = B / V_{\text{дет}}$ – время формирования шероховатости поверхности, с.

После преобразований зависимости (2.1), получено:

$$R_{\text{max}} = \frac{1}{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot k_0 \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}. \quad (2.2)$$

В шлифовальном круге зерна выступают над уровнем связки на различную высоту. В первом приближении можно принять равномерный закон выступания, т.е. когда на каждом уровне находится одинаковое количество зерен. Тогда справедливо соотношение $k_0 = k \cdot R_{\text{max}} / b$, где k – поверхностная концентрация зерен, шт./м²; b – максимальная высота выступания зерен над уровнем связки круга, м.

Профессор Резников А. Н. [1] предложил расчетные зависимости для определения параметров: $k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \pi \cdot \bar{X}^2}$; $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$, где m – объемная концентрация алмазного круга (для концентрации 50 %; 100 %; 150 % объемная концентрация алмазного круга соответственно равна: 50; 100; 150); $\bar{X}$ – зернистость круга, м.

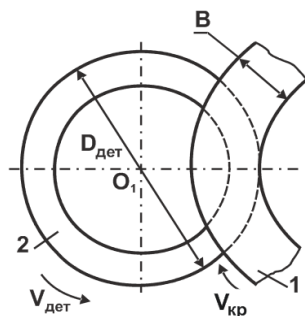


Рис. 2.3. Расчетная схема шлифования торцом круга (1) торца кольца (2)

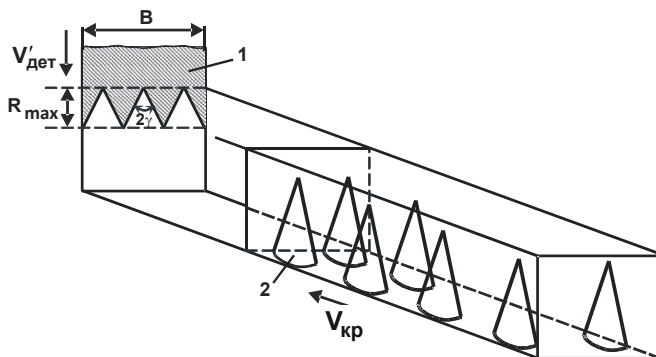


Рис. 2.4. Схема формирования шероховатости плоской поверхности при врезном шлифовании торцом круга

Условные обозначения: 1 – профиль поперечного сечения обрабатываемой детали; 2 – круг.

Преобразуя зависимость (2.2), получено:

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{100\pi \cdot \bar{X}^3}{3 \cdot m \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}}. \quad (2.3)$$

Как видно, наибольшее влияние на параметр шероховатости поверхности $R_{\max}$ оказывает зернистость круга $\bar{X}$. Уменьшить параметр шероховатости поверхности $R_{\max}$ можно уменьшением $\bar{X}$ и увеличением m , γ , $V_{\text{кр}}$ и $\tau = B/V_{\text{дет}}$ (увеличением B и уменьшением $V_{\text{дет}}$):

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{100\pi \cdot \overline{X^3} \cdot V_{\text{дет}}}{3 \cdot m \cdot \text{tg} \gamma \cdot V_{\text{кр}} \cdot B}}. \quad (2.4)$$

Важно провести анализ условий формирования шероховатости поверхности в направлении врезной подачи круга $V'_{\text{дет}}$. В этом случае расчетная схема останется прежней, изменяется лишь время формирования шероховатости поверхности τ , которое равно $\tau = R_{\max} / V'_{\text{дет}}$. Тогда, исходя из зависимости (2.3), получено:

$$R_{\max} = \sqrt[3]{\frac{100\pi \cdot \overline{X^3} \cdot V'_{\text{дет}}}{3 \cdot m \cdot \text{tg} \gamma \cdot V_{\text{кр}}}}. \quad (2.5)$$

Необходимо обозначить время формирования шероховатости поверхности в направлении скорости $V_{\text{дет}}$ через τ_0 , а время формирования шероховатости поверхности в направлении скорости $V'_{\text{дет}}$ – через τ_1 . Если $\tau_1 > \tau_0$, то определяющим в формировании шероховатости будет вращательное движение детали. Если $\tau_1 < \tau_0$, то наоборот, определяющим будет движение врезной подачи (по нормали к обрабатываемой поверхности).

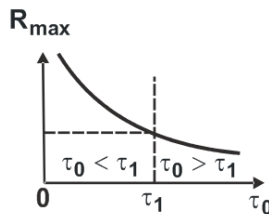


Рис. 2.5. Зависимость параметра шероховатости поверхности $R_{\max}$ от времени τ

Графически зависимость параметра шероховатости поверхности $R_{\max}$ от времени τ показана на рис. 2.5. На участке $\tau_1 > \tau_0$ параметр $R_{\max}$ больше, чем на участке $\tau_1 < \tau_0$. Следовательно, для того чтобы уменьшить параметр $R_{\max}$ необходимо выполнить условие $\tau_1 < \tau_0$ или

$$\frac{R_{\max 1}}{V'_{\text{дет}}} < \frac{B}{V_{\text{дет}}}, \text{ где параметр } R_{\max 1} \text{ определяется зависимостью (2.5).}$$

Поскольку, на участке $\tau_1 < \tau_0$ параметр шероховатости поверхности $R_{\max}$ не зависит от параметров B , $V_{\text{дет}}$, шлифование можно производить торцом круга шириной $B \geq D_{\text{дет}}$. Обрабатываемое кольцо при этом может не вращаться.

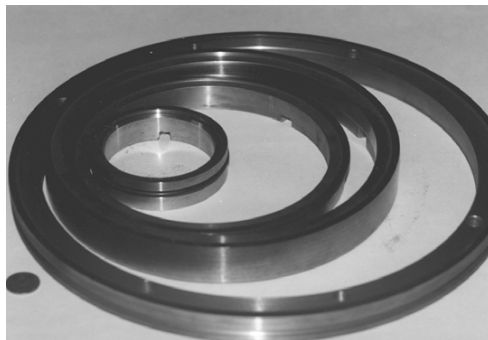


Рис. 2.6. Кольца торцовых уплотнений

Приведенные результаты теоретических исследований положены в основу создания промышленной высокоэффективной технологии алмазно-абразивной обработки рабочих поверхностей торцовых уплотнений (выполненных в виде колец) из композиционного материала "твердый сплав "Релит" – медь" (рис. 2.6). Ниже приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса шлифования торцовой поверхности вращающегося кольца торцом алмазного круга.

2.3. Экспериментальные исследования технологии электроэрозионной правки торцовых алмазных кругов на металлических связках

Исследования проводились на внутришлифовальном станке. Обрабатываемое кольцо (рис. 2.3) крепилось в патроне станка и в процессе шлифования совершало вращательное движение. Алмазный круг формы 12A2 45° 150×10×3 устанавливался на шпинделе станка на специальную двухступенчатую втулку и совершал в процессе шлифования вращательное и поступательное (в продольном направлении) движения. Обработка производилась по упругой схеме с фиксированным радиаль-

ным усилием [100]. Алмазный круг по отношению к обрабатываемой детали устанавливался таким образом, чтобы вся ширина рабочей поверхности круга В участвовала в резании.

Испытывались алмазные круги на металлических связках М1-01, М2-01, зернистостью АС6 50/40 ... 200/160 и концентрацией 50 ... 150 %, а также алмазные круги на органической связке В2-01.

Для осуществления электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке, втулка, на которую устанавливался круг, выполнена из изоляционного материала – текстолита (рис. 2.7). Для обеспечения токоподвода к металлическому корпусу алмазного круга на втулке крепилось бронзовое кольцо, которое касалось корпуса круга. К кольцу через специальное щеточное устройство подводился положительный полюс источника технологического тока. К обрабатываемой детали через контактирующий элемент подводился отрицательный полюс источника тока. Такая схема обеспечивала электроэрозионную правку алмазного круга с целью поддержания его высокой режущей способности.

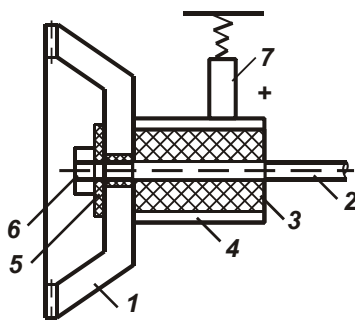


Рис. 2.7. Схема подвода электрического тока к алмазному кругу

Условные обозначения: 1 – алмазный круг; 2 – шпиндель станка; 3 – электроизоляционная втулка; 4 – бронзовое кольцо; 5 – текстолитовая (электроизоляционная) шайба; 6 – гайка; 7 – щетка.

В зону обработки подавалась охлаждающая жидкость – 3-процентный раствор Na_2NO_3 . В качестве источника технологического тока использовался специально изготовленный выпрямитель с трансформатором мощностью 1,62 кВт, формирующий постоянный ток напряжением 36 В и силой тока $I = 0 \dots 45$ А.

После установки алмазного круга на металлической связке на станок производилось его начальное вскрытие и устранение радиального биения (в пределах 0,15 мм) с помощью электроэрозионной

правки. Правящим электродом служила вращающаяся обрабатываемая деталь, установленная в патрон станка. Алмазный круг подводится до касания к обрабатываемой детали для возбуждения в межэлектродном промежутке электрических разрядов. Электроэрозионная правка производилась при оптимальной (установленной экспериментально) силе тока $I = 20 \text{ А}$ путем непрерывной подачи круга продолжительностью до 10 минут.

Контроль за состоянием режущей поверхности круга осуществлялся визуально (периодически останавливая круг) и на "слух" – при наличии биения характерна неравномерность (периодичность) электроэрозионного процесса. Об устранении биения круга можно было судить также по отсутствию "дребезжания" стрелки амперметра.

Качество правки круга оценивалось в процессе шлифования вращающейся обрабатываемой детали (правящего электрода). При наличии на обработанной поверхности отдельных периодически повторяющихся участков, процесс правки продолжался. Об отсутствии биения круга свидетельствовала однородная обработанная поверхность, не имеющая чередующихся участков.

При достаточно точной установке круга на шпинделе станка продолжительность его начальной электроэрозионной правки, как установлено экспериментально, уменьшалась и составляла менее 5 минут. Если биение значительно – до 0,3 мм (что имело место) – продолжительность правки увеличилась до 20 минут, а в ряде случаев и более.

Выбор оптимального электрического режима работы источника постоянного тока при правке производился из следующих соображений. Мощность по току N , затрачиваемая при правке круга, равна:

$$N = I \cdot U = I \cdot (U_0 - U_{кз}), \quad (2.6)$$

где I – сила тока, А;

U – напряжение, В;

U_0 – напряжение источника тока, В;

$U_{кз} = I \cdot R_0$ – напряжение режима "короткого замыкания", В;

R_0 – нагрузочное сопротивление, Ом.

После преобразования зависимости (2.6), имеем:

$$N = I \cdot (U_0 - I \cdot R_0). \quad (2.7)$$

Зависимость (2.7) носит экстремальный характер с увеличением силы тока I . Для определения экстремального значения $I_{\text{экстр}}$ следует взять первую производную от функции N по силе тока I и полученное выражение приравнять к нулю. В результате получено:

$$I_{\text{экстр}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_0}{R_0} = \frac{1}{2} \cdot I_{\text{кз}}, \quad (2.8)$$

где $I_{\text{кз}}$ – сила тока режима "короткого замыкания", А.

Вторая производная $N'' = -2 \cdot R_0$ – отрицательная, следовательно, имеет место максимум функции N от I . Максимальное значение N_{max} определяется подстановкой зависимости (2.8) в (2.7):

$$N_{\text{max}} = \frac{I_{\text{кз}} \cdot U_0}{4} = \frac{N_{\text{кз}}}{4}, \quad (2.9)$$

где $N_{\text{кз}}$ – мощность режима "короткого замыкания".

Пример расчета:

1) для заданных значений $R_0 = 2$ Ом; $U_0 = 40$ В; имеем $I_{\text{кз}} = 20$ А; $I_{\text{экстр}} = 10$ А; $N_{\text{кз}} = 800$ Вт; $N_{\text{max}} = 200$ Вт;

2) для заданных значений $R_0 = 1$ Ом; $U_0 = 40$ В; имеем: $I_{\text{кз}} = 40$ А; $N_{\text{кз}} = 1600$ Вт; $N_{\text{max}} = 400$ Вт.

Результаты расчетов приведены на рис. 2.8. Оптимальное значение силы электрического тока $I_{\text{экстр}}$ следует выбирать из условия максимального использования мощности источника технологического тока, т.е. $N_{\text{кз}}$. Тогда из условия $I_{\text{кз}} = N/U_0$, имеем:

$$I_{\text{экстр}} = \frac{N_{\text{кз}}}{2 \cdot U_0}. \quad (2.10)$$

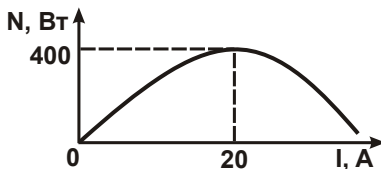


Рис. 2.8. Зависимость мощности N электроэрозионной правки круга от силы тока I

Пример расчета. Для заданных значений $N_{кз} = 1\ 600$ Вт, $U_0 = 36$ В оптимальное значение $I_{экстр}$ в соответствии с зависимостью (2.10) равно 22,2 А.

Теоретическое решение проверялось экспериментально. В электрическую цепь включалось нагрузочное сопротивление $R_0 = 1$ Ом (тарированная спираль). При силе тока $I \approx 22$ А наблюдалась наиболее интенсивная правка круга 12A2 45° 150×10×3 AC6 125 / 100 M1-01 4. При увеличении и уменьшении силы тока, начиная с $I \approx 22$ А, интенсивность правки уменьшалась, о чем свидетельствовало уменьшение интенсивности электрических разрядов. При $I \rightarrow I_{кз} = 40$ А возбуждение в межэлектродном промежутке электрических разрядов отсутствовало.

Экспериментальные значения мощности N правки практически совпали с расчетными значениями, показанными на рис. 2.8. Максимум мощности N достигался при $I = 22$ А. Расхождение расчетного и экспериментального экстремальных значений I составляет 10 %.

Следует отметить, что изменение силы тока I при проведении экспериментов обеспечивалось за счет изменения силы прижима алмазного круга к электроду (обрабатываемой детали). С увеличением силы прижима сила электрического тока I увеличивалась.

На рис. 2.9 приведены результаты экспериментальных исследований производительности электроэрозионной правки $Q_{пр}$ в зависимости от силы тока I . Производительность правки $Q_{пр}$ равна объему алмазного слоя круга, снятого в единицу времени (размерность – мм³/мин). Из графика следует, что производительность правки $Q_{пр}$ изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку максимума. Максимум $Q_{пр}$ достигается при силе тока $I = 22$ А, что соответствует теоретическим результатам и данным простого визуального наблюдения за процессом правки, как отмечалось выше.

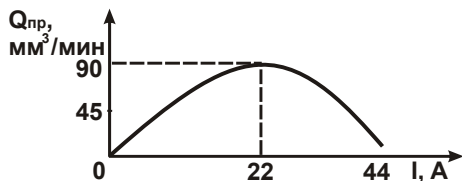


Рис. 2.9. Зависимость производительности $Q_{пр}$ электроэрозионной правки круга от силы тока I

Для проведения экспериментальных исследований была отобрана партия алмазных кругов одной характеристики в количестве 60 штук с начальным торцовым биением кругов 0,1 мм. Замеры величины биения алмазного круга (после установки его на шпиндель станка) производились с помощью индикатора.

Необходимо отметить, что при изменении I до значения $I_{\text{экстр}} = 20\text{ А}$ процесс электроэрозионной правки алмазного круга происходил практически без сошлифовывания правящего электрода (обрабатываемой детали), рис. 2.10. С увеличением силы тока, начиная с 17 А, скорость износа (сошлифовывания) электрода увеличивалась. Следовательно, при $I_{\text{экстр}} = 17\text{ А}$ межэлектродный зазор равен приблизительно максимальной высоте выступания зерен над уровнем связки алмазного круга. С увеличением силы тока зазор уменьшается, и зерна контактируют с правящим электродом, осуществляя процесс резания. Из этого можно заключить, что процесс алмазного электроэрозионного шлифования обрабатываемой детали (правящего электрода) возможен при $17\text{ А} < I < 40\text{ А}$. Для того чтобы увеличить $I_{\text{экстр}} > 20\text{ А}$ и соответственно увеличить скорость съема обрабатываемого материала необходимо в соответствии с зависимостью (2.8) уменьшить нагрузочное сопротивление R_0 . Например, при $R_0 = 0,5\text{ Ом}$ сила тока $I_{\text{экстр}}$ станет равной 40 А, что позволит максимально использовать энергию электрических разрядов для осуществления процесса алмазного электроэрозионного шлифования.

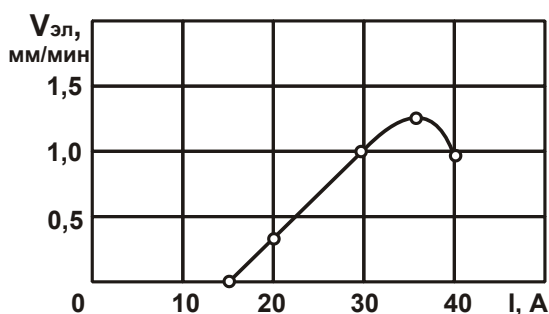


Рис. 2.10. Зависимость линейной скорости съема материала электрода $V_{\text{эл}}$ при правке от силы тока I

Сила прижатия круга к обрабатываемой детали P при шлифовании по упругой схеме является основным параметром процесса, определя-

ющим условия механического взаимодействия режущих зерен и связи круга с обрабатываемым материалом, а при алмазном электроэрозионном шлифовании – определяющим дополнительно условия протекания процесса электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке.

Из рис. 2.8 следует, что с увеличением силы тока I мощность N процесса электроэрозионной правки алмазного круга изменяется по экстремальной зависимости. В пределах $0 < I < 20\text{A}$ мощность N увеличивается, а при дальнейшем увеличении силы тока I , наоборот, уменьшается до нуля. Изменение силы тока I обеспечивается за счет изменения толщины зазора между алмазным кругом и правящим электродом (в данном случае обрабатываемой деталью) путем изменения силы прижатия круга к обрабатываемой детали. Чем больше эта сила, тем меньше толщина межэлектродного зазора и больше сила тока I .

При $I > 20\text{ A}$ мощность N процесса электроэрозионной правки уменьшается, что ведет к снижению производительности процесса правки (рис. 2.9). Следовательно, с увеличением силы прижима алмазного круга к обрабатываемой детали интенсивность электроэрозионной правки снижается, и процесс алмазного электроэрозионного шлифования мало чем отличается от обычного алмазного шлифования.

Опытами установлено, что при $I > 35\text{ A}$ в зоне резания практически отсутствуют электрические разряды, т.е. отсутствует процесс электроэрозии. Из этого можно заключить, что сила прижатия круга к детали при алмазном электроэрозионном шлифовании должна изменяться в определенных пределах. Учитывая, что между силой тока I и силой прижатия круга к детали P в процессе алмазного электроэрозионного шлифования существует вполне однозначная связь, управление процессом шлифования можно осуществлять путем поддержания во времени заданного значения P или I . В первом случае необходимо использовать упругую схему шлифования с фиксированной силой прижатия круга к детали P . Во втором случае можно использовать шлифование с "ручной" подачей, например, на рассматриваемом внутришлифовальном станке, осуществляя "вручную" продольную подачу круга, определяющую силу прижатия круга к детали.

Данная схема весьма эффективна при кратковременном процессе шлифования, каким является процесс шлифования одного кольца, закрепленного в патроне внутришлифовального станка (съем припуска величиной $0,1 \dots 0,15\text{ мм}$ происходит в течение $3 \dots 5\text{ с}$). По данной схеме

можно обеспечить плавное касание круга с обрабатываемой деталью (без удара), чего трудно добиться при частой установке обрабатываемых колец в условиях обычного шлифования по упругой схеме.

Как показано выше, изменить электрическую характеристику $N-I$ можно за счет изменения нагрузочного сопротивления R_0 в электрической цепи. Чем меньше R_0 , тем больше экстремальные значения силы тока I и мощности процесса электроэрозионной правки N . Увеличение экстремального значения I позволяет увеличить силу прижатия круга к детали и соответственно производительность обработки. Таким образом, на основе проведенных экспериментальных исследований определены технологические возможности увеличения производительности алмазного электроэрозионного шлифования.

2.4. Экспериментальные исследования производительности обработки и износостойкости алмазного торцового круга при шлифовании

Экспериментальные исследования осуществлялись на установке, созданной на базе внутришлифовального станка, по схеме шлифования, описанной в п. 2.3. Шлифовались рабочие торцовые поверхности уплотнительных колец из композиционного материала на основе релита. Величина линейного съема материала с одной детали во время проведения опыта составляла 2 мм, т.е. в ходе проведения опыта снимался весь релитовый слой кольца [92; 150].

Испытывались алмазные круги формы 12A2 45° 150×10×3×32 разных характеристик на металлической связке М1-01 и органической связке В2-01 производства Полтавского алмазного завода. Алмазные круги на металлической связке М1-01 перед каждым опытом подвергались электроэрозионной правке с целью устранения биения и качественного вскрытия алмазного слоя круга. Правку производили до тех пор, пока не достигали высокого качества поверхности детали, шлифованной данным кругом (отсутствие следов вибраций и достижение однородной поверхности).

На рис. 2.11 приведены графики, показывающие изменение производительности обработки Q с течением времени шлифования τ . Наибольшая производительность обработки имеет место при шлифовании алмазным кругом на металлической связке М1-01 с его непрерывной

электроэрозионной правкой, т.е. при алмазном электроэрозионном шлифовании. С течением времени обработки производительность незначительно уменьшалась, затем стабилизировалась.

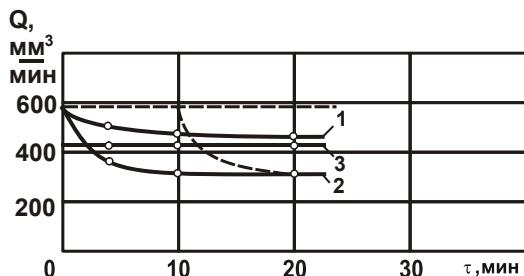


Рис. 2.11. Зависимость производительности обработки от времени шлифования

Условия обработки: алмазные круги 12A2 45° 150×10×3×32 AC6 100/80 4 на связках: 1 – M1-01(с электрическим током); 2 – M1-01 (без электрического тока); 3 – B2-01; $V_{кр} = 28$ м/с; $V_{дет} = 30$ м/мин; $P_{уд} = 70$ Н/см²; $I = 30$ А; СОЖ – 3-процентный раствор Na_2NO_3 .

При шлифовании алмазным кругом на металлической связке M1-01 без использования электроэрозионной правки в процессе шлифования производительность обработки так же с течением времени уменьшалась, затем стабилизировалась. Однако стабилизация происходила при меньшей производительности обработки. Следовательно, применение непрерывной электроэрозионной правки алмазного круга позволяет повысить производительность обработки.

Проводились экспериментальные исследования шлифования с периодической электроэрозионной правкой алмазного круга на металлической связке M1-01. Как следует из рис. 2.11, с течением времени обработки производительность уменьшается от исходного максимального значения (после правки) до значения, соответствующего производительности шлифования без правки. Зависимость $Q - \tau$ подчиняется периодической функции с периодом, определяемым временем между правками алмазного круга. Установлено, что продолжительность правки круга зависит от времени между правками. Между указанными параметрами существует пропорциональная связь. Чем больше время между правками, тем продолжительнее процесс правки круга.

Производительность шлифования алмазным кругом на органической связке B2-01 с течением времени обработки практически остается

постоянной и по уровню занимает промежуточное положение между производительностью шлифования алмазным кругом на металлической связке с применением непрерывной электроэрозионной правки и производительностью шлифования тем же кругом без применения электроэрозионной правки.

Необходимо отметить, что алмазный круг на органической связке В2-01 после установки его на станок не требует правки, характеризуется высокой режущей способностью. Об этом свидетельствует высокое качество обработанной поверхности – отсутствие следов вибраций, неоднородной поверхности (чередующихся участков). Приработка круга занимает весьма непродолжительное время.

Заслуживает внимания еще один важный факт. В ходе проведения экспериментальных исследований установлено, что при относительно небольшом биении алмазного круга на металлической связке М1-01 (до 0,1 мм) возможна подготовка круга к работе без применения электроэрозионной правки. Достаточно использовать механическую правку, осуществляемую путем шлифования релитовых колец. Для того чтобы устранить биение круга, необходимо сошлифовать релитовый слой толщиной до 100 мкм и более, т.е. прошлифовать 30 – 80 релитовых колец (толщина релитового слоя кольца составляет 2 мм).

Опытами установлено, что продолжительность электроэрозионной правки значительно меньше, чем механической. Биение круга величиной 0,1 мм с использованием электроэрозионной правки можно устранить за 5 – 10 минут, тогда как с использованием механической правки – более чем за один час.

Были проведены опыты по шлифованию алмазным кругом на более прочной металлической связке М2-01. Механической правкой не удалось устранить биение данного круга. Продолжительность электроэрозионной правки до устранения биения величиной 0,15 мм составила около 2-х часов. Однако при этом не удалось обеспечить качественную правку. После шлифования на обработанной поверхности наблюдались чередующиеся участки, свидетельствующие о неоднородности поверхности и низком качестве обработки, неприемлемом для рассматриваемой технологии обработки релитовых колец. Таким образом, чрезвычайно высокие прочностные свойства алмазного круга на металлической связке М2-01 в данном случае реализовать не удалось в связи с проблемой качественной правки алмазного круга. Возможно, при более длительной электроэрозионной правке можно обеспечить более высо-

кую режущую способность алмазного круга и добиться требуемого качества обработки, однако, это снижает производительность за счет увеличения продолжительности правки. Поэтому в исследованиях ограничились изучением технологии шлифования алмазными кругами на менее прочной металлической связке М1-01 и органической связке В2-01, которые обеспечивали протекание стабильного процесса шлифования.

На рис. 2.12 показан характер изменения производительности обработки Q в зависимости от зернистости круга. С увеличением зернистости производительность обработки непрерывно увеличивается, что является важным фактором интенсификации процесса шлифования. Производительность шлифования алмазным кругом на органической связке В2-01 больше производительности шлифования алмазным кругом на металлической связке (без применения электроэрозионной правки) и меньше производительности алмазного электроэрозионного шлифования (кривая 1 на рис. 2.12) во всем исследуемом диапазоне изменения зернистости круга.

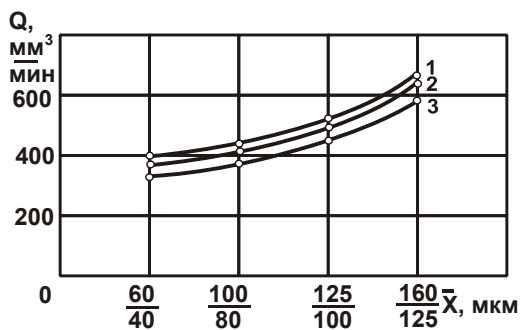


Рис. 2.12. Зависимость производительности обработки Q от зернистости

Условия обработки: алмазные круги 12A2 45° 150×10×3×32 AC6 4 на связках: 1 – М1-01 (с электрическим током); 2 – В2-01; 3 – М1-01 (без электрического тока): $V_{кр} = 28$ м/с; $V_{дет} = 30$ м/мин; $P_{уд} = 70$ Н/см²; $I = 30$ А; $\tau = 4$ мин; СОЖ – 3-процентный раствор Na_2NO_3

Для обоснования оптимальных условий обработки произведена оценка износостойкости алмазных кругов. На рис. 2.13 показано количество колец, отшлифованных одним алмазным кругом до его полного износа при съеме припуска величиной 0,15 мм. Как видно, износостойкость алмазного круга на металлической связке М1-01 почти на порядок больше износостойкости алмазного круга на органической связке В2-01.

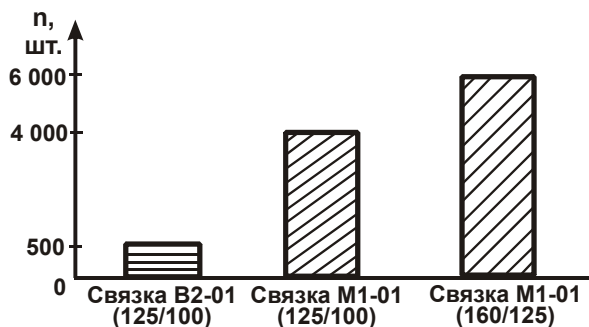


Рис. 2.13. Влияние типа связки алмазного круга
12A2 45° 150×10×3×32 AC6 4 на количество
обработанных колец до полного износа круга

Условия обработки: $V_{кр} = 28 \text{ м/с}$; $V_{дет} = 30 \text{ м/мин}$; $P_{уд} = 70 \text{ Н/см}^2$; СОЖ – 3 процентный раствор Na_2NO_3

С увеличением зернистости алмазного круга на металлической связке его износостойкость увеличивается. Этим доказана эффективность применения крупнозернистых алмазных кругов, которые, наряду с увеличением производительности обработки, обеспечивают снижение износа.

2.5. Исследование качества обработки при торцовом алмазном шлифовании

Как известно, наибольшее влияние из характеристик алмазного круга на параметр шероховатости поверхности R_a оказывает зернистость круга. В связи с этим, проведена серия экспериментов по установлению связи шероховатости обработанной поверхности с зернистостью алмазного круга [88; 150].

Исходя из рис. 2.14, с увеличением зернистости алмазного круга в пределах 60/40 ... 200/160, параметр шероховатости поверхности R_a непрерывно увеличивается. Наибольшие значения параметра R_a достигаются при шлифовании алмазным кругом на металлической связке М1-01 с применением непрерывной правки. В этом случае обеспечивается наибольшее выступание алмазных зерен над уровнем связки круга. С одной стороны, как показано в п. 2.4, это создает условия повышения производительности обработки за счет более глубокого внедрения ре-

жущих зерен в обрабатываемый материал. С другой стороны, это ведет к увеличению глубин рисок–царапин на обработанной поверхности и соответственно увеличению параметра шероховатости поверхности R_a . Данная закономерность справедлива, если сравнивать зависимость 1 (рис. 2.14) с зависимостями 2 и 3. Если сравнивать зависимости 2 и 3 между собой, то данное объяснение не правомочно.

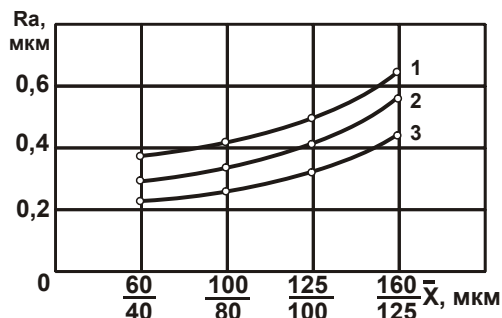


Рис. 2.14. Зависимость параметра шероховатости поверхности R_a от зернистости алмазных кругов 12A2 45° 150×10×3×32 AC6 4

Условия обработки: алмазные круги на связках: 1 – М1-01 (с электрическим током); 2 – М1-01 (без электрического тока); 3 – В2-01: $V_{кр} = 28$ м/с; $V_{дет} = 30$ м/мин; $P_{уд} = 70$ Н/см²; $I = 30$ А; $\tau = 4$ мин; СОЖ – 3 процентный раствор Na_2NO_3 .

Например, алмазный круг на органической связке В2-01, исходя из рис. 2.12, обеспечивает более высокую производительность обработки по сравнению с алмазным кругом на металлической связке М1-01 при шлифовании без применения непрерывной электроэрозионной правки. Очевидно, этот алмазный круг должен обеспечить и большую высоту микронеровностей на обработанной поверхности. Однако, наоборот, большую высоту микронеровностей обеспечивает алмазный круг на металлической связке. Следовательно, в данном случае фактор "остроты" зерен и высоты выступления их над уровнем связки не является определяющим. Существует другой, более существенный фактор, определяющий аномальную закономерность. Органическая связка допускает "утопание" в нее алмазных зерен под нагрузкой в процессе шлифования. Разновысотное выступание зерен над уровнем связки увеличивает количество одновременно работающих зерен и уменьшает глубины внедрения зерен в обрабатываемый материал. Следовательно, уменьшается параметр шероховатости поверхности R_a , а за счет увеличения количе-

ства одновременно работающих зерен – увеличивается производительность обработки. Здесь из двух противоположно действующих факторов – количества одновременно работающих зерен и глубин внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал – определяющим является первый, который не позволяет уменьшить производительность обработки за счет явного уменьшения глубин внедрения зерен в обрабатываемый материал и, соответственно, уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a . Причем, этот фактор настолько значителен, что нивелирует эффект, создаваемый при шлифовании алмазным кругом на металлической связке в связи с затуплением зерен и уменьшением по этой причине глубин их внедрения в обрабатываемый материал и параметра шероховатости поверхности R_a .

Таким образом, алмазные круги на органической связке В2-01 обладают важным свойством "утопания" зерен в связку, что создает эффект обработки, выражающийся в повышении производительности обработки и уменьшении параметра шероховатости поверхности R_a .

Структура композиции "твердый сплав "Релит" – медь" представляет собой вольфрамовый каркас, поры которого заполнены медью (рис. 2.15). Медь и вольфрам практически не растворяются друг в друге 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.



Рис. 2.15. Микроструктура композиции
"твердый сплав "Релит" – медь"

Для определения фазового состава проводились рентгеновские съемки на дифрактометре Дрон-2,0 в излучении хромового анода обработанной поверхности и поверхности на глубине 5 мкм шлифованного образца (кольца). Условия шлифования соответствовали приведенным на рис. 2.13 для алмазного круга зернистостью 125/100 АС6 на металлической связке М1-01. Дифрактограммы записывались автоматически при непрерывном вращении образца и счетчика. На дифрактограммах исследуемых поверхностей выявляются линии только WC и Cu. Линии достаточно сильные и идентифицируются уверенно. Интенсивность дифракционных линий обработанной поверхности меньше, что объясняется различной чистотой поверхности.

Измеренная микротвердость H образца при нагрузке 100 г составляет 12 268 Н/мм², а на глубине 5 мкм от обработанной поверхности образца $H = 10\,623$ Н/мм².

Остаточные ориентированные напряжения σ в образце 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 композиционном материале показал наличие растягивающих напряжений в карбидной фазе: $\sigma = +244,3$ Н/мм²; в меди напряжения равны нулю.

2.6. Условия снижения температуры резания при шлифовании

Для расчета температуры резания при шлифовании следует воспользоваться аналитической зависимостью, полученной проф. Якимовым А. В. [169; 171; 172]:

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{\lambda \cdot c \cdot \rho}}, \quad (2.11)$$

где $q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{F}$ – плотность теплового потока, характеризующего количество теплоты, проходящей через единицу поверхности обрабатываемой детали (кольца) в единицу времени, Вт/м²;

P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

F – площадь контакта круга с обрабатываемым материалом, м^2 ;
 τ – время контакта фиксированной точки, расположенной на поверхности обрабатываемого кольца, с кругом, с;
 $V_{\text{дет}}$ – скорость детали (кольца), м/с ;
 λ – коэффициент теплопроводности материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;
 c – удельная теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;
 ρ – плотность обрабатываемого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Время контакта фиксированной точки вращающегося обрабатываемого кольца с торцом круга τ определяется [88]:

$$\tau = \tau_1 + \tau'_0, \quad (2.12)$$

где τ_1 – время, в течение которого срезается слой припуска толщиной t , равной глубине шлифования и определяемой зависимостью:

$$t = V'_{\text{дет}} \cdot \bar{\tau} = V'_{\text{дет}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{дет}} - L}{V_{\text{дет}}}, \quad (2.13)$$

$D_{\text{дет}}$ – диаметр обрабатываемого кольца, м ;
 $\bar{\tau}$ – время одного вращения кольца, с;
 L – длина дуги контакта круга с кольцом, м .

По сути, параметр τ_1 определяет время формирования шероховатости поверхности в направлении скорости $V'_{\text{дет}}$. Толщины срезов отдельными зернами в данном случае больше параметра шероховатости поверхности R_{max} .

Время τ'_0 равно $\tau'_0 = \tau_0 - \tau_1$, где $\tau_0 = L / V_{\text{дет}}$. В течение времени τ'_0 происходит съем обрабатываемого материала режущими зернами с толщинами срезов, равными параметру шероховатости поверхности R_{max} . Из этого можно заключить, что в течение времени τ_1 режущие зерна испытывают большие нагрузки, чем в течение времени τ'_0 .

С учетом сказанного, зависимость (2.11) можно представить:

$$\theta = q_1 \cdot \sqrt{\frac{2\tau_1}{\lambda \cdot c \cdot \rho}} + q'_0 \cdot \sqrt{\frac{2\tau'_0}{\lambda \cdot c \cdot \rho}}, \quad (2.14)$$

где $q_1 = \frac{P'_z \cdot V_{кр}}{L_1 \cdot b} \approx \frac{\sigma \cdot Q}{L_1 \cdot b} = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot V'_{дет}}{L_1}$ – плотность теплового потока,

возникающего при шлифовании на участке контакта круга с обрабатываемым кольцом длиной $L_1 = V_{дет} \cdot \tau_1$;

σ – условное напряжение резания, Н/м²;

Q – производительность обработки, м³/с;

b – ширина торцевой поверхности кольца, м;

$q'_0 = \frac{P'_z \cdot V_{кр}}{(L - L_1) \cdot b} \approx \frac{P'_y \cdot f \cdot V_{кр}}{(L - L_1) \cdot b} = p \cdot f \cdot V_{кр}$ – плотность теплового потока,

возникающего при шлифовании на участке контакта круга с обрабатываемым кольцом длиной $(L - L_1)$;

L – суммарная длина дуги контакта круга с обрабатываемым кольцом;

P'_z , P'_y , p – составляющие тангенциальной и радиальной сил резания, а также удельное давление, возникающее на участке контакта круга с обрабатываемым кольцом длиной $(L - L_1)$;

f – коэффициент трения круга с обрабатываемым материалом.

Зависимость (2.14) состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое определяет температуру шлифования, образующуюся на участке длиной L_1 (условно – на участке резания). Второе слагаемое определяет температуру шлифования, образующуюся на участке длиной $(L - L_1)$ (условно – на участке трения круга с кольцом). Очевидно, для уменьшения температуры шлифования θ необходимо уменьшить или исключить второе слагаемое зависимости (2.14). Это достигается за счет уменьшения времени $\tau'_0 \rightarrow 0$ и длины L (ширины рабочей части круга).

Как следует из зависимости (2.13), уменьшение L приводит к увеличению глубины шлифования t и толщин срезов отдельными зернами круга на участке длиной L_1 . Это, в свою очередь, приводит к уменьшению условного напряжения резания σ и первого слагаемого зависимости (2.14). Таким образом, уменьшая длину дуги контакта круга с обрабатываемым кольцом до значения $L \rightarrow L_1$, можно существенно уменьшить температуру шлифования θ . Оптимальное значение длины контакта L_1 (оптимальной ширины рабочей части круга B) определяется из зависимости:

$$L_1 = V_{\text{дет}} \cdot \tau_1 = V_{\text{дет}} \cdot \frac{R_{\text{max}}}{V'_{\text{дет}}}. \quad (2.15)$$

Из зависимости (2.15) следует, что длина L_1 определяется параметром R_{max} и отношением $V_{\text{дет}} / V'_{\text{дет}}$. Чем больше эти величины, тем больше должна быть длина L_1 (ширина рабочей части круга).

Анализируя зависимость (2.14), нетрудно видеть увеличение температуры шлифования θ с увеличением скорости круга $V_{\text{кр}}$, входящей во второе слагаемое зависимости. Этот неблагоприятный фактор, опять же, можно устранить, исключая второе слагаемое ($\tau'_0 \rightarrow 0$).

2.7. Влияние ширины рабочей части торцового алмазного круга на показатели шлифования

Из зависимости (2.13) следует, что с увеличением длины дуги контакта круга с обрабатываемым кольцом L происходит уменьшение глубины шлифования t . Это приводит к уменьшению толщин срезов отдельными зернами круга, а также нагрузок, действующих на зерна, и износу зерен. Следовательно, применение алмазных торцовых кругов с увеличенной шириной рабочей части потенциально позволяет повысить производительность обработки и снизить износ кругов.

Кроме того, с увеличением ширины рабочей части круга B увеличивается время формирования шероховатости поверхности, что предполагает выполнение условия $\tau_0 > \tau_1$ (рис. 2.5) и уменьшение параметра шероховатости поверхности R_{max} .

Вместе с тем, как отмечалось в п. 2.6 и, исходя из зависимости (2.14), с увеличением ширины рабочей части круга увеличивается температура шлифования, что нежелательно с точки зрения качества обработки. Причем, последний фактор (т.е. температура шлифования) определяется главным образом длиной дуги контакта круга с обрабатываемым кольцом L (шириной рабочей части круга).

Из этого можно заключить, что с целью уменьшения температуры шлифования, ширина рабочей части круга должна быть ограничена, а регулирование производительностью, шероховатостью и другими показателями обработки должно производиться за счет варьирования остальными параметрами процесса шлифования.

С этой целью проведены экспериментальные исследования торцевого шлифования алмазным кругом формы 12A2 45° 200×20×5 AC6 100/80 M1-01 4, характеризующимся увеличенным диаметром и шириной рабочей части.

Опыты проводились с применением периодической электроэрозионной правки круга. После установки круга на станок, биение круга составило 0,25 мм. Биение было устранено в течение 40 минут с применением электроэрозионной правки, т.е. продолжительность подготовки данного круга к работе существенно увеличилась по сравнению с подготовкой к работе алмазного круга 12A2 45° 150×10×3.

В результате проведенных опытов установлено, что применение данного круга позволяет увеличить производительность обработки и уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a по сравнению с алмазным кругом 12A2 45° 150×10×3 той же характеристики (рис. 2.16).

Достигнутый эффект объясняется увеличением количества одновременно работающих зерен (т.к. при этом увеличивается площадь контакта круга с обрабатываемой деталью) и увеличением скорости круга вследствие увеличения его диаметра.

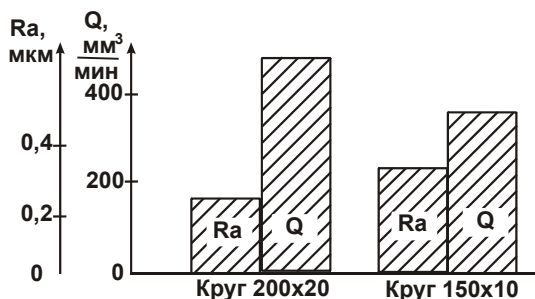


Рис. 2.16. Значения параметра шероховатости поверхности R_a и производительности обработки Q при шлифовании

Условия обработки: алмазные круги: 12A2 45° 200×20×5×32 AC6 100/80 M1-01 4; 12A2 45° 150×10×3×32 AC6 100/80 M1-01 4; $V_{\text{дет}} = 30$ м/мин; $P_{\text{уд}} = 70$ Н/см²; $\tau = 4$ мин; СОЖ – 3-процентный раствор Na_2NO_3 .

Опытами также установлено уменьшение величины образующихся заусенцев (рис. 2.17) в связи с уменьшением толщин срезов отдельными режущими зернами алмазного круга, что имеет чрезвычайно важное практическое значение [93]. Для окончательного устранения заусенцев и

формирования фасок на обрабатываемой детали после шлифования разработана эффективная технология, основанная на использовании шлифовального полотна оптимальной характеристики и реализуемая на сверлильном станке.

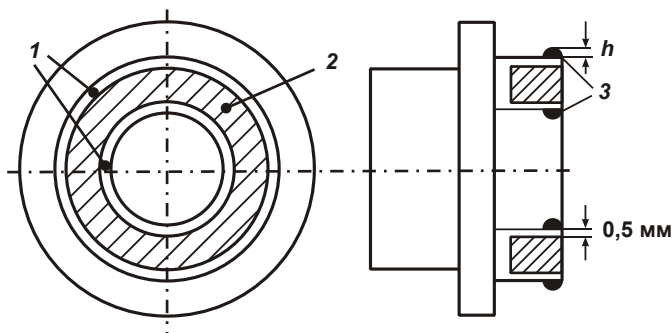


Рис. 2.17. Схема расположения заусенцев

Условные обозначения: 1 – нержавеющая сталь; 2 – композиция "твердый сплав "Релит" – медь"; 3 – заусенцы.

Вместе с тем, при шлифовании данным кругом выявлены новые закономерности, которые отсутствовали при шлифовании алмазным кругом 12A2 45° 150×10×3, – это появление следов вибраций и прижогов на обработанных поверхностях. Появление прижогов связано с увеличением температуры шлифования, что согласуется с теоретическими решениями, вытекающими из зависимости (2.14).

В ходе проведения экспериментов оценивалось влияние скорости вращения обрабатываемого кольца $V_{\text{дет}}$ на появление прижогов. Изменение $V_{\text{дет}}$ в довольно широких пределах (до 100 м/мин) не позволило устранить прижоги, хотя параметр $V_{\text{дет}}$ входит в знаменатель первого слагаемого зависимости (2.14) и его увеличение должно привести к уменьшению температуры шлифования и исключению образования прижогов. Из этого можно заключить, что в формировании температуры шлифования преобладает второе слагаемое зависимости (2.14), т.к. при шлифовании алмазным кругом с меньшей шириной рабочей части ($B = 10$ мм) прижоги отсутствовали. Следовательно, за счет уменьшения ширины рабочей части круга решается важная задача снижения температуры шлифования и исключения прижогов.

Появление следов от вибраций на обработанной поверхности кольца также связано с увеличением ширины рабочей части круга и появлением составляющей тангенциальной силы резания P_z' (по сути, силы трения), которая при шлифовании алмазным кругом с меньшей шириной рабочей части ($B = 10$ мм) отсутствовала и не приводила к возникновению вибраций.

Таким образом установлено, что применение торцового алмазного круга 12A2 45° 200×20×5 привело к ухудшению качества обработки. Поэтому для практического использования рекомендуется торцовый алмазный круг 12A2 45° 150×10×3, исключающий образование на обработанных поверхностях следов вибраций и прижогов.

2.8. Экспериментальные исследования плоского алмазного шлифования торцовых поверхностей релитовых уплотнений

Экспериментально установлено, что применение обычных абразивных кругов на операции чернового плоского шлифования торцовых рабочих поверхностей релитовых уплотнений со съемом относительно больших припусков (до 1,5 мм) оказалось малоэффективным [92; 149]. В результате интенсивного износа абразивного круга фактическая глубина шлифования была в 3 раза меньше номинальной глубины шлифования, устанавливаемой по лимбу станка (рис. 2.18). Это снижает производительность обработки.

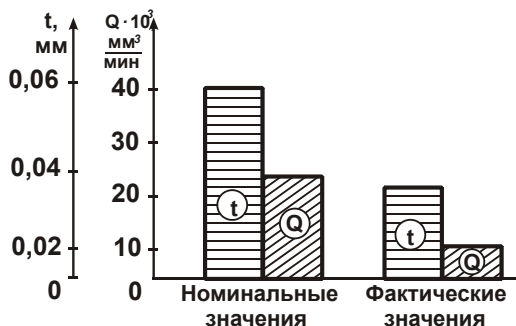


Рис. 2.18. Номинальные и фактические значения глубины шлифования t и производительности обработки Q

Условия обработки: $t = 0,06$ мм; $V_{\text{дет}} = 20$ м/мин; $S_{\text{поп}} = 0,02$ мм/ход; $V_{\text{кр}} = 34$ м/с.

Кроме того, вследствие значительных динамических нагрузок (при пакетной обработке торцовых уплотнений имел место ударный характер взаимодействия круга с обрабатываемыми уплотнениями) резко ухудшалось качество и точность обработки. Все это потребовало проведения экспериментальных исследований процесса шлифования алмазными кругами на металлических связках.

Поскольку при шлифовании на плоскошлифовальном станке использовался габаритный абразивный круг диаметром 450 мм и высотой 60 мм, для решения задачи его эффективной замены были испытаны габаритные алмазные круги на металлических связках диаметром 400 мм и высотой 40 мм (связки М1-01 и М2-01).

При установке данных алмазных кругов на станок, наблюдалось их значительное биение (до 0,3 мм). Попытки устранить такое большое биение применением механической правки не принесли положительных результатов. В связи с этим была использована технология электроэрозионной правки. Для этого плоскошлифовальный станок был модернизирован: произведена электроизоляция шпинделя станка от алмазного круга. В качестве источников технологического тока использовались специальные выпрямитель и генератор импульсного тока. Рабочее напряжение выпрямителя – $U = 25$ В, генератора – $U = 36$ В (скважность – 1,2; максимальная сила тока – $I_{\max} = 100$ А). В качестве правящего электрода использовались бруски из стали 45, которые укладывались на столе станка.

На рис. 2.19 приведены экспериментальные данные продолжительности процесса электроэрозионной правки τ и алмазных кругов на металлических связках М1-01 и М2-01 с применением выпрямителя ($U = 25$ В) и генератора импульсного тока ($U = 36$ В). Как видно, продолжительность процесса устранения биения алмазного круга на металлической связке М2-01 значительно больше М1-01.

Применение генератора импульсного тока, главным образом за счет увеличения в нем рабочего напряжения, позволяет уменьшить продолжительность электроэрозионной правки.

Устранение биения алмазного круга на металлической связке имеет исключительно важное значение при подготовке его к работе. Поэтому в процессе правки периодически проверялось состояние рабочей поверхности алмазного круга путем шлифования электрода из стали 45. Правка производилась до тех пор, пока при шлифовании не достигалось высокое качество обработанной поверхности (отсутствовали следы бие-

ния, обеспечивалась равномерная поверхность по всей площади обработанной поверхности).

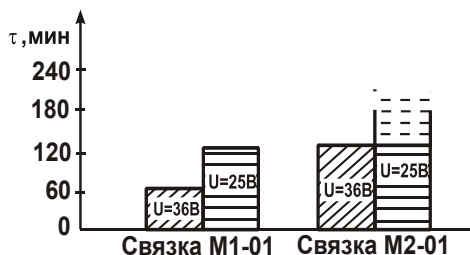


Рис. 2.19. Продолжительность электроэрозионной правки алмазных кругов 1А1 400×25 на металлических связках М1-01 и М2-01

Металлическая связка М2-01 тверже и прочнее связки М1-01. Поэтому качество правки этого круга было ниже, о чем свидетельствовали результаты исследований качества шлифованных поверхностей образцов из стали 45. Необходимо отметить, что при механической правке путем шлифования на плоскошлифовальном станке относительно больших по площади поверхностей торцовых уплотнений из твердого сплава "Релит" достигалось все же некоторое устранение радиального биения алмазного круга на связке М1-01. Алмазный круг на связке М2-01 правке не поддавался. В результате в технологической системе с течением времени создавался натяг, существенно возрастала нагрузка, что приводило к разрушению алмазоносного слоя круга (отслаиванию части алмазного слоя от корпуса круга).

При шлифовании алмазным кругом на металлической связке М1-01 с применением непрерывной электроэрозионной правки (с током) производительность обработки Q с течением времени шлифования почти не уменьшилась (рис. 2.20). При шлифовании без использования электроэрозионной правки (без тока) наблюдалось уменьшение производительности обработки во времени, однако не столь существенно.

При шлифовании алмазным кругом на более прочной металлической связке М2-01 производительность обработки с течением времени уменьшалась как с применением непрерывной электроэрозионной правки (с током), так и без нее (без тока). При этом производительность была ниже производительности шлифования алмазным кругом на связке М1-01 (рис. 2.20).

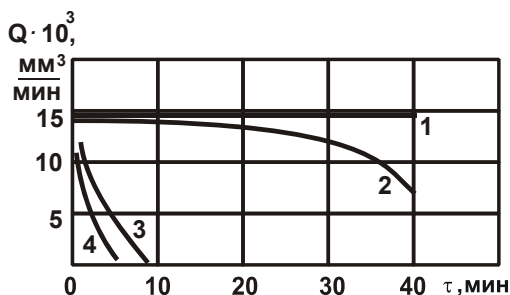


Рис. 2.20. Зависимости производительности обработки Q от продолжительности шлифования τ

Условия обработки – алмазные круги 1А1 400×25×6×203 AC6 200/160 4; $t = 0,05$ мм; $V_{\text{дет}} = 15$ м/мин; $S_{\text{поп}} = 0,02$ мм/ход; $V_{\text{кр}} = 30$ м/с; 1, 2 – металлическая связка М1-01 (1 – с током, 2 – без тока); 3, 4 – металлическая связка М2-01 (3 – с током, 4 – без тока).

Очевидно, применение алмазного круга на прочной связке М2-01 более предпочтительно с точки зрения снижения расхода алмаза, однако, данный алмазный круг обладает низкой режущей способностью и обеспечивает меньшую производительность обработки, чем алмазный круг на связке М1-01 и абразивный круг. Поэтому предпочтение следует отдать алмазному кругу на связке М1-01, который требует меньших затрат времени на правку; более длительное время сохраняет режущую способность и может быть использован как с применением, так и без применения непрерывной электроэрозионной правки. Как показали проведенные опыты, этот круг можно эффективно использовать в режиме периодической правки.

Однако при этом необходимо производить достаточно интенсивную электроэрозионную правку, чтобы режущие зерна выступали на значительную высоту, тогда стойкость алмазного круга между правками возрастет. В течение периода стойкости алмазный круг сохраняет достаточно высокую режущую способность.

На рис. 2.21 приведены экспериментально установленные зависимости производительной обработки Q и удельного расхода алмаза q , полученные при многопроходном и глубинном шлифовании. В условиях многопроходного шлифования с долевой продольной подачей, равной 0,9 высоты круга, удалось реализовать значения глубины $t = 0,1$ мм. При этом фактическое и номинальное значения глубины шлифования отличались не более 20 %. При абразивном шлифовании с номинальной

глубины шлифования $t = 0,06$ мм фактическая глубина шлифования составила $0,02$ мм (в связи с износом абразивного круга).

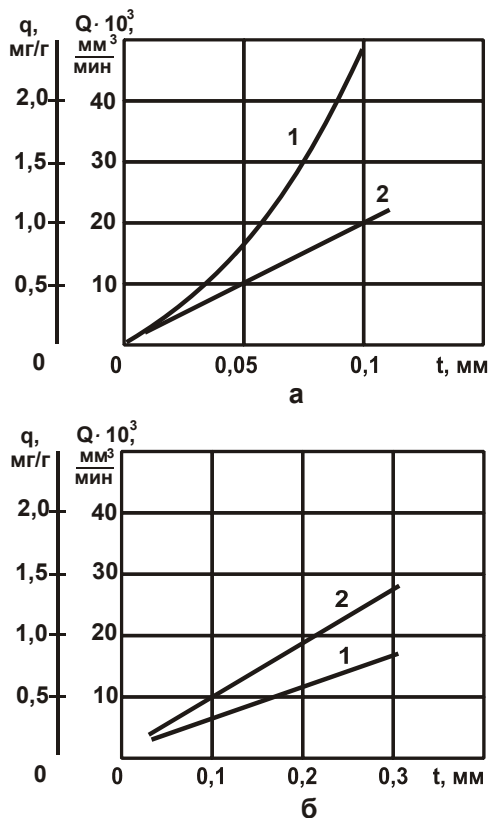


Рис. 2.21. Зависимости удельного расхода алмаза q (1) и производительности обработки Q (2) от глубины шлифования t при многопроходном (а) и глубинном (б) шлифовании

Условия обработки: алмазный круг 1А1 $400 \times 25 \times 6 \times 203$ АС6 200/160 М1-01 4; $V_{кр} = 30$ м/с; $S_{пол} = 0,02$ мм/ход; а – $V_{дет} = 15$ м/мин; б – $V_{дет} = 5$ м/мин.

Следовательно, шлифование алмазным кругом на металлической связке М1-01 позволяет увеличить фактическую глубину шлифования. Однако, абразивный круг имеет большую высоту рабочей части – 60 мм, тогда как алмазный круг – 25 мм и 40 мм. За счет этого абразивный круг имеет выигрыш по производительности до 2-х раз, но с учетом меньших значений фактической глубины шлифования производительность абразивного шлифования будет меньше.

Еще более высокую производительность обработки можно достичь при шлифовании с увеличенными глубинами резания (0,1 – 0,3 мм) и относительно небольшой скоростью детали (≈ 5 м/мин), рис. 2.21б. В этих условиях происходит уменьшение удельного расхода алмаза q .

На рис. 2.22 приведены графики изменения параметра шероховатости поверхности R_a в зависимости от глубины шлифования t . Параметр R_a мало изменяется с изменением t , хотя тенденция его увеличения с увеличением t наблюдается.

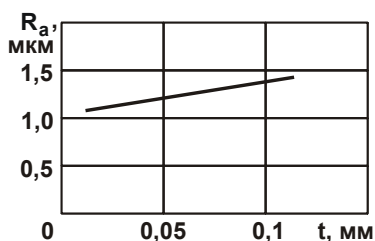


Рис. 2.22. Зависимость параметра шероховатости поверхности R_a от глубины шлифования t

Условия обработки: алмазный круг 1А1 400×25×6×203 АС6 200/160 М1-01 4; $V_{\text{дет}} = 15$ м/мин; $S_{\text{пол}} = 0,02$ мм/ход; $V_{\text{кр}} = 30$ м/с.

Необходимо отметить, что в процессе шлифования достигаются достаточно большие значения R_a . Это связано с эффектом электроэрозионной правки, обеспечивающей значительное выступание зерен над уровнем связки. При абразивном шлифовании параметр шероховатости поверхности R_a , как установлено экспериментально, несколько меньше и составляет 0,8 – 1,1 мкм. Однако после абразивного шлифования обработанная поверхность характеризуется более низкой точностью (плоскостностью) в связи с интенсивным износом абразивного круга и изменением геометрических параметров его рабочей части во времени. Размерная стойкость алмазного круга на металлической связке гораздо выше, чем абразивного круга, что делает перспективным переход на алмазную обработку.

Проводились экспериментальные исследования алмазного плоского шлифования торцовых поверхностей колец из композиции «твердый сплав "Релит" – нержавеющая сталь". Соотношение площадей твердого сплава "Релит" и стали – 1: 3,7. В этих условиях алмазный круг на метал-

лической связке М2-01 через несколько минут работы терял режущую способность даже при использовании непрерывной электроэрозионной правки. Алмазный круг на связке М1-01 с применением непрерывной электроэрозионной правки работал довольно стабильно, хотя наблюдалось засаливание круга стальной стружкой. Это требовало дополнительной периодической электроэрозионной правки, используя в качестве электродов образцы из менее прочной стали 45. В данном случае производительность обработки была несколько меньше, чем при шлифовании твердого сплава "Релит" (без стали), однако больше, чем при обычном абразивном шлифовании. Таким образом, на основе проведенных исследований доказана перспективность шлифования рабочих поверхностей торцовых уплотнений из твердого сплава "Релит" с применением алмазных кругов диаметром 400 мм на металлической связке М1-01 и периодической электроэрозионной правки.

2.9. Себестоимость обработки при шлифовании торцовых релитовых уплотнений

Как известно, стоимость алмазного круга многократно превышает стоимость абразивного круга. Поэтому об эффективности применения алмазного шлифования взамен абразивного можно судить лишь после расчета и анализа себестоимости обработки двух сравниваемых вариантов. В связи с этим, важно определить оптимальные условия обработки, при которых эффективно применение алмазных кругов 1А1 400×25×60 АС6 200/160 М1-01 4 на операции черного плоского шлифования торцовых релитовых уплотнений [87].

Для этого следует воспользоваться расчетной зависимостью для определения себестоимости обработки C , полученной на основе теоретического подхода, предложенного в работе [146]:

$$C = n_1 \cdot t_0 \cdot \left(s_1 \cdot z \cdot k + \frac{Ц}{T} \right), \quad (2.16)$$

где n_1 – количество обрабатываемых деталей;

t_0 – основное время обработки одной детали, час;

s_1 – тарифная ставка рабочего, грн/час;

z – коэффициент, учитывающий долю вспомогательного времени на обработку одной детали по отношению к основному времени;

k – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления (налоги) на заработную плату рабочего;

Ц – цена одного круга, грн;

T – период стойкости круга до его полного износа (время работы круга в металле), час.

Для двух сравниваемых вариантов абразивного и алмазного шлифования первое слагаемое (стоящее в скобках) и параметр n_1 одинаковы. Переменными являются второе слагаемое (стоящее в скобках) и основное время обработки одной детали t_0 . Для алмазного шлифования основное время обработки одной детали t_0 , как отмечалось выше, в 3 раза меньше, чем для абразивного шлифования. Поэтому при условии $C = \text{const}$ второе слагаемое $\text{Ц}/T$ должно увеличиться. Степень увеличения зависит от величины первого слагаемого. Очевидно, чем больше первое слагаемое, тем больше степень увеличения второго слагаемого.

Данное решение вытекает из преобразованной зависимости (2.16), рассматривая в ней $A_1 = s_1 \cdot z \cdot k$; $A_2 = \text{Ц}/T$:

$$\frac{C}{n_1 \cdot s_1 \cdot z \cdot k} = C_0 = t_0 \cdot \left(1 + \frac{A_2}{A_1} \right). \quad (2.17)$$

При условии $C = \text{const}$ зависимость функции $(1 + A_2/A_1)$ от основного времени обработки одной детали t_0 представлена на рис. 2.23.

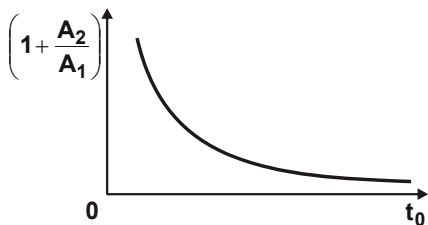


Рис. 2.23. Зависимость функции $(1 + A_2/A_1)$ от основного времени обработки одной детали t_0

С уменьшением времени t_0 функция $(1 + A_2/A_1)$ увеличивается, т.е. увеличивается параметр A_2 при заданном значении A_1 . С увеличе-

нием A_1 параметр A_2 увеличивается, так как значение $(1 + A_2 / A_1)$ неизменно. Если параметр $A_1 = 0$, то зависимость (2.17) примет вид:

$$C = n_1 \cdot t_0 \cdot \frac{\zeta}{T}. \quad (2.18)$$

С уменьшением основного времени обработки одной детали t_0 в 3 раза, при условии $C = \text{const}$, соотношение ζ / T должно увеличиться в 3 раза. Физический смысл данного решения состоит в том, что по экспериментальным данным при абразивном шлифовании соотношение

$$\frac{\zeta}{T} = \frac{150 \text{ грн}}{10 \text{ час}} = 15 \frac{\text{грн}}{\text{час}}.$$

При алмазном шлифовании соотношение ζ / T в 3 раза больше. Следовательно, с учетом того, что цена алмазного круга в 10 раз больше абразивного круга ($\zeta = 1500$ грн), его стойкость

$$T = \frac{1500 \text{ грн}}{3 \cdot 15 \text{ грн}} = 33 \text{ час, т.е. по стойкости алмазный круг должен в 3,3 раза}$$

превосходить абразивный круг.

При одинаковой производительности алмазного и абразивного шлифования стойкость алмазного круга должна быть в 10 раз больше стойкости абразивного круга.

Важно определить значение стойкости алмазного круга T , когда $A_1 > 0$. Для этого необходимо разрешить зависимость (2.16) относительно параметра T , тогда:

$$T = \frac{\zeta}{\frac{C}{n_1 \cdot t_0} - s_1 \cdot z \cdot k}. \quad (2.19)$$

Для определения стойкости алмазного круга T в зависимости (2.19) необходимо задать значение себестоимости обработки C , которое неизвестно. Поэтому следует рассмотреть случай, когда значения себестоимости абразивного и алмазного шлифования равны. Тогда C определится из зависимости (2.16) для абразивного шлифования ($s_1 = 5,6$ грн/час; $k = 1,6$; $n_1 = 30$; $t_0 = 0,3$ час; $\zeta / T = 150$ грн/час):

$$C = 30 \cdot 0,3 \cdot (26,9 + 15) = 377 \text{ грн.} \quad (2.20)$$

Подставляя в зависимость (2.19) те же значения параметров S_1 , k , z , n_1 и $t_0 = 0,1$ час, $C = 377$ грн, определена стойкость алмазного круга $T = 15,2$ час. Как видно, значения стойкости T алмазного и абразивного кругов отличаются незначительно, несмотря на то, что по стоимости алмазный круг в 10 раз дороже абразивного.

Если при $A_1 = 0$ стойкость алмазного круга $T = 33$ час, то при $A_1 = 26,9$ грн/час стойкость алмазного круга T меньше и составляет $T = 15,2$ час. Таким образом показано, что за счет первого слагаемого (стоящего в скобках) в зависимости (2.16) стойкость алмазного круга может значительно изменяться.

Например, если увеличить слагаемое A_1 в зависимости (2.20) до значения 50 грн/час (вместо 26,9 грн/час), то себестоимость абразивного шлифования будет равна $C = 585$ грн. Соответственно стойкость алмазного круга T , исходя из зависимости (2.19), равна $T = 8,92$ час, что меньше, чем для абразивного круга. Графически зависимость стойкости алмазного круга T от параметра A_1 показана на рис. 2.24.

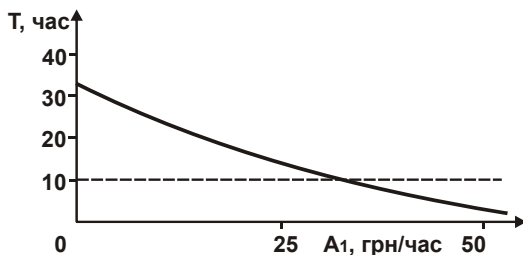


Рис. 2.24. Зависимость стойкости алмазного круга T от параметра A_1

Таким образом, расчетами установлено, что для принятых условий обработки стойкость алмазного круга (при условии $A_1 = 26,9$ грн/час) должна всего в 1,52 раза превышать стойкость абразивного круга – при одинаковой себестоимости обработки C . Если стойкость алмазного круга T будет больше, это приведет к уменьшению себестоимости обработки. Данные расчетов на основе зависимости (2.16) графически показаны на рис. 2.25. Расчетная зависимость имеет вид:

$$C = 30 \cdot 0,1 \cdot \left(26,9 + \frac{1\ 500}{T} \right). \quad (2.21)$$

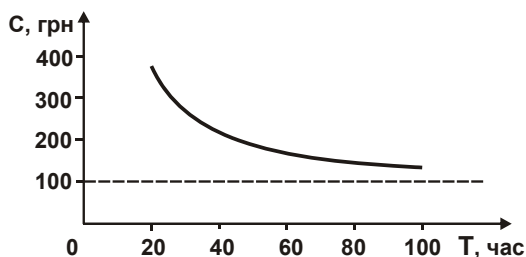


Рис. 2.25. **Зависимость себестоимости обработки C от стойкости алмазного круга T**

Как видно, при увеличении стойкости алмазного круга T с 15,2 до 100 час (т.е. в 6,57 раз) себестоимость обработки C уменьшится с 377 до 125,7 грн (т.е. в 3 раза). Наиболее существенно уменьшение себестоимости обработки C при изменении стойкости алмазного круга T в диапазоне $T = 15,2 \dots 40$ час. При дальнейшем увеличении стойкости алмазного круга T интенсивность уменьшения себестоимости обработки не столь значительна. Следовательно, для того чтобы получить эффект обработки за счет уменьшения себестоимости обработки в 2 раза, необходимо чтобы стойкость алмазного круга превышала стойкость абразивного круга в 4 раза (стойкость абразивного круга $T = 10$ час, а алмазного круга $T = 40$ час).

При условии одинаковой себестоимости обработки при алмазном и абразивном шлифовании стойкость алмазного круга, как отмечалось выше, должна лишь в 1,52 раза превышать стойкость абразивного круга до его полного износа. Здесь эффект обработки достигается за счет увеличения в 3 раза производительности алмазного шлифования.

Таким образом показано, что эффект от применения алмазного шлифования релитового слоя торцовых уплотнений обусловлен увеличением производительности обработки. При этом не следует добиваться увеличения стойкости алмазного круга до его полного износа пропорционально увеличению его цены (по отношению к абразивному кругу). Для того чтобы обеспечить одинаковую себестоимость алмазного и абразивного шлифования, достаточно относительно небольшое превышение стойкости алмазного круга над стойкостью абразивного круга. Такой вывод связан с тем, что основное время обработки одной детали t_0 (определяющее производительность обработки) оказывает значительно большее влияние на себестоимость обработки C , исходя из зависимости (2.16), чем стойкость алмазного круга T . Чем больше первое слага-

емое в зависимости, тем меньше влияние стойкости алмазного круга T на себестоимость обработки C .

В расчетах следует учитывать взаимосвязь между параметрами T и t_0 , поскольку с уменьшением t_0 (увеличением производительности обработки) стойкость алмазного круга до его полного износа T уменьшается.

Экспериментально установлено, что связь между параметрами T и t_0 подчиняется зависимости

$$T = N \cdot t_0^2, \quad (2.22)$$

где $N = \frac{T_1}{t_{01}^2};$

T_1, t_{01} – значения T и t_0 для определенных условий обработки.

Подставляя зависимость (2.22) в (2.16), имеем:

$$C = n_1 \cdot t_0 \cdot \left(A_1 + \frac{C}{N} \cdot \frac{1}{t_0^2} \right), \quad (2.23)$$

где $A_1 = s_1 \cdot z \cdot k$.

Нетрудно видеть, что себестоимость обработки C изменяется по экстремальной зависимости (проходя точку минимума) с изменением основного времени обработки одной детали t_0 . Для определения экстремального (минимального) значения t_0 следует подчинить функцию себестоимости обработки C необходимому условию экстремума, т.е. определить первую производную от C по t_0 и полученное выражение приравнять к нулю. Тогда

$$t_{0\text{экстр}} = \sqrt{\frac{C}{N \cdot A_1}}. \quad (2.24)$$

Вторая производная $C''_{t_0} = n_1 \cdot \frac{C}{N} \cdot \frac{1}{t_0^4}$ положительна. Следовательно,

имеет место минимум себестоимости обработки C . Принимая $t_{01} = 0,1$ час и $T_1 = 15,2$ час, определено значение параметра $N = 1\,520$.

Используя зависимость (2.24) и исходные данные: $C = 1\,500$ грн; $A_1 = 26,9$ грн/час; $N = 1\,520$, определено основное время обработки одной детали $t_{0_{\text{экстр}}} = 0,19$ час. Из зависимостей (2.22) и (2.23) для значения $t_{0_{\text{экстр}}} = 0,19$ час получено: $T = 54,9$ час; $C = 309,1$ грн.

Как видно, минимум функции себестоимости обработки C достигается при большем значении $t_{0_{\text{экстр}}} = 0,19$ час $> t_0 = 0,1$ час. При этом себестоимость обработки C уменьшилась от 377 до 309,1 грн.

Для случая $t_{01} = 0,1$ час; $T_1 = 40$ час получено: $t_{0_{\text{экстр}}} = 0,12$ час, $C = 190,6$ грн.

Для случая $t_{01} = 0,1$ час; $T = 100$ час получено: $t_{0_{\text{экстр}}} = 0,075$ час, $C = 120,5$ грн.

Графически данные расчетов приведены на рис. 2.26.

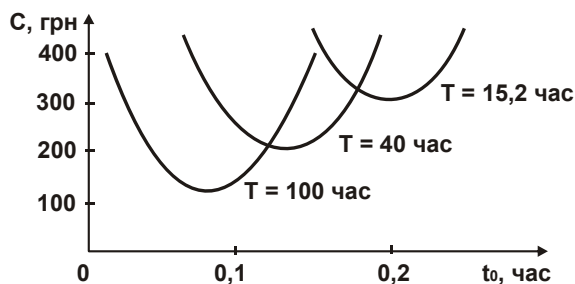


Рис. 2.26. Зависимость себестоимости обработки C от основного времени обработки одной детали t_0

Таким образом показано, что с увеличением T_1 до значения $T_1 = 100$ час (при $t_{01} = 0,1$ час) экстремальное значение $t_{0_{\text{экстр}}}$ меньше t_0 . Это свидетельствует о возможности увеличения производительности обработки при одновременном уменьшении себестоимости обработки от 125,7 грн (рис. 2.25) до 120,5 грн. (рис. 2.26). Как установлено, себестоимость обработки C изменяется по экстремальной зависимости (2.23) с изменением основного времени обработки одной детали t_0 и поэтому выбор оптимальных условий обработки необходимо производить из условия минимума себестоимости обработки C . Для выполнения оптимизационных расчетов важно знать функциональную связь между параметрами T и t_0 . В данном случае рассмотрена экспериментальная за-

висимость (2.22). Для более углубленного анализа необходимо использовать аналитические зависимости, установленные на основе математического моделирования процессов обработки.

2.10. Эффективное применение разработанной технологии алмазно-абразивной обработки релитовых торцовых уплотнений

Работы по созданию и совершенствованию технологии механической обработки рабочих поверхностей уплотнений проводились в ОАО завод "Потенциал" более 20 лет. В результате разработана и успешно функционирует высокоэффективная технология алмазно-абразивной обработки релитовых торцовых уплотнений. Съём основной части припуска релитового слоя (толщиной более 1 мм) уплотнений производится на плоскошлифовальном станке в многоместных приспособлениях с применением алмазных и абразивных кругов. Габаритные алмазные круги на металлической связке диаметром 400 мм используют в режиме алмазного электроэрозионного шлифования, а также в режиме периодической электроэрозионной правки. Экспериментально установлено, что абразивный круг при шлифовании твердого релитового слоя быстро изнашивается. Например, вследствие увеличенного износа абразивного круга фактическая глубина шлифования меньше номинальной глубины шлифования в 3 раза. Поэтому применение алмазного круга (для которого фактор "размерного износа" исключен) позволяет повысить производительность и качество обработки на операции предварительного шлифования. Доказана экономическая эффективность применения алмазного круга на металлической связке М1-01. Применение алмазного круга на металлической связке М2-01 оказалось малоэффективным в связи с потерей режущей способности алмазного круга как при обычном, так и при электроэрозионном шлифовании.

Для обеспечения высоких показателей качества (шероховатости) и точности обработки предложено после операции предварительного шлифования выполнить промежуточную операцию шлифования торцовой поверхности уплотнения торцом алмазного круга, а затем – окончательную операцию притирки с использованием алмазного порошка.

Предложенная операция шлифования торцом алмазного круга торца вращающегося кольца (уплотнения) оказалась весьма эффектив-

ной, так как существенно снижает трудоемкость последующей операции притирки, повышает производительность, экономичность и качество алмазно-абразивной обработки уплотнения в целом. Процесс торцового алмазного шлифования реализуется на внутришлифовальном станке. Обрабатываемое кольцо (уплотнение) крепится в специальном цанговом зажиме патрона станка. Алмазный круг формы 12A2 45° 150×10×3×32 крепится на шпинделе и подводится до касания с обрабатываемым кольцом с помощью механической продольной подачи внутришлифовального станка. Этот процесс шлифования, как отмечалось выше, эффективен для выполнения последующей операции притирки, однако потребовал проведения большого комплекса научно-исследовательских работ. Например, первоначально был сделан упор на применение алмазных кругов на органических связках. Эти круги могут работать в режиме самозатачивания, но с весьма большим износом. Применение алмазных кругов на более прочных металлических связках оказалось неэффективно, так как наблюдалась быстрая потеря их режущей способности во времени. Попытки использования прогрессивной технологии электроэрозионной правки алмазных кругов также первоначально успеха не имели, так как алмазные круги на органической связке обеспечивали большую производительность обработки. Проблема состояла в том, что процесс шлифования одного кольца кратковременный (3 – 6 секунд), а зона шлифования находится рядом с рабочим-шлифовщиком, который "вручную" устанавливает и убирает обрабатываемое кольцо. В результате реализовать непрерывную электроэрозионную правку алмазного круга на металлической связке невозможно, что в итоге не позволило повысить производительность обработки.

Положительное решение было найдено за счет правильной организации применения периодической электроэрозионной правки. Вначале после установки алмазного круга на станок электроэрозионной правкой устраняется его биение, затем через каждые 50 отшлифованных колец производится "подзаправка" круга продолжительностью до 40 секунд. Производительность шлифования таким кругом на 30 – 40 % была меньше производительности шлифования алмазным кругом на органической связке. Однако с учетом снижения удельного расхода алмаза до 10 раз это делало возможным эффективное применение алмазных кругов на металлической связке взамен алмазных кругов на органической связке. Окончательное решение проблемы было получено благодаря применению алмазных кругов на металлической связке М1-01 производ-

ства Полтавского алмазного завода. Эти круги оказались достаточно работоспособными даже без применения электроэрозионной периодической правки. Начальное биение круга устранялось в течение шлифования 300 – 400 колец. Производительность обработки при этом находилась на уровне производительности шлифования алмазными кругами на органической связке, а износ круга – до 10 раз меньше.

Необходимо отметить важность фактора обучения рабочих-шлифовщиков работе с алмазными кругами на металлической связке М1-01, особенно в начальный момент – после установки алмазного круга на станок, когда необходимо в процессе шлифования устранить его биение. Благодаря знанию особенностей работы этого алмазного круга удалось научить рабочего управлять процессом и главное – преодолеть психологический барьер рабочего – доказать, что при правильной организации процесса шлифования алмазные круги на металлической связке обладают значительно большими возможностями, чем другие алмазные круги. В процессе торцового шлифования обеспечивается шероховатость поверхности $R_a = 0,25 - 0,4$ мкм, существенно повышается точность (плоскостность) обработки. Съём припуска составляет 0,1 – 0,15 мкм.

Введение данной операции упрощает достижение высоких показателей обработки на окончательной операции алмазной притирки, выполняемой с использованием специальных многоместных приспособлений и специально спроектированного и изготовленного на Каунасском заводе шлифовальных станков “Нерис” вертикально-доводочного станка модели 3806Л [104]. Его конструкция состоит в следующем. На неподвижной станине установлены доводочный диск (притир), который с помощью привода получает вращательное движение со скоростью 2,68 м/с (главное движение станка), и три прижима, обеспечивающих крепление 26 колец на каждом и их прижатие к поверхности доводочного диска с давлением 100 – 200 г/см². Каждый прижим может перемещаться в вертикальном направлении независимо от других прижимов с помощью пневмоцилиндра, установленного на станке. Для обеспечения самоустановления и подъема прижима на штоке пневмоцилиндра установлен шарнир, в котором роль непосредственной шарнирной связи играют два сферических подшипника.

Известно, что для достижения высокой чистоты поверхности необходимо обеспечить такой вид относительного движения зерен и обрабатываемого кольца, чтобы абразивное или алмазное зерно при своих повторных движениях не повторяло предыдущей траектории. Поэтому ра-

бочее движение притира должно быть всегда колебательным и в простейшем случае может быть возвратно-поступательным или возвратно-вращательным. В случае применения станков специального назначения рабочее движение должно осуществляться в виде сложного циклоидального движения, являющегося результатом движения качения и скольжения или результатом сложения нескольких движений скольжения, например, движения вращения и возвратно-поступательного движения. При правильно выбранном рабочем движении обработанная поверхность будет иметь вид матовой поверхности с мельчайшей сеткой пересекающихся штрихов (представляющих собой следы движения отдельных зерен) при весьма малой высоте микронеровностей – порядка 0,07 – 0,3 мкм.

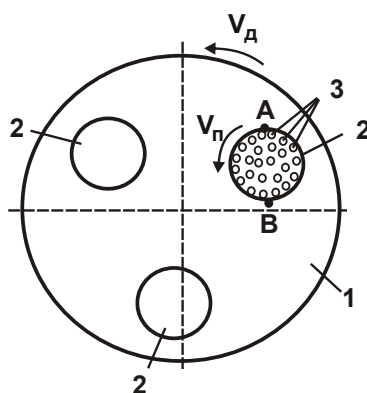


Рис. 2.27. Кинематическая схема притирки торцовых поверхностей колец

Условные обозначения: 1 – доводочный диск; 2 – прижимы; 3 – обрабатываемые кольца; V_d – скорость вращения доводочного диска; V_p – скорость вращения прижима.

В данном случае при вращении доводочного диска из-за разности скоростей в точках A и B (рис. 2.27) прижим получает вращательное движение вокруг своей оси. В результате наложения вращательных движений диска и прижима, закрепленные в прижиме обрабатываемые кольца получают сложное циклоидальное движение по поверхности доводочного диска. При этом обеспечивается трение колец практически по всей поверхности доводочного диска, что обеспечивает равномерный его износ. Механизм процесса притирки заключается в том, что абразивные зерна (в данном случае алмазный порошок АСМ 28/20) при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью кольца вдавливаются

("шаржируются") в более мягкую поверхность доводочного диска (притира) и затем, будучи закрепленными в этой поверхности, снимают тончайшие стружки с обрабатываемой поверхности. Притир в таких случаях должен изготавливаться из более мягкого материала по сравнению с обрабатываемым материалом. В данном случае доводочный диск был изготовлен из чугуна марки СЧ21–40. В качестве связывающей и смазочной жидкости применен керосин.

Обрабатываемая поверхность кольца должна быть тщательно подготовлена к операции притирки, т.к. только при минимальных припусках этот вид обработки, обеспечивающий чрезвычайно низкую производительность обработки, не потребует больших затрат времени и будет экономически выгоден.

Обычно под притирку оставляют припуск порядка 5 – 20 мкм. Если такая точность не может быть обеспечена на предыдущей операции, оставляют больший припуск – до 0,1 мм и производят сначала предварительную притирку более крупнозернистым алмазным порошком (обеспечивающим макрогеометрию), а затем окончательную притирку, в процессе которой улучшается только микрогеометрия поверхности. Снимаемый припуск на операции притирки составляет 1 – 5 мкм.

Как отмечалось выше, каждый прижим обеспечивает крепление 26 колец, т.е. одновременно на доводочном диске обеспечивается обработка 78 колец. Длительность обработки данной партии колец составляет 12 – 15 минут и зависит от состояния поверхности (шероховатости) колец, достигнутого на предыдущей операции – операции торцового алмазного шлифования. В результате притирки обеспечивается шероховатость поверхности R_a на уровне 0,1 мкм, неплоскостность обработки – менее 0,9 мкм. Расход алмазного порошка АСМ 28/20 составляет в среднем 1 500 карат на 1 000 обработанных колец.

Для гарантированного обеспечения шероховатости поверхности $R_a < 0,1$ мкм предложено операцию притирки выполнять в два перехода. На первом переходе используется более крупнозернистый алмазный порошок зернистостью АСМ 28/20 ... АСМ 22/14 для съема основной части припуска, а на втором переходе – алмазный порошок меньшей зернистости АСМ 10/7... АСМ 5/3 для окончательного формирования высокой чистоты обработки. Длительность операции притирки при этом увеличивалась до 30 минут.

После притирки следует операция по устранению заусенцев и формированию фасок на рабочих поверхностях уплотнений с помощью

специального шлифовального полотна на сверлильном станке. В результате внедрения релитовых торцовых уплотнений в электробурах межремонтных период работы увеличился в 3 – 4 раза и более. Особое значение имело место применение релитовых торцовых уплотнений для повышения надежности погружных электродвигателей серии ПЭД, с помощью которых обеспечивалось более 50 % нефти в странах СНГ. Применение релитовых торцовых уплотнений способствовало увеличению наработки на отказ погружных электродвигателей в 1,5 – 2 раза.

Релитовые торцовые уплотнения получили широкое применение при изготовлении насосов и аппаратов для различных отраслей промышленности, в том числе и предприятий пищевой промышленности. Для химически активных сред были изготовлены релитовые торцовые уплотнения, рабочие поверхности которых были выполнены из релита с хромоникелевой связкой, что значительно расширило область их применения.

Выводы к разделу 2

1. Разработана аналитическая модель формирования шероховатости плоских поверхностей деталей при алмазно-абразивной обработке, что позволило определить основные пути уменьшения высоты микронеровностей обработанных поверхностей с учетом ограничения по производительности обработки. Установлена обобщенная аналитическая зависимость для расчета шероховатости обработанной поверхности, справедливая для разных кинематических схем шлифования, которые отличаются между собой временем формирования шероховатости поверхности. Теоретически доказана возможность достижения наименьшей шероховатости обработки торцовой поверхности уплотнительного кольца путем применений схемы врезного торцового алмазного шлифования вращающегося кольца.

2. Расчетами установлено, что необходимая шероховатость обработки ($R_a = 0,1$ мкм) торцовой поверхности уплотнительного кольца достигается при использовании зернистости 28/20 и менее, т.е. при обработке свободным абразивом (алмазным порошком). В связи с этим торцовое алмазное шлифование уплотнительного кольца необходимо рассматривать как получистовую обработку, предназначенную для подготовки торцовой поверхности кольца к последующей технологической операции притирки алмазным порошком.

3. Разработана эффективная технология предварительного плоского шлифования труднообрабатываемого релитового слоя уплотнительного кольца габаритными (диаметром 400 мм) алмазными кругами на металлических связках с применением электроэрозионной правки. Технология обеспечивает повышение в 2 – 3 раза производительности обработки по сравнению с традиционным шлифованием абразивными кругами за счет высокой режущей способности алмазных кругов. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований себестоимости обработки определены оптимальные условия шлифования, при которых применение алмазных кругов на металлических связках вместо абразивных кругов экономически выгодно.

4. Разработана эффективная технология полустового торцового шлифования релитового слоя уплотнительного кольца с применением алмазных кругов на металлических связках и их периодической электроэрозионной правкой. Экспериментально определены оптимальные условия торцового шлифования и электроэрозионной правки алмазных кругов. Разработана научная методика расчета оптимальных электрических режимов электроэрозионной правки торцовых алмазных кругов на металлических связках.

5. На основе проведенных экспериментальных исследований по критерию максимальной производительности обработки окончательно обоснован оптимальный вариант технологического маршрута обработки, который включает технологические операции чернового плоского шлифования периферией алмазного круга на металлической связке, полустового шлифования торцом алмазного круга на металлической связке и окончательной притирки алмазным порошком, которая осуществляется в два этапа с применением алмазного порошка зернистостью АСМ 28/20 – 20/14 и АСМ 7/5 – 5/3 и обеспечивает выполнение требований по шероховатости и точности обработки.

6. Разработана промышленная технология прецизионной обработки торцовых поверхностей уплотнительных колец из композиционного материала на основе релита. Применяемые шлифовальные станки модернизированы для осуществления электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках. Для автоматизации крепления обрабатываемых колец на внутришлифовальном станке разработаны специальные цанговые зажимы, а на станок установлен пневматический цилиндр. Применение многоместных приспособлений для крепления колец на плоскошлифовальном станке и станке для притирки позволило существенно увеличить производительность обработки.

3. Алмазное электроэрозионное шлифование деталей с покрытиями и наплавочными материалами

3.1. Существующие подходы к шлифованию деталей с покрытиями и наплавочными материалами

Нанесение высокопрочных износостойких покрытий и наплавочных материалов на рабочие поверхности нашло широкое применение при восстановлении высокопрочных деталей машин и стало важным фактором повышения их долговечности и работоспособности, многократного использования в процессе эксплуатации.

В настоящее время номенклатура деталей, которые восстанавливаются и упрочняются покрытиями, включает сотни наименований. Это детали металлургического и горного оборудования, дорожно-строительных и сельскохозяйственных машин, автомобильного и железнодорожного транспорта и т.д. Вместе с тем, широкое применение покрытий сдерживается высокой трудоемкостью их обработки при шлифовании. Высокие показатели твердости, прочности и пластичности покрытий определяют плохую их обрабатываемость. Поэтому применение традиционных методов шлифования для их обработки неэффективно. В особой мере это относится к шлифованию порошковых покрытий высокой твердости $HRC \geq 60$, в состав которых входят Ni, Cr, Si, Fe (это обработка деталей двигателей внутреннего сгорания, буровых инструментов и т.д. с высокопрочными покрытиями). При шлифовании указанных деталей абразивный круг интенсивно изнашивается, теряет режущую способность и требует постоянной правки, что существенно снижает производительность обработки. Как показывает многолетняя практика, применение абразивного шлифования эффективно при обработке покрытий с твердостью $HRC \leq 40 \dots 45$. Например, шлифование восстановленной фаски клапана ДВС высокопрочным покрытием ПГ-10Н-01 твердостью $HRC \geq 60$ кругом из карбида кремния зеленого показали неудовлетворительные результаты. После снятия 14 ... 16 г данного материала резко возростала мощность шлифования, и процесс резания абразивным кругом прекращался, на обрабатываемой поверхности покрытий появлялись прижоги. Для усиления процесса самозатачивания режущей поверхности круга и исключения его частых правок проводилось ужесточения режимов шлифования, однако по-прежнему наблюдалось

засаливание круга срезанной стружкой, что, в конечном счете, приводило к разрушению шлифовального круга от чрезмерных контактных нагрузок.

Важные результаты исследований по абразивному шлифованию молибденовых покрытий представлены в диссертационной работе Анельчика В. Д. [6]. Автор предлагает осуществлять шлифование покрытия специально обработанным в холоде абразивным кругом. Результаты исследований выходных параметров процесса показывают преимущество нового метода шлифования. Вместе с тем отмечается, что при таком абразивном шлифовании в зоне резания развивается высокая температура, достаточная для структурных и фазовых превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала. Следовательно, разработанный технологический процесс может быть эффективно использован при чистовом абразивном шлифовании и рекомендован для шлифования других относительно непрочных покрытий, аналогичных молибденовым покрытиям.

В настоящее время при обработке высокопрочных покрытий самых различных материалов все шире используются шлифовальные круги из синтетических алмазов взамен кругов из электрокорунда и карбида кремния, которые по-прежнему остаются основным инструментом при шлифовании покрытий. Преимущества синтетических алмазов по сравнению с обычными абразивами объясняются более высокими механическими и теплофизическими свойствами алмазных зерен.

Ведущими научными организациями: Институтом сверхтвердых материалов НАН Украины, Харьковским и Одесским политехническими университетами, НПО "Ремдеталь" и другими выполнена значительная работа по исследованию и внедрению в производство новых технологий алмазного шлифования различных высокопрочных покрытий.

В Институте сверхтвердых материалов НАН Украины под руководством канд. техн. наук Рыбицкого В. А. разработаны процессы алмазного шлифования наплавленных покрытий, используемые в металлургическом производстве [129; 131].

Алмазное шлифование покрытий контактных поверхностей больших и малых конусов, чаш и воронок засыпных аппаратов доменных печей позволило повысить производительность обработки в 3 ... 5 раз при значительном улучшении состояния поверхностного слоя (табл. 3.1 [131]). Достижения такого результата стало возможным благодаря использованию специально созданных алмазных кругов на металлической

связке М1-10. Удачное сочетание свойства самозатачивания режущей поверхности круга на связке М1-10 и высокой степени удержания режущих зерен при шлифовании позволило вести обработку износостойких покрытий типа 300 25НЗСЗГ2 твердостью HRC 50 ... 55 с высокой эффективностью.

Таблица 3.1

Оптимальные режимы шлифования наплавленных контактных поверхностей больших и малых конусов, чаш и воронок засыпных аппаратов доменных печей

Тип наплавочного материала	Операция	Режим шлифования				Шероховатость обработанной поверхности R_a , мкм
		$V_{кр}$, м/с	$V_{дет}$, м/мин	$S_{отн}$	t , мм	
1	2	3	4	5	6	7
300×25МЗННЗГ2	Обработка контактных поверхностей конусов (черновая)	25 – 30	4 – 5	0,7 – 0,8	0,1 – 0,15	0,70 – 0,63
550×44НЗ4ГСР		28 – 30	2 – 3	0,6 – 0,8	0,2 – 0,3	0,80 – 0,63
450×20Б7М7В2Ф		28 – 30	2 – 3	0,6 – 0,7	0,2 – 0,25	0,80 – 0,60
Релит – мельхиор		25 – 30	3 – 3,5	0,5 – 0,6	0,25 – 0,3	0,90 – 1,20
550×44НЗ4ГСР	Обработка контактных поверхностей чаш (черновая)	25 – 30	2 – 3	0,6 – 0,7	0,1 – 0,15	0,70 – 0,80
450×20Б7М7В2Ф		28 – 30	1,5 – 2	0,6 – 0,7	0,2 – 0,25	0,70 – 0,85
450×20Б7М7В2Ф		28 – 30	1,5 – 2	0,6 – 0,7	0,15 – 0,2	0,50 – 0,80
Релит – мельхиор		25 – 30	2 – 3	0,5 – 0,7	0,2 – 0,25	0,80 – 1,0

Для поддержания высокой режущей способности алмазного круга периодически производилась его электроэрозионная правка. При этом удалялась налипшая стружка со связкой, и обнажались новые слои режущих зерен. В качестве источника технологического тока используется ИТТ–35.

Особенностью процесса шлифования поверхностей покрытий является снятие неравномерных по толщине припусков (2 ... 3 мм). Вследствие возникающих по этой причине переменных (ударных) нагрузок происходит увеличенный износ алмазного круга. Для снижения ударных нагрузок и обеспечения более равномерного их изменения во времени

обработки предложено осуществлять шлифование с относительно небольшой скоростью детали $V_{\text{дет}} = 2 \dots 3$ м/мин и увеличенной глубиной шлифования $t = 0,1 \dots 0,2$ мм. Поддержание требуемых режимов шлифования обеспечивает высокую производительность обработки при допустимых нормах расхода алмазов.

Важные результаты получены Гуцаленко О. Г. [28] при исследовании алмазного шлифования теплостойких наплавов типа 3Х2НЗ и 25Х5ФМС, обладающих твердостью HRC 46 ... 48 и получивших широкое применение в металлургической промышленности для повышения износостойкости различных деталей прокатного оборудования и, прежде всего, валков прокатных станов (прокатные валки работают в условиях больших переменных нагрузок, высоких температур и поэтому к качеству обрабатываемой поверхности предъявляют особые требования).

Благодаря использованию алмазных кругов на специальной металлической связке М1-10, работающих в режиме непрерывной электророзерозионной правки, автору удалось добиться высокоэффективной обработки покрытий с необходимым качеством поверхности валков. Важным достоинством разработанного технологического процесса явилось использование крупногабаритного сегментного алмазного круга диаметром 800 мм и высотой 90 мм, что позволило, вследствие увеличения режущей площади круга, значительно увеличить производительность обработки и снизить влияние неравномерностей наплавленной поверхности на контактные нагрузки между кругом и покрытием. На основе проведенной оптимизации режимов обработки принята схема многопроходного шлифования, в которой реализованы следующие условия обработки: $V_{\text{дет}} = 30$ м/мин; $S_{\text{пр}} = 0,15$ м/мин; $S_{\text{поп}} = 0,064$ мм/дв. ход.

Попытки перенести разработанные рекомендации для алмазного шлифования восстановленной фаски клапана двигателя внутреннего сгорания (ДВС) оказались малоэффективными, что обусловлено, прежде всего, весьма высокой твердостью обрабатываемого материала фаски ПГ-10Н-01, составляющей HRC 60 ... 62, а также небольшой шириной обрабатываемой поверхности с неравномерным припуском – 8 мм (рис. 3.1 [85]). Вследствие возникающих значительных контактных нагрузок при шлифовании этого покрытия алмазным кругом на металлической связке М1-10 наблюдается чрезвычайно высокий расход алмазов. Например, при шлифовании с $V_{\text{дет}} = 25$ м/мин через незначительное время обработки на поверхности алмазного круга образовывались глу-

бокие "борозды", что требовало прекращения процесса шлифования. Таким образом, проведенный анализ показал, что в настоящее время отсутствует эффективная высокопроизводительная технология алмазного шлифования наплавок с твердостью HRC 60 ... 62.

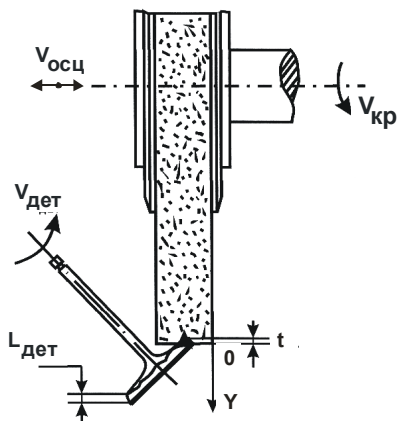


Рис. 3.1. Схема круглого наружного шлифования фаски клапана

Вместе с тем, анализ существующих технологий алмазного шлифования с непрерывной или периодической электроэрозионной правкой алмазного круга на металлической связке показал, что существуют резервы повышения эффективности обработки покрытий, связанные с использованием крупногабаритных алмазных кругов на металлических связках типа М2-01, которые по прочности превосходят применяемую связку М1-01. Для их реализации необходимо выполнить комплекс теоретических и экспериментальных исследований.

3.2. Экспериментальные исследования процессов алмазного электроэрозионного многопроходного и глубинного шлифования высокопрочных покрытий

Процесс алмазного электроэрозионного шлифования на практике осуществляется, как правило, в условиях малопроизводительного многопроходного шлифования. Между тем, всевозрастающие требования к качеству и производительности обработки, необходимость концентрации операций алмазного шлифования при съеме больших припусков (до

2 мм и выше) требуют применения более эффективных процессов, к которым в первую очередь относится глубинное шлифование. Однако, интенсивное засаливание алмазного круга в условиях глубинного шлифования труднообрабатываемых материалов не позволяет его использовать на практике.

Поэтому важно оценить технологические возможности глубинного алмазного шлифования при дополнительном электроэрозионном воздействии на алмазный круг на примере обработки высокопрочных покрытий, когда имеет место чрезвычайно интенсивное засаливание алмазного круга.

В качестве исследуемых образцов использовались кольца из высокопрочного порошкового материала покрытия ПГ-10Н-01 твердостью HRC 60 ... 62 диаметром $D_{дет} = 55$ мм и длиной $l_{дет} = 8$ мм.

При шлифовании использовались алмазные круги с маркой алмаза AC6, зернистостью 125/100 ... 250/200, концентрацией 100 % и 150 % на металлической связке M2-01.

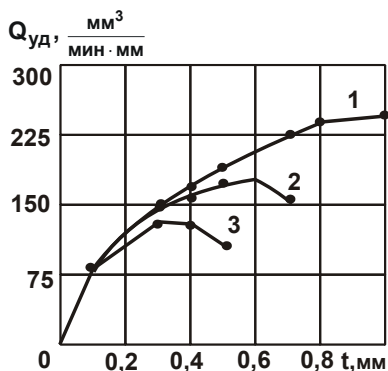


Рис. 3.2. Зависимость удельной производительности обработки $Q_{уд}$ от глубины шлифования t

Условия обработки: 1 – $I_{cp} = 75$ А; 2 – $I_{cp} = 48$ А; 3 – $I_{cp} = 34$ А; обрабатываемый материал – покрытие ПГ-10Н-01; круг – AC6 250/200 M2-01 4; $a_{z,max} = 15$ мкм; $V_{кр} = 28$ м/с.

Эффективность обработки материала оценивалась удельной производительностью обработки (т.е. приходящейся на единицу высоты круга). Для этого устанавливалась зависимость удельной производительности обработки $Q_{уд}$ от глубины шлифования t для различных зна-

чений импульсного тока I_{cp} . В результате проведенных экспериментальных исследований (рис. 3.2) установлено, что удельная производительность обработки $Q_{уд}$ с увеличением глубины шлифования t первоначально возрастает, затем, после достижения определенной глубины шлифования, начинает снижаться, что практически приводит к прекращению процесса шлифования.

Такая закономерность обусловлена тем, что при данном значений импульсного тока I_{cp} при увеличении глубины шлифования t до вполне конкретного значения, энергии электроэрозионного воздействия на алмазный круг вполне достаточно для его своевременной очистки и поддержания высокой режущей способности. После превышения глубиной шлифования предельного значения, в результате существенного увеличения удельной производительности обработки, подводимой энергии электроэрозионного воздействия на алмазный круг оказывается недостаточно для его своевременной очистки алмазного круга и обнажения режущих алмазных зерен из связки. Режущая способность алмазного круга в этих условиях не успевает восстанавливаться, следствием чего являются увеличение силы резания, повышение деформации элементов технологической системы и снижение интенсивности съема припуска.

Таким образом, для данной величины импульсного тока I_{cp} существует вполне однозначная глубина шлифования, при которой удельная производительность обработки $Q_{уд}$ принимает максимальное значение и осуществление процесса шлифования наиболее эффективно. Как следует из приведенных экспериментальных графиков, такая закономерность изменения удельной производительности обработки $Q_{уд}$ от глубины шлифования t наблюдается для всех значений импульсного тока I_{cp} . Причем, с увеличением I_{cp} максимум удельной производительности обработки $Q_{уд}$ смещается в область больших значений глубины шлифования, а, соответственно, значения $Q_{уд}$ в точках максимумов – увеличиваются. Таким образом, показано, что для реализации условий высокопроизводительного алмазного шлифования величину импульсного тока I_{cp} необходимо увеличивать.

Проведенные эксперименты по определению удельной производительности шлифования при различных значениях подводимого импульсного тока показали на необходимость установления связи между глу-

биной шлифования, площадью контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью и величиной разрядного тока, подводимого в зону обработки. Параметром, характеризующим такую связь, может быть концентрация (плотность) импульсного тока на площади контакта круга с обрабатываемой поверхностью:

$$K_T = \frac{I_{cp}}{S_K} = \frac{I_{cp}}{I_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t \cdot D_{кр} \cdot D_{дет}}{D_{кр} + D_{дет}}}}, \quad (3.1)$$

где I_{cp} – значение импульсного тока, А;

S_K – площадь контакта круга с обрабатываемой поверхностью детали, мм²;

$D_{кр}$ – диаметр круга, мм.

Приведенные на рис. 3.3 графики изменения параметра K_T от глубины шлифования t при различных значениях I_{cp} (в данном случае $I_{cp} = 75$ А; 48 А; 34 А), показывают на убывающий характер зависимости K_T от t . При этом большим значениям I_{cp} соответствуют большие значения параметра K_T .

Для оценки значений параметра K_T в точках максимума производительности обработки Q_0 следует воспользоваться экспериментальными данными, приведенными на рис. 3.2. Для этого на графиках (рис. 3.2) необходимо установить значения глубины шлифования, соответствующие точкам максимума производительности обработки, для различных I_{cp} и, используя эти данные, на графиках K_T от t (рис. 3.3) определить значения K_T .

Как следует из рис. 3.3, установленные значения K_T , соответствующие точкам максимума производительности обработки, изменяются в пределах $K_T = 1,3 \dots 1,5$ А/мм². Из этого следует, что значения K_T для различных I_{cp} отличаются весьма незначительно, – область изменения оптимальных значений K_T на рис. 3.3 заштрихована.

Таким образом, расчетно-экспериментальным путем установлено, что максимум удельной производительности обработки $Q_{уд}$ соответствует приблизительно одному и тому же значению плотности импульсного тока. Поэтому данный параметр следует рассматривать основным

обобщенным параметром, характеризующим процесс электроэрозионной правки алмазного круга.

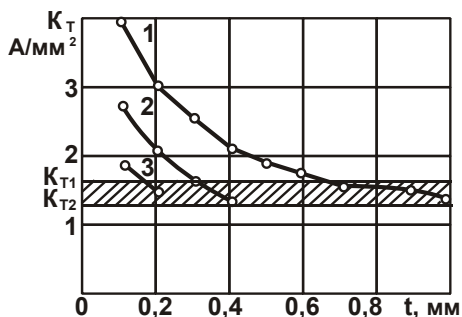


Рис. 3.3. Зависимость плотности тока K_T от глубины шлифования t
Условные обозначения: 1 – $I_{cp} = 75$ А; 2 – $I_{cp} = 48$ А; 3 – $I_{cp} = 34$ А.

Поддержание заданной плотности импульсного тока в процессе шлифования позволяет осуществлять своевременную очистку круга от продуктов диспергирования и постоянно поддерживать на круге развитый режущий рельеф.

Для определения оптимальной величины импульсного тока I_{cp} (для данных значений K_T и глубины шлифования t , которую рекомендуется принимать в условиях глубинного шлифования равной величине снимаемого припуска), необходимо воспользоваться зависимостью (3.1). Разрешая ее относительно I_{cp} , получено:

$$I_{cp} = K_T \cdot I_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t \cdot D_{кр} \cdot D_{дет}}{(D_{кр} + D_{дет})}}. \quad (3.2)$$

Подставляя в эту зависимость известные значения параметров K_T , t , а также $I_{дет}$, $D_{дет}$, $D_{кр}$, определяется оптимальное значение I_{cp} , поддержание которого в процессе шлифования позволит, во-первых, обеспечить высокую режущую способность алмазного круга, во-вторых, реализовать максимум удельной производительности обработки $Q_{уд}$ для данной глубины шлифования t .

Важно установить влияние параметра K_T на технологические параметры шлифования на примере изменения относительного расхода

алмаза $q_{отн}$. Для этого следует установить экспериментальные зависимости $q_{отн}$ от глубины шлифования t для условий $I_{ср} = \text{const}$ и $K_T = \text{const}$. В последнем случае одновременно с изменением глубины шлифования по зависимости (3.2) изменялась величина импульсного тока $I_{ср}$. Результаты исследований представлены на рис. 3.4, из которого следует, что с увеличением глубины шлифования t при условии $I_{ср} = \text{const}$ относительный расход алмаза $q_{отн}$ уменьшается. При глубинах шлифования $t = 0,1 - 0,4$ мм имеет место достаточно высокий расход алмаза, что, в первую очередь, обусловлено интенсивным электроэрозионным воздействием на рабочую поверхность алмазного круга. Концентрация импульсного тока в этом случае превышает оптимальное значение, изменяющееся в пределах $K_{T1} \dots K_{T2}$ (рис. 3.3).

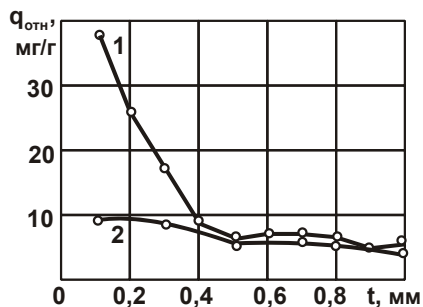


Рис. 3.4. Зависимость относительного расхода алмазов $q_{отн}$ от глубины шлифования t

Условия обработки: 1 – $I_{ср} = 68A$; 2 – $K_T = 1,4 A/мм$; обрабатываемый материал – ПГ–10Н–01; $V_{кр} = 28$ м/с; круг – АС6 250/200 М2–01 4.

Поддержание в процессе шлифования постоянным значения параметра K_T существенно изменяет характер зависимости относительного расхода алмаза $q_{отн}$ от глубины шлифования t . Она принимает вид практически прямой линии, т.е. относительный расход алмаза с увеличением глубины шлифования остается неизменным. Кроме того, значения $q_{отн}$ во втором случае меньше, чем в первом. Установленный характер зависимости обусловлен тем, что для каждого значения глубины шлифования t устанавливается вполне конкретное значение величина импульсного тока, которое обеспечивает одинаковую интенсивность

электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность круга в широком диапазоне изменения глубины шлифования.

Таким образом, экспериментально установлены принципиальные отличия существующего подхода к управлению процессом электроэрозионной правки алмазного круга (состоящим в поддержании при шлифовании оптимального значения I_{cp}) от предлагаемого подхода, состоящим в поддержании при шлифовании постоянной величины K_T .

Подводя итоги проведенного анализа, можно сделать следующие выводы. Несоблюдение условия $K_T = \text{const}$, как установлено экспериментально, приводит к увеличению в 2 – 5 раз относительного расхода алмаза (в случае превышения импульсным током оптимального значения) или к значительному снижению производительности обработки и последующему прекращению процесса шлифования из-за интенсивного засаливания рабочей поверхности алмазного круга (в случае, когда величина импульсного тока меньше оптимального значения).

Так установлено, что величина силы тока $I_{cp} = 48$ А обеспечивает полное устранение засаливания круга и соблюдение примерного равенства скоростей эрозионного разрушения металла связки и линейного износа зерен при шлифовании с производительностью обработки $Q = 1\,400$ мм³/мин ($V_{дет} = 0,4$ м/мин; $t = 0,5$ мм). С увеличением глубины шлифования наблюдается интенсивное засаливание круга, и осуществление процесса в таких условиях становится нецелесообразным.

В случае уменьшения глубины шлифования, начиная со значения $t = 0,35$ мм, наоборот, обеспечивается полное устранение засаливания круга, однако, имеет место чрезвычайно высокий износ круга, который с дальнейшим уменьшением глубины шлифования резко возрастает.

Выполняя условие $K_T = \text{const}$, экспериментально установлены зависимости удельной производительности обработки $Q_{уд}$ и эффективной мощности шлифования $N_{эф}$ от глубины шлифования t при фиксированном значении $a_{z,max}$ (рис. 3.5, рис. 3.6). Как видно, благодаря поддержанию высокой режущей способности круга удельная производительность обработки $Q_{уд}$ почти равна расчетной, а эффективная мощность шлифования $N_{эф}$ изменяется примерно по закону производительности обработки Q , что обеспечивает постоянство условного напряжения резания (энергоёмкости шлифования) $\sigma = N_{эф} / Q$ (рис. 3.6).

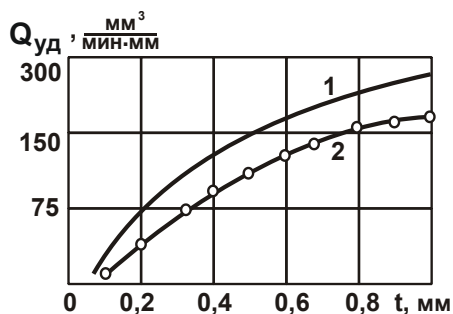


Рис. 3.5. Зависимость удельной производительности обработки $Q_{уд}$ от глубины шлифования t

Условные обозначения: 1 – расчетная зависимость; 2 – экспериментальная зависимость.

Условия обработки: $a_{z,max} = 15$ мкм; $V_{кр} = 28$ мкм.

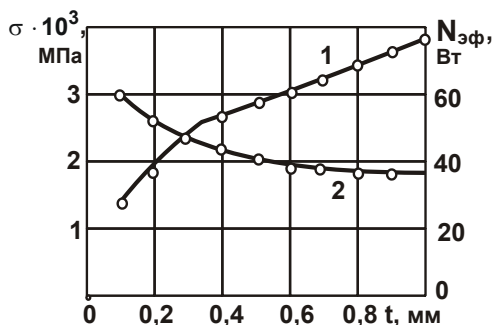


Рис. 3.6. Зависимость эффективной мощности шлифования $N_{эф}$ (1) и условного напряжения резания σ (2) от глубины шлифования t

Условия обработки: $a_{z,max} = 15$ мкм; $V_{кр} = 28$ мкм.

Этим показано, что в широких пределах изменения глубины шлифования t условное напряжение резания σ остается почти постоянным. Следовательно, исходя из зависимости (3.1), температура шлифования t^0 также должна оставаться фактически постоянной в области глубинного и многопроходного шлифования, что открывает широкие перспективы применения высокопроизводительного глубинного алмазного электроэрозионного шлифования деталей с высокопрочными покрытиями.

Оптимальные характеристики импульсного тока должны изменяться в следующих пределах: частота следования импульсов $f = 1 - 3$ кГц, скважность импульсов $q_{и} = 1,9 - 2,5$. В качестве высокочастотного им-

пульсного генератора рекомендуется использовать ШГИ–80×2–88М с $I_{\text{ном}} = 80 \text{ А}$; $f = 1 - 88 \text{ кГц}$; $q_{\text{и}} = 1,1 - 8,1$; $B_c = 5$.

В работе также произведена оценка плотности тока i , создаваемой в поперечном сечении образующихся стружек и определяемой зависимостью:

$$i = \frac{I}{S} = \frac{I}{Q} \cdot V_{\text{кр}}, \quad (3.3)$$

для точек максимума удельной производительности обработки $Q_{\text{уд}}$ (рис. 3.2). Экспериментально установлено, что для силы тока $I_{\text{ср}} = 34 \text{ А}$ получено $i = 0,6 \cdot 10^5 \text{ А/мм}^2$; для $I_{\text{ср}} = 48 \text{ А}$ получено $i = 0,6 \cdot 10^5 \text{ А/мм}^2$; для $I_{\text{ср}} = 75 \text{ А}$ получено $i = 0,7 \cdot 10^5 \text{ А/мм}^2$.

Этим показано, что существует предельное значение параметра i , при достижении которого независимо от механических параметров шлифования реализуется максимум удельной производительности обработки $Q_{\text{уд}}$, обусловленный исключением засаливания алмазного круга и поддержанием его высокой режущей способности на протяжении всего периода обработки. Исходя из этого, расчет оптимальных электрических параметров электроэрозионного глубинного шлифования может быть произведен на основе установленного значения $i = 0,6 \cdot 10^5 \text{ А/мм}^2$.

3.3. Расчет параметров шероховатости обработанных поверхностей и максимальной толщины среза при глубинном шлифовании

Существующие методы расчета параметров шероховатости шлифованной поверхности в основном базируются на вероятностном представлении закономерностей процесса участия зерен в резании [1; 30; 60; 61; 62; 90; 103; 111; 127; 136]. В расчетах режущие зерна проектируются на фиксированную диаметрально плоскость круга, которая совершает вращательное движение.

В результате наложения и перекрытия проекций зерен на плоскости образуется область сплошного перекрытия, которая с помощью теоремы умножения независимых случайных величин или других теорем теории вероятности описывается вероятностной функцией микронеровностей. Задавая необходимую степень точности значений такой функ-

ции, определяются параметры шероховатости R_a , R_{max} , R_z . Если рассматривать в расчетах не все зерна, участвующие в срезе припуска, а только те, которые участвуют в окончательном формировании шероховатой поверхности, т.е. зерна, оставившие свой след на обработанной поверхности, решение задачи по определению шероховатости можно значительно упростить.

На рис. 3.7 приведена расчетная схема круглого врезного шлифования, на примере которой проведен расчет шероховатости обработанной поверхности. Обрабатываемая деталь условно представлена бесконечным множеством диаметральных плоскостей, периодически контактирующих с рабочей поверхностью круга, предполагая, что характер взаимодействия остальных плоскостей останется тем же.

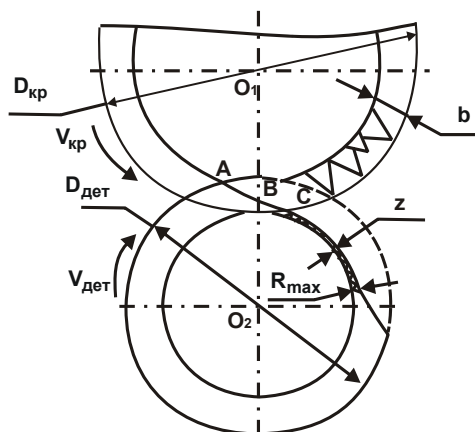


Рис. 3.7. Схема формирования шероховатости обработанной поверхности при врезном шлифовании

При повороте вокруг оси O_2 фиксированной плоскости в пределах длины дуги контакта круга с деталью срез припуска осуществляется по линии ABC, характеризующей границу завершения срезания режущими зернами материала толщиной z , подводимого в зону резания. Не снятый материал в виде гребешков остаточных микронеровностей будет характеризовать параметр шероховатости поверхности R_{max} . Используя работу [15], нетрудно установить связь между параметрами шероховатости поверхности R_a и R_{max} , которая может быть выражена зависимостью $R_{max} = 4 \cdot R_a$. Необходимо учитывать, что формирование шерохо-

ватости обработанного слоя осуществляется за один оборот детали, а режущие зерна, расположенные на рабочей поверхности круга, подчинены равномерному закону распределения над уровнем связки с максимальной величиной выступания над связкой b .

Рассмотрим диаметральное сечение рабочей части шлифовального круга и спроектируем режущие зерна на это сечение. Поскольку максимальная высота выступания зерен над уровнем связки равна b , то площадь, ограничивающая эти проекции, будет равна произведению ширины круга B на величину b . Полученную площадь следует разбить на множество ячеек квадратной формы, размер которой определяется параметром a , площадь ячейки – параметром ΔS (рис. 3.8).

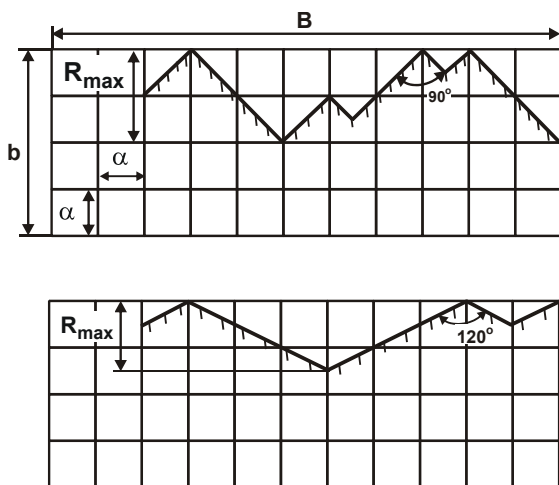


Рис. 3.8. Схема расположения вершин зерен над уровнем связки круга

Согласно равномерному закону размещения зерен над связкой в каждой ячейке будет размещаться одна вершина зерна.

На заключительной стадии формирования микронеровностей при глубинном шлифовании максимальное внедрение зерен в обрабатываемую поверхность будет осуществляться на величину R_{max} . В связи с этим рассмотрим ячейки, в которые попали вершины зерен, расположенные на уровне и выше $(b - R_{max})$, тогда площадь, ограничивающая эти ячейки, определится произведением $b \cdot R_{max}$. Вершины зерен в рассматриваемых ячейках могут занимать различное положение, поэтому

для определения параметра $R_{\max}$ будем рассматривать самые неблагоприятные условия, т.е. условия, когда расстояние между вершиной и впадиной проекций соседних зерен максимально и равно $R_{\max}$. Важным параметром является угол при режущей части зерна. Согласно работам [10; 144], значение его изменяется в пределах $90^\circ \dots 120^\circ$, поэтому в расчетах ограничимся изменением указанного угла в этих пределах.

На рис. 3.8 приведена схема размещения вершин зерен в ячейках для самого неблагоприятного случая. Здесь значение параметра $R_{\max}$, исходя из геометрического представления положения вершин зерен в ячейках, будет максимально. С учетом этого (при изменении угла заострения зерен в диапазоне $90^\circ \dots 120^\circ$), параметр шероховатости $R_{\max}$ будет принимать значения $1,5 \cdot a \dots 2 \cdot a$. В дальнейшем будет рассмотрен самый худший случай, т.е. когда параметр шероховатости равен $R_{\max} = 2 \cdot a$, тогда на фиксированной плоскости оставят свой след только те зерна, выступание вершин которых над связкой больше или равно $(b - R_{\max})$. Остальные же зерна, несмотря на возможность участия их в резании, с кинематической точки зрения никакого влияния на максимальную высоту остаточных микронеровностей обработанной поверхности не окажут.

При расчете параметров шероховатости необходимо знать количество проконтактировавших с поверхностью зерен, имеющих высоту выступания над связкой больше или равную $(b - R_{\max})$. Согласно принятому равномерному закону распределения вершин зерен над связкой и пренебрегая их износом в процессе шлифования, имеем:

$$n_3 = k \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau_3 \cdot B \cdot \frac{R_{\max}}{b}, \quad (3.4)$$

где k – поверхностная концентрация зерен на круге, шт./м²;

τ_3 – время контакта детали по линии C_1C с рабочей поверхностью круга, с;

B – ширина круга, м.

Исходя из расчетной схемы, представленной на рис. 3.9, время контакта точки C и рабочей поверхности круга опишется:

$$\tau_3 = \frac{l}{V_{\text{дет}}}. \quad (3.5)$$

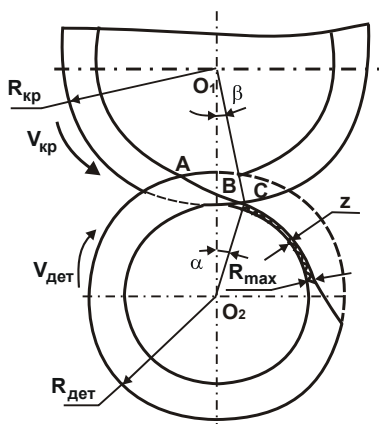


Рис. 3.9. Расчетная схема для определения шероховатости обработанной поверхности при врезном шлифовании

В зависимости (3.5) величина l определяет длину дуги контакта режущих зерен, которые начинают формировать шероховатость поверхности в точке C_1 и заканчивают в точке C (рис. 3.9):

$$l = C_1C = 2 \cdot R_{дет} \cdot \alpha. \quad (3.6)$$

Угол α и длина l определяются из решения системы тригонометрических уравнений:

$$\begin{cases} R'_{дет} \cdot \cos \alpha + R_{кр} \cdot \cos \beta = (R'_{дет} + R_{кр}) - R_{max}, \\ R'_{дет} \cdot \sin \alpha = R_{кр} \cdot \sin \beta, \end{cases} \quad (3.7)$$

где $R'_{дет} = R_{дет} - z$ (рис. 3.9).

После преобразований, с учетом $R'_{дет} \approx R_{дет}$, имеем:

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{2 \cdot R_{max} \cdot R_{кр}}{R_{дет} \cdot (R_{дет} + R_{кр})}}. \quad (3.8)$$

Принимая $\sin \alpha \approx \alpha$, в силу малых его значений угла α , определено число зерен, участвующих в формировании шероховатости шлифованной поверхности:

$$n_3 = 2 \cdot k \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot R_{\max}}}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{дет}} + \frac{1}{R_{кр}}\right)}} \cdot B \cdot \frac{R_{\max}}{b}. \quad (3.9)$$

В дальнейшем, для удобства расчетов в уравнениях использованы значения диаметров детали и шлифовального круга. Тогда выражение (3.9) примет вид:

$$n_3 = 2 \cdot k \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\max}}}{\sqrt{\left(\frac{1}{D_{дет}} + \frac{1}{D_{кр}}\right)}} \cdot B \cdot \frac{R_{\max}}{b}. \quad (3.10)$$

Проектируя режущие зерна на фиксированную диаметральную плоскость, с учетом сделанных допущений, можно считать, что их вершины равномерно заполняют всю площадь $R_{\max} \cdot B$ (рис. 3.8). Минимальная площадь ячейки ΔS , в которую обязательно попадет одна вершина зерна, равна

$$\Delta S = \frac{B \cdot R_{\max}}{n_3}, \quad (3.11)$$

где размер ячейки равен $a = \sqrt{\Delta S}$.

Таким образом, не прибегая к вероятностным расчетам, удалось графически установить зависимость максимальной высоты микронеровностей $R_{\max}$ от размера ячейки a , т.е. расчет параметра шероховатости обработанной поверхности свелся к определению размера элементарной ячейки a . Исходя из условия $R_{\max} = 2 \cdot a$, составлено уравнение совместности:

$$\frac{2}{R_{\max}^2} = k \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\max}}}{\sqrt{\left(\frac{1}{D_{дет}} + \frac{1}{D_{кр}}\right)}} \cdot \frac{1}{b}. \quad (3.12)$$

Решая уравнение (3.12) относительно $R_{\max}$, получено:

$$R_{\max} = \sqrt[5]{\frac{4 \cdot b^2 \cdot V_{\text{дет}}^2}{k^2 \cdot V_{\text{кр}}^2} \cdot \left(\frac{1}{D_{\text{дет}}} + \frac{1}{D_{\text{кр}}} \right)}. \quad (3.13)$$

Используя работу [1], следует произвести замену параметров зависимости (3.13) на объемную концентрацию алмазных зерен в круге m и зернистость $\bar{X}$, согласно зависимостей:

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}; \quad (3.14)$$

$$b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}, \quad (3.15)$$

где $(1 - \varepsilon)$ – коэффициент, учитывающий прочность заделки зерна в связке.

После преобразований выражение для $R_{\max}$ примет вид:

$$R_{\max} = \sqrt[5]{\frac{17,5 \cdot 10^4 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{\text{дет}}^2}{m^2 \cdot V_{\text{кр}}^2} \cdot \left(\frac{1}{D_{\text{дет}}} + \frac{1}{D_{\text{кр}}} \right)}. \quad (3.16)$$

Полученное выражение для определения параметра шероховатости $R_{\max}$ однозначно устанавливает связь между параметрами режима шлифования и характеристиками алмазного круга. Наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает зернистость алмазного круга, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными.

Следующими по важности параметрами выражения (3.16) необходимо рассматривать скорость детали $V_{\text{дет}}$ и скорость круга $V_{\text{кр}}$. Учитывая, что скорость круга в большинстве случаев регулировать в широком диапазоне сложно из-за конструктивных особенностей станка и алмазного круга, более приемлемым параметром, с точки зрения управления параметром $R_{\max}$, является скорость детали $V_{\text{дет}}$. Снижение шероховатости поверхности требует уменьшения $V_{\text{дет}}$, что возможно в условиях глубинного шлифования. Значения скорости детали при глубинной схеме в 50 ... 60 раз меньше, чем при многопроходном шлифовании, следовательно, параметр $R_{\max}$ может быть значительно уменьшен. Учитывая то, что при глубинном шлифовании достигается более высокая про-

изводительность съема обрабатываемого материала и значения Q в несколько раз превышают производительность многопроходного шлифования, снижение шероховатости обработки в условиях глубинного шлифования открывает новые возможности использования этого прогрессивного метода шлифования. Таким образом, полученная расчетная зависимость для определения шероховатости обработки позволяет прогнозировать оптимальные условия алмазного глубинного шлифования.

Для более полного представления о возможностях глубинного шлифования следует выполнить кинематический расчет максимальной толщины среза на примере схемы круглого наружного врезного глубинного шлифования (рис. 3.10).

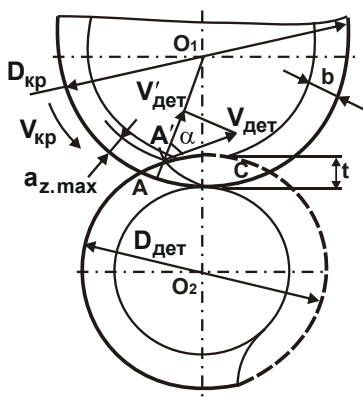


Рис. 3.10. Расчетная схема для определения максимальной толщины среза при врезном шлифовании

В расчетной схеме обрабатываемая деталь представлена бесконечным множеством диаметральных плоскостей, периодически контактирующих с рабочей поверхностью круга. Принято, что режущие зерна, расположенные на рабочей поверхности круга, подчинены равномерному закону их выступания над уровнем связки, а максимальная величина выступания над уровнем связки равна b .

Из множества диаметральных плоскостей, которыми условно представлена деталь, следует выделить одну и переместить ее из положения A в новое положение A' (рис. 3.10). За время перемещения плоскости произойдет наложение проекций зерен на эту плоскость и образование области сплошного перекрытия проекций зерен. Максимальная высота микронеровностей от наложения проекций зерен на плоскости

будет определять максимальную толщину среза $a_{z.max}$. Принимая в расчетах, что сьем всего припуска на детали осуществляется за один оборот, а размер ячейки определяется параметром a , для аналитического определения максимальной толщины среза $a_{z.max}$ следует воспользоваться приведенной выше методикой для определения параметров шероховатости обработанной поверхности.

При шлифовании материала в момент образования зоны полного перекрытия проекций зерен срезается слой толщиной, равной максимальной толщине среза. В связи с этим необходимо рассмотреть ячейки с вершинами зерен, которые расположены на уровне $(b - a_{z.max})$ и выше. Площадь контакта плоскости с зернами круга определится произведением параметров $B \cdot a_{z.max}$.

Вершины зерен в ячейках могут занимать различное положение, однако, для определения параметра $a_{z.max}$ следует рассматривать самые неблагоприятные условия, т.е. условия, когда расстояние между вершиной и впадиной проекций соседних зерен будет максимальным, равным максимальной толщине среза $a_{z.max}$. Значения угла у вершины режущей части зерен приняты равными $90^\circ \dots 120^\circ$, тогда, исходя из рис. 3.11, максимальная толщина среза изменяется в пределах $1,5 \cdot a \dots 2 \cdot a$.

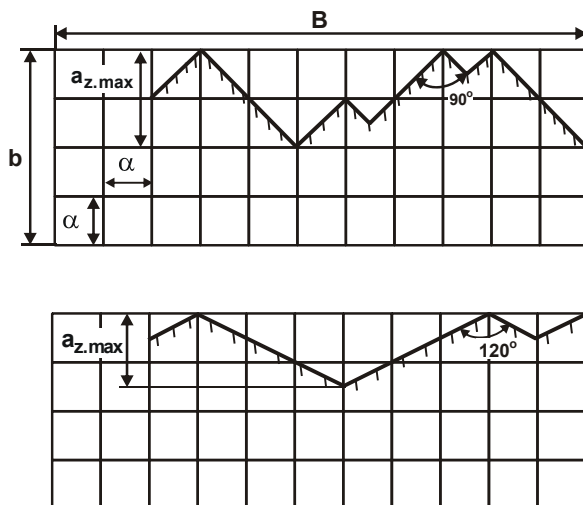


Рис. 3.11. Схема расположения вершин зерен над уровнем связки круга

Для окончательного определения максимальной толщины среза $a_{z.max}$ необходимо знать количество проконтактировавших с плоскостью зерен, имеющих высоту выступания над связкой $(b - a_{z.max})$. Рассматривая равномерный закон распределения вершин зерен над связкой и пренебрегая их износом в процессе шлифования, получено:

$$n_3 = k \cdot B \cdot L \cdot \frac{a_{z.max}}{b}, \quad (3.17)$$

где L – длина рабочей поверхности круга, на которой расположены зерна, срезавшие слой материала толщиной $a_{z.max}$, м.

Для определения длины участка шлифовального круга, на котором расположены зерна, производящие съём материала с максимальной толщиной среза $a_{z.max}$, следует воспользоваться геометрическими соотношениями, приведенными в работе [97]. Нормальная составляющая скорости детали (по отношению к рабочей поверхности круга) равна:

$$V'_{дет} = V_{дет} \cdot \cos \alpha, \quad (3.18)$$

$$\cos \alpha = \sqrt{2t \cdot \left(\frac{2}{D_{дет}} + \frac{2}{D_{кр}} \right)}. \quad (3.19)$$

Время $\tau_{ск}$, в течение которого происходит контакт зерен участка круга длиной L с материалом детали и, следовательно, осуществляется срез материала на величину $a_{z.max}$, определяется зависимостью:

$$\tau_{ск} = \frac{L}{V_{кр}}. \quad (3.20)$$

С другой стороны, время $\tau_{ск}$ может быть представлено:

$$\tau_{ск} = \frac{a_{z.max}}{V'_{дет}} = \frac{L}{V_{кр}}. \quad (3.21)$$

Разрешая зависимость (3.21) относительно L , имеем:

$$L = \frac{V_{кр} \cdot a_{zmax}}{V_{дет} \cdot \sqrt{2t \cdot \left(\frac{2}{D_{дет}} + \frac{2}{D_{кр}} \right)}}. \quad (3.22)$$

Тогда зависимость (3.17) примет вид:

$$n_3 = k \cdot B \cdot \frac{V_{кр} \cdot a_{zmax}^2}{V_{дет} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{D_{дет}} + \frac{2}{D_{кр}} \right)} \cdot b}. \quad (3.23)$$

Согласно принятому равномерному закону распределения вершин зерен над уровнем связи (рис. 3.11), имеет место равномерное заполнение вершинами зерен площади $B \cdot a_{zmax}$. Площадь ячейки, в которую обязательно попадет одна вершина зерна, равна:

$$\Delta S = \frac{B \cdot a_{zmax}}{n_3}. \quad (3.24)$$

Размер стороны ячейки определяется выражением:

$$a = \sqrt{\Delta S}. \quad (3.25)$$

Подставляя зависимость (3.24) в (3.25), имеем:

$$a_{zmax} = \frac{a^2 \cdot n_3}{B}. \quad (3.26)$$

С учетом выше установленной зависимости $a_{zmax} = 2 \cdot a$, после подстановки зависимости (3.26) в (3.23), получено:

$$\frac{4}{a_{zmax}^3} = k \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет} \cdot b \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{D_{дет}} + \frac{1}{D_{кр}} \right)}}, \quad (3.27)$$

откуда

$$a_{z\max} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{дет}} \cdot b \cdot \sqrt{4 \cdot t \cdot \left(\frac{1}{D_{\text{дет}}} + \frac{1}{D_{\text{кр}}} \right)}}{k \cdot V_{\text{кр}}}}. \quad (3.28)$$

Выражая параметры k и b через объемную концентрацию алмазных зерен в круге m и зернистость круга $\bar{X}$, согласно зависимостей (3.14) и (3.15), окончательно максимальная толщина среза $a_{z\max}$ опишется:

$$a_{z\max} = \sqrt[3]{\frac{16,7 \cdot 10^2 \cdot V_{\text{дет}} \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{1}{D_{\text{дет}}} + \frac{1}{D_{\text{кр}}} \right)}}{m \cdot V_{\text{кр}}}}. \quad (3.29)$$

Как видно, из всех, входящих в зависимость (3.29) параметров, наибольшее влияние на $a_{z\max} = 2 \cdot a$ оказывает зернистость круга $\bar{X}$, а затем, в порядке убывания, объемная концентрация алмазных зерен в круге m , скорость детали $V_{\text{дет}}$ и скорость круга $V_{\text{кр}}$, глубина шлифования t . Учитывая, что скорость круга $V_{\text{кр}}$ может изменяться в ограниченных пределах, основными параметрами режима шлифования, которые позволяют изменять $a_{z\max}$ в широких пределах, являются $V_{\text{дет}}$ и t .

Следовательно, задача поиска оптимальных условий обработки и, соответственно, оптимальной производительности обработки Q состоит в определении оптимальных значений $V_{\text{дет}}$ и t , одновременно обеспечивающих заданную шероховатость обработки, определяемую параметром $R_{\max}$, и шлифование с заданной (предельной) максимальной толщиной среза $a_{z\max}$. Выполнение последнего условия весьма важно, т.к. это обеспечит исключение преждевременного разрушения зерен и реализацию экономически приемлемого износа алмазного круга.

3.4. Определение максимально возможной производительности обработки с учетом шероховатости обработанной поверхности и максимальной толщины среза

В установленные расчетные зависимости для определения параметров $R_{\max}$ и $a_{z\max}$ вошли два параметра режима шлифования: $V_{\text{дет}}$

и t , управление которыми позволяет значительно повысить эффективность шлифования. Для их определения достаточно разрешить полученные зависимости (3.16) и (3.26) относительно $V_{\text{дет}}$ и t . Однако с методической точки зрения представляет интерес отдельный анализ влияния R_{max} и $a_{z,\text{max}}$ на параметры $V_{\text{дет}}$ и t . Для этого первоначально следует разрешить зависимость (3.29) относительно $V_{\text{дет}}$:

$$V_{\text{дет}} = \frac{a_{z,\text{max}}^3 \cdot m \cdot V_{\text{кр}}}{16,7 \cdot 10^2 \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{1}{D_{\text{дет}}} + \frac{1}{D_{\text{кр}}} \right)}}. \quad (3.30)$$

Полученная зависимость позволяет установить связь между скоростью детали $V_{\text{дет}}$ и глубиной шлифования t при условии $a_{z,\text{max}} = \text{const}$ (рис. 3.12).

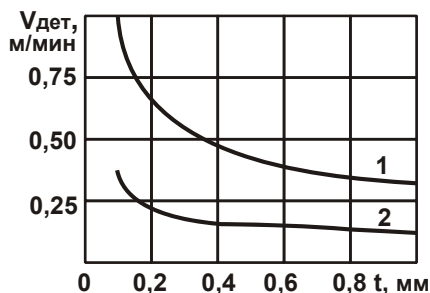


Рис. 3.12. Зависимость скорости детали $V_{\text{дет}}$ от глубины шлифования t

Условия обработки: 1 — $a_{z,\text{max}} = 15$ мкм; 2 — $a_{z,\text{max}} = 10$ мкм; $\bar{X} = 250/200$ мкм; $m = 100$; $V_{\text{кр}} = 28$ м/с.

Как известно, основным параметром, определяющим эффективность алмазного шлифования, является производительность обработки Q , которая при круглом наружном врезном глубинном шлифовании определяется произведением параметров режима шлифования $V_{\text{дет}}$ и t на ширину обрабатываемой поверхности $l_{\text{дет}}$. Тогда, используя зависимость (3.30), получено:

$$Q = \frac{m \cdot V_{кр} \cdot l_{дет} \cdot \sqrt{t} \cdot a_{zmax}}{16,7 \cdot 10^2 \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{D_{дет}} + \frac{1}{D_{кр}} \right)}}. \quad (3.31)$$

Как видно, наибольшее влияние на производительность обработки Q оказывает параметр $a_{z,max}$. Однако, его увеличение связано с рядом ограничений и, в первую очередь, с физико-механическими свойствами режущей поверхности алмазного круга. Для увеличения параметра $a_{z,max}$ необходимо использовать алмазные круги с более прочными алмазами и высокопрочными металлическими связками. Сочетание этих факторов позволит алмазным зернам выдерживать значительные контактные нагрузки длительное время и сохранять устойчивое положение в связке алмазного круга. На рис. 3.13 показан характер изменения удельной производительности обработки $Q_{уд} = Q/l_{дет}$ с увеличением максимальной толщины среза $a_{z,max}$.

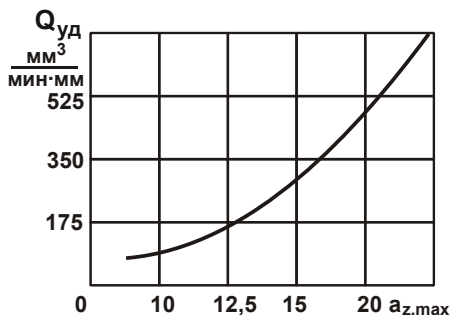


Рис. 3.13. Изменение удельной производительности обработки $Q_{уд}$ от максимальной толщины среза $a_{z,max}$

Условия обработки: $l_{дет} = 8$ мм; $\bar{X} = 250/200$ мкм; $m = 100$; $V_{кр} = 28$ м/с; $t = 1$ мм.

Исходя из зависимости (3.31), на производительность обработки Q также оказывает существенное влияние глубина шлифования t . С ее увеличением производительность обработки Q увеличивается, что свидетельствует о преимуществе глубинного шлифования по сравнению с многопроходным шлифованием. Такой вывод согласуется с практикой шлифования.

Необходимо иметь ввиду, что увеличение производительности обработки Q с увеличением глубины шлифования t в данном случае обусловлено снижением скорости детали $V_{\text{дет}}$ в соответствии с зависимостью (3.30). Лишь в этом случае можно реализовать эффект повышения производительности обработки при глубинном шлифовании.

Влияние зернистости круга $\bar{X}$, несмотря на то, что этот параметр входит в зависимость (3.31) в третьей степени, менее значительно. Это обусловлено тем, что одновременно с изменением зернистости круга $\bar{X}$ почти пропорционально изменяется максимальная толщина среза $a_{z.\max}$. Учитывая, что параметры $\bar{X}$ и $a_{z.\max}$ входят в зависимость (3.31) в одинаковой степени, следует ожидать практически неизменность производительности обработки Q с изменением параметра $\bar{X}$.

Таким образом показано, что с точки зрения снижения износа алмазного круга при одновременном повышении производительности обработки, наиболее предпочтительным является применение глубинного шлифования с управлением скорости детали в соответствии с зависимостью (3.30).

Важно проанализировать влияние параметра шероховатости поверхности $R_{\max}$ на условия шлифования, для чего следует разрешить зависимость (3.16) относительно скорости детали $V_{\text{дет}}$:

$$V_{\text{дет}} = \frac{m \cdot V_{\text{кр}}}{4,2 \cdot 10^2 \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{R_{\max}^5}{\left(\frac{1}{D_{\text{дет}}} + \frac{1}{D_{\text{кр}}}\right)}}, \quad (3.32)$$

Полученное выражение устанавливает связь между параметром шероховатости поверхности $R_{\max}$, характеристиками алмазного круга и скоростью детали $V_{\text{дет}}$. Весьма важно, что в зависимость (3.32) не входит глубина шлифования t . Это открывает значительные возможности повышения производительности обработки, т.к. независимо от глубины шлифования шероховатость обработанной поверхности будет оставаться неизменной. При дальнейшем рассмотрении характеристик процесса следует перейти к параметру шероховатости поверхности R_a , который связан с параметром $R_{\max}$ выражением $R_{\max} = 4 \cdot R_a$. Тогда зависимость (3.32) примет вид:

$$V_{\text{дет}} = \frac{m \cdot V_{\text{кр}}}{13,1 \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{R_a^5}{\left(\frac{1}{D_{\text{дет}}} + \frac{1}{D_{\text{кр}}}\right)}}. \quad (3.33)$$

Разрешая зависимость (3.30) с учетом зависимости (3.33) относительно глубины шлифования, имеем:

$$t = \frac{a_{z,\text{max}}^6}{17,1 \cdot 10^3 \cdot R_a^5}. \quad (3.34)$$

Таким образом, определены два независимых параметра $V_{\text{дет}}$ и t с учетом ограничений по шероховатости поверхности R_a и максимальной толщине среза $a_{z,\text{max}}$.

Анализ кривых, приведенных на рис. 3.14, показывает на различную связь $V_{\text{дет}}$ и t с параметром шероховатости поверхности R_a .

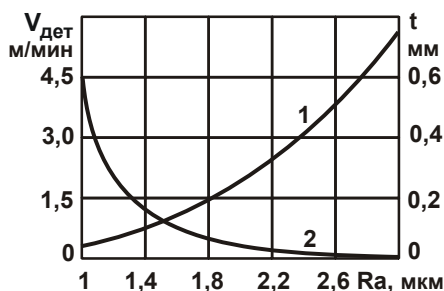


Рис. 3.14. Связь скорости детали $V_{\text{дет}}$ (1) и глубины шлифования t (2) с параметром шероховатости поверхности R_a

Условия обработки: $a_{z,\text{max}} = 15$ мкм; $\bar{X} = 250/200$ мкм; $m = 100$; $V_{\text{кр}} = 28$ м/с.

С увеличением скорости детали $V_{\text{дет}}$ происходит увеличение параметра шероховатости поверхности R_a , а с увеличением глубины шлифования t наблюдается противоположный процесс и значения параметра R_a уменьшаются.

Следует отметить различную интенсивность уменьшения параметра R_a с увеличением глубины шлифования t . Например, начиная с

$t = 0,2$ мм значения параметра шероховатости поверхности R_a изменяются незначительно.

Таким образом показано, что использование схемы глубинного шлифования позволяет осуществлять высокопроизводительный съем материала и обеспечивает уменьшение шероховатости обработанной поверхности при высокой степени стабилизации параметра R_a , а это особенно важно в условиях производства.

С учетом ограничений по шероховатости обработанной поверхности R_a и максимальной толщине среза $a_{z.max}$ производительность обработки описывается зависимостью:

$$Q = \frac{m \cdot V_{кр} \cdot l_{дет}}{22,4 \cdot 10 \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{D_{дет}} + \frac{1}{D_{кр}} \right)}} \cdot \frac{a_{z.max}^6}{\sqrt{R_a^5}}. \quad (3.35)$$

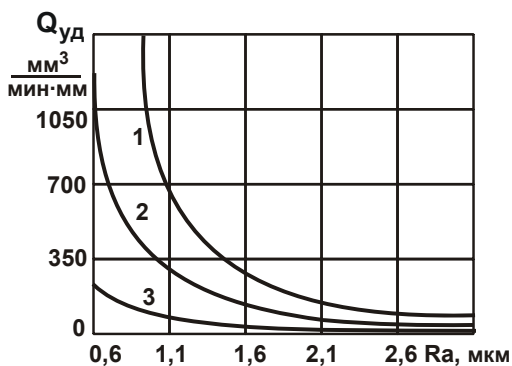


Рис. 3.15. Зависимость удельной производительности обработки $Q_{уд}$ от параметра шероховатости поверхности R_a

Условия обработки: 1 – $a_{z.max} = 19$ мкм; 2 – $a_{z.max} = 16$ мкм; 3 – $a_{z.max} = 12$ мкм;
 $\bar{X} = 250/200$ мкм; $m = 100$; $l_{дет} = 8$ мм; $V_{кр} = 28$ м/с.

На рис. 3.15 представлены графики, полученные на основе зависимости (3.35). В области относительно небольших значений производительности обработки наблюдается значительное изменение параметра шероховатости поверхности R_a . С переходом в область высокопроизводительной обработки интенсивность изменения шероховатости поверхности уменьшается. Такой результат выгодно отличает высокопроизво-

длительный процесс глубинного шлифования от других схем и является основным его преимуществом.

Таким образом, проведенный анализ позволил вскрыть новые закономерности глубинного алмазного шлифования, связанные с возможностью увеличения Q с уменьшением параметра шероховатости поверхности R_a при заданном значении предельной максимальной толщины среза $a_{z.max}$. При этом установлено, что глубина шлифования t определяется лишь параметрами $a_{z.max}$ и R_a (т.е. для каждой глубины шлифования существует оптимальное соотношение параметров $a_{z.max}$ и R_a), а скорость детали $V_{дет}$ не зависит от параметра $a_{z.max}$. Эти результаты значительно упрощают поиск оптимальных условий алмазного шлифования и подтверждают эффективность применения схемы глубинного (однопроходного) шлифования с точки зрения увеличения Q , т.к. за счет снижения параметра R_a , при заданном значении $a_{z.max}$, всегда может быть реализована глубина шлифования t , равная или кратная величине снимаемого припуска.

Для численного анализа параметров $V_{дет}$, t и Q установлены их значения в соответствии с приведенными зависимостями для различных значений $a_{z.max}$ и R_a (табл. 3.2 – табл. 3.4).

Таблица 3.2

Расчетные значения скорости детали $V_{дет}$

(исходные данные: $m = 100$; $\bar{X} = 250/200$; $D_{кр} = 0,3\text{м}$; $V_{кр} = 28\text{ м/с}$; $D_{дет} = 0,055\text{ м}$)

R_a , мкм	0,9	1,1	1,3	1,5
$V_{дет}$, м/мин	0,27	0,44	0,68	0,96

Таблица 3.3

Расчетные значения глубины шлифования t , мм

(исходные данные: $m = 100$; $\bar{X} = 250/200$; $D_{кр} = 0,3\text{ м}$; $V_{кр} = 28\text{ м/с}$; $D_{дет} = 0,055\text{ м}$)

$a_{z.max}$, мкм	R_a , мкм			
	0,9	1,1	1,3	1,5
10	0,099	0,036	0,0157	0,008
15	1,1	0,4	0,18	0,08

Таблица 3.4

Расчетные значения производительности обработки Q , мм³/мин(исходные данные: $m = 100$; $\bar{X} = 250/200$; $D_{кр} = 0,3$ м; $V_{кр} = 28$ м/с; $D_{дет} = 0,055$ м)

$a_{z.max}$, мкм	R_a , мкм			
	0,9	1,1	1,3	1,5
10	210,0	127,3	83,9	58,6
15	2 395,3	1 450,5	955,1	668,2

Анализируя полученные результаты, следует отметить, во-первых, достаточно существенное увеличение скорости детали $V_{дет}$ с увеличением параметра шероховатости поверхности R_a , во-вторых, значительное увеличение глубины шлифования t и производительности обработки Q с увеличением максимальной толщины среза $a_{z.max}$ и уменьшением R_a . При этом заслуживает особого внимания тот факт, что с уменьшением параметра шероховатости обработки R_a производительность обработки Q увеличивается. Такая закономерность обусловлена, исходя из расчетной зависимости (3.34), увеличением глубины шлифования t с уменьшением параметра шероховатости обработки R_a .

Таким образом, с одной стороны, следуя зависимости (3.35), появляется возможность беспредельного увеличения производительности обработки Q путем уменьшения параметра R_a . С другой стороны, этому препятствует ограниченность параметра t , поскольку величина снимаемого припуска ограничена. Следовательно, производительность обработки Q определяется главным образом величиной снимаемого припуска, принимая глубину шлифования t равной этой величине.

Учитывая, что для данных условий глубинного шлифования параметры t и R_a принимают вполне конкретные значения, исходя из зависимости (3.35), будет вполне однозначно определяться и параметр $a_{z.max}$, характеризующий прочностные свойства рабочей поверхности алмазного круга и обрабатываемого материала.

Для его определения необходимо зависимость (3.34) представить в виде:

$$a_{z.max} = \sqrt[6]{17,1 \cdot 10^3 \cdot t \cdot R_a^5}. \quad (3.36)$$

Приведенные в табл. 3.5 расчетные значения параметра $a_{z,max}$ показывают его существенное изменение с изменением заданной шероховатости обработки R_a . Глубина шлифования t оказывает незначительное влияние на параметр $a_{z,max}$. Учитывая, что в условиях глубинного шлифования ограничивающими параметрами являются t и R_a , а параметр $a_{z,max}$ зависит от этих двух параметров, производительность обработки Q , определяемая зависимостью (3.35), после подстановки в нее зависимости (3.36), примет вид:

$$Q = \frac{m \cdot V_{кр} \cdot l_{дет} \cdot t \cdot \sqrt{R_a^5}}{13,1 \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{\frac{1}{D_{дет}} + \frac{1}{D_{кр}}}} \quad (3.37)$$

Таблица 3.5

Расчетные значения максимальной толщины среза $a_{z,max}$, мкм

(исходные данные: $m = 100$; $\bar{X} = 250/200$; $D_{кр} = 0,3$ м; $V_{кр} = 28$ м/с; $D_{дет} = 0,055$ м)

R_a , мкм	t , мм			
	0,9	1,1	1,3	1,4
0,1	9,9	11,7	13,4	14,3
0,3	11,9	14,1	16,1	17,2
0,5	12,9	15,3	17,6	18,7
0,7	13,7	16,2	18,6	19,7
1,0	14,5	17,2	19,7	21,0

Как видно, производительность обработки Q является функцией двух независимых параметров t и R_a . С их увеличением производительность обработки Q увеличивается.

В табл. 3.6 приведены расчетные значения Q в зависимости от параметров t и R_a . Необходимо отметить, что значения скорости детали $V_{дет}$, соответствующие приведенным в табл. 3.6 новым значениям производительности обработки Q , остаются неизменными, поскольку в зависимость (3.33) не входят параметры $a_{z,max}$ и t . Таким образом, в табл. 3.6 приведены значения максимально возможной производитель-

ности обработки Q (для данных значений величины снимаемого припуска, равной глубине шлифования, параметра R_a , определяемого техническими требованиями на обработку детали). Полученные значения производительности обработки Q для определенных параметров t и R_a , свидетельствуют о возможности реализации на практике высокопроизводительного алмазного шлифования.

Таблица 3.6

Расчетные значения производительности обработки Q , мм³/мин

(исходные данные: $m = 100$; $\bar{X} = 250/200$; $D_{кр} = 0,3$ м; $V_{кр} = 28$ м/с; $D_{дет} = 0,055$ м)

R_a , мкм	t , мм			
	0,9	1,1	1,3	1,4
0,1	211,9	350,1	531,3	639,7
0,3	636,1	1050,3	1594,2	1919,2
0,5	1059,9	1750,1	2656,5	3198,7
0,7	1484,2	2450,6	3719,2	4478,1
1,0	2120,3	3500,9	5312,1	6397,3

Таким образом, установлены оптимальные значения скорости детали и производительности обработки для конкретных условий, определяемых значениями параметров t и R_a , а также установлены оптимальные значения максимальной толщины среза $a_{z,max}$, определяющие конкретную характеристику алмазного круга. Для правильного выбора оптимальной характеристики алмазного круга (марки режущих зерен и типа связки) по установленному значению $a_{z,max}$ необходимо знать функциональную связь этих параметров, что может быть установлено расчетно-экспериментальным путем.

На основе проведенного теоретического анализа можно предложить достаточно простую инженерную методику расчета оптимальных условий глубинного алмазного шлифования высокопрочных покрытий. Ее сущность состоит в том, что для заданных исходных данных (включая скорость круга $V_{кр}$, глубину шлифования t , равную величине снимаемого припуска, зернистость $\bar{X}$ и объемную концентрацию алмазных зерен в круге m , параметры $l_{дет}$, $D_{дет}$, $D_{кр}$ и параметр шероховатости обработ-

ки R_a) на основе зависимостей (3.33), (3.37) и (3.36) определяются скорость детали $V_{\text{дет}}$, производительность обработки Q и максимальная толщина среза $a_{z.\text{max}}$. Зная параметр $a_{z.\text{max}}$, выбираются оптимальные характеристики алмазного круга: марка алмаза и тип металлической связки, реализующие предельную (обусловленную прочностными свойствами рабочей поверхности алмазного круга) толщину среза, равную установленной величине $a_{z.\text{max}}$.

Необходимо отметить, что применение алмазного круга, характеризующегося большей предельной толщиной среза, чем установленное значение $a_{z.\text{max}}$, приведет к недоиспользованию прочностных свойств рабочей поверхности алмазного круга. В случае же, когда предельная толщина среза будет меньше установленного значения $a_{z.\text{max}}$, алмазный круг будет работать в условиях повышенного износа и поэтому осуществление процесса шлифования в таких условиях будет экономически нецелесообразно.

3.5. Экспериментальные исследования основных технологических параметров электроэрозионного алмазного глубинного шлифования

Экспериментальные исследования проводились на специально созданной установке на базе универсального круглошлифовального станка модели 3К12, реализующей режим алмазного электроэрозионного шлифования. Приводы движений модернизированного оборудования позволили расширить область изменения значений параметров режима шлифования $V_{\text{кр}}$, $V_{\text{дет}}$, $S_{\text{прод}}$. Установка оснащена специальным импульсным источником тока, осуществлен подвод технологического тока в зону шлифования.

Для оценки эффективности глубинного алмазного электроэрозионного шлифования, а также проверки достоверности полученных выше теоретических результатов экспериментально исследовались: производительность обработки, шероховатость обработанных поверхностей, относительны расход алмаза и мощность шлифования. В качестве образцов для испытания были использованы специальные кольца из высокопрочного порошкового материала покрытия ПГ-10Н-01. Твердость покрытия HRC 60 ... 62, геометрические размеры $D_{\text{дет}} = 55$ мм, $l_{\text{дет}} = 8$ мм.

Для обработки образцов применялись алмазные круги прямого профиля 1А1 300×40×127×5 на металлической связке М2-01 с различной характеристикой зернистости режущих зерен, их концентрации в алмазном слое.

Обработка производилась по схеме глубинного шлифования, которая позволяет удалить слой материала покрытия на величину припуска за один оборот детали. Режимы шлифования рассчитывались, исходя из условий постоянства максимальной толщины среза $a_{z.max}$ отдельным зерном, поскольку этот параметр, как показано выше, определяет износ круга и относительный расход алмазов. Для установления связи между параметрами $V_{дет}$ и t при $a_{z.max} = const$ использовано выражение:

$$V_{дет} = \frac{a_{z.max}^3 \cdot m \cdot V_{кр}}{16,7 \cdot 10^2 \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{1}{D_{дет}} + \frac{1}{D_{кр}} \right)}}. \quad (3.38)$$

Методика проведения экспериментальных исследований состоит в следующем. Для конкретных значений $a_{z.max}$, m , $\bar{X}$, $V_{кр}$, t , $D_{кр}$, $D_{дет}$ (которыми характеризуются применяемые при эксперименте алмазный круг, обрабатываемая деталь и режим шлифования) на станке устанавливается скорость детали, определяемая в соответствии с зависимостью (3.38). При изменении глубины шлифования t или другого параметра, входящего в зависимость (3.38), производится перерасчет $V_{дет}$, и вновь полученное значение $V_{дет}$ устанавливается на станке. Такой подход позволяет четко фиксировать в процессе шлифования величину $a_{z.max}$ и установить сопоставляемые с точки зрения максимального использования прочностных свойств рабочей поверхности круга результаты по величине Q . Для сравнения экспериментальных значений производительности обработки с теоретическими данными произведен расчет производительности обработки Q в соответствии с зависимостью:

$$Q = \frac{m \cdot V_{кр} \cdot l_{дет} \cdot \sqrt{t} \cdot a_{z.max}^3}{16,7 \cdot 10^2 \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{D_{дет}} + \frac{1}{D_{кр}} \right)}}. \quad (3.39)$$

Результаты экспериментов и расчетные данные зависимости удельной производительности обработки $Q_{уд}$ от глубины шлифования t представлены на рис. 3.16.

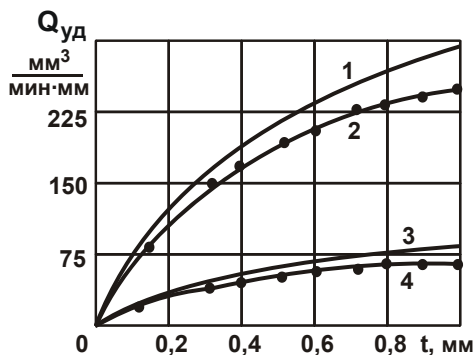


Рис. 3.16. Зависимость удельной производительности обработки $Q_{уд}$ от глубины шлифования t

Условия обработки: 1, 2 – $a_{z,max} = 15$ мкм; 3, 4 – $a_{z,max} = 10$ мкм; обрабатываемый материал – ПГ-10Н-01; $\bar{X} = 250/200$ мкм; $m = 100$; $l_{дет} = 8$ мм; $V_{кр} = 28$ м/с.

Условные обозначения: 1, 3 – расчетные зависимости; 2, 4 – экспериментальные зависимости.

Из рис. 3.16 следует, что характер изменения расчетных и экспериментальных значений $Q_{уд}$ аналогичен, т.е. в обоих случаях имеет место увеличение удельной производительности обработки $Q_{уд}$ с увеличением глубины шлифования t при условии $a_{z,max} = \text{const}$. Кроме того, наблюдается значительное увеличение экспериментально установленных значений удельной производительности обработки $Q_{уд}$ с увеличением максимальной толщины среза $a_{z,max}$, что свидетельствует о достоверности результатов расчетов.

Однако, теоретические значения $Q_{уд}$ все же больше экспериментальных значений, что объясняется в первую очередь недостаточной жесткостью технологической системы.

Расхождение теоретических и экспериментальных данных, как следует из графиков (рис. 3.16), не превышает 10 ... 15 %, что вполне приемлемо для практического использования теоретических данных и расчетных зависимостей.

На рис. 3.17 приведены экспериментальные графики изменения эффективной мощности шлифования $N_{эф}$ и относительного расхода алмазов $q_{отн}$ от глубины шлифования t . Как известно, глубинная схема шлифования деталей с высокопрочным покрытием характеризуется повышенными энергозатратами, в особенности наблюдается увеличение эффективной мощности $N_{эф}$ на шпиндельном валу при увеличении глубины шлифования t . Однако в случае обработки поверхностей деталей с покрытием небольшой ширины, что имеет место при шлифовании фаски клапана ($l_{дет} = 8$ мм), не наблюдается интенсивного увеличения $N_{эф}$. Так, при изменении глубины шлифования в пределах $t = 0,1 \dots 1,0$ мм затрачиваемая эффективная мощность увеличилась лишь в три раза и составила $N_{эф.маx} = 76$ Вт. Относительно низкие значения $N_{эф}$ указывают на то, что при шлифовании образуются не столь высокие температуры резания, как в условия традиционного глубинного шлифования, а, следовательно, снижается вероятность появления на обрабатываемых поверхностях дефектов, обусловленных тепловыми явлениями.

Важную роль в обеспечении относительно низкой эффективной мощности шлифования $N_{эф}$ играет качественная очистка режущей поверхности алмазного круга от образующихся стружек путем воздействия на нее разрядным током, т.е. применение процесса алмазного электроэрозионного шлифования высокопрочных покрытий значительно повышает эффективность обработки.

Важные результаты получены при экспериментальном исследовании относительного расхода алмаза. Как следует из рис. 3.17, с увеличением глубины шлифования t при постоянном значении максимальной толщины среза $a_{z.маx}$, что достигается одновременным уменьшением скорости детали $V_{дет}$, относительный расход алмаза $q_{отн}$ уменьшается. Причем, уменьшение $q_{отн}$ происходит приблизительно по зависимости $t^{-0,5}$, что с учетом увеличения производительности обработки по зависимости $t^{0,5}$ свидетельствует о практически неизменности линейного износа круга с увеличением глубины шлифования t при условии $a_{z.маx} = \text{const}$. Этим подтверждается, что при высокопроизводительном глубинном алмазном шлифовании максимальная толщина среза $a_{z.маx}$ определяет износ алмазного круга и, соответственно, его предельные (с точки зрения прочности зерен и связки) режущие возможности.

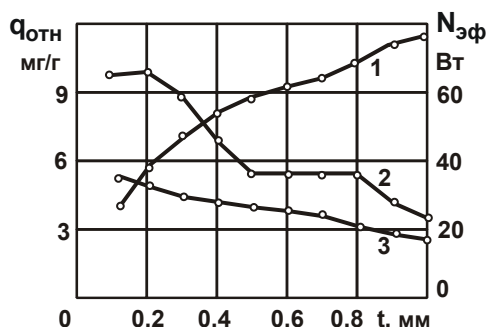


Рис. 3.17. Зависимости эффективной мощности шлифования $N_{эф}$ (1) и относительного расхода алмазов $q_{отн}$ (2, 3) от глубины шлифования t

Условия обработки: 1, 2 – $a_{z.max} = 15$ мкм; 3 – $a_{z.max} = 10$ мкм; обрабатываемый материал – ПГ-10Н -01; $\bar{X} = 250/200$; $m = 100$; $V_{кр} = 28$ м/с.

Установлено также, что чем больше максимальная толщина среза $a_{z.max}$, тем больше относительный расход алмаза $q_{отн}$. Уменьшение $q_{отн}$ с увеличением глубины шлифования t при условии $a_{z.max} = \text{const}$ свидетельствует о преимуществах схемы глубинного шлифования. При этом установлено, что чем больше глубина шлифования t , тем значительнее снижение $q_{отн}$ и тем выше эффективность от применения глубинного алмазного шлифования. Достижимые при глубинном алмазном шлифовании значения относительного расхода алмаза $q_{отн}$ экономически приемлемы. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность в несколько раз увеличить производительность обработки деталей с высокопрочным покрытием (достичь значения $9\ 500$ мм³/мин) при экономически допустимом относительном расходе алмаза $q_{отн} = 5$ мг/г в условиях глубинного алмазного шлифования.

Необходимо отметить, что в условиях обычного многопроходного алмазного шлифования, как правило, имеет место увеличение относительного расхода алмаза $q_{отн}$ с увеличением глубины шлифования t . В условиях же глубинного алмазного шлифования наблюдается противоположная закономерность, что обусловлено, по-видимому, отличиями в механизме износа алмазного круга. Так, следуя полученным в работе аналитическим зависимостям, максимальная толщина среза $a_{z.max}$ при

многопроходном шлифовании всегда больше, чем при глубинном шлифовании вследствие неблагоприятного соотношения параметров режима шлифования $V_{\text{дет}}$ и t . Увеличение $a_{z.\text{max}}$, в свою очередь, приводит к увеличению нагрузок, действующих на зерна и, следовательно, к увеличению интенсивности износа круга. Причем, чем больше глубина шлифования t , тем больше $a_{z.\text{max}}$ и, соответственно, относительный расход алмаза $q_{\text{отн}}$ в случае интенсивного разрушения зерен и их выпадения из связки от чрезмерных нагрузок.

В условиях же глубинного алмазного шлифования, когда максимальная толщина среза $a_{z.\text{max}}$ независимо от характера изменения скорости детали и глубины шлифования, остается неизменной, не превышающей предельное значение, в механизме износа алмазного круга преобладает истирание зерен без их преждевременного разрушения и выпадения из связки. При этом доказано, что интенсивность линейного износа круга при условии $a_{z.\text{max}} = \text{const}$ остается постоянной. Тогда увеличение производительности обработки по зависимости $t^{0,5}$ приведет к снижению относительного расхода алмаза $q_{\text{отн}}$ по зависимости $t^{-0,5}$. Этим доказаны отличия в механизме износа круга при обычном алмазном шлифовании и глубинном шлифовании и обоснована причина уменьшения $q_{\text{отн}}$ с увеличением глубины шлифования t при условии $a_{z.\text{max}} = \text{const}$.

На рис. 3.18 представлены экспериментальные данные об изменении параметра шероховатости поверхности R_a с увеличением глубины шлифования t при условии $a_{z.\text{max}} = \text{const}$. Для сравнения приведены расчетные графики R_a от t при условии $a_{z.\text{max}} = \text{const}$. Расчет параметра шероховатости поверхности R_a производится по зависимости:

$$R_a = 5 \sqrt{\frac{a_{z.\text{max}}^6}{17,1 \cdot 10^3 \cdot t}}. \quad (3.40)$$

При этом скорость детали $V_{\text{дет}}$ для каждого конкретного значения глубины шлифования t устанавливается в соответствии с зависимостью (3.30). Как следует из приведенных графиков (рис. 3.18), во всех случаях с увеличением глубины шлифования t , при условии $a_{z.\text{max}} = \text{const}$, па-

параметр шероховатости поверхности R_a уменьшается. Это свидетельствует о том, что с переходом от схемы многопроходного шлифования к схеме глубинного шлифования появляется возможность улучшения качества обработанных поверхностей.

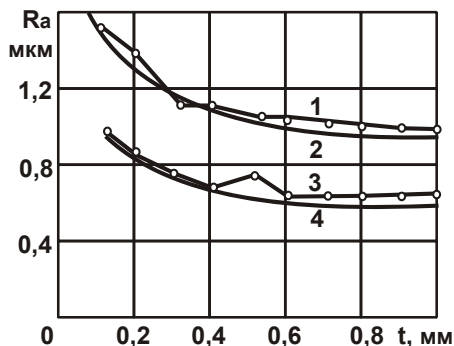


Рис. 3.18. Зависимость параметра шероховатости поверхности R_a от глубины шлифования t

Условия обработки: 1, 2 – $a_{z,max} = 15$ мкм; 3, 4 – $a_{z,max} = 10$ мкм; обрабатываемый материал – ПГ-10Н-01; $\bar{X} = 250/200$; $m = 100$; $V_{кр} = 28$ м/с.

Условные обозначения: 1, 3 – экспериментальные зависимости; 2, 4 – расчетные зависимости.

Значительное влияние на параметр шероховатости поверхности R_a оказывает максимальная толщина среза $a_{z,max}$. С ее увеличением шероховатость обработанной поверхности увеличивается более чем по линейной зависимости. Причем, такая закономерность установлена как экспериментально, так и теоретически. Заслуживает особого внимания то, что расчетные и экспериментальные данные имеют высокую степень сходимости. Их расхождение, следуя приведенным графикам на рис. 3.18, не превышает 10 %.

Как следует из рис. 3.19, глубинное алмазное шлифование деталей с высокопрочным покрытием позволяет повысить производительность обработки при одновременном снижении параметра шероховатости поверхности R_a . Необходимо отметить, что такие закономерности установлены впервые, т.к. не рассматривались условия обработки при глубинном шлифовании с учетом условия $a_{z,max} = \text{const}$. Как показано выше, выполнение этого условия по-новому открывает возможности шлифования и позволяет обосновать новые эффекты обработки.

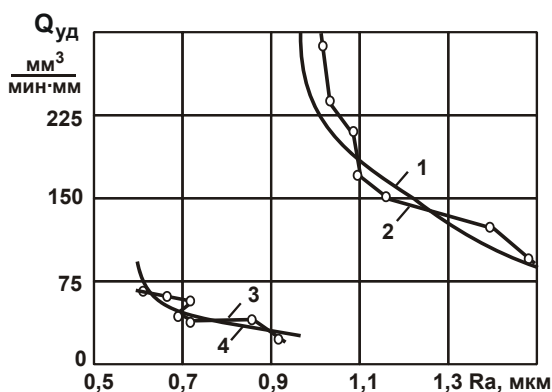


Рис. 3.19. Зависимость удельной производительности обработки $Q_{уд}$ от параметра шероховатости поверхности R_a

Условия обработки: 1, 2 – $a_{z,max} = 15$ мкм, 3, 4 – $a_{z,max} = 10$ мкм; обрабатываемый материал – ПГ-10Н-01; $\bar{X} = 250/200$; $m = 100$; $l_{дет} = 8$ мм; $V_{кр} = 28$ м/с.

Условные обозначения: расчетные (1, 4) и экспериментальные (2, 3) зависимости.

Исходя из приведенных на рис. 3.19 зависимостей, значительное влияние (более чем по линейной зависимости) на удельную производительность обработки $Q_{уд}$ оказывает максимальная толщина среза $a_{z,max}$. С ее увеличением наблюдается значительное увеличение $Q_{уд}$, что подтверждено экспериментально. Кроме того, с увеличением $a_{z,max}$ увеличиваются значения параметра шероховатости поверхности R_a , которые могут быть реализованы в этих условиях, т. зависимость удельной производительности обработки $Q_{уд}$ от R_a приобретает вид асимптотической кривой, приближающейся к конкретному значению R_a . Для случая $a_{z,max} = 10$ мкм зависимость асимптотически приближается к прямой $R_a = 0,5$ мкм, а для случая $a_{z,max} = 15$ мкм – к прямой $R_a = 0,9$ мкм.

Для экспериментальной оценки влияния характеристик алмазного круга на параметр шероховатости поверхности R_a следует воспользоваться зависимостью (3.33), в которую наряду с параметрами режима шлифования входят характеристики алмазного круга: зернистость круга $\bar{X}$ и объемная концентрация алмазных зерен в круге m . В процессе исследования обрабатываемости образцов с высокопрочным покрытием ПГ-10Н-01 использовались алмазные круги с различными значениями $\bar{X}$ и m . На рис. 3.20 представлены зависимости параметра шероховатости

поверхности R_a от зернистости круга $\bar{X}$ и объемной концентрации алмазных зерен в круге m .

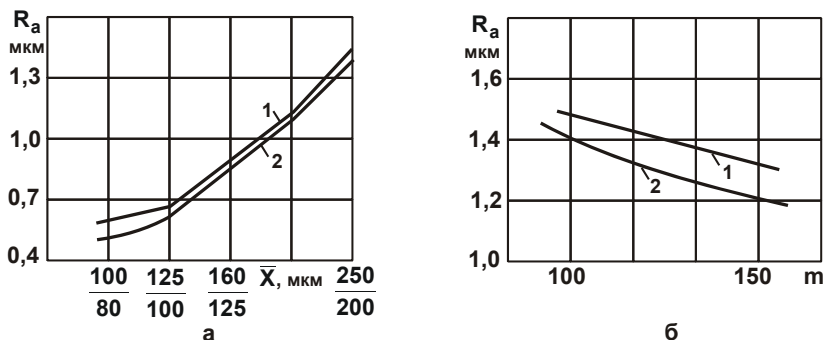


Рис. 3.20. Зависимости параметра шероховатости поверхности R_a от зернистости круга $\bar{X}$ (а) и объемной концентрации алмазных зерен в круге m (б)

Условные обозначения: экспериментальные (1) и расчетные (2) зависимости.

Условия обработки: $\bar{X} = 250/200$; $m = 100$; $V_{\text{дет}} = 0,6$ м/мин; $V_{\text{кр}} = 28$ м/с; обрабатываемый материал – ПГ-10Н-01.

Для сравнения приведены экспериментальные и расчетные значения. Как видно, увеличение зернистости круга $\bar{X}$ ведет к увеличению шероховатости поверхности R_a , поскольку увеличивается размер режущих зерен, а, следовательно, и след, оставленный зерном на обработанной поверхности. Необходимо отметить, что расчетные значения параметра шероховатости поверхности R_a несколько ниже экспериментальных. Объясняется это наличием множества острых микрокромки на поверхности режущих зерен, которые создают развитый по форме след. Введение в зону резания дополнительной энергии в форме электрических разрядов обеспечивает высокую степень очистки режущей поверхности алмазного круга от образующихся стружек и устраняет налипание материала на режущие зерна, что обеспечивает высокую развитость режущего рельефа круга и тем самым положительно влияет на выходные показатели шлифования (что при моделировании формы зерен в теоретических расчетах не учитывается). Вместе с тем, установлено, что расхождение расчетных и экспериментальных значений параметра шероховатости поверхности R_a не превышает 15 %. Следовательно, возможность использования зависимости (3.33) для прогнозирования

шероховатости обработанной поверхности с изменением зернистости круга $\bar{X}$ экспериментально подтверждена.

В отличие от зернистости круга $\bar{X}$, увеличение объемной концентрации алмазных зерен в круге m способствует снижению параметра шероховатости поверхности R_a . Однако значительного снижения R_a с увеличением m не наблюдается. На рис. 3.20б представлены кривые зависимости параметра шероховатости поверхности R_a от объемной концентрации алмазных зерен в круге m расчетного и экспериментального характера. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают теоретически установленную зависимость.

При оценке эффективности процесса обработки важно знать характер зависимости относительного расхода алмазов $q_{отн}$ от параметра шероховатости поверхности R_a , которая определяет экономическую эффективность применения данного метода шлифования. В связи с этим на рис. 3.21 представлены зависимости $q_{отн}$ от параметра шероховатости поверхности R_a , полученные при обработке деталей с высокопрочным покрытием ПГ-10Н-01.

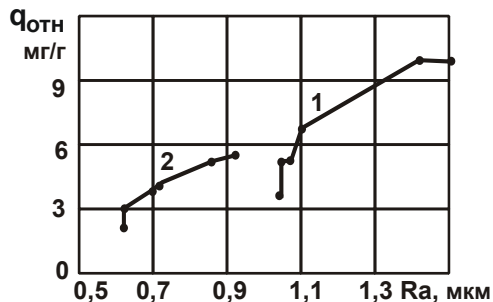


Рис. 3.21. Зависимость относительного расхода алмаза $q_{отн}$ от параметра шероховатости поверхности R_a

Условные обозначения: 1, 2 — $a_{z.max} = 15$ мкм; 3, 4 — $a_{z.max} = 10$ мкм.

Условия обработки: $\bar{X} = 250/200$; $m = 100$; обрабатываемый материал — ПГ-10Н-01.

Как видно, с увеличением параметра шероховатости поверхности R_a наблюдается увеличение относительного расхода алмазов $q_{отн}$, однако с разной интенсивностью. Существуют области изменения параметров режимов шлифования, в которых $q_{отн}$ изменяется весьма незна-

чительно при существенном изменении R_a . Использование таких областей позволяет получить различную шероховатость поверхности материала, стабилизируя при этом наименьший расход алмазов.

В то же время существуют области, в которых практически отсутствует связь между параметрами $q_{отн}$ и R_a . Это свидетельствует о том, что относительный расход алмазов может изменяться в значительных пределах практически без изменения параметра шероховатости поверхности R_a . Эти области имеют чрезвычайно важное практическое значение. Приведенные на рис. 3.21 экспериментальные графики еще раз подтверждают идею о том, что применение в качестве условия оптимизации параметров обработки максимальной толщины среза $a_{z.max}$ позволяет принципиально по-новому подойти к определению технологических возможностей глубинного алмазного шлифования и установить новые нетрадиционные соотношения параметров режимов шлифования, обеспечивающих значительное повышение эффективности обработки.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования позволили, во-первых, определить оптимальные значения выходных технологических параметров глубинного алмазного электроэрозионного шлифования, во-вторых, подтвердить достоверность разработанной математической модели шлифования и полученных теоретических результатов. Установлено также, что наиболее эффективно применение при глубинном алмазном шлифовании деталей с высокопрочным покрытием алмазных кругов на металлических связках М2-01, М1-01, М3-06, М1-10 с зернистостью 160/125 ... 250/200 и 100-процентной концентрации в условиях их непрерывной электроэрозионной правки.

3.6. Технологическое обеспечение алмазного электроэрозионного глубинного шлифования

3.6.1. Используемые источники технологического тока

В настоящее время разработано множество электрических схем генераторов импульсного тока для различных видов эрозионного воздействия. Промышленностью серийно выпускаются генераторы типа ШГИ, ГКИ, ИТТ (табл. 3.7). Наиболее универсальными источниками импульсного высокочастотного тока для алмазного электроэрозионного процесса шлифования являются генераторы типа ШГИ.

Таблица 3.7

Источники технологического тока

Обозначение источника	Ток $I_{\text{ср}}$, А	Частота f , кГц	Скважность $q_{\text{и}}$	Силовые блоки, В _с
ШГИ–40–440М	40	1 – 440	1,1 – 8,1	3
ШГИ–80×2–88М	80	1 – 88	1,1 – 8,1	6
ИТТ–35	35	$50 \cdot 10^{-3}$	4 – 20	1

Важным регулируемым параметром процесса эрозионного воздействия на режущую поверхность алмазного круга является энергия единичных искровых разрядов, которая выражается зависимостью:

$$\mathcal{E} = I_{\text{ср}} \cdot U_{\text{ср}} \cdot \tau_{\text{и}}, \quad (3.41)$$

где $I_{\text{ср}}$, $U_{\text{ср}}$ – средние значения силы тока и напряжения в межэлектродном промежутке, А, В;

$\tau_{\text{и}}$ – время действия единичного импульса, с.

Величина $\tau_{\text{и}}$ определяется зависимостью:

$$\tau_{\text{и}} = \frac{1}{f \cdot q_{\text{и}}}, \quad (3.42)$$

где f – частота следования импульсов, Гц.

Энергия разрядов выражается параметрами f и $q_{\text{и}}$:

$$\mathcal{E} = \frac{I_{\text{ср}} \cdot U_{\text{ср}}}{f \cdot q_{\text{и}}}. \quad (3.43)$$

Зависимость (3.43) устанавливает прямо пропорциональную связь энергии импульсного разряда с характеристиками разрядного тока. Увеличение f и $q_{\text{и}}$ снижает энергоемкость импульса, однако, эти параметры имеют определенные оптимальные области значений, использование которых позволяет оптимизировать процесс алмазного электроэрозионного шлифования. Из табл. 3.7 видно, что имеет место разброс значений f и $q_{\text{и}}$ для различных источников тока. Частота следования импульсов

ИТТ–35 принимает постоянное и наименьшее значение, равное 50 Гц. Для других генераторов частота следования импульсов $f > 1\,000$ Гц. В отличие от частоты, скважность импульсов ИТТ–35 больше, т.е. концентрация энергии во времени для этого источника тока в несколько раз выше, чем для генератора ШГИ. Однако, рассматривая процесс алмазного электроэрозионного шлифования, следует отметить, что частота вращения шлифовального круга колеблется в пределах 40 – 50 Гц. При подключении ИТТ–35 имеет место совпадение частот следования импульсов и вращения круга, в результате чего лишь небольшая площадь режущей поверхности круга подвергается эрозионному воздействию тока. Сочетание переменной концентрации энергии во времени и небольшой частоты следования импульсов вызывает усиленное эрозионное воздействие в нескольких местах режущей поверхности круга, что нарушает стабильность процесса шлифования материала. Поэтому более целесообразно использовать ИТТ–35 в случае устранения радиального биения алмазного круга с небольшой скоростью вращения, значительно отличающейся от частоты вращения 50 Гц.

Широкодиапазонные генераторы импульсов обладают большим набором значений частоты и скважности и, следовательно, могут быть гораздо эффективнее использованы при алмазном электроэрозионном шлифовании. Важным выходным параметром источника импульсных разрядов является среднее значение вырабатываемого тока I_{cp} . У генератора ШГИ–80×2–88М оно в два раза выше, чем у генератора ШГИ 40 – 440. Кроме того, важной особенностью, выгодно отличающей генератор ШГИ 80×2–88М от других генераторов, является наличие у него пяти силовых блоков в каждом из двух контуров. Увеличивая число включенных блоков, появляется возможность увеличения силы тока разрядных импульсов до $I_{cp} = 80$ А. В связи с этим, чрезвычайно важно реализовать такой характер зависимости в условиях глубинного алмазного шлифования.

Схема глубинного алмазного шлифования характеризуется большой площадью контакта круга с обрабатываемой поверхностью и поэтому для нормального осуществления процесса шлифования необходимо создать требуемую концентрацию тока на режущей поверхности круга. Правильно установленная концентрация тока позволит обеспечить очистку поверхность круга от засаливания и ограничить чрезмерный расход алмазов от интенсивного эрозионного воздействия разрядного

тока. Так, на рис. 3.22 приведены кривые зависимостей параметров импульсного тока $q_{и}$ и V_c от величины тока, согласно которым с увеличением числа включенных силовых блоков V_c увеличивается сила тока, а рост параметра $q_{и}$, наоборот, уменьшает ее.

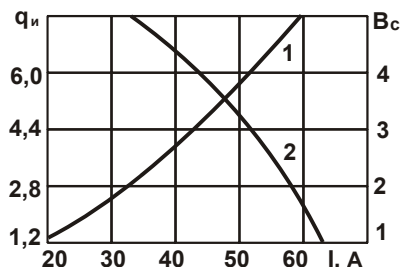


Рис. 3.22. Зависимость разрядного тока I от скажности $q_{и}$ и количества силовых блоков V_c

Условия обработки: 1 – V_c : $f = 8$ кГц, $q_{и} = 1,6$; 2 – $q_{и}$: $f = 8$ кГц, $V_c = 4$.

Частота следования импульсов при этом не оказывает влияния на выходные значения импульсного тока. Таким образом показано, что, располагая современными мощными источниками тока, весьма важно установить функциональные связи между электрическими параметрами и выходными (технологическими) параметрами обработки.

3.6.2. Разработка специального генератора импульсного тока

В результате выполнения экспериментальных исследований и широкого внедрения в производство технологий электроэрозионного алмазного шлифования (в том числе глубинного шлифования) труднообрабатываемых материалов установлена необходимость создания специального генератора импульсного тока с вполне конкретными диапазонами изменения электрических параметров. При этом важно значительно снизить вес и уменьшить габариты генератора по сравнению с аналогами, обеспечить его работу в режиме короткого замыкания, так как процесс шлифования (в особенности процесс глубинного шлифования) характеризуется большой площадью контакта круга с деталью.

В известных схемах электроэрозионного алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов в основном использовались специ-

альные источники технологического тока типа ИТТ–35, ИТТ–40. Существенным недостатком этих источников является несоответствие значений частоты и скважности вырабатываемого импульсного тока необходимым значениям. Частота следования импульсов в ИТТ–35 равна 25 Гц. Если сравнивать ее с частотой вращения алмазного круга, равной 40 – 50 Гц, то оказывается, что отсутствует эрозионное воздействие по всей режущей поверхности круга. Это приводит к засаливанию круга и потере его режущих свойств. Скважность импульсного тока в ИТТ–35 значительно больше (9 – 20), чем у специально разработанного источника (1 – 4), т.е. значительно выше концентрация импульса во времени, что ведет к интенсивному эрозионному разрушению режущей поверхности алмазного круга только в отдельных местах и, тем самым, нарушает стабильность процесса шлифования.

Перечисленные и целый ряд других недостатков устранены в специально разработанном генераторе. Новая электрическая схема позволяет вырабатывать высокочастотный разрядный импульсный ток с характеристиками, установленными расчетным путем на основе экспериментальных данных, приведенных в п. 3.2. Частота следования импульсов находится в диапазоне (8 – 44 кГц) и изменяется дискретно по трем значениям: 8 кГц, 22 кГц, 44 кГц. Реализация на практике этих частот обеспечивает качественное эрозионное воздействие разрядного тока по всей режущей поверхности, а также обеспечивает жесткое и чистовое воздействие на круг. Жесткое воздействие необходимо в условиях устранения большого радиального биения, что чрезвычайно важно при использовании крупногабаритных кругов. Чистовой, более мягкий, режим работы генератора необходим при окончательной подготовке алмазного круга к работе. Реализуемые значения скважности тока позволяют уменьшить расход алмазосодержащего слоя в процессе правки, иными словами, устраняют "выжигание" связки и алмазов, что наблюдается при использовании источников ИТТ.

В разработанном генераторе применяются новые радио- и электронные детали с высокой надежностью работы, что позволяет гарантировать его длительную эксплуатацию без ремонта.

Значительное снижение габаритов позволило более рационально организовать рабочее место шлифовщика и, тем самым, улучшить условия работы. Снижение потребляемой мощности создает эффект экономии электроэнергии. Основные технические характеристики и данные генератора импульсов представлены в табл. 3.8.

Технические характеристики генератора

Наименование показателей	
1. Напряжение питающей сети, В	$220 \pm 10 \%$
2. Частота питающей сети, Гц	$50 \pm 10 \%$
3. Номинальный средний ток, А	25 ± 3
4. Фиксированные частоты, кГц	22, 44, 66, $\pm 10 \%$
5. Допустимые отклонения частот, %	1,2; 2
6. Скважность импульсов	
7. Режим работы	длительный
8. Охлаждение	воздушное принудительное
9. Потребляемая мощность, кВт	$1,1 \pm 10 \%$
10. Масса, кг, не более	30

Генератор формирует прямоугольные силовые импульсы следующим образом: сетевое напряжение (220 В, 50 Гц) понижается силовым трансформатором до величины 50 В и выпрямляется с последующим сглаживанием. Выпрямленное напряжение подается на силовые ячейки. При подаче на силовые ячейки импульсов от задающего генератора происходит их запирающее и прерывание протекающего через них тока, что формирует импульсное напряжение заданной частоты на электроэрозионные нагрузки (т.е. между кругом и деталью). С целью регулирования тока нагрузки предусмотрено включение различного количества силовых ячеек (от 1 до 4). Защита силовых ячеек осуществляется плавкими предохранителями. Достоинством разработанного импульсного генератора является защищенность всех элементов электронной схемы от воздействия влаги, т.к. в процессе шлифования образуется туман из охлаждающей жидкости, который вместе с воздухом для охлаждения попадает внутрь корпуса генератора. Размещение генератора на большом расстоянии от шлифовального станка приводит к значительным потерям разрядного тока в токопроводящих проводах.

3.6.3. Модернизация станка для осуществления алмазного электроэрозионного глубинного шлифования

Реализация процесса алмазного шлифования деталей из труднообрабатываемых материалов с электроэрозионным воздействием на металлическую связку алмазного круга неразрывно связана с рядом ра-

бот по модернизации шлифовального станка. Модернизацию можно проводить на всех серийно выпускаемых станках. Она состоит в подводе технологического тока к алмазному кругу и электроизоляции шпиндельного узла от круга.

В настоящее время разработано множество вариантов конструкций модернизации, однако, как правило, все они предназначены для использования алмазных кругов малых диаметров, что не всегда приемлемо при использовании кругов больших диаметров – 300 ... 500 мм и выше. Наиболее надежной и многократно проверенной конструкцией является электроизоляция посадочного места планшайбы шлифовального круга от шпиндельного вала. Схема конструкции модернизированного шпиндельного узла представлена на рис. 3.23.

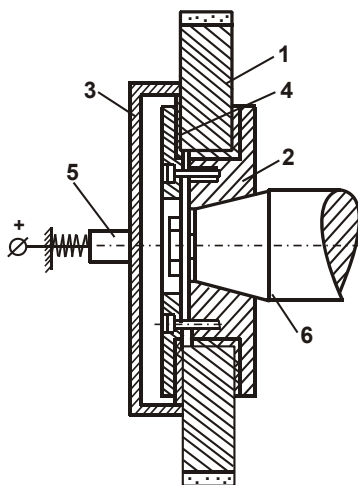


Рис. 3.23. Схема электроизоляции шпиндельного узла и подвода технологического тока к алмазному кругу

Условные обозначения: 1 – алмазный круг; 2 – планшайба; 3 – токоподводящий фланец; 4 – изолятор; 5 – графитная щетка; 6 – шпиндель станка

Для установки изоляционного материала на конусную поверхность планшайбы необходимо произвести ее расточку на глубину 4 – 5 мм при строгом соблюдении базирования от посадочных мест алмазного круга, в противном случае будет наблюдаться дисбаланс при вращении узла в сборе. Окончательная расточка посадочного места планшайбы по изоляционному материалу, опять же, производится при строгом базировании от посадочного места круга и доводится путем замеров непосред-

ственно по шпиндельному валу. Строгое выполнение указанных рекомендаций позволит избежать дополнительного радиального биения круга и не потребует проведения дополнительной балансировки шлифовального узла. Обеспечить подвод технологического тока от генератора импульсов к кругу необходимо в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.23.

Многочисленные исследования показали на необходимость качественной очистки всех сопрягаемых поверхностей в цепи технологического тока от абразивной пыли и грязи. Поскольку появление дополнительного сопротивления значительно влияет на величину разрядного тока в цепи, тем самым, резко снижается эффективность электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность алмазного круга. Эффективной защитой места контакта гранитной щетки и вращающегося фланца токоподвода на планшайбе от разбрызгивающей охлаждающей жидкости служат защитные щитки. Конструктивное исполнение их может быть различным, исходя из конструкции узла токоподвода.

Следует обратить внимание на качественное исполнение деталей, обеспечивающих контакт между графитной щеткой и вращающимся фланцем. Наличие биения на указанном фланце при вращении с большой скоростью, равной скорости вращения круга, создает разрыв в цепи технологического тока, поскольку существует определенная инерционность в движении (поджиге) щетки, а это, в свою очередь, приводит к эрозионным процессам на фланце и, следовательно, к плохому прохождению разрядного тока в цепи.

Вторым элементом цепи технологического разрядного тока служит катодное устройство, которое обеспечивает надежную и качественную очистку режущей поверхности алмазного круга на металлической связке от продуктов обработки, а также вскрытие новых слоев режущих зерен.

Схема конструкции катодного устройства представлена на рис. 3.24. Как показывает практика внедрения алмазного шлифования с электроэрозионным воздействием на алмазный круг, в процессе обработки использовать более сложные конструкции правящих электродов в производственных условиях не целесообразно из-за очень низкой культуры обращения со стороны рабочего. По этой причине были разработаны специальные конструкции устройств с целью обеспечения высокой надежности и долговечности, а также простоты конструкции.

Тело катода выполнено из меди. Необходимым условием обеспечения более интенсивного эрозионного воздействия на круг со стороны

катода является наличие пазов на рабочей поверхности. Они выполняются вдоль образующей режущей части круга и обеспечивают высокую концентрацию разрядного тока на кромках паза, а это обеспечивает работу, в эрозионном отношении, всей поверхности катода. Следует устанавливать величину площади рабочей поверхности катодного устройства исходя из мощности используемого генератора импульсов.

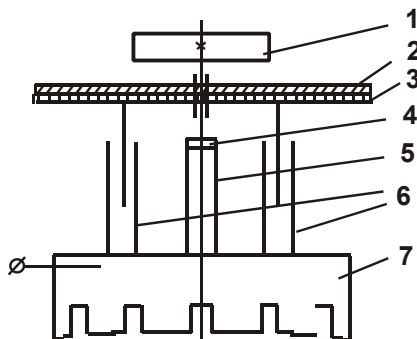


Рис. 3.24. Схема катодного устройства алмазного круга

Условные обозначения: 1 – изоляционная ручка; 2 – текстолитовая пластина; 3 – резиновая прокладка; 4 – гайка; 5 – ходовой винт; 6 – направляющие; 7 – катод.

По мере истирания катода зазор с рабочей поверхностью алмазного круга следует регулировать с помощью специального ходового винта непосредственно в процессе работы.

Тело катода должно быть изолировано от корпуса станка, для чего следует использовать текстолитовые изоляторы. Необходимо обратить внимание на обеспечение плотного прилегания изоляционных пластин к кожуху шлифовального круга на станке с целью исключения выбрасывания охлаждающей жидкости наружу и устранения помех рабочему.

Модернизация механической части круглошлифовального станка предполагает возможность варьирования скорости детали в широком диапазоне, включая реализацию скорости детали $V_{\text{дет}} = 1$ м/мин. Для этого вращательное движение на деталь передается от вала электродвигателя постоянного тока, однако обеспечивать постоянство такой небольшой скорости детали весьма сложно из-за малого передаточного числа привода. В связи с этим, был разработан и изготовлен новый привод вращения детали со скоростью $V_{\text{дет}} \leq 1$ м/мин (рис. 3.25). Контроль скорости детали осуществляется тахометром, установленным на валу двигателя привода.

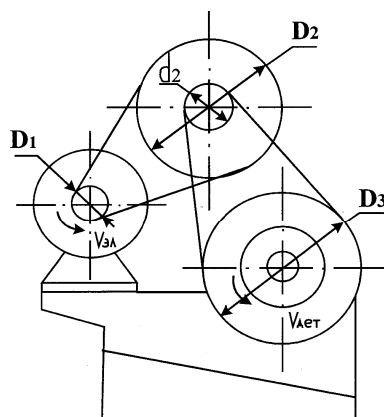


Рис. 3.25. Схема привода вращения детали на круглошлифовальном станке

3.7. Разработка эффективной технологии круглого наружного глубинного алмазного шлифования деталей двигателя внутреннего сгорания с высокопрочными покрытиями

Восстановление изношенных деталей с использованием высокопрочных покрытий позволяет в 2 раза и более повысить срок работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Вместе с тем, как отмечалось в п. 3.1, сложности осуществления шлифования покрытий твердостью $HRC > 60$ ограничивают их применение для восстановления изношенных деталей ДВС, что требует создания эффективных технологий шлифования. Выше научно обоснованы возможности высокопроизводительной обработки покрытий твердостью $HRC > 60$ на основе использования глубинного алмазного электроэрозионного шлифования. Это открывает широкие перспективы эффективной обработки деталей ДВС с покрытиями: клапанов газораспределения, коленчатых валов, кулачковых валов газораспределения и других деталей. Однако реализация на практике новых технологий связана с рядом трудностей технологического характера. Например, невозможность жесткого крепления на станке клапана газораспределения при круглом наружном шлифовании восстановленной покрытием фаски (рис. 3.1) приводит к снижению производительности и точности обработки, что делает эту операцию шлифования наиболее трудоемкой в технологическом процессе обработки деталей ДВС.

Для определения условий повышения эффективности шлифования с учетом упругих перемещений в технологической системе следует рассмотреть расчетную зависимость текущей производительности обработки $Q_{\text{тек}}$ [85]:

$$Q_{\text{тек}} = Q_{\text{ном}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{c \cdot \lambda \cdot \tau}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}}}} \right) = Q_{\text{ном}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{c \cdot V_{\text{кр}} \cdot K_{\text{ш}} \cdot \tau}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}} \cdot \sigma}} \right), \quad (3.44)$$

где $Q_{\text{ном}}$ – номинальная производительность обработки, м³/мин;

c – приведенная контактная жесткость при шлифовании, Н/м;

$\lambda = Q_{\text{тек}} / P_y = V_{\text{кр}} \cdot K_{\text{ш}} / \sigma$ – удельная интенсивность съема материала, м³/мин·Н;

σ – условное напряжение резания, Н/м²;

$K_{\text{ш}} = P_z / P_y$;

P_z , P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;

$D_{\text{дет}}$, $l_{\text{дет}}$ – диаметр и длина обрабатываемой детали, м;

τ – время обработки, с.

Как видно, с изменением второго множителя текущая производительность $Q_{\text{тек}}$ может изменяться в широких пределах: от нуля до значения $Q_{\text{ном}}$. Поэтому выбор оптимальных условий обработки следует производить из условия приближения второго множителя к единице, т.е. из условия:

$$e^{-\frac{c \cdot \lambda \cdot \tau}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}}}} \rightarrow 0. \quad (3.45)$$

Для выполнения условия (3.45) необходимо показатель степени данного выражения устремить к бесконечности (с учетом $\tau = \frac{n \cdot D_{\text{дет}}}{V_{\text{дет}}}$, где n – текущее число вращений детали):

$$\frac{c \cdot \lambda \cdot n}{V_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}}} \rightarrow \infty. \quad (3.46)$$

Из выражения (3.46) вытекают два варианта его реализации. Первый состоит в устремлении к бесконечности параметров, стоящих в числителе. Второй состоит в устремлении к нулю параметров, стоящих в знаменателе. Учитывая, что параметры s и λ , стоящие в числителе, могут изменяться в ограниченных пределах и, следовательно, не могут принимать бесконечные значения, реализовать данное условие можно за счет увеличения параметра n до бесконечности. Тогда второй множитель зависимости (3.44) увеличится и влияние упругих перемещений в технологической системе на производительность обработки станет весьма незначительным, что приведет к выполнению условия $Q_{\text{тек}} \rightarrow Q_{\text{ном}}$ (рис. 3.26).

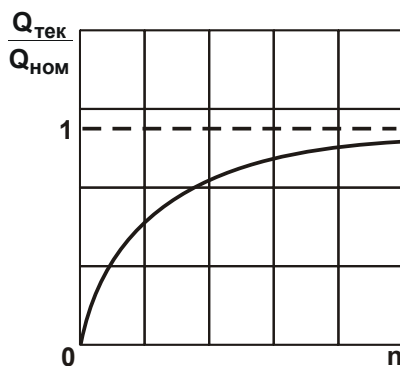


Рис. 3.26. Зависимость отношения $Q_{\text{тек}} / Q_{\text{ном}}$ от количества оборотов детали n

Однако неустановившийся процесс шлифования в этом случае характеризуется небольшой текущей производительностью обработки $Q_{\text{тек}}$, поскольку для достижения требуемого натяга в технологической системе при обработке неравномерных поверхностей деталей с низкой жесткостью их крепления на станке необходимо затратить значительное технологическое время.

Наиболее приемлемым вариантом реализации условия (3.46) следует рассматривать второй случай, связанный с существенным уменьшением $V_{\text{дет}}$, когда также справедливо условие $Q_{\text{тек}} \rightarrow Q_{\text{ном}}$ (рис. 3.27). С целью компенсации снижения номинальной производительности обработки $Q_{\text{ном}} = V_{\text{дет}} \cdot t \cdot l_{\text{дет}}$, вследствие снижения $V_{\text{дет}}$, необходимо увеличивать глубину шлифования $t = Q_{\text{ном}} / V_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}}$ до величины сни-

маемого припуска. Тогда съём припуска будет производиться за один оборот детали ($n = 1$) в условиях глубинного шлифования.

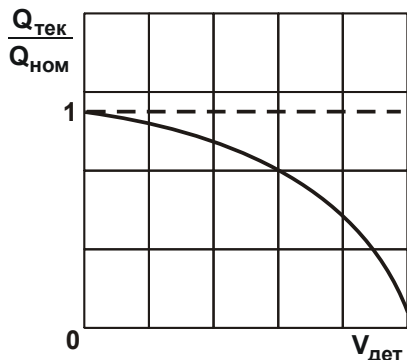


Рис. 3.27. Зависимость отношения $Q_{\text{тек}} / Q_{\text{ном}}$ от скорости детали $V_{\text{дет}}$ при глубинном шлифовании

Таким образом, доказано преимущество применения (для обработки высокопрочных покрытий с неравномерным слоем снимаемого припуска) схемы глубинного шлифования.

Автоматизированный цикл врезного глубинного шлифования должен включать: врезание круга в неподвижную деталь на полную глубину резания и съём припуска за один оборот детали.

Такой цикл врезного шлифования отличается от циклов, применяемых в современных круглошлифовальных станках МШ–197В.

На серийно выпускаемых станках данного типа можно реализовать два автоматизированных цикла. Первый используемый цикл определяется форсированным подводом круга к обрабатываемой поверхности (участок ОА, кривая 2, см. рис. 1.4) и врезанием его с постоянной подачей в деталь (участок АЕ). После достижения необходимого натяга в технологической системе происходит обработка поверхности в требуемый размер. Заданная чистота обработки достигается выхаживанием определенное время.

Второй используемый цикл определяется форсированным подводом круга к обрабатываемой поверхности (участок ОА, кривая 1, см. рис. 1.4), а затем ускоренным врезанием в деталь (участок АЕ на рис. 1.4). На этапе ВС происходит черновая обработка с врезной подачей в 4 – 5 раз меньше, чем при ускоренном врезании. Требуемая частота поверх-

ности обработки достигается выхаживанием. Отличительной особенностью второго автоматизированного цикла от первого является значительно меньшие затраты времени на достижение требуемого натяга в технологической системе, который достигается на этапе ускоренного врезания, что способствует повышению эффективности обработки. Сопоставляя предложенный цикл (с учетом глубинной схемы шлифования) и два цикла, используемые на серийно выпускаемых круглошлифовальных станках, следует отдать предпочтение первому, поскольку в этом случае, во-первых, реализуется более высокопроизводительное глубинное шлифование, во-вторых, отсутствует необходимость контроля создаваемого натяга в технологической системе с целью уравнивания сил резания на этапе врезания и чернового шлифования, что весьма сложно с точки зрения правильности выбора соотношения подач при врезании и черновом шлифовании. Особенно это важно при алмазном шлифовании, где самозатачивание круга отсутствует, и он интенсивно засаливается.

Предложенный цикл врезного глубинного шлифования не требует разработки сложных следящих систем и относительно просто может быть реализован на существующих круглошлифовальных станках.

Для реализации алмазного электроэрозионного шлифования восстановленной фаски клапана высокопрочным покрытием ПГ-10Н-01 на круглошлифовальном станке МШ–197В проведена необходимая модернизация станка и узлов генератора электрических импульсов. Электроизоляция алмазного круга от шпиндельного узла и подвод технологического тока осуществлены аналогично варианту, описанному в п. 3.6. На круглошлифовальном станке был установлен крупногабаритный алмазный круг 1А1 500×25×305×6 АС6 200/160 100 М2-01, который имел значительное радиальное биение (0,6 – 0,7 мм), не позволяющее нормально осуществлять процесс шлифования. Многочисленными экспериментальными исследованиями доказано, что для обеспечения устойчивой работы алмазного круга с указанными размерами и характеристиками радиальное биение должно находиться в пределах 0,01 мм. Для устранения радиального биения станок был оборудован специальным приспособлением, которое работает по принципу электроэрозионного удаления материала с положительно заряженного электрода, т.е. с алмазного круга на токопроводящей связке (рис. 3.28).

Основным элементом конструкции такого приспособления является катод, изготовленный из меди. При помощи ходового винта и направ-

ляющих устанавливается необходимый зазор между телом катода и режущей поверхностью круга, который играет важную роль в эрозионном процессе удаления материала связки. Катодное устройство изолировано от корпуса станка посредством текстолитовой пластины и к нему подключен отрицательный выход генератора импульсов. Для обеспечения процесса эрозионного воздействия разрядного тока в зазор между режущей поверхностью круга и катода подводится СОТС по специальному трубопроводу. В случае прекращения процесса правки круга на трубопроводе имеется кран, позволяющий перекрыть подачу охлаждающей жидкости.

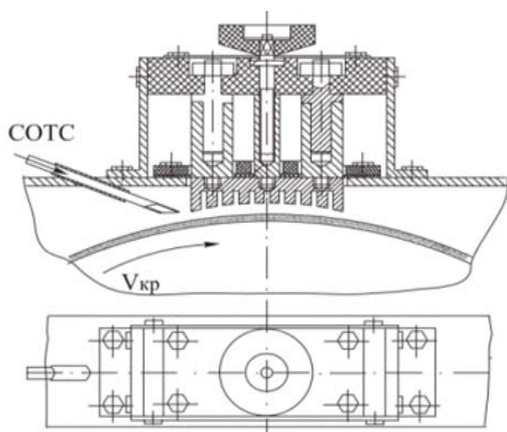


Рис. 3.28. Устройство для электроэрозионной правки алмазных кругов

Прямолинейность образующей профиля режущей части круга в процессе электроэрозионной правки достигается осциллирующим осевым движением шпинделя с алмазным кругом. С учетом максимального осевого хода шпинделя для обеспечения надежности прямолинейности профиля выбрана оптимальная ширина катода, которая равна 20 мм при осевом ходе шпинделя 16 мм.

Для эффективного осуществления процесса устранения радиального биения алмазного круга определены оптимальные параметры импульсного тока. В качестве генератора импульсов рекомендуется использовать ШГИ–80×2.

В п. 3.2 подробно рассмотрен характер воздействия разрядного тока на токопроводящую связку круга и, в частности, на металлическую

связку M2-01. Поэтому для анализа закономерностей процесса электроэрозионной правки алмазного круга следует воспользоваться этими результатами. Как известно, процесс шлифования с одновременным протеканием разрядного тока через деталь и круг характеризуется небольшой площадью их контакта, поэтому эрозионный процесс на режущей поверхности круга носит локальный характер. Поддержание в процессе обработки установленной в ходе исследований оптимальной концентрации тока $K_T = 1,4 \text{ А/мм}^2$ для связки M2-01 обеспечивает надежную очистку алмазного круга от стружек, удаление слоев связки и обнажение новых режущих зерен.

В случае устранения радиального биения необходимо за короткое время удалить большое количество связки. Для этого предлагается новое решение, состоящее в значительном увеличении площади эрозионного воздействия, что достигается увеличением рабочей части катода. В связи с этим, для усиления эрозионного процесса поверхность катода выполнена в виде чередующихся пазов.

Используемый генератор импульсов ШГИ–80×2 может обеспечить силу тока $I_{cp} = 80 \text{ А}$, чего достаточно для создания необходимой концентрации тока на поверхности такого катода. В этом случае концентрацию тока K_T следует рассматривать переменной величиной, поскольку по мере линейного удаления слоя связки площадь ее контакта с катодом увеличивается, а концентрация тока K_T несколько уменьшается, однако, по мере увеличения площади эрозионного воздействия количество удаленного металла связки во времени увеличивается.

Процесс эрозионного воздействия на связку алмазного круга следует разделить на два этапа. На первом этапе осуществляется черновая обработка с удалением большого количества связки и устранением радиального биения рабочей поверхности круга, а на втором этапе – чистовая обработка режущей поверхности и непосредственная подготовка круга к шлифованию. При черновом эрозионном воздействии концентрация технологического тока должна быть максимальной, что достигается включением всех пяти силовых блоков генератора, а также снижением параметров частоты и скважности тока. В качестве оптимальных значений этих параметров следует рассматривать $f = 1 \dots 3 \text{ кГц}$; $q_{и} = 1,2 \dots 1,4$; $I_{cp} = 80 \text{ А}$.

Окончание черновой операции определяется визуально по наличию следов эрозионного процесса на всей рабочей поверхности круга.

При чистовой правке необходимо изменить электрические параметры путем увеличения частоты и скважности импульсов соответственно до значений $f = 8 \dots 22$ кГц; $q_{и} = 2,7 \dots 3,0$. Это позволит обеспечить более равномерное воздействие разрядного тока на режущую поверхность круга. Контроль подготовленного к работе круга оценивается путем осмотра всей его рабочей поверхности – поверхность должна быть равномерно вскрыта эрозионным воздействием, а радиальное биение круга не должно превышать 0,01 мм.

После прекращения процесса электроэрозионной правки тело катода с помощью ходового винта отводится от поверхности круга и тем самым предохраняется от преждевременного износа. Контрольные замеры линейного износа катода показывают, что он, как правило, небольшой и поэтому может использоваться длительное время. Для замены катода в связи с износом не требуется прилагать больших усилий, так как конструкция устройства предусматривает эту операцию.

Важным моментом на этапе модернизации станка для глубинного алмазного электроэрозионного шлифования восстановленной фаски клапана является обеспечение скорости детали $V_{дет} = 0,4 - 0,6$ м/мин. Сложность выполнения этого условия состоит в том, что зажим тела клапана осуществляется автоматически с помощью гидропривода, а это накладывает дополнительные сложности в его конструктивное исполнение. Наиболее приемлемым вариантом решения данного вопроса является использование специального редуктора с электродвигателем мощностью 1,1 кВт в одном корпусе. Передаточное число редуктора должно быть $i_{ред} = 300$. В случае использования указанного электродвигателя с редуктором отпадает необходимость что-либо изменять в кинематической схеме привода вращения детали.

Экспериментально установлено, что важным резервом повышение производительности шлифования покрытия фаски клапана является увеличение жесткости крепления тела детали в приводе вращения. На серийно выпускаемом круглошлифовальном станке МШ–197В в качества зажима детали используется цанговый зажим, обеспечивающий вход стержня клапана до упора в цангу на глубину 18 мм. Увеличить глубину захода стержня в цанговый патрон невозможно из-за специального устройства для автоматической смены клапанов при загрузке. Базирование детали происходит по рабочей цилиндрической части стержня клапана на специальном люнете. Опорные части люнета изготовлены

из искусственного антифрикционного материала и расположены под углом 90° . Под действием радиальной составляющей силы резания P_y происходит отжатие обрабатываемой поверхности покрытия фаски от круга, которое включает деформацию опорной поверхности люнета, а также изгиб тела стержня клапана. Таким образом, устранив две указанные причины при базировании обрабатываемой детали, можно повысить ее жесткость.

Наиболее приемлемым решением при замене пластмассовых упоров является установка радиальных подшипников требуемого типоразмера (рис. 3.29). Изгиб тела стержня клапана можно значительно уменьшить путем установки со стороны выпуклости стержня упора с радиальным подшипником одинакового типоразмера с первым. В связи с тем, что в процессе шлифования используется охлаждающая жидкость, и подшипники будут находиться в зоне ее действия, рабочую часть подшипников необходимо закрыть.

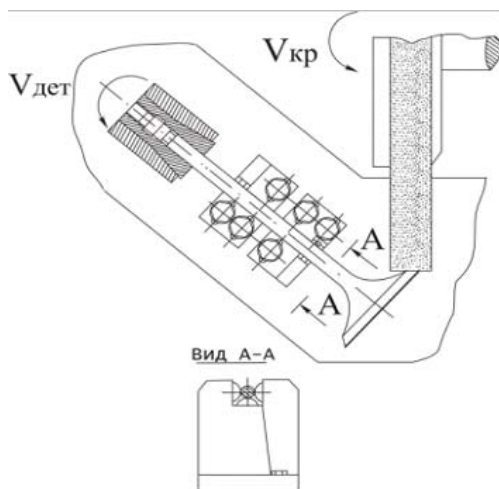


Рис. 3.29. Приспособление для увеличения жесткости крепления клапана в приводе вращения станка

Проведенные исследования жесткости описанного выше крепления клапана в приводе вращения (при статическом нагружении силой P_y) показали на возможность ее увеличения на 20 ... 25 %, что позволило повысить производительность обработки восстановленных клапанов.

Автоматизация процесса обработки восстановленной фаски клапана на модифицированном станке МШ–197В является неотъемлемым условием реализации нового технологического процесса.

В предлагаемом процессе глубинного шлифования этап форсированного подвода круга до касания с обрабатываемой поверхностью детали следует оставить без изменения, поскольку этот этап такой же, как и при шлифовании абразивным кругом. На этапе врезания режущей части круга в деталь имеет место интенсивное засаливание поверхности алмазного круга продуктами обработки, что является определяющим фактором при выборе параметров врезной подачи и импульсного тока. Наиболее целесообразно в этом случае врезание производить при неподвижной детали $V_{\text{дет}} = 0$, причем, врезание должно быть на глубину снимаемого припуска P . После достижения режущей поверхностью круга отметки величины припуска, можно за одно вращение детали удалить снимаемый припуск.

По мере врезания круга в обрабатываемую деталь происходит увеличение площади контакта круга с обрабатываемой поверхностью, а, следовательно, снижение концентрации разрядного тока на режущей поверхности, что ведет к засаливанию круга удаляемыми стружками. Уменьшение толщины среза $a_{z,\text{max}}$ при врезании уменьшает напряженность процесса резания и тем самым позволяет избежать засаливания круга. Как установлено расчетно-экспериментальным путем, оптимальное значение параметра $a_{z,\text{max}}$ должно быть на уровне 12 мкм. Такой подход позволяет реализовать одинаковые значения параметров разрядного тока в случае врезания на величину снимаемого припуска и при съеме остального материала покрытия шлифованием. Исходя из этого, определена область изменения скорости врезания круга в деталь при поддержании постоянным параметра $a_{z,\text{max}} = 12$ мкм. Доказано, что приемлемая скорость врезания при обработке высокопрочного покрытия ПГ-10Н-01 должна составлять $V_{\text{вр}} = 0,4 \dots 0,5$ мм/мин.

Этап врезания круга в деталь при $V_{\text{дет}} = 0$ предполагает некоторые изменения в электрической схеме станка, однако они не сложны и не требуют применения дополнительных конструктивных устройств. После врезания круга на полную глубину включается вращение детали и происходит шлифование остальной поверхности восстановленной фаски. Как уже отмечалось, параметры технологического тока при этом остаются прежними: $f = 3$ кГц; $q_{\text{и}} = 1,1 \dots 1,3$; $B_c = 5$; $I_{\text{ср}} = 67 \dots 70$ А.

Этап удаления материала покрытия с глубиной шлифования, равной величине припуска, является одновременно и чистовой обработкой, обеспечивающей шероховатость обработанной поверхности $R_a \leq 1$ мкм. Для нормального протекания процесса алмазного электроэрозионного шлифования покрытия фаски и достижения требуемых показателей шероховатости и точности поверхности необходимо устанавливать оптимальные режимы обработки.

Статистический анализ величины снимаемого припуска при обработке клапанов показал, что глубина шлифования изменяется $t = 0,6 \dots 0,8$ мм. В случае реализации толщины среза $a_{z, \max} = 15$ мкм и обеспечении шероховатости обработанной поверхности $R_a \leq 1$ мкм скорость детали необходимо устанавливать равной $V_{\text{дет}} = 0,6$ м/мин. Это позволяет добиться устойчивой обработки восстановленной фаски клапана в автоматизированном цикле. Электроэрозионной правкой круга обеспечивается постоянное поддержание его высокой режущей способности и тем самым достигается полное удаление срезаемого слоя материала с требуемой чистотой обработки. Однако значительная неравномерность нанесенного покрытия отрицательно сказывается на точности обработанной фаски клапана. Биение обработанной поверхности составляет $0,012 \dots 0,014$ мм, что превышает допустимые пределы $0,008 \dots 0,01$ мм. Это свидетельствует о недостаточной жесткости тела клапана и возникновении значительных упругих перемещений в технологической системе из-за большой неравномерности нанесенного слоя высокопрочного покрытия. Решить этот вопрос удалось снижением скорости детали до уровня $V_{\text{дет}} = 0,5$ м/мин. На рис. 3.30 приведена структурная схема, в соответствии с которой определены максимально возможная производительность и режимы шлифования.

Результаты реализации разработанной технологии глубинного алмазного электроэрозионного шлифования в производственных условиях приведены в табл. 3.9. Для комплектования модернизированных круглошлифовальных станков МШ–197В источниками технологического тока под руководством авторов настоящей работы разработаны специальные конструкции малогабаритных генераторов импульсного тока и организовано их производство в необходимом количестве. С участием авторов также в НПО "Ремдеталь" (г. Москва) разработан и изготовлен автомат для нанесения высокопрочных порошковых покрытий на фаску клапанов, который внедрен на предприятиях агропромышленного комплекса.

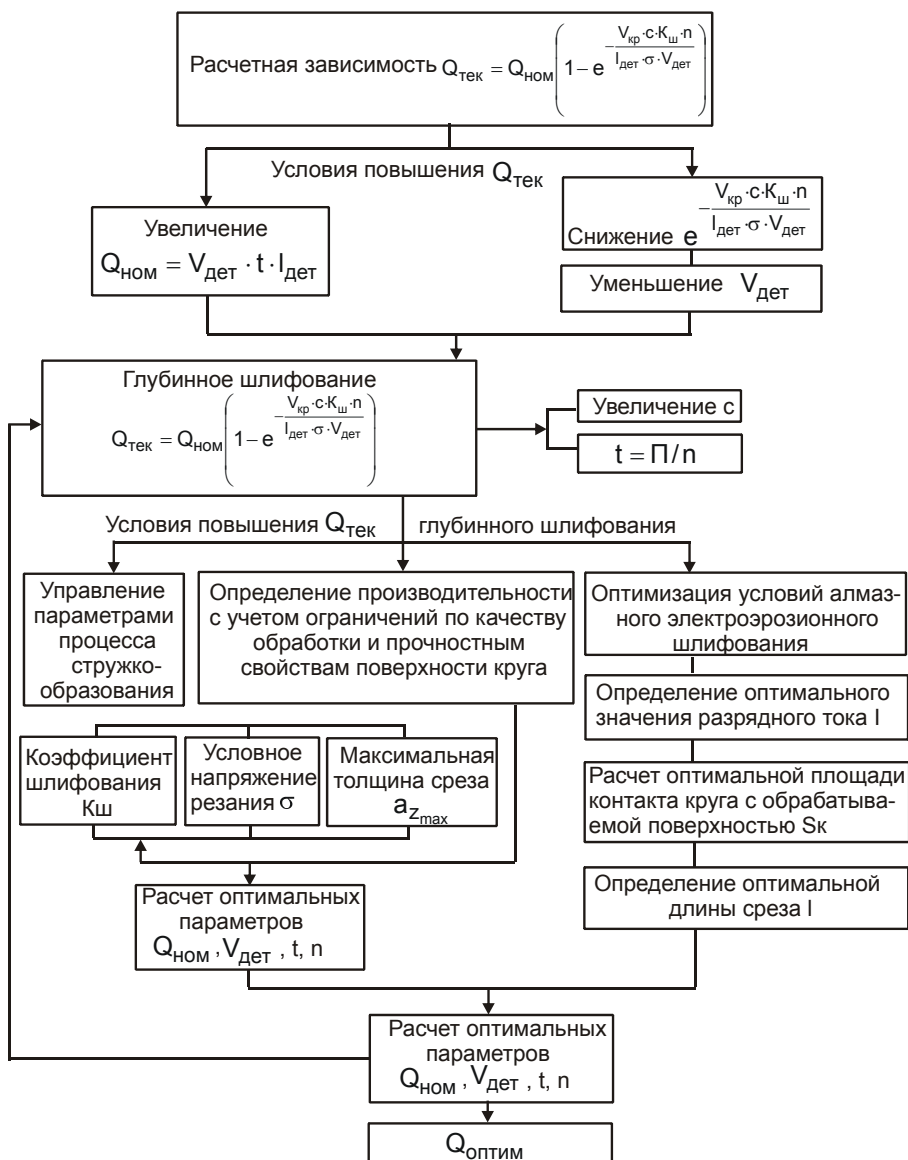


Рис. 3.30. Структурная схема алгоритма расчета максимально возможной производительности и оптимальных условий обработки

Таблица 3.9

Рекомендуемые условия обработки

Характеристика круга		1А1 500×25×305×6 АС15 200/160 М2-01 100
Обрабатываемый материал: покрытие ПГ-10Н-01	$V_{\text{дет}}$, м/мин	0,5
	$V_{\text{кр}}$, м/с	28
	$V_{\text{вр}}$, мм/мин	0,5
	t , мм	0,8
Параметры импульсного тока	$I_{\text{ср}}$, А	67 ... 70
	f , кГц	3
	$B_{\text{с}}$, шт.	5
	$q_{\text{и}}$	1,1 ... 4,3
Производительность процесса обработки за цикл	$Q_{\text{уд}}$, мм ³ /мин·мм	170
Количество обработанных клапанов кругом до его полного износа	$n_{\text{кл}}$, тыс. шт.	75
Шероховатость обработанной поверхности	$R_{\text{а}}$, мкм	0,8 ... 1,0
Эффективная мощность шлифования	$N_{\text{эф}}$, Вт	70 ... 90

Совместно с НПО "Ремдеталь", ЭНИМС и Московским заводом автоматических линий проведена работа по согласованию технической документации на проектирование и постановку на производство специального оборудования для обработки деталей ДВС с высокопрочными покрытиями с использованием разработанной технологии алмазного шлифования. Данная технология алмазного шлифования также внедрена на ряде предприятий на операциях шлифования клапанов и кулачковых валов газораспределения.

3.8. Круглое наружное глубинное алмазное шлифование буровых инструментов с высокопрочными покрытиями

Заточка и шлифование твердосплавных буровых инструментов – одна из наиболее эффективных областей применения алмазных кругов. Благодаря снижению силовой и тепловой напряженности процесса об-

работки, увеличению стойкости применяемых алмазных кругов решена проблема повышения качества обработки и снижения расхода буровых инструментов [47; 124].

Вместе с тем, шлифование буровых инструментов с нанесенными на их рабочие поверхности износостойкими покрытиями (релит и т.д.), по-прежнему, производится обычными абразивными кругами с относительно низким качеством обработки. Применение алмазных кругов на операциях круглого наружного шлифования экономически неэффективно в связи с низкой производительностью и высокой себестоимостью обработки, поскольку в реальных условиях производства достигнут чрезвычайно высокий уровень производительности абразивного шлифования – до 50 тысяч мм³/мин и более. Следовательно, применение алмазных кругов взамен абразивных возможно при условии существенного повышения производительности обработки при экономически обоснованном расходе алмаза.

Эффективным решением проблемы может быть практическое использование разработанной технологии глубинного алмазного электроэрозионного шлифования. В связи с этим на ПО "Куйбышевбурмаш" (основном производителе данного типа буровых инструментов) реализована схема круглого наружного глубинного шлифования, включающая врезание алмазного круга на полную глубину резания (0,9 мм) при неподвижной детали (шарошке долотчатой коронки) и съем всего припуска за одно вращение детали с фиксированной глубиной резания (0,9 мм).

Вместо абразивного круга диаметром 600 мм использован крупногабаритный алмазный круг диаметром 500 мм и шириной 50 мм на металлической связке М2-01, что позволило одновременно обрабатывать всю поверхность детали (44 мм) без применения продольной подачи.

Скорость вращения детали устанавливалась $V_{\text{дет}} = 1$ м/мин, что обеспечивало производительность обработки 900 мм³/мин·мм или более 40 тыс. мм³/мин, достигнутой при абразивном шлифовании.

Предварительные исследования показали практически неприемлемость электроэрозионной правки круга с подводом электрического тока через зону резания. В связи с образованием длинных стружек алмазный круг на прочной металлической связке М2-01 интенсивно засаливался и через определенное время терял режущую способность независимо от изменения электрического режима работы генератора импульсного тока. Применение электроэрозионной правки вне зоны резания с установкой специального правящего устройства (катода) позволило по-

высить стойкость алмазного круга, однако в полной мере решить проблему качественной очистки круга от продуктов обработки не удалось.

В связи с этим на Полтавском алмазном заводе был разработан и изготовлен специальный крупногабаритный алмазный круг диаметром 500 мм и шириной 50 мм на менее прочной металлической связке М1-01. Необходимо отметить, что Полтавский алмазный завод ранее не выпускал таких кругов на связке М1-01, им был освоен выпуск кругов лишь на связке М2-01. Поэтому для изготовления круга была разработана и создана специальная технология и технологическая оснастка (пресс-формы и т.д.). Практическое использование такого круга позволило получить положительные результаты. Имеющая место самозатачиваемость алмазного круга на металлической связке М1-01 в сочетании с непрерывным электроэрозионным воздействием на его рабочую поверхность предопределили возможность качественной очистки и правки круга в процессе шлифования и поддержание его высокой режущей способности в течение смены (при обработке до 100 шарошек).

Переход на полную алмазную обработку за счет снижения силовой и тепловой напряженностей процесса позволил существенно повысить качество и точность шлифованных поверхностей (устранить сколы, микротрещины и прижоги), улучшить экологию производства за счет исключения образования абразивной пыли. Достаточно отметить, что при действующей технологии абразивного шлифования в течение смены в связи с интенсивным износом расходовалось до шести абразивных кругов диаметром 600 мм. Это сопровождалось большим выделением абразивной пыли и значительным ухудшением условий работы.

Расчеты показали, что износ алмазного круга соответствовал примерно одинаковым затратам на приобретение алмазного и абразивного инструмента. Таким образом, по производительности и себестоимости обработки предложенный процесс алмазного шлифования соизмерим с действующим процессом, а эффект достигается за счет повышения качества и точности обработки, улучшения экологии производства и условий труда, исключения трудоемких операций по частой замене абразивных кругов в связи с их полным износом (до шести раз в смену).

Необходимо отметить, что действующая технология основана на использовании схемы врезного многопроходного шлифования с продольной осцилляцией круга. Скорость детали составляет до 60 м/мин. Попытки шлифования алмазным кругом по данной схеме привели к отрицательным результатам и, прежде всего, за счет прерывистости об-

работки. Как известно, обрабатываемая поверхность детали (шарошки) имеет прерывистый характер. В связи с высокой скоростью детали это предопределяет ударный характер взаимодействия и значительные динамические нагрузки, которые приводят к интенсивному износу алмазного круга. Для абразивного круга такой режим шлифования является эффективным, поскольку обеспечивает непрерывную правку круга и поддержание его высокой режущей способности. Собственно этим объясняется высокий износ абразивных кругов и их частая замена в течение смены. Обрабатываемая деталь (шарошка) в данном случае выполняет функцию правящего элемента. Следовательно, обработку алмазными кругами прерывистых поверхностей экономически нецелесообразно производить по схеме многопроходного шлифования с большой скоростью детали, эффективно использовать схему глубинного шлифования с небольшой скоростью детали.

Разработанная технология глубинного алмазного шлифования прошла производственную апробацию и принята для внедрения на ПО "Куйбышевбурмаш". Технология может быть использована на Дрогобычском доломитном заводе в основном производстве.

Практика показала, что по сравнению с алмазным шлифованием буровых инструментов с нанесенными высокопрочными покрытиями, шлифование твердосплавных буровых инструментов можно осуществлять с более высокой производительностью, поскольку алмазный круг в меньшей мере подвергается засаливанию и обладает повышенной режущей способностью. Это позволило рекомендовать на ПО "Куйбышевбурмаш" технологию алмазного шлифования твердосплавных буровых инструментов кругами на более прочной металлической связке М2-01, что обеспечило снижение износа круга по сравнению с кругом на связке М1-01.

Достигнутый уровень производительности глубинного алмазного шлифования буровых инструментов с релитовыми покрытиями превышает уровень производительности алмазного шлифования деталей с покрытиями металлургического назначения [131; 133]. По-видимому, это обусловлено менее жесткими требованиями к уровню производительности в связи с заменой абразивного шлифования алмазным в металлургии, а также тем, что использована более производительная схема глубинного шлифования (с глубиной резания 0,9 мм).

В заключение следует отметить, что достигнутый уровень производительности алмазного шлифования деталей с высокопрочными покры-

тиями – $900 \text{ мм}^3/\text{мин} \cdot \text{мм}$ – является в ряде случаев недостаточным для применения алмазных кругов взамен абразивных. Это требует дальнейшего поиска новых решений по эффективной очистке и правке алмазного круга в условиях высокопроизводительного шлифования высокопрочных пластичных материалов, к которым относятся покрытия.

Выводы к разделу 3

1. Разработана математическая модель глубинного алмазного шлифования с позиции разновысотного выступания зерен над связкой круга и вероятностного участия их в формировании режущего профиля диаметральной плоскости круга, что позволило аналитически описать основные параметры процесса глубинного шлифования, такие как максимальная толщина среза отдельным зерном алмазного круга, параметры шероховатости поверхности и другие. Расхождение результатов расчетов и экспериментальных данных составляет 10 – 15 %, что делает возможным практическое использование полученных аналитических зависимостей.

2. На основе аналитической оптимизации глубинного алмазного шлифования установлена новая закономерность процесса, связанная с возможностью увеличения производительности обработки при одновременном уменьшении параметров шероховатости поверхности и обусловленная применением оптимальных соотношений скорости детали и глубины шлифования для заданной максимальной толщины среза отдельным зерном. Показано, что в условиях глубинного алмазного шлифования с максимальной толщиной среза отдельным зерном, равной 15 мкм, и параметром шероховатости поверхности $R_a = 0,8 \dots 1,0 \text{ мкм}$, может быть достигнута удельная производительность обработки на уровне $1200 \text{ мм}^3/\text{мин} \cdot \text{мм}$, существенно превышающая значения удельной производительности обработки известных процессов алмазного и абразивного шлифования.

3. Теоретически и экспериментально обоснована возможность реализации высокопроизводительного глубинного алмазного шлифования деталей с высокопрочными покрытиями кругами на металлических связках, в том числе и крупногабаритными алмазными кругами, за счет применения оптимальных схем шлифования и электроэрозионной правки алмазного круга. Доказано существование экстремальной зависимости (с наличием максимума) производительности обработки высокопрочного

покрытия от глубины шлифования, что связано с потерей режущей способности алмазного круга. Доказано также существование оптимальной концентрации разрядного электрического тока ($K_T = 1,3 \dots 1,5 \text{ А/мм}^2$), дополнительно вводимого в зону шлифования, и оптимальной площади контакта круга с деталью, обусловленной достижением максимальной производительности обработки и бездефектностью обработанной поверхности, которые в совокупности определяют условия эффективного применения алмазного электроэрозионного шлифования деталей с высокопрочными покрытиями.

4. Экспериментально установлены зависимости производительности обработки, относительного расхода алмазов, мощности шлифования и шероховатости поверхности от параметров режимов шлифования, характеристик алмазного круга и условий электроэрозионной правки алмазного круга. Показано, что применение оптимальных условий глубинного алмазного электроэрозионного шлифования позволяет в 2 – 3 раза повысить производительность обработки и в 3 – 4 раза уменьшить относительный расход алмаза по отношению к существующим процессам алмазного шлифования покрытий твердостью HRC 60 – 62.

5. Разработаны рекомендации по выбору оптимальных условий шлифования, обеспечивающие гарантированное получение параметра шероховатости поверхности $Ra = 0,8 \dots 1,0 \text{ мкм}$. Произведен расчет оптимальных электрических параметров процесса шлифования, которые обеспечивают максимально возможную производительность обработки в условиях глубинного шлифования. Установлено, что чем больше сила импульсного тока, тем больше глубина шлифования, при которой исключается засаливание алмазного круга и поддерживается его высокая режущая способность в процессе шлифования.

6. Разработаны практические рекомендации по эффективному применению высокопроизводительного глубинного алмазного электроэрозионного шлифования для обработки деталей двигателя внутреннего сгорания с высокопрочными покрытиями, например фаски клапана, осуществляемой по схеме круглого наружного шлифования. Приведены результаты разработки и технические характеристики специального генератора импульсного тока для осуществления алмазного электроэрозионного шлифования, а также рекомендации по осуществлению модернизации шлифовальных станков для работы с крупногабаритными алмазными кругами.

4. Алмазное шлифование изделий, изготовленных из неметаллических материалов повышенной твердости

4.1. Алмазное шлифование деталей из керамик и ферритов

4.1.1. Условия повышения эффективности алмазного шлифования деталей из керамик и ферритов

Чрезвычайно высокая твердость керамик, используемых для изготовления деталей электронной промышленности, предопределяет их эффективную обработку исключительно алмазными кругами на металлических связках М2-01 и т.п. Установлено, что при торцовом шлифовании алмазный круг быстро тупится, и теряет режущие свойства, в результате чего резко возрастают силы и температура резания, на обрабатываемых поверхностях образуются трещины и сколы, увеличиваются потери от брака. В особой мере это относится к двухстороннему шлифованию керамических пластин на станках модели 3102. Осуществляя шлифование по жесткой схеме, вследствие затупления алмазного круга значительно возрастает радиальная сила резания, что приводит к значительному увеличению нагрузок, действующих на радиально-упорные подшипники шпиндельного узла станка, и преждевременному выходу их из строя. Это требует проведения трудоемкого ремонта станка.

Применяемые методы механической правки алмазного круга малоэффективны, так как выступание зерен над уровнем связки круга после правки несущественно, обрабатываемый материал интенсивно контактирует с металлической связкой, вызывая рост сил и температуры резания, повышение износа круга, снижение качества обработки. Кроме того, для поддержания более высокой режущей способности круга при шлифовании его необходимо часто править, что трудоемко и снижает производительность обработки.

Перспективным решением проблемы повышения режущей способности алмазного круга при шлифовании керамических пластин следует рассматривать применение периодической электроэрозионной правки, обеспечивающей более качественное вскрытие алмазоносного слоя круга и, соответственно, более продолжительный период нормальной рабо-

ты круга. Учитывая то, что обработка на станке модели 3102 производится одновременно двумя алмазными кругами, расположенными параллельно, необходимо организовать одновременную электроэрозионную правку двух кругов без снятия их со станка (с целью повышения точности обработки). Это требует создания специальной оснастки и схем правки в автоматизированном режиме. Учитывая также непродолжительный период между правками кругов, повысить эффективность шлифования керамических пластин можно за счет увеличения площади рабочей части круга (увеличения диаметра и высоты алмазного слоя круга), снижая интенсивность затупления круга.

Практическим воплощением данного решения следует рассматривать действующие на ряде предприятий технологии торцевого шлифования плоских поверхностей деталей (из керамик, ферритов и других труднообрабатываемых неметаллических материалов) крупногабаритными ($\varnothing 800$ мм и более) сборными алмазными кругами на шлифовальных станках с вращающимся столом модели 3Б756 (рис. 4.1 [122]).

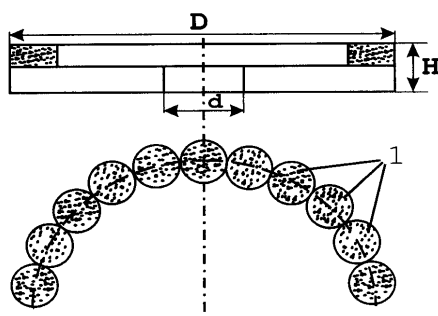


Рис. 4.1. Сборный алмазный круг для торцевого шлифования неметаллических материалов

Условные обозначения: 1 – алмазные элементы.

Благодаря увеличению площади рабочей поверхности круга, существенно увеличивается производительность и качество обработки, стойкость круга между правками. Вместе с тем, с созданием крупногабаритного сборного алмазного круга возникли сложности по подготовке его к работе и в процессе эксплуатации. Так, после сборки режущих элементов (имеющих цилиндрическую форму $\varnothing 40$ мм) имеет место их значительная разновысотность (до 1 мм и выше), которая устраняется шлифованием сборным алмазным кругом торца абразивного круга, выпол-

няющего роль правящего инструмента. Данная операция весьма трудоемка и продолжительна – составляет несколько смен. Кроме того, требует потребления значительного количества абразивных кругов. Правка алмазного круга в процессе эксплуатации также выполняется методом шлифования абразивного круга и достаточно трудоемка – по продолжительности составляет несколько часов и производится довольно часто, не реже одного раза в смену (при обработке деталей из ферритов). Низкая стойкость круга указывает на низкое качество вскрытия его алмазного слоя – недостаточное выступание зерен над уровнем связки, что не позволяет повысить производительность и улучшить качество обработки – при шлифовании происходит перенос компонентов металлической связки круга на обрабатываемую поверхность, что ухудшает эксплуатационные показатели деталей из ферритов.

Для повышения стойкости сборного алмазного круга взамен металлической связки М2-01 применяются более прочные кобальтовые связки. При этом трудоемкость и продолжительность механической правки круга резко возрастают, что требует применения более прогрессивной технологии электроэрозионной правки. Однако, отсутствие опыта электроэрозионной правки крупногабаритных сборных торцовых алмазных кругов (с учетом образования на них заборного конуса) требует проведения комплекса научно-исследовательских и конструкторско-технологических работ по созданию новой технологии правки, специальной технологической оснастки (правлящих устройств) для ее осуществления.

4.1.2. Торцовое алмазное двухстороннее шлифование керамических пластин на станках модели 3102

Схема шлифования керамических пластин на станке с вращающимся столом и непрерывной радиальной подачей в связи с их большой площадью контакта с двумя алмазными кругами является наиболее производительной из всего многообразия существующих кинематических схем шлифования.

Вместе с тем, высокая силовая напряженность процесса шлифования в связи с быстрым затуплением алмазных кругов на металлической связке приводит к растрескиванию тонких керамических пластин, образованию на них сколов и микротрещин, что увеличивает потери от брака. Для определения условий повышения эффективности шлифования следует рассмотреть расчетные зависимости для определения со-

ставляющих силы резания P_y и P_z при шлифовании по жесткой схеме с фиксированной производительностью обработки Q [14]:

$$P_y = \frac{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV \cdot Q}{2 \cdot V_{\text{кр}} \cdot (1 - \eta)}, \quad (4.1)$$

$$P_z = \frac{Q}{V_{\text{кр}}} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot HV}{(1 - \eta)}}, \quad (4.2)$$

где 2γ – угол при вершине зерна;

HV – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/мм^2 ;

$\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/мм^2 ;

$\eta = 0 \dots 1$ – безразмерный коэффициент, определяющий степень затупления зерен (для острого зерна $\eta = 0$, для затупленного зерна $\eta \rightarrow 1$).

Исходя из зависимости (4.1), уменьшить радиальную составляющую силы резания P_y можно уменьшением производительности обработки Q , безразмерного коэффициента η и увеличением скорости круга $V_{\text{кр}}$. Очевидно, оптимальным условием является уменьшение безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$, т.к. это не требует снижения производительности обработки Q . Для реализации данного условия необходимо использовать эффективную электроэрозионную правку алмазного круга, обеспечивающую качественное вскрытие алмазоносного слоя, удаление с рабочей поверхности затупившихся зерен, формирование на круге "острого" режущего рельефа.

Для анализа характера изменения коэффициента η зависимость для определения площади поперечного сечения единичного среза:

$$S = H^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma - x^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma = H^2 \cdot (1 - \eta^2) \cdot \operatorname{tg} \gamma \quad (4.3)$$

с учетом $H = x / \eta$ следует представить в виде:

$$\eta = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{S}{\operatorname{tg} \gamma \cdot x^2} - 1 \right)}}, \quad (4.4)$$

где x – величина линейного износа зерна, м.

Исходя из зависимости (4.4), уменьшить безразмерный коэффициент η можно увеличением S и уменьшением величины линейного износа зерна x . При условии $x \rightarrow 0$ безразмерный коэффициент $\eta \rightarrow 0$, т.е. основным условием уменьшения η является шлифование "острыми" режущими зернами, исключая образование на них площадок износа. Увеличение S приводит к уменьшению безразмерного коэффициента η , однако это связано с увеличением производительности обработки Q , которая входит в числитель зависимости (1.34) и вызывает увеличение радиальной составляющей силы резания P_y . Этим показано, что увеличение параметра S не позволяет решить задачу снижения P_y .

Для повышения стойкости алмазного круга необходимо обеспечить удаление с рабочей поверхности зерен с заданной величиной линейного износа x . Это можно реализовать путем их объемного разрушения, выбирая зернистость и марку алмаза. Данный вывод вытекает из расчетной зависимости для определения радиальной составляющей силы резания, действующей на отдельное зерно:

$$P_{y1} = 0,5 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV \cdot \left(\frac{S}{\operatorname{tg} \gamma} + x^2 \right). \quad (4.5)$$

При фиксированных значениях HV , S , x , γ радиальная составляющая силы резания P_{y1} , действующая на отдельное зерно, должна быть равна прочности зерна на раздавливание. Исходя из зависимости (4.5), с увеличением твердости обрабатываемого материала HV радиальная составляющая силы резания P_{y1} , действующая на отдельное зерно, увеличивается, что требует применения алмазных кругов на прочных металлических связках с прочными алмазами повышенной зернистости.

Как показано в работе [115], увеличение зернистости ведет к увеличению прочности зерна на раздавливание (рис. 4.2). Следовательно, при шлифовании керамик высокой твердости необходимо использовать крупнозернистые алмазные круги на металлических связках типа M2-01. Снижение прочностных характеристик рабочей поверхности алмазного круга приведет к уменьшению его стойкости вследствие интенсивного разрушения зерен и их выпадения из связки (например, при использовании кругов на малопрочных органических связках), а чрезмерное увеличение прочностных характеристик круга – к образованию значительных

площадок износа на зернах (т.е. к выполнению условия $\eta \rightarrow 1$) и увеличению сил резания.

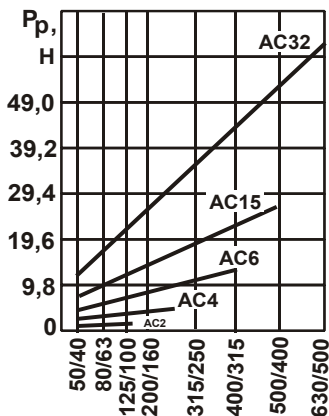


Рис. 4.2. Гарантированные нормы прочности P_p шлифпорошков различных марок синтетических алмазов

Следуя зависимости (4.5), уменьшение параметров S и x позволяет использовать меньшую зернистость, а также алмазные круги, характеризующиеся меньшей прочностью рабочей поверхности (менее прочные связки, алмазные зерна и т.д.).

Для практической реализации условия $\eta \rightarrow 0$ применительно к схеме торцового алмазного двухстороннего шлифования керамических пластин на станке модели 3102 разработана конструкция правящего устройства для электроэрозионной периодической правки одновременно двух кругов (установленных параллельно), не снимая их со станка. Устройство обеспечивает работу в автоматическом режиме. Применение устройства позволяет производить качественное вскрытие алмазного слоя затупившихся кругов, устранение торцового биения кругов, поддержание прямолинейности профиля рабочей части кругов, что способствует снижению сил и температуры резания, повышению производительности, точности и качества обработки, снижению потерь от брака шлифуемых керамических пластин.

Уменьшение сил резания снижает нагрузки на радиально-упорные подшипники шпиндельного узла станка и увеличивает надежность его работы. Применение правящего устройства позволяет также уменьшить расход алмаза за счет исключения малоэффективной механической

правки алмазных кругов. Установлено, что применение эффективной электроэрозионной правки, обеспечивающей поддержание на круге "острого" режущего рельефа (т.е. выполнение условия $\eta \rightarrow 0$), позволяет использовать при шлифовании керамических пластин алмазные круги на металлических связках повышенной зернистости (250/200), которые в обычных условиях в связи с невозможностью достаточного вскрытия алмазных зерен практически неработоспособны.

Данная технология алмазного шлифования внедрена на предприятии радиоэлектроники, где переоборудованы все станки основного производства. На этом же предприятии внедрена технология профилирования алмазных кругов формы 1А1 диаметром 300 мм, которые используются для фасонного шлифования керамических изделий. Технология шлифования основана на электроэрозионном воздействии на алмазный круг с помощью специальных правящих электродов. Это позволило решить проблему создания сложных геометрических профилей на алмазном круге, повысить производительность и качество фасонного шлифования изделий из керамик высокой твердости. Технология использована на операциях круглого наружного и плоского шлифования.

4.1.3. Торцовое шлифование деталей из ферритов и керамик крупногабаритными алмазными сборными кругами на станках модели 3Д756

Наиболее полно технологические возможности высокопроизводительной схемы торцового шлифования деталей из керамик и ферритов с вращающимся столом станка, когда оси вращения круга и стола не совпадают, реализуются на станках модели 3Д756 с применением крупногабаритных сборных торцовых алмазных кругов диаметром до 1 000 мм и выше. В результате существенного увеличения площади контакта круга с пакетом обрабатываемых деталей, уложенных на столе станка, производительность обработки увеличивается до уровня 50 ... 100 тысяч мм³/мин и выше, что до 10 раз и более превышает производительность шлифования обычными алмазными кругами. Вместе с тем, как отмечалось в разделе 1, данный процесс шлифования алмазными кругами на прочных металлических связках деталей из ферритов и керамик характеризуется быстрой потерей режущей способности алмазного круга, восстановить которую с применением традиционных методов механической правки чрезвычайно сложно как с точки зрения продолжительности

правки, так и качества вскрытия алмазоносного слоя. Это требует частых правок круга и потребления большого количества абразивных кругов для осуществления правки, что снижает производительность труда и увеличивает трудоемкость обработки, особенно на этапе первоначальной подготовки круга к работе (после сборки круга), когда необходимо устранить значительную разновысотность расположения алмазных элементов (до 1 мм и выше) и вывести биение круга.

Применение результатов исследований данной работы позволило решить проблему повышения эффективности алмазного шлифования деталей из ферритов и керамик. Производительность обработки определяется зависимостью:

$$Q = \frac{2 \cdot P_y \cdot V_{кр}}{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot H_V} \cdot (1 - \eta), \quad (4.6)$$

где P_y – сила прижима обрабатываемого изделия к алмазному кругу, Н.

Как видно, добиться увеличения производительности обработки Q с увеличением твердости обрабатываемых материалов (ферритов и керамик) можно путем снижения безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$, т.е. путем шлифования кругом с “острым” режущим рельефом. Добиться исключения площадок износа на зернах можно путем реализации условия (4.5) – с увеличением твердости обрабатываемого материала H_V необходимо увеличивать предельную нагрузку, действующую на зерно, за счет применения алмазных кругов на прочных металлических связках с алмазными зернами увеличенной зернистости и прочности. В связи с этим предложено использовать круги зернистостью 315/250 и более из алмазов AC15. Для качественного вскрытия алмазоносного слоя круга разработана эффективная технология периодической электроэрозионной правки с использованием специальных габаритных правящих устройств, специально разработанных генераторов импульсного тока, реализующих оптимальный электрический режим правки крупнозернистых алмазных кругов в соответствии с результатами исследований, приведенных в разделе 3.

Исследованиями установлено, что в течение 20 минут электроэрозионной правки обеспечивается качественное вскрытие алмазоносного слоя крупнозернистого круга, режущие зерна выступают над уровнем связки на значительную высоту. Это существенно повышает стойкость

алмазного круга. Периодичность правки – один раз в 7 смен, тогда как после механической правки обеспечивалась стойкость алмазного круга 2 ... 4 часа работы, т.е. алмазный круг необходимо было править 2 ... 3 раза в смену.

Кроме того, в процессе механической правки не обеспечивалась необходимая высота выступления зерен над уровнем связки, что приводило к интенсивному контакту металлической связки с обрабатываемой поверхностью и переносу элементов связки на обрабатываемую поверхность, а это недопустимо для деталей электронной промышленности. После электроэрозионной правки это явление было исключено, в результате чего шлифование производится алмазными зернами, отсутствует трение связки с обрабатываемой поверхностью, уменьшаются силы и температура резания, повышается качество обработки.

Снижение силовой напряженности процесса шлифования с применением электроэрозионной правки алмазного круга позволило увеличить радиальную подачу и производительность обработки как за счет повышения режущей способности алмазного круга, так и за счет снятия ограничений обработки в связи с невозможностью прочного крепления деталей из ферритов и керамик на магнитной плите стола станка (детали нетокопроводны), а также в связи с недостаточной прочностью и жесткостью собственно обрабатываемых тонкостенных деталей.

Таким образом, благодаря разработанной технологии электроэрозионной правки решена проблема эффективного использования высокопроизводительных крупнозернистых алмазных кругов на металлических связках типа М2-01 и более прочных кобальтовых связках, которые с применением механической правки практически неработоспособны в связи с невозможностью качественного вскрытия алмазоносного слоя.

Данная технология правки обеспечила решение важной проблемы – устранение разновысотности алмазных элементов после сборки их в круге. При использовании механической правки процесс устранения разновысотности осуществлялся в течение нескольких смен, а при использовании разработанной электроэрозионной обработки – в течение нескольких часов. При этом за счет разработки специальной технологической оснастки обеспечивалось профилирование на алмазном круге заборного конуса, что весьма важно для нормального протекания процесса шлифования.

Необходимо отметить, что создание механическим путем заборного конуса на алмазном круге на прочной металлической связке весьма

проблематично. Для этого на предприятии использовалась низкокачественная слесарная обработка с использованием напильника, которая в конечном итоге не решала данного вопроса.

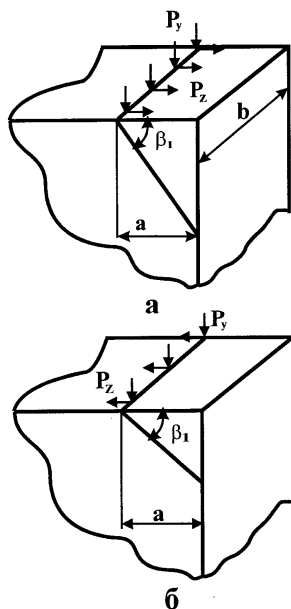


Рис. 4.3. Расчетные схемы образования микросколов на обрабатываемой поверхности

Актуальным стал вопрос исключения образования сколов на обрабатываемых деталях, поскольку процент выхода годных деталей в значительной степени обусловлен именно этим фактором. Учитывая важность вопроса, определены условия, снижающие вероятность образования сколов, принимая, что в момент выхода режущего зерна круга из контакта с обрабатываемой поверхностью под действием сил P_{z1} и P_{y1} происходит микроскол под углом β_1 к плоскости шлифования на расстоянии a от торцевой поверхности детали (рис. 4.3). В расчетной схеме в качестве параметра в рассматривается ширина среза единичным зерном.

Согласно положениям сопротивления материалов, микроскол будет образовываться при условии достижения в плоскости скола предельных напряжений на сдвиг $\tau_{сдв}$. Для определения положения плоскости скола получена зависимость, устанавливающая касательное напряжение:

$$\tau = (P_{z1} \cdot \cos \beta_1 + P_{y1} \cdot \sin \beta_1) \cdot \frac{1}{S_1}, \quad (4.7)$$

где $S_1 = \frac{a \cdot b}{\cos \beta_1}$ – площадь скола, m^2 .

С учетом $K_{ш} = P_{z1}/P_{y1} = \tan \psi$ зависимость (4.7) выразится:

$$\tau = \frac{P_{y1} \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin(\beta_1 + \psi)}{a \cdot b \cdot \cos \psi}, \quad (4.8)$$

где ψ – условный угол шлифования.

Как видно, с увеличением угла β_1 множитель $\sin(\beta_1 + \psi)$ увеличивается, а множитель $\cos \beta_1$ — уменьшается. Учитывая более интенсивный рост $\sin(\beta_1 + \psi)$ при небольших углах β_1 по сравнению с уменьшением $\cos \beta_1$, очевидно, имеет место максимум τ от β_1 . Для определения экстремального значения β_1 следует продифференцировать зависимость (4.8) по углу β_1 и производную приравнять к нулю. После несложных преобразований получено:

$$\beta_1 = 45^\circ - \frac{\psi}{2}. \quad (4.9)$$

Следовательно, угол β_1 определяется лишь условным углом шлифования ψ . Большему значению угла ψ соответствует меньшее значение угла β_1 , т.е. чем острее зерно, тем больше угол ψ и, соответственно, меньше угол β_1 .

Подставляя зависимость (4.9) в (4.8) и принимая $\tau = \tau_{\text{сдв}}$, определена величина микроскола:

$$a = \frac{P_{y1} \cdot \sin^2 \left(45^\circ + \frac{\psi}{2} \right)}{B \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot \cos \psi}. \quad (4.10)$$

Уменьшить величину микроскола a можно уменьшением силы P_{y1} , приходящейся на единицу ширины среза b , т.е. уменьшением P_{y1}/b . Увеличение угла ψ , а соответственно и увеличение коэффициента резания при шлифовании, также способствуют снижению величины a . Увеличение $K_{\text{ш}} = P_{z1}/P_{y1}$ предполагает уменьшение силы P_{z1} , однако с меньшей интенсивностью, чем снижение P_{y1} .

Увеличение прочности обрабатываемого материала $\tau_{\text{сдв}}$ также позволяет уменьшить величину микроскола a .

Зависимость для определения касательного напряжения τ в момент входа зерна в обрабатываемый материал (рис. 4.3б) принимает вид:

$$\tau = \frac{\cos \beta_1}{a \cdot b} \cdot (-P_{z1} \cdot \cos \beta_1 + P_{y1} \cdot \sin \beta_1). \quad (4.11)$$

С учетом угла ψ зависимость (4.11) видоизменится:

$$\tau = \frac{P_{y1} \cdot \cos \beta_1}{a \cdot b \cdot \cos \psi} \cdot \sin(\beta_1 - \psi). \quad (4.12)$$

Аналогично зависимости (4.11), касательные напряжения τ с увеличением угла β_1 изменяются по экстремальной зависимости, проходя точку максимума. Взяв производную от функции τ по параметру β_1 и приравняв производную нулю, получено выражение для определения экстремального значения угла скола:

$$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\psi}{2}. \quad (4.13)$$

В данном случае с увеличением угла ψ угол скола β_1 увеличивается. Величина микроскола a определяется после подстановки зависимости (4.13) в (4.12) с учетом $\tau = \tau_{\text{сдв}}$:

$$a = \frac{P_{y1} \cdot \sin^2 \left(45^\circ - \frac{\psi}{2} \right)}{b \cdot \cos \psi}. \quad (4.14)$$

Сравнивая зависимости (4.10) и (4.14), нетрудно видеть, что величина микроскола a при выходе зерна из контакта с обрабатываемым материалом всегда больше, чем при входе. Причем, с увеличением угла ψ , т.е. с увеличением затупления зерна, это расхождение увеличивается. При угле $\psi = 0$ величина микроскола a для двух случаев равна.

Таким образом установлено, что основным условием снижения параметра a следует рассматривать увеличение остроты режущих зерен, применяя для этого эффективную электроэрозионную правку алмазного круга на металлической связке. Производственные испытания полностью подтвердили теоретические результаты. Применение электроэрозионной правки алмазного круга позволило повысить процент выхода

годных деталей в связи с уменьшением количества сколов на обработанных деталях и исключением других дефектов обработки.

Разработанная технология с высокой эффективностью внедрена в основное производство Научно-производственной фирмы "Феррокерам" (г. Белая Церковь, Киевская область), которая является основным производителем изделий из ферритов в Украине. Под данную технологию было переоборудовано более 20 станков модели 3Д765, укомплектованных необходимым количеством специальных генераторов импульсного тока и специальной технологической оснасткой для электроэрозионной обработки крупногабаритных алмазных торцевых кругов. Шлифование производилось с использованием алмазных элементов крупной зернистости 315/250 и более на высокопрочных кобальтовых металлических связках и связках типа М2-01.

4.2. Шлифование природных алмазов в бриллианты

4.2.1. Существующие технологии шлифования природных алмазов в бриллианты

Длительное время процесс шлифования алмазов в бриллианты осуществлялся с использованием оgranочного чугунного диска, шаржированного микропорошком из синтетических алмазов АСН или АСМ зернистостью 7 ... 20 мкм и поверхностной концентрацией алмазных зерен на круге – 0,0032 кар/см² (рис. 4.4 – рис. 4.6) [31]. Ограночный диск имеет зону шлифования и зону полирования. Шлифование выполняется с удельным давлением $P_{уд} = 0,25 \dots 0,65 \text{ кгс/мм}^2$, а полирование – с $P_{уд} = 0,1 \dots 0,25 \text{ кгс/мм}^2$ (рис. 4.7) и скоростью вращения инструмента близкой к 50 м/с. Недостатком такого оgranочного диска является то, что лишь 15 – 20 % зерен участвуют в резании, а остальные зерна, попавшие в поры и графитные включения, остаются неиспользованными. Кроме того, зерна непрочно удерживаются на рабочей поверхности диска, вследствие чего стойкость диска относительно небольшая.

С целью повышения концентрации алмазного микропорошка в алмазном слое и увеличения стойкости оgranочного диска, освоено производство дисков с гальваническим покрытием никель-железо с использованием мелкодисперсных алмазных порошков [18]. Установлено, что поверхностная концентрация алмазного порошка в них может достигать 75 % (от всей площади рабочей поверхности), стойкость увеличена в

4,5 раза, а производительность обработки – в 1,7 раза по сравнению с чугунными шаржированными дисками. Вместе с тем, относительно невысокая стойкость и вредность условий изготовления таких дисков гальваническим методом, а также трудность получения устойчивого электролита и высокой поверхностной концентрации алмазов (более 75 %) ограничивает их применение.

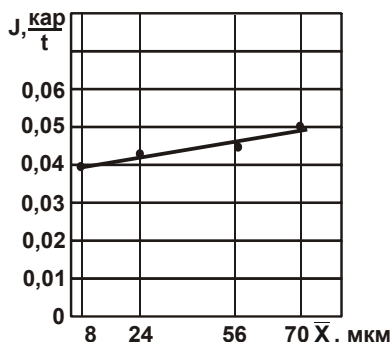


Рис. 4.4. Зависимость интенсивности съема алмаза J от зернистости круга $\bar{X}$

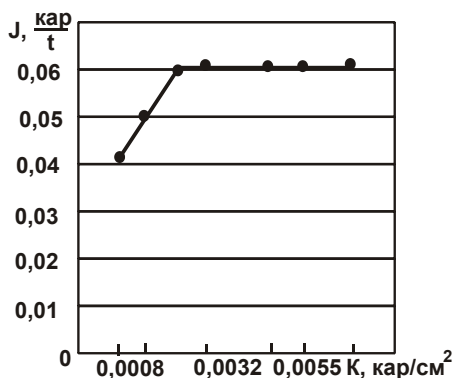


Рис. 4.5. Зависимость интенсивности съема алмаза J от поверхностной концентрации круга K

Дальнейшим этапом совершенствования инструментов для обработки алмазов стало создание специальных алмазных кругов (для "подшлифовки") из металлизированных кобальтом и титаном неметаллизированных алмазных микропорошков на различных металлических связках (МН1, МО22) методами порошковой металлургии, детонационного и

плазменного напыления и электроконтактного припекания [51; 128]. Так, на Полтавском алмазном заводе создан специальный алмазный круг 6A2 300×60×5×50 AC6 10/7 100 % на металлической связке МЗ-04.

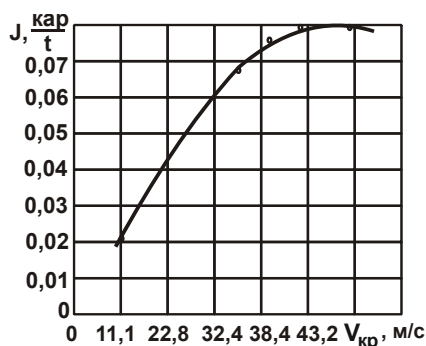


Рис. 4.6. Зависимость интенсивности съема алмаза J от скорости круга $V_{кр}$

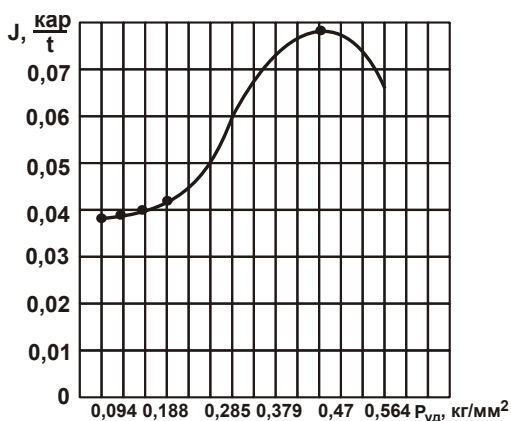


Рис. 4.7. Зависимость интенсивности съема алмаза J от удельного давления $P_{уд}$

Недостаток такого алмазного круга – невозможность изготовления с концентрацией алмазов более 150 %, а также технологические сложности получения качественной металлизации алмазного микропорошка в диапазоне зернистости 14/10...10/7, что не обеспечивает требуемых производительности и качества обработки, стойкости круга.

В наибольшей степени требованиям производства удовлетворяют специальные шлифовально-полировальные алмазные круги формы

6A2 300×60×3×50, разработанные в Институте сверхтвёрдых материалов имени В. Н. Бакуля НАН Украины, алмазонасный слой которых изготавливается путем горячего спекания и пропитки в вакууме, с высоким содержанием и прочным закреплением по вакуумной технологии в адгезионно активной связке зерен микропорошков алмазов [51].

Алмазные круги изготавливаются с применением микропорошка АСН 10/7 повышенной концентрации – 200 % на металлической связке типа МП2. Они предназначены для обеспечения всего процесса огранки, включая операции шлифования и полирования. Недостаток алмазного круга – технологически ограниченная концентрация круга (200 %), которая в 1,4 раза меньше необходимой для полирования. Этот дефицит вынужденно компенсируется введением в состав СОТС алмазного микропорошка той же зернистостью с концентрацией до 35 %.

Вместе с тем, недостаточное количество зерен на рабочей поверхности алмазного круга приводит к снижению производительности и качества обработки (на ювелирных обрабатываемых поверхностях наблюдается перенос компонента металлической связки круга – титана, что недопустимо для бриллиантового производства). Следовательно, повысить эффективность обработки природных алмазов можно путем увеличения числа работающих зерен алмазного круга. Это позволит увеличить производительность обработки и стойкость круга, уменьшить (исключить) трение обрабатываемого материала со связкой круга и, тем самым, обеспечить выполнение требований по качеству обработки.

Наиболее простой способ повышения режущих свойств алмазного круга – правильная подготовка его к работе. Согласно действующей технологии, после спекания рабочая поверхность алмазного круга вскрывается абразивным бруском, периодическая правка для переподготовки алмазного круга также производится абразивным бруском. Естественно, это не позволяет качественно вскрыть алмазный слой мелкозернистого круга, обеспечить достаточное выступание зерен над уровнем связки, устранить биение круга (обеспечить точность рабочей поверхности в пределах 0,01 мм), что ограничивает использование зерен при огранке.

Сложности подготовки алмазного круга к работе обусловлены еще и тем, что он имеет большую площадь рабочей поверхности – ширина алмазного слоя составляет 60 мм. Добиться высокой точности обработки поверхности (плоскости) механическим методом чрезвычайно сложно.

Поэтому традиционно операции огранки природных алмазов в бриллианты производятся в условиях непрерывной электрохимической

правки алмазного круга. Для этого вращающийся алмазный круг на металлической связке устанавливается в ванночку с электролитом, в результате чего происходит восстановление его режущей способности за счет электрохимического растворения металлической связки и постоянного обновления режущего контура круга. Однако, такой метод правки алмазного круга, во-первых, ограничивает возможности увеличения скорости круга (т.е. увеличения производительности обработки) в связи с разбрызгиванием электролита, а, во-вторых, приводит к загрязнению рабочего места химически активными веществами и возможному заболеванию рабочего. Поэтому переход от электрохимической правки к электроэрозионной правке открывает новые технологические возможности операций огранки природных алмазов в бриллианты, состоящие в исключении вредного воздействия электролита на здоровье рабочего, а также в повышении качества и производительности обработки.

Однако отсутствие опыта электроэрозионной обработки мелкозернистых алмазных кругов на металлических связках с большой площадью рабочей поверхности требует разработки новых схем и технологической оснастки, установления оптимальных условий обработки, включая механические и электрические параметры обработки.

Актуален также вопрос подготовки алмазного круга на металлической связке формы 1А1 к работе на операции круглого предварительного наружного шлифования природного алмаза, поскольку механическая обработка алмазного круга после его спекания не обеспечивает устранения биения (по периферии и торцам) и качественного вскрытия алмазного слоя зернистостью 80/63, что снижает работоспособность круга. Важным резервом в решении данного вопроса следует рассматривать электроэрозионную обработку, располагающую более широкими технологическими возможностями по обеспечению точности и качества подготовки алмазного круга к работе.

4.2.2. Высокопроизводительная обработка природных алмазов в бриллианты и расширение технологических возможностей применения алмазных кругов на металлических связках

Природные алмазы являются наиболее труднообрабатываемыми материалами. Это вытекает, в частности, из аналитической зависимости для расчета угла сдвига в процессе микрорезания единичным зерном:

$$\beta = 3 \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{4 \cdot HV} \cdot \frac{a_z}{R} \cdot \cos \psi}, \quad (4.15)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²;

HV – твердость обрабатываемого материала по Виккерсу, Н/м²;

a_z – толщина среза, м;

R – радиус округления вершины режущего зерна, м;

ψ – угол трения, определяется из условия $f = \operatorname{tg} \psi$;

f – коэффициент трения режущего зерна с обрабатываемым материалом.

Как следует из зависимости (4.15), чем меньше отношение $\sigma_{сж}/HV$, тем хуже обрабатываемость материала резанием. Очевидно, наименьшее значение $\sigma_{сж}/HV$ будет иметь природный алмаз, что и предопределяет его низкую обрабатываемость. Кроме того, при обработке алмаза толщина среза a_z минимальна вследствие его высокой твердости, что дополнительно уменьшает угол сдвига.

В зависимость (4.15) входит переменный параметр R, управление которым в процессе шлифования позволяет увеличить угол β и повысить эффективность обработки. Чем меньше R, тем больше β . Для уменьшения параметра R необходимо использовать алмазные круги на мягких самозатачивающихся связях (органических, керамических) или алмазные круги на металлических связках с их интенсивной электроэрозионной правкой.

Добиться уменьшения угла β можно также за счет уменьшения угла трения ψ , однако он входит в зависимость функцией косинуса и, следовательно, мало влияет на угол β .

Выполненные расчеты угла β показали, что он может принимать значения меньше 1°. Очевидно, реализовать процесс удаления стружки при таком небольшом значении угла β практически невозможно, т.е. процесс резания в этом случае будет отсутствовать. Поэтому съем материала будет происходить не от действия напряжений на сжатие, а от напряжений на растяжение, которые образуются под зерном (вследствие того, что предел прочности алмаза на сжатие выше, чем на растяжение). Из этого следует, что при шлифовании труднообрабатывае-

мых хрупких материалов, при определенных условиях, сьем будет происходить не путем резания и отделения микросколов "впереди зерна", а путем образования микросколов "под зерном" и "за зерном" в результате трения зерна с обрабатываемым материалом. С увеличением коэффициента трения, т.е. с увеличением силы трения, можно ожидать увеличения интенсивности образования микросколов и повышения производительности обработки.

Рассмотренный механизм обработки материала указывает на то, что для реализации процесса резания необходимо постоянно при шлифовании поддерживать высокую остроту зерна (уменьшать R). Данное условие выполняется при обработке природных алмазов в бриллианты. Используемые при этом алмазные круги на металлических связках необходимо подвергать непрерывной электроэрозионной правке. Это позволит непрерывно поддерживать "острый" режущий рельеф алмазного круга и осуществлять процесс резания.

Как уже отмечалось, правка алмазного круга в этом случае выполняется электрохимическим методом путем "погружения" алмазного круга в ванночку с электролитом в процессе обработки, что требует существенного снижения скорости круга (на операциях круглого наружного шлифования). Это приводит к снижению производительности обработки. Поэтому важным резервом увеличения скорости круга и производительности обработки следует рассматривать применение автономной (периодической) электроэрозионной правки алмазного круга.

Для эффективного осуществления процесса алмазного шлифования необходимо обеспечить удержание алмазного зерна в связке с силой, равной прочности его на раздавливание.

Суммарная сила резания, действующая на отдельное зерно круга

$$P_1 = \sqrt{P_{z1}^2 + P_{y1}^2} = P_{y1} \cdot \sqrt{K_{\text{ш}}^2 + 1}, \quad (4.16)$$

при коэффициенте шлифования $K_{\text{ш}} = P_{z1}/P_{y1} < 0,5$ мало отличается от нормальной P_{y1} составляющей силы резания (где P_{z1} – тангенциальная составляющая силы резания, Н). Следовательно, зерно в связке должно удерживаться таким образом, чтобы исключить его утопание под действием силы P_{y1} . Для этого твердость связки $HV_{\text{св}}$ должна удовлетворять условию:

$$HV_{\text{св}} = \frac{P_{y1}}{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot h^2}, \quad (4.17)$$

где h – глубина заделки зерна в связке, м;
 γ – половина угла при вершине конусообразного зерна.

Очевидно, чем больше твердость связки $HV_{\text{св}}$, тем меньше h и больше высота выступания зерна, что повышает режущую способность инструмента. Силу P_{y1} , равную прочности зерна на раздавливание, можно представить в виде:

$$P_{y1} = \alpha \cdot \bar{X}, \quad (1.51=4.18)$$

где α – размерный коэффициент, характеризующий марку алмаза (его прочность).

Тогда безразмерный коэффициент $\varepsilon = h/\bar{X}$, определяющий степень заделки зерна в связке, выразится зависимостью:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV_{\text{св}} \cdot \bar{X}}}. \quad (1.52=4.19)$$

Как видно, с уменьшением зернистости круга $\bar{X}$ коэффициент ε увеличивается, т.е. доля выступающей над уровнем связки части зерна уменьшается. Этим объясняется низкая работоспособность мелкозернистых алмазных кругов. Увеличение твердости связки $HV_{\text{св}}$ уменьшает коэффициент ε . Однако, с применением высокопрочных металлических связок нарушается режим самозатачивания круга. Следовательно, перспективным способом обработки природных алмазов в бриллианты следует рассматривать применение мелкозернистых алмазных кругов (ограночных кругов) на металлических связках и эффективных методов их правки (электроэрозионной правки).

Кроме алмазных кругов формы 1А1 на металлических связках, изготовленных методом порошковой металлургии, на этих операциях используются алмазные круги, изготовленные электрогальваническим методом. Как известно, этот метод является еще менее экологически «чистым» методом по сравнению с электрохимической правкой круга, так как приходится использовать значительные объемы вредных для здоро-

вья рабочих электролитов. Кроме того, продолжительность работы таких кругов незначительна. Поэтому с целью устранения алмазных кругов, изготовленных электрогальваническим методом, из технологического процесса обработки природных алмазов в бриллианты, предложено использовать специальные ограночные алмазные круги на металлических связках (например, круг 6А2 300×60×5×50 АС6 10/7 4 МЗ-04), изготовленные методом порошковой металлургии. Для обеспечения их высокой режущей способности целесообразно использовать электроэрозионную правку. Это позволит существенно увеличить срок работы алмазного круга и эффективность осуществления процесса шлифования.

При обработке ограночный круг базируется на оправке—оси и закрепляется механическим способом (рис. 4.8). Для нормального протекания процесса обработки биения режущей поверхности ограночного круга не должно превышать 0,01 мм. Поэтому ограночный круг обязательно проходит динамическую балансировку, поскольку вибрации существенно влияют на величину биения его режущей поверхности (диаметр круга – 300 мм, а частота вращения превышает 3 000 об./мин).

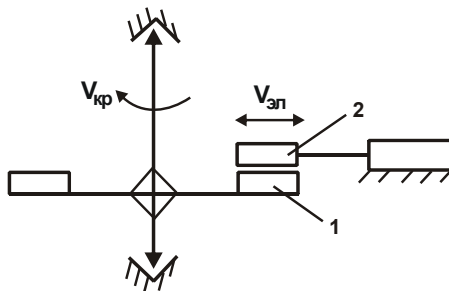


Рис. 4.8. Схема электроэрозионной правки ограночного алмазного круга

Условные обозначения: 1 – алмазоносный слой круга; 2 – электрод.

Практикой установлено, что устранить механическим способом увеличенное биение круга не приводит к положительным результатам. Несмотря на то, что происходит снятие алмазоносного слоя, профиль режущей поверхности фактически не изменяется (остается исходным) и биение не устраняется. Поэтому выполнять огранку природных алмазов этим кругом невозможно. В связи с этим была предложена идея устранения биения режущей поверхности круга с использованием метода

электроэрозионной правки. Для этого было изготовлено специальное оборудование. Чтобы исключить ряд погрешностей при электроэрозионной правке круга, его обработку производили на ограночном станке, где размещали все необходимые элементы правки. Важным моментом данного решения стало то, что ограночный круг правился в собранном виде (на оправке-оси). Правящий электрод был изготовлен из графитового материала и имел пазы для попадания охлаждающей жидкости в зону исправления. Электроду сообщали возвратно-поступательные движения на всю ширину алмазоносного слоя круга (рис. 4.8).

Направляющие электрода изготавливались из закаленной стали и соединялись между собой с помощью шариков. Такая конструкция исключала вибрации электрода, уменьшала погрешности и обеспечивала прямолинейность режущей поверхности круга. Возвратно-поступательные движения электрода осуществлялись от электродвигателя с редуктором с помощью кривошипно-шатунного механизма. Величину движения электрода регулировали увеличением или уменьшением штанги шатуна. Электродвигатель с редуктором имел небольшие габариты и легко устанавливался на приспособлении. Все устройство крепилось на столе станка. Врезная подача графитового электрода на алмазоносный слой круга осуществлялась с помощью пары "винт-гайка" по штифтовым направляющим. Длина этого перемещения составляла 1 ... 4 мм. С помощью винта можно вводить графитовый электрод в контакт с режущей поверхностью ограночного круга. Процесс электроэрозионной правки протекал при обильном охлаждении зоны правки с использованием технической воды. Принудительная подача жидкости осуществлялась от насосной станции (с использованием водяной помпы от заточного станка модели ЗД642Е). Для сбора отработанной жидкости под вращающимся ограночным кругом установлен специальный поддон, откуда вода поступает обратно в бачок насосной станции. Для исключения разбрызгивания жидкости при вращении круга используется защитный кожух. В качестве источника технологического тока электроэрозионной правки применялся специальный импульсный генератор.

Электроэрозионная правка ограночных алмазных кругов с зернистостью 5 ... 10 мкм имеет свои особенности, связанные, прежде всего, с поддержанием необходимого зазора между электродом и правящей поверхностью круга. Решить эту задачу удалось путем использования электрода из графита и обильной подачи охлаждающей жидкости непосредственно в зону правки.

Электроэрозионная правка характеризуется переносом снятого материала связки алмазного круга на правящий электрод (на круг подается положительный заряд, а на электрод – отрицательный), который в застывшем виде накапливается в пазах электрода. Наступает такой момент, когда в отдельных местах он перемыкает зазор между электродом и связкой круга. В результате резко увеличивается сила тока правки и на поверхности круга образуются борозды (за счет более интенсивного съема материала). При дальнейшей правке на режущей поверхности круга образуются значительные неровности.

Описанный выше случай относится к правке электродом, изготовленным из металла. Устранить застывший на электроде материал связки сложно из-за небольшой величины выступания зерен. Данная задача успешно решается при использовании электрода из графита. Перенесенный на электрод материал связки легко отрывается от графитового электрода, т.к. температуры плавления графита и материала связки разные и между ними не происходит прочного сцепления.

Практика показывает, что при обработке природных алмазов все же эффективнее применять ограночные круги, изготовленные электрогальваническим методом. Это обусловлено меньшими затратами дорогостоящего алмазного порошка. Вместе с тем, изготовление ограночных кругов электрогальваническим методом является экологически вредным производством и поэтому ограничивает применение. Вместо этих кругов следует применять специальные ограночные алмазные круги на металлических связках 6A2 300×60×5×50 AC6 10/7 4 M3-04, изготовленные методом порошковой металлургии, с их периодической электроэрозионной правкой. Для этого определены оптимальные условия электроэрозионной правки ограночных алмазных кругов, обеспечивающие биение их режущей поверхности в пределах 0,01 мм, чего другими методами не достигалось. Вскрытый таким способом алмазный слой круга характеризуется высокой режущей способностью длительное время.

В результате использования разработанной технологии электроэрозионной правки достигнуто повышение качества и производительности обработки, увеличена стойкость круга, осуществлен переход от алмазных кругов на гальванической связке к более эффективным алмазным кругам, изготовленным методами порошковой металлургии. Это исключает экологически вредное производство алмазных кругов на основе гальванического нанесения алмазоносного слоя на его рабочую поверхность.

Предложенное техническое решение было также использовано при разработке технологического процесса шлифования блок-матриц для синтеза алмазного порошка. Блок-матрица состоит из стальной обоймы с запрессованной в нее твердосплавной камерой, в которой происходит процесс синтеза алмазного порошка. Для обеспечения плоскостности верхней части блок-матрицы производится ее шлифование алмазным кругом на плоскошлифовальном станке модели ЗГ71. Совместная обработка стали и твердого сплава алмазным кругом 1А1 250×20×5 на органической связке, как показывает практика, приводит к его интенсивному износу и снижению производительности обработки. Применение алмазного круга на керамической связке позволяет в определенной степени повысить производительность обработки и снизить износ круга. Однако полностью решить проблему высокопроизводительного шлифования не удалось. Проблема была решена за счет применения алмазного круга 1А1 300×20×5 на металлической связке М1-01 и его электроэрозионной правки. Для этого была произведена модернизация плоскошлифовального станка, включающая электроизоляцию алмазного круга и осуществление токоподвода к нему через графитовую щетку. В качестве правящего электрода первоначально использовалась обрабатываемая деталь. Источником технологического тока служил специально изготовленный генератор импульсов.

Однако электроэрозионная правка алмазного круга непосредственно в процессе шлифования не позволила добиться ожидаемых результатов. Плотный контакт круга с обрабатываемой поверхностью, с одной стороны, приводил к существенному увеличению разрядного тока, а с другой стороны, вызывал интенсивное засаливание круга. Круг фактически не подвергался правке, его рабочая поверхность была полностью покрыта светло-серым слоем стальной стружки. Поэтому от такой идеи электроэрозионной правки круга пришлось отказаться. Взамен была предложена идея осуществления электроэрозионной правки с использованием ручного изолированного электрода. Первые опыты по практической реализации данной идеи показали положительные результаты. Например, новый алмазный круг на металлической связке М1-01, установленный на станок и имевший значительное биение рабочей поверхности, с помощью ручного электрода был подготовлен к работе за небольшой промежуток времени.

Суть электроэрозионной правки состоит в следующем. Изолированный Г-образный электрод прижимается к периферии алмазного круга

в зоне интенсивного попадания на него охлаждающей жидкости (рис. 4.9). Отсутствие биения рабочей поверхности алмазного круга способствует устойчивому положению Г-образного электрода (не происходит его отбрасывания от алмазного круга). В результате алмазный круг быстро очищается от продуктов обработки (стального налета) и одновременно вскрывается его алмазоносный слой. При силе тока 15 – 20 А время правки составляет 5 – 7 секунд.

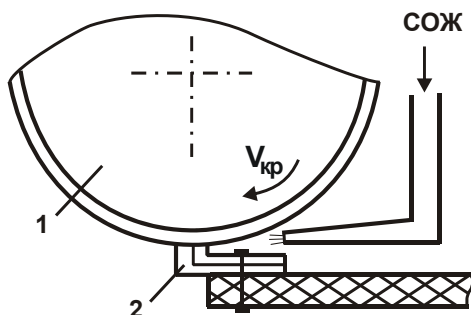


Рис. 4.9. Схема электроэрозионной правки алмазного круга (1) с использованием электрода (2)

Для осуществления предложенной электроэрозионной правки (подзаправки) необходимо алмазный круг вывести из зоны обработки и выключить продольную подачу, что весьма удобно для рабочего. Последующую правку (подзаправку) алмазного круга следует производить при появлении в зоне обработки шума, что является первым признаком засаливания алмазного круга.

Установлено, что стойкость алмазного круга на металлической связке М1-01 после электроэрозионной правки с использованием ручного изолированного электрода многократно увеличивается. Это позволяет эффективно обрабатывать твердосплавные блок-матрицы в условиях съема значительных припусков. Количество шлифованных блок-матриц между заправками алмазного круга изменялось, однако, в основном из-за различной величины снимаемого припуска.

Таким образом, обоснованы возможности эффективного применения электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках взамен традиционно применяемого метода электрохимической правки при огранке природных алмазов в бриллианты. Предложены новые конструктивные схемы осуществления электроэрозионной правки.

4.3. Алмазная обработка изделий из стекла, хрусталя и твердых пород камня

4.3.1. Проблемы алмазной обработки изделий из стекла и хрусталя

По данным предприятий Украины, России и Республики Беларусь, занимающихся изготовлением алмазных инструментов, до 95 % алмазных кругов на металлических связках используется при обработке различных неметаллических материалов (натуральные и синтетические алмазы и другие сверхтвердые материалы, керамики, ферриты, графиты, стекло, хрусталь, твердые породы камня, огнеупорные материалы и т.д.). Чрезвычайно большое потребление алмазных кругов на металлических связках при обработке изделий из хрусталя. Здесь важно обеспечить высокую размерную стойкость профильных алмазных кругов, поэтому применяются высокопрочные металлические связки типа М2-01.

Для нарезания алмазной грани на изделиях из хрусталя используют алмазные круги формы 14ЕЕ1 диаметром 250 мм из зерен АС6 63/50 ... 200/160 100-процентной концентрации на металлической связке типа М2-01 и прочнее (рис. 4.10).

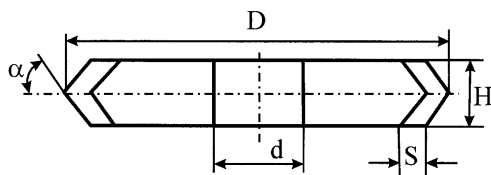


Рис. 4.10. Алмазный круг формы 14ЕЕ1

При обработке наиболее интенсивно происходит износ острия алмазного круга – потеря геометрической формы и размеров (рис. 4.11), что требует постоянной правки круга с целью придания требуемой точности формы, а также обнажения режущих зерен с целью повышения его режущей способности. Последний фактор имеет исключительно важное значение, поскольку нанесение алмазной грани производится "вручную" и понижение режущей способности алмазного круга приводит к возникновению значительных усилий резания при обработке изделий из хрусталя, а это ведет к физическим перегрузкам рабочего в течение рабочей смены, ухудшению качества обработки и снижению производительности труда.

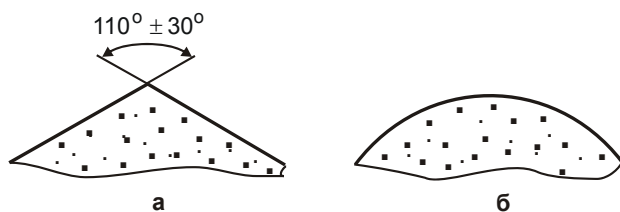


Рис. 4.11. **Форма неизношенной (а) и изношенной (б) рабочей части алмазного круга**

Традиционная правка алмазного круга производится механическим методом с использованием абразивного бруска. При этом используется большое количество абразивных брусков диаметром 100 мм и высотой 20 мм (примерно один брусок в смену на каждом рабочем месте). Как показывает практика, такой метод правки является малоэффективным. Во-первых, сложно восстановить требуемый угол α при вершине алмазного круга, во-вторых, невозможно устранить биение алмазного круга непосредственно на рабочем станке, в-третьих, невозможно произвести качественное вскрытие зерен (обеспечить достаточное их выступание над уровнем связки). Кроме того, в процессе правки происходит потеря геометрической формы алмазного круга, что ведет к снижению качества обработки хрусталя. Поэтому эти круги восстанавливают на специальном станке с использованием абразива (операция трудоемкая с большим расходом абразива).

Установлено, что алмазные круги зернистостью 125/100 обладают достаточно высокой режущей способностью после абразивной правки. Однако это приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности, что требует ее длительного химического полирования и неэффективно. Применение абразивной правки алмазных кругов зернистостью 63/50 требует большого расхода абразивных брусков и не обеспечивает достаточной режущей способности круга. Это снижает производительность обработки изделий из хрусталя, хотя шероховатость обработанной поверхности хрусталя при этом уменьшается. Данный вариант обработки также малоэффективен.

Установлено, что в результате низкой режущей способности алмазного круга на обрабатываемых поверхностях изделий из хрусталя образуются прижоги и трещины. При последующем химическом полировании хрусталя кислота проникает в трещины и разрушает материал на достаточно большую глубину. В итоге образуется так называемая "паутина" поверхности, для устранения которой требуется

значительное время. Необходимо отметить, что химическому полированию подвергаются все изделия, поскольку нарезанные грани хрусталя всегда имеют матовую поверхность, а кислота снимает нарушенный поверхностный слой, обеспечивая прозрачность всей поверхности.

Известны подходы к профилированию и правке алмазного круга электроэрозионным методом [118 – 120]. Однако реального применения при обработке изделий из стекла и хрусталя они не получили, что связано с трудностями организации процесса электроэрозионной правки непосредственно на рабочем месте, так как правка алмазного круга на специальной установке трудоемка, не позволяет удалить биение круга, и не приводит к ожидаемому эффекту.

Следовательно, решение проблемы электроэрозионной правки и профилирования алмазных кругов формы 14EE1 требует создания новых схем обработки, технологической оснастки, установления оптимальных условий, достаточно просто реализуемых на каждом рабочем месте. Электроэрозионный метод правки может быть эффективно использован также для профилирования алмазных кругов, используемых для обработки facets на листовом стекле, в зеркальном производстве. Это связано с быстрой потерей геометрической формы и размеров алмазного круга в процессе обработки и весьма высокой трудоемкостью их правки с использованием абразивного круга.

Значительный объем обработки оптических изделий производится по схеме круглого наружного шлифования, а также "вручную" (аналогично схеме заточки инструмента) с использованием алмазных кругов на металлической связке M2-01 формы 1A1 диаметром до 500 мм. Как показывает практика, алмазный круг быстро теряет режущую способность и обработка происходит напряженно, с высокой энергоемкостью шлифования. Это снижает производительность и качество обработки (на стекле образуются сколы). Износ алмазного круга вдоль образующей происходит неравномерно с глубиной выемки до 3 мм. Естественно, добиться прямолинейности образующей алмазного круга, также как и повысить его режущую способность с использованием правки абразивным бруском или кругом чрезвычайно сложно.

В связи с этим представляется эффективным профилирование и периодическую правку алмазного круга производить с использованием более производительного электроэрозионного метода. Для этого необходимо решить вопросы практической реализации метода непосредственно на рабочем месте (без снятия алмазного круга со станка) с ис-

пользованием простых в техническом исполнении правящих устройств, так как попытки применения (по данным научно-технической литературы) сложных конструкций правящих устройств (в том числе с регулировкой межэлектродного зазора) оказались безуспешными и распространения не получили. Важной проблемой является создание специальных малогабаритных источников технологического тока для осуществления процесса правки алмазного круга на одном или нескольких станках одновременно.

4.3.2. Условия эффективного применения электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке для нарезания граней на изделиях из хрусталя

Для устранения указанных выше недостатков разработана эффективная технология электроэрозионной правки алмазного круга формы 14EE1 на металлической связке М2-01, используемого для нарезания граней на изделиях из хрусталя на станках САГ [82]. Электроэрозионная правка осуществляется периодически рабочим-резчиком хрусталя непосредственно на каждом рабочем месте без съема круга со станка. Время правки – 5 ... 10 секунд, периодичность – 15 ... 20 мин. Используется простое устройство (правлящий электрод), которое удерживается в руках рабочего [83]. Электрические разряды возбуждаются от специального малогабаритного электроимпульсного генератора, который одновременно может обслуживать 10 станков. В данном случае не требуется осуществлять сложную модернизацию станка САГ, не требуется высокая квалификация рабочего. Достаточно обеспечить токоподвод от генератора импульсного тока к станку. Результатом электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке является качественное вскрытие алмазоносного слоя, что полностью восстанавливает его режущую способность и обеспечивает требуемую точность формы режущей части. Это позволяет производить качественное высокопроизводительное нарезание граней на изделиях из хрусталя.

Применение электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке позволило полностью отказаться от правки абразивным бруском. Рабочий на станке может устранить биение круга и произвести его более качественную подзаправку. Прямая образующая на пластинах электрода в процессе правки обеспечивает устранение завалов

на грани алмазного круга. В результате достигается требуемая геометрия алмазного круга.

Более качественное вскрытие зерен круга позволяет увеличить время между подзаправками до 2 – 3 раз, а это снижает расход алмазного круга. Повышение качества обработки хрусталя приводит к тому, что после химического полирования нарезанные грани имеют совершенно другой качественно новый вид, свидетельствующий об изготовлении высококачественной продукции. Применение электроэрозионной правки позволяет за счет повышения режущей способности алмазного круга на металлической связке существенно повысить производительность и качество нарезания граней на изделиях из хрусталя, снизить значительные физические нагрузки на рабочего в процессе "ручного" нарезания граней на изделиях из хрусталя.

Для оценки возможностей технологии обработки хрусталя алмазными кругами после их электроэрозионной правки определены условия повышения производительности шлифования Q на основе аналитической зависимости (4.6).

Как видно, повысить производительность обработки Q можно увеличением параметров P_y , $V_{кр}$ и уменьшением безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$. Возможности увеличения параметров P_y и $V_{кр}$ ограничены характеристиками станка и требованиями по качеству обработки. Безразмерный коэффициент η может изменяться в широких пределах: 0 ... 1. Следовательно, наибольший эффект достигается от уменьшения безразмерного коэффициента η . С физической точки зрения безразмерный коэффициент η равен отношению величины линейного износа зерна x к максимальной толщине среза H , отсчитывая ее от вершины исходного неизношенного зерна (рис. 4.12). Тогда

$$\eta = \frac{x}{H}, \quad (4.20)$$

$$\text{где } H = \sqrt[3]{\frac{900 \cdot \bar{X}^3 \cdot P_y}{m \cdot F \cdot HV}}; \quad (4.21)$$

F – площадь контакта круга с обрабатываемой деталью, m^2 .

С учетом зависимости (4.21) коэффициент η выразится:

$$\eta = x \cdot \sqrt[3]{\frac{m \cdot F \cdot HV}{900 \cdot \bar{X}^3 \cdot P_y}}. \quad (4.22)$$

Уменьшить безразмерный коэффициент η можно уменьшением величины линейного износа зерна x , концентрации алмазного круга m , твердости обрабатываемого материала HV и увеличением зернистости круга $\bar{X}$ и давления P_y / F . Наибольшее влияние на безразмерный коэффициент η оказывает величина линейного износа зерна x . Следовательно, необходимо в процессе шлифования поддерживать высокую остроту круга. С учетом (4.22) зависимость (4.6) при условии $\operatorname{tg} \gamma = 1$ примет вид:

$$Q = \frac{2 \cdot P_y \cdot V_{\text{кр}}}{\pi \cdot HV} \cdot \left(1 - x \cdot \sqrt[3]{\frac{m \cdot F \cdot HV}{900 \cdot \bar{X}^3 \cdot P_y}} \right). \quad (4.23)$$

С увеличением радиальной составляющей силы резания P_y производительность обработки Q увеличивается более чем по линейному закону. Однако этому препятствует увеличение величины линейного износа зерна x , которое снижает производительность обработки Q . Увеличение величины линейного износа зерна x обусловлено увеличением силы P_{y1} , действующей на отдельное зерно круга [146]:

$$P_{y1} = 0,5 \cdot \pi^3 \sqrt[3]{HV \cdot \left(\frac{900 \cdot \bar{X}^3 \cdot P_y}{m \cdot F} \right)^2}. \quad (4.24)$$

Следовательно, добиться пропорционального увеличения производительности обработки Q с увеличением радиальной составляющей силы резания P_y можно уменьшением или стабилизацией во времени величины линейного износа зерна x . Для этого необходимо обеспечить периодическое выпадение из связки затупившихся зерен, т.е. режим равномерного во времени износа круга (режим самозатачивания).

Для того чтобы затупившееся зерно выпало из связки круга, необходимо приложить к нему силу P_{y1} , равную силе, удерживающей зерно в связке. В соответствии с зависимостью (4.24), сила P_{y1} тем больше, чем больше параметры HV , $\bar{X}$, P_y и меньше m , F . Для заданных значений m , $\bar{X}$, HV достичь предельное значение P_{y1} можно изменением P_{y1} / F . Для относительно малопрочных связок значения P_{y1} и P_y / F – небольшие.

Поэтому самозатачивание круга будет происходить при относительно низкой силовой и тепловой напряженности процесса.

Увеличение твердости (прочности) связки увеличивает предельное значение P_{y1} . Величины радиальной составляющей силы резания P_y может быть недостаточно для достижения предельного значения P_{y1} . Тогда, исходя из зависимости (4.24), необходимо увеличить зернистость круга $\bar{X}$ и уменьшить объемную концентрацию зерен круга m . Очевидно, эффект выше от увеличения зернистости круга $\bar{X}$, которая входит в (4.24) с максимальной степенью. Этим можно объяснить эффективность снижения зернистости в алмазных кругах на относительно "мягких" связках. Режим самозатачивания алмазного круга требует также выполнения условия равенства скоростей износа зерен и связки. Данное условие предполагает разделение радиальной составляющей силы резания P_y условно на две составляющие.

Первая составляющая должна затрачиваться на вдавливание зерен в обрабатываемый материал, вторая – на прижатие обрабатываемого материала и микростружек к связке круга и ее износ со скоростью износа зерен. Для "мягких" связок вторая составляющая силы P_y небольшая. Для твердых связок она существенно выше и не всегда может быть достигнута на практике. В результате алмазный круг будет работать в режиме затупления, т.к. скорость износа зерен будет больше скорости износа связки. Обеспечить режим самозатачивания круга можно уменьшением скорости износа зерен, применяя более прочные абразивные или алмазные зерна, увеличивая зернистость и концентрацию круга.

Таким образом показано, что с точки зрения выполнения условия равенства силы резания P_{y1} , действующей на зерно, и силы удержания зерна в связке, необходимо увеличить зернистость круга $\bar{X}$ и уменьшить объемную концентрацию зерен круга m . С точки зрения выполнения условия равенства скоростей износа зерен и связки необходимо увеличивать и зернистость круга $\bar{X}$ и объемную концентрацию зерен круга m . Учитывая то, что на практике при высокопроизводительной обработке зерна трудно выполнить второе условие, необходимо стремиться к увеличению параметров $\bar{X}$ и m , т.е. применять алмазные круги на прочной металлической связке типа М2-01 зернистостью 100/80 и более и концентрацией 100 %. Именно этим обстоятельством можно объяснить то, что при огранке природных алмазов в бриллианты применяют алмазные круги

на металлической связке с высокой концентрацией (200 % и более), поскольку здесь практически отсутствует контакт обрабатываемого материала со связкой и ее износ, что не обеспечивает режим самозатачивания круга. Для снижения скорости износа зерен и выполнения условия равенства скоростей износа зерен и связки в этом случае в зону обработки часто вводят свободный абразив, что эквивалентно повышению концентрации зерен в круге до 400 %. Естественно, изготовить алмазные круги с такой высокой концентрацией зерен методами порошковой металлургии невозможно.

Важным условием выполнения равенства скоростей износа зерен и связки круга является правильный выбор типа связки. В настоящее время создано большое количество различных по составу связок, в том числе металлических, которые обеспечивают режим самозатачивания круга. Это достигается в основном за счет снижения твердости связки, что сопровождается снижением прочности удержания зерен и срока работы круга. Однако при этом увеличиваются режущая способность круга и производительность обработки Q вследствие уменьшения параметров $\bar{X}$ и η – в соответствии с зависимостями (4.6) и (4.23). Уменьшение зернистости круга $\bar{X}$ ведет к снижению ресурса работы зерен в алмазном круге. Поэтому с точки зрения уменьшения себестоимости обработки существует оптимальное значение зернистости круга $\bar{X}$, которое должно обеспечиваться оптимальным сочетанием твердости связки, зернистости и концентрации круга. Если два вышеуказанных условия самозатачивания круга не выполняются, то круг будет работать в режиме затупления и его необходимо периодически править. Для этого эффективно использовать метод электроэрозионной правки, основанный на термическом разрушении металлической связки от действия электрических разрядов. Температура нагрева поверхностных слоев связки в момент действия электрического импульса равна [81]:

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot A}{\rho \cdot c \cdot S \cdot l}, \quad (4.25)$$

где k – тепловой эквивалент работы;

$A = I \cdot U \cdot \tau$ – работа электрического тока, Дж;

I – сила тока, А;

U – напряжение, В;

τ – время действия электрического импульса, с;

c – удельная теплоемкость металлической связки, Дж/кг·К;

ρ – плотность металлической связки, кг/м³;

S – фактическая площадь контакта связки круга с правящим электродом, м²;

l – толщина межэлектродного зазора, м.

Как видно, температура t° тем больше, чем больше работа электрического тока A и меньше S и l . В начальный момент правки затупленного круга, когда величина l небольшая ($l \rightarrow 0$), температура t° принимает большие значения, достаточные для термического разрушения. По мере увеличения выступания зерен над связкой, величина l возрастает, а температура t° уменьшается, что при определенных условиях может привести к прекращению процесса электроэрозии. В этом случае необходимо увеличить работу электрического тока A .

С увеличением прочности (твердости) связки температура t° и работа электрического тока A увеличиваются. Правка крупнозернистых алмазных кругов в связи с увеличением l требует увеличения работы электрического тока A . Зависимость (4.25) можно преобразовать:

$$t^\circ = \frac{k \cdot N}{\rho \cdot c \cdot Q_{\text{пр}}}, \quad (4.26)$$

где $N = I \cdot U$ – мощность электрического тока, Вт;

$Q_{\text{пр}} = S \cdot l / \tau$ – производительность правки, м³/с.

При достижении предельного значения t° производительность правки $Q_{\text{пр}}$ зависит лишь от мощности электрического тока N : чем больше N , тем больше $Q_{\text{пр}}$. При этом напряжение U определяет толщину межэлектродного зазора l :

$$t^\circ = \frac{k \cdot U^2 \cdot \tau}{\rho \cdot c \cdot \rho_{\text{ом}} \cdot l^2}, \quad (4.27)$$

где $\rho_{\text{ом}}$ – удельное сопротивление связки, Ом·мм/м².

Сила тока I определяет фактическую площадь контакта металлической связки с электродом $S_{\text{пл}}$:

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot I^2 \cdot \tau \cdot \rho_{\text{ом}}}{\rho \cdot c \cdot S_{\text{пл}}^2}. \quad (4.28)$$

В начальный момент правки, когда $I \approx 0$, напряжение небольшое (при достижении предельной температуры). С течением времени толщина зазора I увеличивается, что сопровождается увеличением напряжения U . Следовательно, для обеспечения большего зазора I необходимо использовать высокие значения напряжения U . Это относится к электроэрозионной правке крупнозернистых алмазных кругов, высокопроизводительному черновому шлифованию и т.д.

Сила тока I в начальный момент правки (в связи с небольшой площадью контакта связки с электродом) принимает большое значение (возможно короткое замыкание). По мере съема микронеровностей связки площадь $S_{\text{пл}}$ уменьшается, что ведет к снижению силы тока. Следовательно, при первоначальном вскрытии алмазного круга (при большой площади контакта связки с электродом) необходимо использовать источники тока, обеспечивающие высокие значения силы тока.

С увеличением τ , как следует из зависимостей (4.27) и (4.28), для достижения предельной температуры t° требуются меньшие значения U и I . Следовательно, недостаток мощности источника тока можно компенсировать увеличением длительности электрического импульса (при использовании электроимпульсных генераторов) или увеличением длины рабочей части электрода (при постоянном электрическом токе).

Теоретические результаты согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [118] (рис. 4.13).

С увеличением времени правки алмазного круга сила тока I_p и мощность тока P_p уменьшаются, а напряжение U_p увеличивается. Это связано с уменьшением площади контакта $S_{\text{пл}}$, производительности правки $Q_{\text{пр}}$ и увеличением I в соответствии с приведенными зависимостями [118] (рис. 4.14), что также вытекает из зависимости (4.28).

С увеличением мощности тока P_p производительность правки $Q_{\text{пр}}$ увеличивается. Как видно, реализация качественной правки требует установления напряжения U до 30 В и более, силы тока I – более 40 А, мощности тока N – более 1 кВт.

Теоретические результаты согласуются с экспериментальными данными Иванова Н. П. и Кобзаря Л. Е. [49] (рис. 4.15, рис. 4.16).

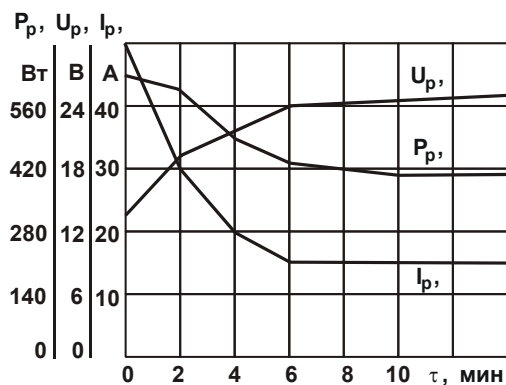


Рис. 4.13. Изменение электрических параметров процесса правки алмазного круга во времени

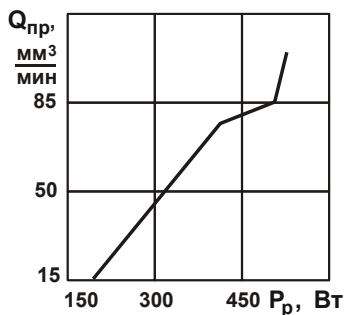


Рис. 4.14. Зависимость производительности правки $Q_{пр}$ от мощности тока P_p

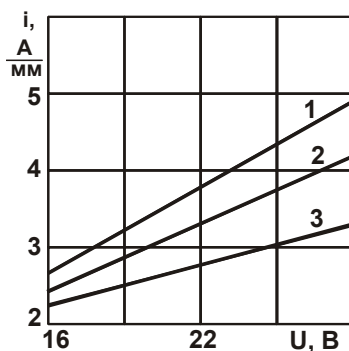


Рис. 4.15. Зависимость плотности тока i от напряжения U

Условные обозначения: 1 – АС6 50/40; 2 – АС6 125/100; 3 – АС6 200/160.

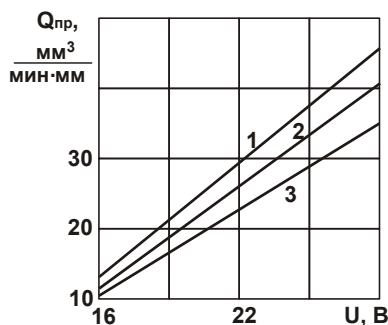


Рис. 4.16. Зависимость производительности правки $Q_{пр}$ от напряжения U

Условные обозначения: 1 – 1A1 200×10×75; 2 – 1A1 250×16×75; 3 – 1A1 300×25×127.

С увеличением напряжения U при электроэрозионной правке (источник тока – специальный двухполупериодный выпрямитель с максимальным током во вторичной обмотке силового трансформатора 200 А) плотность тока i и производительность правки $Q_{пр}$, приходящиеся на единицу ширины круга, увеличиваются. Для алмазного круга 1A1 250×16×75×5 AC6 200/160 4 M2-01 (позиция 2 на приведенных графиках) произведение $i \cdot U$ и производительность правки $Q_{пр}$ с увеличением напряжения U увеличиваются в одинаковое количество раз. Согласно зависимости (4.26), это указывает на постоянство температуры t° в процессе электроэрозионного (термического) разрушения металлической связки алмазного круга.

Следовательно, с увеличением напряжения U толщина межэлектродного зазора l при условии $t^\circ = \text{const}$ в соответствии с зависимостью (4.27) увеличивается. Об этом свидетельствуют также экспериментальные данные по высотам выступления зерен над уровнем связки (рис. 4.17 [50]). С увеличением напряжения U модальная и максимальная высоты выступания зерен увеличиваются.

Установлено, что параметры i и $Q_{пр}$ с увеличением зернистости при условии $U = \text{const}$ уменьшаются. Исходя из зависимости (4.28), это связано с увеличением площади контакта $S_{пл}$ при условии $t^\circ = \text{const}$. Из приведенных данных следует, что процесс электроэрозионной правки обеспечивает производительность до 1 000 мм³/мин при силе тока до 100 А (напряжение $U = 28$ В).

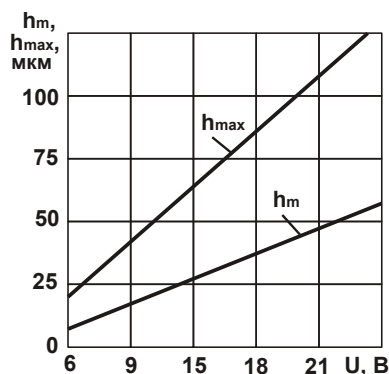


Рис. 4.17. Зависимости модальной h_m и максимальной h_{max} высот выступления зерен от напряжения U

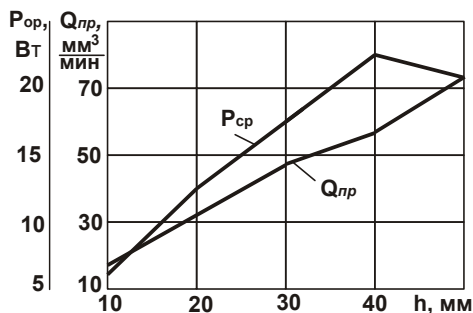


Рис. 4.18. Зависимости производительности правки $Q_{пр}$ и средней мощности электрического тока P_{cp} от длины правящего электрода h

По экспериментальным данным Матюхи П. Г. [74] (рис. 4.18), с увеличением длины правящего электрода h производительность процесса электроэрозионной правки $Q_{пр}$ и средняя мощность электрического тока P_{cp} увеличиваются в одинаковое число раз (например, в диапазоне $h = 10 \dots 40$ мм – приблизительно в 4 раза). Это указывает на постоянство температуры t° в зависимости (4.25) независимо от изменения электрических параметров.

Применяя полученные теоретические результаты для анализа процесса электроэрозионного шлифования, когда роль правящего электрода выполняет обрабатываемая деталь в процессе шлифования, зависимости (4.26) – (4.28) следует представить в виде:

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot I \cdot U}{\rho \cdot c \cdot Q_{\text{пр}}}; \quad (4.29)$$

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot U^2}{\rho \cdot c \cdot \rho_{\text{ом}} \cdot I \cdot V_{\text{кр}}}; \quad (4.30)$$

$$t^{\circ} = \frac{k \cdot I^2 \cdot l \cdot \rho_{\text{ом}} \cdot V_{\text{кр}}}{\rho \cdot c \cdot Q_{\text{пр}}}, \quad (4.31)$$

где ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³;

c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К).

При электроэрозионном шлифовании важно своевременно устранить с рабочей поверхности круга продукты обработки, не допуская засаливания круга. Это обеспечивается, прежде всего, термическим разрушением образующихся стружек при достижении предельной температуры t° .

Для увеличения производительности процесса электроэрозионной правки $Q_{\text{пр}}$ мощность тока $N = I \cdot U$ и силу тока I необходимо увеличить ($t^{\circ} = \text{const}$). Для увеличения толщины межэлектродного зазора l напряжение U также необходимо увеличить.

При заданных значениях $Q_{\text{пр}}$ и I с увеличением скорости круга $V_{\text{кр}}$ напряжение U увеличивается, сила тока I уменьшается, а мощность тока N остается постоянной.

Из приведенного анализа можно сделать выводы:

- уровень производительности процесса электроэрозионной правки $Q_{\text{пр}}$ вполне однозначно определяется мощностью тока $N = I \cdot U$;
- для реализации высоких значений производительности процесса электроэрозионной правки $Q_{\text{пр}}$ необходимо увеличить толщину межэлектродного зазора l путем повышения напряжения U ;
- чем больше толщина межэлектродного зазора l при заданном значении производительности процесса электроэрозионной правки $Q_{\text{пр}}$, тем меньше требуется сила тока;
- чем больше скорость круга $V_{\text{кр}}$ при заданных значениях I и $Q_{\text{пр}}$, тем меньше требуется сила тока и больше напряжение U .

Из приведенных зависимостей следует, что при высокопроизводительном электроэрозионном шлифовании основным электрическим пара-

метром является напряжение U , которое необходимо увеличивать. Учитывая ограничения на величину напряжения U по технике безопасности труда, исходя из зависимости (4.30), необходимо уменьшать скорость круга $V_{кр}$. Однако это ведет к снижению производительности обработки.

Теоретические результаты согласуются с экспериментальными данными [118] (рис. 4.19). Мощность тока P_p с течением времени остается почти постоянной. Следовательно, за счет правки алмазного круга под-держивается постоянной во времени производительность обработки.

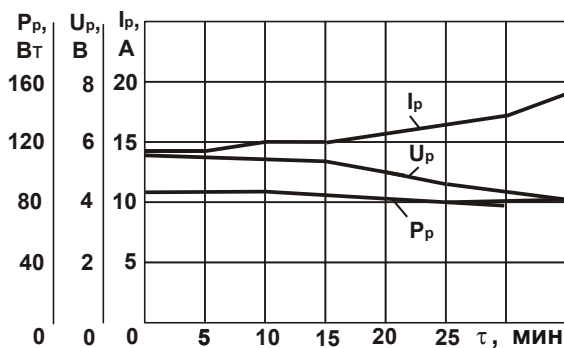


Рис. 4.19. Изменение электрических параметров правки алмазного круга в процессе шлифования

Напряжение U_p с течением времени правки несколько уменьшается. Следовательно, уменьшается толщина межэлектродного зазора l в соответствии с зависимостью (4.30).

Уменьшение толщины межэлектродного зазора l при постоянстве производительности обработки и температуры t° приводит к увеличению силы тока в соответствии с зависимостью (4.31), что также согласуется с экспериментальными данными.

Для осуществления эффективной электроэрозионной правки алмазных кругов на прочных металлических связках типа М2-01 мощность тока необходимо существенно увеличивать. При ее ограничении – уменьшать скорость линейного износа зерен путем увеличения их прочности и износостойкости, а также путем увеличения площади рабочей поверхности круга (диаметра и высоты) и количества расположенных на ней зерен. Этим предопределяется эффективность применения крупногабаритных алмазных кругов на металлических связках.

4.3.3. Расчет и анализ шероховатости обработанной поверхности при нарезании граней на изделиях из хрусталя

Существенным недостатком применения алмазных кругов на металлических связках при шлифовании изделий из хрусталя является относительно низкое качество обработки в связи с высокими значениями параметра шероховатости поверхности R_a , вызванными, главным образом, образованием на обрабатываемой поверхности глубоких рисок-царапин. Поэтому при обработке изделий из хрусталя важно обеспечить требуемую шероховатость поверхности. Ниже произведен расчет шероховатости поверхности и анализ возможностей ее уменьшения.

Параметр шероховатости поверхности $R_{\max}$ при шлифовании алмазным кругом с одинаковыми по размеру зернами определяется зависимостью [146]:

$$R_{\max} = (1 - \eta) \cdot \bar{X} \cdot 3 \sqrt[3]{\frac{900 \cdot P_y}{m \cdot HV}}. \quad (4.32)$$

Как следует из зависимости (4.32), чем больше зернистость круга $\bar{X}$, радиальная составляющая силы резания P_y и меньше безразмерный коэффициент η , твердость материала HV , объемная концентрация зерен круга m , тем больше параметр шероховатости поверхности $R_{\max}$. Наибольшее влияние на параметр $R_{\max}$ оказывают параметры $\bar{X}$ и η , т.е. эффективно управлять шероховатостью обработки за счет изменения характеристик алмазного круга.

Алмазные круги изготавливаются с определенными диапазонами зернистости. Учесть разброс геометрических размеров зерен в расчетной зависимости для определения параметра шероховатости поверхности $R_{\max}$ можно путем уменьшения "условной" концентрации круга, умножив параметр m на два коэффициента $K_1 = \frac{R_{\max}}{\Delta}$ и K_2 . Здесь Δ – диапазон разброса размера зерен. Первый коэффициент K_1 определяет то, что слой шероховатости обработанной поверхности формируется наиболее выступающими из связки зернами, вершины которых удалены от вершины максимально выступающего зерна на расстояние не более $R_{\max}$. Второй коэффициент K_2 равен отношению количества зерен, имеющих

наибольшие размеры, к количеству зерен, имеющих наименьшие размеры. Как показывает практика, крупных зерен всегда меньше, чем мелких. Поэтому коэффициент K_2 всегда меньше единицы и может быть равным 0,5; 0,3 и менее. С учетом принятых допущений, зависимость (4.32) преобразуется

$$R_{\max} = 4 \sqrt[4]{(1-\eta)^3 \cdot \bar{X}^3 \cdot \frac{225 \cdot P_y \cdot \Delta}{m \cdot K_2}} \quad (4.33)$$

или

$$R_{\max} = \sqrt[4]{R_{\max}^3} \cdot 4 \sqrt[4]{\frac{\Delta}{K_2}}, \quad (4.34)$$

где $\bar{R}_{\max}$ – параметр шероховатости поверхности, определяемый в соответствии с зависимостью (4.32).

Из зависимости (4.34) следует, что $R_{\max} > \bar{R}_{\max}$, так как $K_1 < 1$. Например, для зернистости 100/80 параметр $\Delta = 20$ мкм. С учетом $K_2 = 0,3$ множитель $4 \sqrt[4]{\frac{\Delta}{K_2}} = 4 \sqrt[4]{\frac{20}{0,3}} \approx 3$.

Таким образом показано, что наличие диапазона разброса зернистости Δ ведет к увеличению $R_{\max}$ приблизительно в 3 раза. С уменьшением коэффициента K_2 ниже 0,3 (что вполне возможно) параметр шероховатость поверхности $R_{\max}$ увеличится в большее число раз. Следовательно, алмазные круги необходимо изготавливать с минимально возможным диапазоном разброса зернистостей Δ , уменьшая его до нуля.

Необходимо отметить, что при некачественном просеивании алмазных зерен коэффициент K_2 может быть значительно уменьшен. Достаточно в массу зерен попасть несколькими крупным зернам, чтобы уменьшить коэффициент K_2 до значений 0,1 или 0,01. Параметр шероховатости поверхности $R_{\max}$ при этом увеличится в 10 и более раз. Улучшить шероховатость обработки в этом случае при шлифовании не удастся. Необходимо вводить новые технологические операции, например, при обработке изделий из хрусталя – операцию химического полирования и производить значительный съем материала для устранения шероховатого слоя.

Существенными факторами, влияющими на параметр шероховатости поверхности $R_{\max}$, являются также наличие неровностей (выступающих участков) на круге и биение круга. Наличие неровностей приводит к значительному выступанию отдельных зерен по отношению к основной массе зерен, что эквивалентно рассмотренному выше случаю, связанному с существованием диапазона зернистости Δ . В результате на обработанной поверхности образуются глубокие отдельные риски-царапины, которые существенно ухудшают шероховатость обработки и не устраняются шлифованием, а устраняются, например, в процессе электрохимического полирования изделий из хрусталя с высокой трудоемкостью.

Как показывает практика, наличие неровностей на круге характерно для прочных металлических связок. Чем прочнее связка, тем труднее добиться однородности поверхности круга.

Применение методов механической правки не позволяет устранить неравномерность поверхности алмазного круга на металлической связке М2-01 в связи с копированием поверхности. Поэтому эффективно применять бесконтактную электроэрозионную правку, устраняющую как неровности связки, так и биение круга, вызывающего волнистость на обработанной поверхности. Подтверждением тому следует рассматривать разработанную авторами работы технологию электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке формы 14ЕЕ1, которая, как показано выше, получила эффективное применение в производстве. Правка круга производится непосредственно на каждом рабочем месте без съема круга со станка. Время правки 5 ... 10 секунд, периодичность – 15 ... 20 мин. Правка выполняется с помощью специального электрода, который удерживается в руках рабочего [83]. Электрические разряды возбуждаются от малогабаритного электроимпульсного генератора, который одновременно может обслуживать 10 станков.

В результате применения электроэрозионной правки обеспечивается качественная подготовка алмазного круга к работе: устраняются неровности связки и его биение, исправляется погрешность геометрической формы круга, что способствует повышению его режущей способности. В сочетании с применением алмазных кругов с оптимальными характеристиками, обоснованными выше, это позволяет существенно повысить производительность и качество обработки, снизить физические нагрузки на рабочего в процессе ручной обработки.

С целью уменьшения параметра шероховатости поверхности $R_{\max}$ были изготовлены специальные алмазные круги с одинаковыми по раз-

мерам алмазными зернами. Их применение действительно позволило уменьшить параметр $R_{\max}$, однако полностью решить проблему обеспечения требуемой шероховатости поверхности не удалось.

Опытами установлено значительное влияние на шероховатость обработки качества изготовления алмазных кругов. Например, алмазные круги на металлической связке М2-01 одной и той же характеристики, произведенные различными предприятиями Украины, России и Республики Беларусь, обеспечивают различную шероховатость поверхности.

Опытами также установлено, что важнейшей причиной, ограничивающей достижение высоких показателей шероховатости поверхности при шлифовании алмазными кругами на металлической связке, является недостаточное количество зерен, расположенных на рабочей поверхности круга. Поэтому с целью увеличения поверхностной концентрации зерен используются алмазно-абразивные инструменты (однослойные), изготовленные электрогальваническим методом. Поверхностная концентрация зерен при этом увеличивается до 5 и более раз, что эквивалентно алмазным кругам 400 – 600-процентной концентрации (изготовленным методом порошковой металлургии). Такие алмазные круги, как отмечалось в разделе 4, достаточно эффективны для огранки природных алмазов в бриллианты, однако технология их изготовления не является экологически безопасной. С учетом сказанного, предварительную операцию обдирки следует производить обычными алмазными кругами на металлической связке М2-01, а окончательные шлифовально-полировальные операции следует производить с использованием алмазных ограночных дисков, изготовленных электрогальваническим методом.

4.3.4. Электроэрозионная правка крупногабаритных алмазных сегментных пил, используемых для обработки твердых пород камня

Добиться снижения температуры резания можно периодическим прерыванием процесса алмазно-абразивной обработки [171], а увеличить производительность при обработке материалов высокой твердости, как показано в разделе 1, – повышением зернистости алмазного инструмента на металлической связке. Эти два фактора удачно реализованы в конструкциях алмазных дисковых сегментных пил $\varnothing 250 \dots 1\,500$ мм и более, имеющих прерывистую рабочую поверхность с алмазоносным слоем, состоящим из зерен природного или синтетического алмаза вы-

сокой прочности зернистостью 1 000/800 и более на высокопрочной металлической связке (рис. 4.20). Пилы используются при разрезке твердых пород камня (мрамора, гранита и т.д.). С целью повышения их стойкости и улучшения всех выходных показателей обработки, эффективно применение крупногабаритных алмазных дисковых сегментных пил диаметром $\varnothing$ 1 500 мм и более.

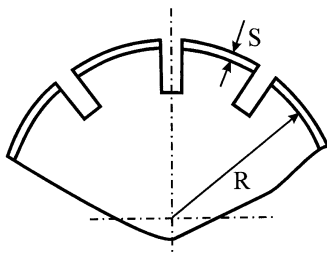


Рис. 4.20. Алмазная дисковая сегментная пила

Перед началом работы рекомендуется вскрыть алмазные зерна на рабочих поверхностях сегментов пилы путем резания абразивного материала или песчано-цементных блоков [122]. Однако, как показывает опыт их применения, после припаивания алмазных сегментов к корпусу пилы в результате несовершенства технологий, как правило, имеет место значительная разновысотность установки сегментов (до 1 мм, а в ряде случаев и более). Устранить эту разновысотность путем обычной приработки круга весьма сложно, процесс трудоемок. В связи с этим на заводах-изготовителях алмазного инструмента производят шлифование пил (по периферии и торцам) абразивным кругом на импортном оборудовании, например итальянского производства.

Это позволяет ускорить подготовку пилы к работе, однако, процесс не эффективен. Во-первых, он является достаточно продолжительным, во-вторых, обеспечивается низкое качество вскрытия алмазоносного слоя, в-третьих, потребляется большое количество абразивных кругов. Кроме того, с появлением в последние годы новых сверхпрочных металлических связок обработка пил абразивным кругом стала практически невыполнимой. Поэтому несовершенство технологии изготовления указанных пил ограничивают их технологические возможности. Все это свидетельствует о необходимости применения более совершенных технологий подготовки сегментных пил к работе.

В настоящее время имеется определенный опыт правки крупнозернистых алмазных кругов электроэрозионным методом [118; 161], в

частности, с использованием специального гибкого электрода. Однако в условиях съема большого объема алмазного слоя с целью устранения разноравности алмазных сегментов прерывистой рабочей поверхности пилы, известные методы электроэрозионной правки применения не получили. Одна из причин – практически отсутствие электроэрозионного процесса в связи с большим межэлектродным зазором, определяемым большой зернистостью, и интенсивным истиранием металла электрода. Следовательно, для эффективного осуществления процесса электроэрозионной обработки необходимо решить проблему практической реализации оптимального электрического режима, обеспечивающего термическое разрушение алмазоносного слоя с высокой интенсивностью.

В связи с этим, авторами работы предложена технология электроэрозионной обработки крупногабаритных алмазных сегментных пил, основанная на использовании специального генератора импульсного тока, в котором реализован оптимальный электрический режим обработки алмазного инструмента чрезвычайно высокой зернистости в соответствии с результатами исследований, приведенных в разделе 3. Увеличить температуру нагрева металлической связки t_2^0 для ее ударно-термического разрушения при большой величине зазора межзеренного пространства у крупнозернистого инструмента I можно увеличением напряжения U и длительности импульса тока τ . Реализация этих двух условий в специально разработанном генераторе импульсного тока позволила повысить энергию электрических импульсов и обеспечить ударно-термическое разрушение металлической связки с достаточно высокой интенсивностью. Это дало возможности производить высокопроизводительную электроэрозионную обработку рабочей поверхности алмазной пилы со съемом большого объема алмазоносного слоя, устранять разноравность и биение пилы, обеспечивать вскрытие алмазных зерен на относительно большую высоту.

Одним из несовершенств данной технологии является повышенный износ электрода в связи со значительным выступанием алмазных зерен над уровнем связки и необходимостью поддержания (регулирования) увеличенного межэлектродного зазора, особенно при устранении разноравности расположения сегментов в пределах 1 мм.

Следовательно, повысить эффективность данной технологии электроэрозионной обработки можно путем более качественной установки сегментов на корпус пилы, снижения разноравного расположения сег-

ментов, что достигается введением операции специальной подгонки сегментов. Данная технология электроэрозионной обработки внедрена на Гомельском заводе алмазных инструментов с использованием переоборудованных под электроэрозионную обработку станков для механической обработки крупногабаритных алмазных сегментных пил, что обеспечивает качественную подготовку пил к работе на заводе-изготовителе.

Выводы к разделу 4

1. Установлено, что при двухстороннем торцовом шлифовании по жесткой схеме керамических пластин (используемых в электронной промышленности) на станках модели 3102 вследствие затупления алмазных кругов на металлической связке М2-01 значительно увеличиваются силы резания, а это приводит к снижению качества обработки и повышению нагрузок, действующих на радиально-упорные подшипники шпиндельного узла станка, и преждевременному выходу их из строя. Это требует трудоемкого ремонта станка. Применяемые методы механической правки алмазного круга малоэффективны, так как не обеспечивают достаточного выступания алмазных зерен над уровнем связки круга. Для осуществления электроэрозионной периодической правки одновременно двух алмазных кругов (установленных параллельно) непосредственно на станке, разработана конструкция правящего устройства, работающего в автоматическом режиме, что обеспечивает увеличенное выступание зерен, устраняет торцовое биение кругов, многократно повышает их стойкость, точность и качество обрабатываемых керамических пластин, уменьшает расход алмаза. Применение электроэрозионной правки позволило повысить производительность обработки за счет использования при шлифовании алмазных кругов повышенной зернистости 250/200, которые в обычных условиях неработоспособны из-за возможности достаточного вскрытия алмазоносного слоя круга.

2. При шлифовании деталей из керамики и ферритов на станках с вращающимся столом модели 3Д756 применяются крупногабаритные торцовые сборные алмазные круги на металлических кобальтовых связках и связке М2-01 диаметром 800 мм и более. При этом возникают проблемы подготовки круга к работе, так как после сборки режущих элементов (цилиндрических вставок диаметром 40 мм) в круге имеет место их значительная разновысотность (до 1 мм и более). Устранение разновы-

сотности традиционно производится шлифованием сборного алмазного круга абразивным кругом, однако данная операция весьма продолжительна и трудоемка, требует потребления большого количества абразивных кругов. Разработанная технология электроэрозионной правки алмазного круга, специальная технологическая оснастка и специальные электроимпульсные генераторы существенно сокращают время подготовки алмазного круга к шлифованию, так как не требуется применение абразивных кругов. В процессе электроэрозионной правки обеспечивается качественное вскрытие алмазоносного слоя крупнозернистого круга, что существенно повышает его стойкость, снижает интенсивность трения связки с обрабатываемым материалом и повышает качество обработки.

3. Обоснованы возможности эффективного применения электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках взамен традиционно применяемого метода электрохимической правки при огранке природных алмазов в бриллианты. Предложены новые конструктивные схемы осуществления электроэрозионной правки, которые позволяют существенно повысить его эффективность в производственных условиях, улучшить экологию производства. Так, в процессе электроэрозионной правки обеспечивается повышение точности рабочих поверхностей алмазных кругов (плоскостности) в пределах 0,01 мм и относительно большое выступание зерен над связкой. Установлено отсутствие массопереноса компонентов металлической связки на обрабатываемом изделии, что имело место после механической правки алмазного круга. Приведены конкретные примеры реализации электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках на операциях огранки природных алмазов в бриллианты и плоского шлифования твердосплавной оснастки синтеза искусственных алмазов.

4. Разработана технология нарезания граней на изделиях из хрусталя с использованием электроэрозионной правки алмазных кругов формы 14EE1 на металлической связке М2-01. Электроэрозионная правка круга производится непосредственно на каждом рабочем месте без съема круга со станка. Время правки – 5 ... 10 секунд, периодичность – 15 ... 20 минут. Правка выполняется с помощью специального электрода, который удерживает в руках рабочий. Электрические разряды возбуждаются от малогабаритного электроимпульсного генератора, который одновременно может обслуживать 10 станков. В результате применения электроэрозионной правки обеспечивается качественная

подготовка круга к работе: устраняются неровности связки и биение круга, исправляется погрешность геометрической формы круга и повышается его режущая способность. В сочетании с применением алмазных кругов с оптимальными характеристиками, обоснованными выше, это позволяет существенно повысить производительность и качество нарезания граней на изделиях из хрусталя, снизить значительные физические нагрузки на рабочего, которые имеют место в процессе "ручного" нарезания граней на изделиях из хрусталя. Разработанная высокоэффективная технология нарезания граней на изделиях из хрусталя внедрена на ряде стекольных заводов, изготавливающих изделия из хрусталя. Под данную технологию переоборудовано более 100 рабочих мест, станки укомплектованы достаточным количеством малогабаритных генераторов импульсного тока.

5. Разработаны и внедрены технологии электроэрозионной обработки специальных профильных алмазных кругов, используемых для создания facets на листовом стекле, в зеркальном производстве и т.д. С помощью этих технологий решена проблема правки алмазных кругов формы 1А1 на металлической связке М2-01, используемых для шлифования оптических изделий, в частности, для шлифования линз при изготовлении очков. В последнем случае обеспечивается качественная правка алмазных кругов (в том числе габаритных) на металлической связке М2-01 с использованием простых правящих устройств. Повышение режущей способности алмазных кругов позволяет улучшить качество обрабатываемых поверхностей, уменьшить образование сколов на них и т.д. Технология внедрена на предприятии "Зир" (г. Харьков) и других предприятиях, занимающихся изготовлением линз для очков.

6. Разработана эффективная технология электроэрозионной обработки крупногабаритных алмазных сегментных пил (диаметром более 1 000 мм), используемых в камнеобработке, которая обеспечивает устранение значительной разновысотности (более 1 мм) расположения алмазных сегментов на корпусе пилы и качественное вскрытие алмазного слоя высокой прочности, что не достигалось в процессе механической правки абразивными кругами на специальном оборудовании западно-европейского производства.

5. Перспективы эффективного использования крупногабаритных алмазных кругов на металлических связках

Как показано в разделе 1, при высокопроизводительном шлифовании, в особенности глубинном шлифовании высокопрочных пластичных материалов, алмазный круг на металлической связке М2-01 интенсивно засаливается и теряет режущую способность. Введение в зону резания дополнительной энергии в виде электрических разрядов не позволяет в полной мере устранить засаливание круга, поскольку повышение мощности импульсов разрядного тока вследствие перемикаания стружками межэлектродного зазора приводит к короткому замыканию и прекращению процесса электроэрозионного (термического) разрушения металлической связки круга и продуктов обработки. Одним из эффективных путей уменьшения интенсивности засаливания алмазного круга при шлифовании может быть увеличение площади его рабочей поверхности за счет увеличения его наружного диаметра и высоты круга. В сочетании с непрерывной электроэрозионной правкой это позволит полностью устранить засаливание алмазного круга и обеспечит высокопроизводительный съем материала, достаточный для эффективного использования алмазного круга взамен абразивного на операциях предварительного шлифования твердых сплавов, высокопрочных сталей и других труднообрабатываемых материалов.

В отличие от крупногабаритных абразивных кругов, наружный диаметр которых достигает 2 000 мм, цельные алмазные круги формы 1А1 изготавливаются с диаметром не более 500 мм. Такие алмазные круги изготавливает Полтавский алмазный завод. Изготовление цельных алмазных кругов диаметром 600 мм и выше является трудноразрешимой проблемой в связи с отсутствием в настоящее время соответствующего оборудования, а также несовершенством изготовления технологической оснастки. Так, основой для изготовления алмазного круга является пресс-форма, представляющая собой сложный конструктивный узел, составные части которого изготавливаются из специального высоколегированного сплава. Технология изготовления пресс-формы весьма трудоемка, объясняется это обработкой крупногабаритных деталей с высокой точностью на специальных габаритных координатно-расточных станках, затем в габаритных печах при термообработке. Стойкость

пресс-формы относительно небольшая, например, одной пресс-формой можно изготовить до десяти алмазных кругов диаметром 500 мм.

Попытки изготовления пресс-формы для алмазного круга диаметром 600 мм на Полтавском алмазном заводе в 1982...85 годы оказались безуспешными ввиду чрезвычайной трудоемкости механической и термической обработки ее составных частей.

В связи с этим в ИСМ НАН Украины 1980-е годы пошли по пути создания сборных конструкций крупногабаритных алмазных кругов. Например, был изготовлен сборный алмазный круг 1А1 600×40 АС15 350/300 М2-01 4, который прошел широкие испытания на Харьковском станкостроительном заводе имени Касиора с целью определения возможностей оснащения им специального круглошлифовального станка на базе модели 3М151 для шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов (табл. 5.1 [103]). В ходе испытаний установлено, что одним из несовершенств круга является его повышенный износ в местах стыка алмазоносных сегментов, из которых состоит круг, т.е. конструкция круга была недостаточно надежна и требовала дальнейшего совершенствования.

Таблица 5.1

Результаты экспериментальных исследований

Условия обработки	Обрабатываемый материал							
	Титановый сплав ВТ-3			Сталь	Сталь 45	Сталь ХВГ	Чугун	
$V_{\text{дет}}, \text{ м/с}$	0,47	0,44	0,4	0,72	0,43	0,417	0,35	0,33
$S_{\text{под}} \cdot 10^4, \text{ м/с}$	2,5	16,6	50	6	30	30	6,6	50
$P_z, \text{ Н}$	30	127	364	170	364	364	30	165
$R_a, \text{ мкм}$	1,5	1,9	2	2	2,5	1,9	2	1,5

Примечание: Исследования проводились в лаборатории ОКБШС при Харьковском станкостроительном заводе имени Касиора под руководством Пашкова Д. А.

Экспериментальные значения тангенциальной составляющей силы резания P_z и параметра шероховатости обработки R_a , полученные при круглом врезном шлифовании алмазным кругом 1А1 600×40 АС15 350/300 М2-01 4 различных обрабатываемых материалов для различных значений скорости детали $V_{\text{дет}}$ и врезной подачи $S_{\text{под}}$ ($V_{\text{кр}} = 40 \text{ м/с}$; диаметр обрабатываемой детали $D_{\text{дет}} = 44 \text{ мм}$).

В целом испытания показали перспективность применения крупногабаритного алмазного круга в плане устранения засаливания и повышения производительности обработки.

В это же время в ИСМ НАН Украины были изготовлены и внедрены в производство опытные образцы сборных алмазных кругов диаметром 800 мм и более для шлифования крупногабаритных деталей с покрытиями и наплавками металлургического назначения [131; 133]. Алмазные круги, изготовленные на металлической связке М1-10, работают достаточно устойчиво в режиме самозатачивания и не требуют применения электроэрозионной правки.

Вместе с тем, применение относительно малопрочной металлической связки М1-10 для изготовления крупногабаритного алмазного круга диаметром 800 мм не позволило в полной мере использовать его технологические возможности, так как с увеличением диаметра круга и соответственно его рабочей поверхности, связка должна быть прочнее. Вполне возможно, что для такого алмазного круга эффективнее было бы использовать более прочную связку М2-01, которая малоэффективна для алмазных кругов меньшего диаметра. В сочетании с электроэрозионной правкой такой алмазный круг позволил бы увеличить производительность обработки за счет осуществления работы без засаливания. В связи с высокой стоимостью разработанные сборные алмазные круги диаметром 800 мм и более получили применение лишь в металлургии при шлифовании крупногабаритных деталей, где применение обычных алмазных кругов технически неприемлемо.

Таким образом, в настоящее время применение крупногабаритных алмазных кругов на металлической связке М2-01 формы 1А1 ограничено диаметром 500 мм, промышленный выпуск которых освоен Полтавским алмазным заводом. Основной областью их использования является шлифование неметаллических материалов (огнеупоров, стекла, хрусталя и т.д.). При шлифовании труднообрабатываемых металлических материалов они применения фактически не получили, что связано с трудностями подготовки их к работе и эффективной эксплуатации. Так установлено, что вновь изготовленный алмазный круг после его установки на станок имеет радиальное биение 0,3 мм и более. Устранить такое большое биение (съем большого объема алмазонаосного слоя) обычным механическим методом затруднено. Затруднено также качественное вскрытие алмазонаосного слоя круга большой площади, что ограничивает возможности эффективной обработки металлических материалов. Бо-

лее того, в процессе шлифования происходит засаливание алмазного круга образующимися стружками, что снижает его режущую способность. В совокупности указанные факторы ограничивают использование алмазного круга Ø 500 мм при высокопроизводительном (в частности глубинном) шлифовании деталей из твердых сплавов и других высокопрочных материалов. Следовательно, основным условием их широкого применения может быть создание эффективных технологий электроэрозионной обработки алмазного круга с целью устранения большого радиального биения и качественного вскрытия алмазоносного слоя как на этапе подготовки круга к работе, так и в процессе его непрерывной или периодической правки при шлифовании. При этом параметры процесса электроэрозионной правки должны быть увязаны с механическим режимом шлифования из условия максимального использования прочностных свойств рабочей поверхности алмазного круга и обеспечения максимально возможной производительности обработки. В противном случае, применение алмазного круга будет экономически нецелесообразно в связи с высокой стоимостью по сравнению с обычным алмазным кругом диаметром 300 мм, т.е. крупногабаритный алмазный круг должен работать в условиях строгого соблюдения оптимального режима шлифования.

В отличие от алмазных кругов формы 1А1, промышленностью освоен выпуск торцовых сборных алмазных кругов на металлических связках с большим наружным диаметром – свыше 1 000 мм. Эти круги используются для плоского шлифования неметаллических труднообрабатываемых материалов: керамики, кремния, германия, ферритов, фарфора и т.д. Сборный круг состоит из корпуса (планшайбы) и режущих алмазных элементов, изготовленных методами порошковой металлургии исключительно на металлической связке М2-01 производства Полтавского алмазного завода. В настоящее время Опытным заводом ИСМ НАН Украины освоено производство алмазных элементов на более прочных металлических связках, что позволяет повысить стойкость сборных алмазных кругов. Однако при этом во много раз увеличивают трудоемкость их правки как на этапе подготовки круга к работе, так и в процессе эксплуатации. Проведенные исследования показали перспективность электроэрозионной правки алмазного круга взамен используемой технологии обычной механической правки, однако обработка большой площади рабочей поверхности круга со съемом большого объема алмазоносного слоя требует подвода высокой концентрации электриче-

ской энергии. Это предполагает разработку новых подходов к созданию технологической оснастки, источников технологического тока и выбору оптимальных условий обработки, так как известные рекомендации по организации электроэрозионной правки малогабаритных алмазных кругов на металлических связках практически неприемлемы. Разработанные технологии электроэрозионной обработки необходимы также для подготовки к работе крупногабаритных алмазных сегментных пил и отрезных кругов, алмазных кругов для огранки природных алмазов и изделий из стекла и хрусталя, обработки оптических деталей и т.д.

Необходимо отметить, что появление в 1960-е годы методов электроэрозионной правки алмазных кругов стало альтернативой используемым механическим методам правки абразивным кругом или бруском (например, из карбида зеленого), которые не обеспечивают достаточного выступания зерен над уровнем связки, приводят к существенному износу круга и механическому повреждению алмазных зерен при правке и снижению работоспособности алмазного круга в процессе шлифования.

Основанный на использовании эффекта электроэрозии металлической связки (ударно-термического ее разрушения), метод электроэрозионной правки практически не зависит от прочности металлической связки алмазного круга, позволяет более качественно вскрыть алмазносный слой круга и повысить его работоспособность [10; 26; 59; 118; 148]. Как правило, процесс электроэрозионной правки осуществляется на специальной установке, укомплектованной источником технологического тока, с использованием правящего электрода из углеграфитовых материалов или серого чугуна, стали, меди и других материалов, которые обладают высокой электроэрозионной стойкостью. В качестве электрода может быть использован также крупнозернистый алмазный круг или брусок на металлической связке.

Более эффективно электроэрозионную правку осуществлять непосредственно на рабочем станке. Это позволит устранить биение алмазного круга благодаря исключению его перестановки со станка на станок и повысить точность обработки рабочей поверхности круга.

В конце 1960-х и начале 1970-х годов широкое развитие получили также методы электроэрозионного профилирования алмазных кругов [80; 161; 162], что открыло новые перспективы применения алмазного фасонного шлифования.

Первые работы по использованию метода электроэрозии для правки алмазного круга непосредственно в процессе шлифования свя-

заны с изобретением, предложенным в Харьковском политехническом университете учеными под руководством профессоров Семко М. Ф. и Беззубенко Н. К. [9; 10]. Суть его состоит в том, что в качестве правящего электрода используется обрабатываемая деталь при шлифовании. При пропускании тока через зону резания возникают электрические разряды, которые образуют в локальных зонах высокотемпературные очаги, достаточные для плавления стружек и металлической связки круга. В результате этого происходит непрерывное обновление рабочей поверхности круга, характеризующейся высокой режущей способностью. В научно-технической литературе предложенный метод обработки получил название "алмазно-искровое шлифование" [8; 10]. Этот метод достаточно глубоко исследован применительно к обработке различных материалов на основных операциях шлифования [26; 54; 105; 118; 124; 154; 160]. Его исследованию посвящен ряд диссертационных работ [10; 28; 71; 75; 77; 156]. Опытами установлено, что при алмазно-искровом шлифовании режущие зерна выступают над уровнем связки на значительную высоту, практически исключается трение обрабатываемого металла со связкой, многократно увеличивается стойкость алмазного круга. Это позволяет уменьшить силы и температуру резания, улучшить качество обрабатываемых поверхностей, а увеличение объема межзеренного пространства создает объективные предпосылки для увеличения производительности обработки за счет повышения параметров срезов (увеличения площади поперечного сечения и длины среза).

Вместе с тем, несмотря на многочисленные проведенные исследования, технологические возможности данного метода шлифования изучены недостаточно. Это связано с тем, что исследовались относительно малопродуктивные процессы многопроходного круглого наружного, внутреннего и плоского шлифования, заточки инструментов, выполняемые с производительностью до 10 тыс. мм³/мин [28; 71; 118; 155; 156]. Оценка возможностей использования метода при высокопроизводительном, например, глубинном шлифовании, с производительностью 20 тыс. мм³/мин и выше не производилась. Кроме того, исследования в основном выполнялись с использованием алмазных кругов на металлических связках типа М1-01, которые склонны к самозатачиванию.

Возможности высокопроизводительного алмазно-искрового шлифования кругами на прочных металлических связках типа М2-01, которые в обычных условиях обработки неработоспособны, практически не оценивались.

В качестве недостатка следует также отметить отсутствие методик расчета оптимального электрического режима работы источника тока для реализации заданного механического режима шлифования. Это не позволяет управлять процессом с точки зрения исключения (или существенного снижения) трения обрабатываемого материала со связкой алмазного круга, поддержания на его рабочей поверхности оптимального режущего рельефа и т.д. Отсутствие этих решений, на наш взгляд, является основной причиной низкой эффективности применения в промышленности серийно выпускаемых станков для электроэрозионного шлифования (например, станков моделей 3К12Р, 3К227ВР, 3Е624ЭР и др.). По имеющимся данным, эти станки в основном работают в режиме обычного шлифования без использования электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках.

Отсутствует также опыт алмазно-искрового шлифования крупногабаритными алмазными кругами на металлических связках, что не позволяет эффективно использовать более прочные металлические связки для увеличения производительности и других технико-экономических показателей обработки. Таким образом можно заключить, что алмазно-искровое шлифование является основной предпосылкой эффективного применения крупногабаритных алмазных кругов, однако, это требует дальнейшего совершенствования процесса.

Как отмечалось выше, требует совершенствования и процесс предварительной электроэрозионной правки крупногабаритных торцовых алмазных кругов, поскольку имеющаяся технологическая оснастка и источники технологического тока не позволяют обеспечить высокую концентрацию электрической энергии правки на большой площади обрабатываемой поверхности алмазного круга для осуществления высокопроизводительного съема больших объемов алмазного слоя с высокой точностью (при устранении большого радиального биения, разновысотного расположения режущих элементов сборного алмазного круга и т.д.).

Выводы к разделу 5

1. Установлено, что уменьшить интенсивность засаливания алмазного круга при шлифовании можно увеличением площади его рабочей поверхности за счет увеличения наружного диаметра и высоты круга. В сочетании с непрерывной электроэрозионной правкой это позволит полностью устранить засаливание алмазного круга и обеспечит высоко-

производительный съем материала, достаточный для эффективного использования алмазного круга взамен абразивного на операциях предварительного шлифования твердых сплавов, высокопрочных сталей и других труднообрабатываемых материалов.

2. Показано, что применение относительно малопрочной металлической связки М1-10 для изготовления крупногабаритного алмазного круга диаметром 800 мм не позволило в полной мере использовать его технологические возможности, так как с увеличением диаметра круга и соответственно его рабочей поверхности, связка должна быть прочнее. Поэтому для крупногабаритного алмазного круга целесообразно использовать более прочную связку М2-01, которая малоэффективна для алмазных кругов меньшего диаметра, работающих, как правило, в режиме засаливания. В сочетании с электроэрозионной правкой такой крупногабаритный алмазный круг позволит увеличить производительность обработки за счет осуществления работы без засаливания.

3. Для эффективного использования алмазного круга Ø 500 мм при высокопроизводительном глубинном шлифовании деталей из твердых сплавов и других материалов повышенной твердости параметры процесса электроэрозионной правки должны быть увязаны с параметрами механического режима шлифования с учетом максимального использования прочностных свойств рабочей поверхности алмазного круга и обеспечения максимально возможной производительности обработки. В противном случае, применение алмазного круга будет экономически нецелесообразно в связи с его высокой стоимостью по сравнению с обычным алмазным кругом диаметром 300 мм, т.е. крупногабаритный алмазный круг должен работать в условиях строгого соблюдения параметров оптимального режима шлифования.

4. Показано, что алмазно-искровое шлифование является основной предпосылкой эффективного применения крупногабаритных алмазных кругов, однако, это требует дальнейшего совершенствования процесса. Требуется совершенствования также и процесс предварительной электроэрозионной правки крупногабаритных торцовых алмазных кругов, поскольку сложно обеспечить высокую концентрацию электрической энергии правки на большой площади обрабатываемой поверхности алмазного круга для осуществления высокопроизводительного съема больших объемов алмазного слоя с высокой точностью при устранении большого радиального биения, разновысотного расположения режущих элементов сборного алмазного круга и т.д.

6. Современные технологии механической обработки лезвийными режущими инструментами

6.1. Обоснование условий эффективного применения высокоскоростного резания материалов

Обработка резанием в настоящее время является основным методом формообразования поверхностей при изготовлении высокоточных и высококачественных деталей машин. Это требует поиска новых эффективных решений совершенствования процессов резания материалов, главным образом, за счет увеличения скорости резания – применения высокоскоростного резания.

За последние десятилетия в этом направлении достигнуты определенные успехи: созданы станки и лезвийные инструменты, реализующие скорости резания 100 – 200 м/с. Такие станки зарубежного производства поступают и в Украину, однако опыта их эффективного использования недостаточно. Основные трудности связаны с низкой стойкостью отечественных режущих инструментов, особенно при съеме неравномерных припусков. Поэтому для обоснования путей совершенствования процессов высокоскоростного резания важно оценить их технологические возможности.

В общем случае мощность резания N определяется произведением тангенциальной составляющей силы резания P_z и скорости резания V , т.е. $N = P_z \cdot V$. Очевидно, с увеличением скорости резания V мощность резания N увеличивается. Например, при увеличении скорости резания V с 2 до 100 м/с мощность резания N (при условии $P_z = \text{const}$) увеличивается в 50 раз и может достичь достаточно больших значений. Поэтому реализация высокоскоростного резания требует создания металлорежущих станков повышенной мощности.

С увеличением скорости резания V уменьшается время контакта инструмента с фиксированным сечением обрабатываемой детали, в результате чего уменьшается время теплового воздействия на деталь. Это способствует улучшению качества обработки. Большая часть тепла отводится образующейся стружкой. Однако при этом увеличивается мощность N теплового потока в зоне резания, что приводит к увеличению температуры резания θ .

Такой вывод следует из известной из курса физики зависимости, устанавливающей связь между мощностью теплового потока N и разницей температур $\theta_1 - \theta_2 \approx \theta$ на двух поверхностях стенки толщиной l (условно равной толщине режущей пластины резца):

$$N = \lambda \cdot S_1 \cdot \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{l}, \quad (6.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала резца;

S_1 – площадь поверхности стенки (площадь контакта образующейся стружки с передней поверхностью резца в m^2).

Если представить мощность теплового потока N в виде [146]: $N = \sigma \cdot S \cdot V$, то после преобразований зависимости (6.1) имеем:

$$\theta = \frac{\alpha \cdot \sigma \cdot l \cdot V}{\lambda}, \quad (6.2)$$

где σ – условное напряжение резания, H/m^2 ;

$S = \alpha \cdot S_1$ – площадь поперечного сечения среза, m^2 ;

α – безразмерный коэффициент, зависящий от толщины стружки и толщины среза ($\alpha < 1$).

Температура резания θ определяется скоростью резания V , что согласуется с практикой резания: период стойкости инструмента выражается главным образом скоростным фактором.

Параметр S явно в зависимость (6.2) не входит. Он связан с температурой резания θ коэффициентом α , который мало изменяется с изменением параметра S . Из этого можно заключить, что площадь поперечного сечения среза S несущественно влияет на температуру резания θ . Поэтому с целью повышения производительности обработки площадь поперечного сечения среза S целесообразно увеличивать. Однако, увеличение S ограничено прочностью инструмента.

Уменьшить температуру резания θ можно уменьшением параметров α , σ , l , V и увеличением λ . Как известно, с увеличением скорости резания V уменьшается условное напряжение резания σ , однако, несущественно. Поэтому с увеличением скорости резания V температура резания θ будет увеличиваться. Собственно этим и определяются

основные трудности, с которыми сталкиваются при осуществлении процессов высокоскоростного резания.

Как уже отмечалось, параметры α и σ мало изменяются для рассматриваемого обрабатываемого материала. Поэтому с целью уменьшения температуры резания θ , исходя из зависимости (6.2), изменять необходимо параметры l и λ , определяющие геометрию инструмента и его теплопроводность. В этой связи эффективно применение инструментов из синтетических сверхтвёрдых материалов (синтетических алмазов, эльбора, гексанида и др.), характеризующихся наименьшими значениями коэффициента теплопроводности λ из всех инструментальных материалов. Важным условием повышения стойкости режущего инструмента необходимо рассматривать нанесения на его рабочие поверхности износостойких покрытий, которые в меньшей степени подвержены износу в условиях повышенной температуры резания, чем материал инструмента.

Таблица 6.1

Результаты испытаний упрочненных режущих инструментов

№	Наименование инструмента	Обрабатываемый материал	Твердость обрабатываемого материала	Увеличение стойкости упрочненного инструмента к неупрочненному (количество раз)
1	Сверло 3 мм	Титановый сплав	HRC ₃ >35,5 ед.	20 раз
2	Сверло 1,6 мм	Сталь конструкционная высоколегированная	HRC ₃ 35 – 43,5 ед.	18 раз
3	Долбяк М 1,5	Сталь конструкционная высоколегированная	HRC ₃ > 30 ед.	8 раз
4	Долбяк М 1,25	Сталь конструкционная высоколегированная	HRC ₃ > 30 ед.	8 раз

Для оценки эффективности применения режущих инструментов с износостойкими покрытиями (нанесенными по технологии КИИТ – конденсация с ионной бомбардировкой низкотемпературная [45]) на ГП Харьковский машиностроительный завод "ФЭД" в лаборатории пере-

довых методов обработки металлов были проведены испытания упрочненных инструментов при резании ряда труднообрабатываемых материалов (табл. 6.1).

Приведенные в табл. 6.1 данные показывают, что упрочнение режущих инструментов износостойкими покрытиями позволяет многократно повысить их стойкость. Это создает объективные предпосылки интенсификации режимов резания и в первую очередь – увеличения скорости резания и перехода в область высокоскоростного резания. Экспериментально установлено, что упрочненный инструмент обеспечивает осуществление процесса резания труднообрабатываемых материалов в тех случаях, когда резание обычным (неупрочненным) инструментом невыполнимо.

6.2. Определение оптимальных параметров режимов резания по критерию наименьшей себестоимости обработки и научные предпосылки их реализации

Снижение себестоимости и увеличение производительности металлообработки являются важнейшими условиями создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. Большое значение при этом имеет правильный выбор оптимальных параметров режимов резания и характеристик режущих инструментов. Для расчета экономически выгодных режимов резания первоначально необходимо установить связь основного показателя обработки – стойкости режущего инструмента – с производительностью процесса резания.

В работе [13] приведена эмпирическая зависимость для определения стойкости режущего инструмента T , основанная на результатах многофакторного планирования эксперимента:

$$T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S_0^p}, \quad (6.3)$$

где t – глубина резания, м;

S_0 – продольная подача за один оборот детали, м/об.;

C_4, m_1, q, p – постоянные для определенных условий обработки ($m_1 > q > p$; $m_1 > 1$).

Произведение параметров $t \cdot S_0$ при продольном точении равно площади поперечного сечения среза S . Производительность обработки Q определяется зависимостью $Q = V \cdot t \cdot S_0$. Тогда после преобразований зависимости (6.3) получено:

$$T = \frac{C_4}{V^{m_1-p} \cdot t^{q-p} \cdot Q^p}. \quad (6.4)$$

Разрешая зависимость (6.4) относительно производительности обработки Q , имеем:

$$Q = \left(\frac{C_4 \cdot t^{q-p}}{V^{m_1-p} \cdot T} \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (6.5)$$

Как видно, стойкость режущего инструмента T влияет на производительность обработки Q значительно меньше, чем скорость резания V . Следовательно, основным условием повышения производительности обработки Q необходимо рассматривать уменьшение скорости резания V . Однако, это вызывает увеличение площади поперечного сечения среза $S = Q/V$, которая связана с толщиной a и шириной среза b отношением $S = a \cdot b$.

Поскольку толщина среза a ограничена прочностью инструмента, увеличить S можно за счет увеличения ширины среза $b = t/\sin \varphi$ (где φ – угол резца в плане), т.е. за счет увеличения глубины резания t . Исходя из этого, глубина резания t должна принимать максимально возможное значение, равное величине снимаемого припуска. Зная глубину резания, можно определить ширину среза $b = t/\sin \varphi$ и площадь поперечного сечения среза $S = a \cdot b = t \cdot a/\sin \varphi$, где толщина среза определяется из условия обеспечения прочности инструмента. Представляя зависимость (6.3) в виде:

$$T = \frac{C_4 \cdot t^{q-p}}{V^{m_1} \cdot S^p}, \quad (6.6)$$

для заданных значений T , C_4 , t , S , из зависимости (6.6) определяется скорость резания V :

$$V = \left(\frac{C_4 \cdot t^{q-p}}{T \cdot S^p} \right)^{\frac{1}{m_1}}. \quad (6.7)$$

После подстановки зависимости (6.7) в (6.5), определяется максимально возможная производительность обработки Q :

$$Q = \left(\frac{C_4 \cdot t^{q-p}}{T} \right)^{\frac{1}{m_1}} \cdot S^{1-\frac{p}{m_1}}. \quad (6.8)$$

С учетом известного выражения $S = t \cdot a / \sin \varphi$ получено:

$$Q = \left(\frac{C_4}{T} \right)^{\frac{1}{m_1}} \cdot t^{1-\frac{q}{m_1}} \cdot \left(\frac{a}{\sin \varphi} \right)^{1-\frac{p}{m_1}}. \quad (6.9)$$

Как видно, производительность обработки Q тем больше, чем больше параметры t , a и меньше T , φ . Учитывая, что $T \approx 1/Q$, эффективно обработку осуществлять с максимально возможной температурой резания θ . Продольную подачу S_0 необходимо выбирать из условия $S_0 = S/t$.

Важным показателем процесса резания является объем снятого материала $\mathcal{G} = Q \cdot T$ за период стойкости инструмента T . С учетом зависимости (6.9), имеем:

$$\mathcal{G} = C_4^{\frac{1}{m_1}} \cdot T^{1-\frac{1}{m_1}} \cdot t^{1-\frac{q}{m_1}} \cdot \left(\frac{a}{\sin \varphi} \right)^{1-\frac{p}{m_1}}. \quad (6.10)$$

Как видно, увеличить объем снятого материала $\mathcal{G}$ можно увеличением стойкости режущего инструмента T , что соответствует увеличению скорости резания V , исходя из зависимости (6.7), и уменьшению производительности обработки Q , исходя из зависимости (6.9).

Учитывая противоположное влияние стойкости режущего инструмента T на $\mathcal{G}$ и Q , важно провести анализ себестоимости обработки C , включающей 2 переменные статьи расходов, связанные с заработной платой рабочего и стоимостью инструментов, необходимых для обработки N деталей (суммарного съема материала объемом $\mathcal{G}$).

Количество инструментов, необходимых для суммарного съема материала объемом $\mathcal{Q}$, равно:

$$n = \frac{\mathcal{Q}}{\mathcal{Q}_0}, \quad (6.11)$$

где $\mathcal{Q}_0$ – объем материала, снимаемого одним инструментом за период его стойкости, м^3 .

Тогда, согласно работе [146], получено:

$$C = n \cdot T \cdot \mathcal{Z}_{\text{час}} \cdot k + n \cdot \mathcal{C}, \quad (6.12)$$

где $\mathcal{Z}_{\text{час}}$ – часовая тарифная ставка рабочего, час;

k – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на заработную плату рабочего;

$\mathcal{C}$ – цена инструмента, грн.

После преобразований зависимость (6.12) принимает вид:

$$C = \frac{\mathcal{Q}_0 \cdot T^{m_1} \cdot \mathcal{Z}_{\text{час}} \cdot k}{C_4^{m_1} \cdot t^{1-\frac{q}{m_1}} \cdot \left(\frac{a}{\sin \varphi}\right)^{1-\frac{p}{m_1}}} + \frac{\mathcal{Q}_0 \cdot \mathcal{C}}{C_4^{m_1} \cdot T^{1-\frac{1}{m_1}} \cdot t^{1-\frac{q}{m_1}} \cdot \left(\frac{a}{\sin \varphi}\right)^{1-\frac{p}{m_1}}}. \quad (6.13)$$

Как видно, стойкость режущего инструмента T неоднозначно влияет на себестоимость обработки C . Существует экстремальное значение T , при котором себестоимость обработки C принимает минимальное значение. Для определения экстремального значения T необходимо взять производную от функции C по величине T и полученное выражение принять равным нулю, т.е. подчинить функцию C необходимому условию экстремума (минимума), рис. 6.1:

$$T_{\text{экстр}} = \frac{\mathcal{C} \cdot (m_1 - 1)}{\mathcal{Z}_{\text{час}} \cdot k}. \quad (6.14)$$

Как видно, экстремальное значение стойкости режущего инструмента $T_{\text{экстр}}$ не зависит от режимов резания, а определяется экономи-

ческими параметрами ζ , $Z_{\text{час}}$, k и показателем m , обусловленным физико-механическими свойствами инструментального и обрабатываемого материалов. Минимальное значение себестоимости обработки C определяется путем подстановки в зависимость (6.13) выражения (6.14). Поскольку экстремальное значение стойкости режущего инструмента $T_{\text{экстр}}$ не зависит от режимов резания, то характер влияния параметров t , a , φ на минимальное значение себестоимости обработки C определяется зависимостью (6.13).

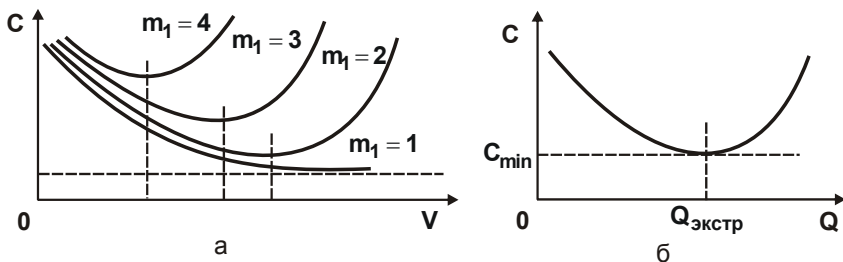


Рис. 6.1. Общий вид зависимости себестоимости обработки C от скорости резания V (а) и производительности обработки Q (б)

Уменьшить минимальное значение себестоимости обработки $C_{\min}$ можно увеличением глубины резания t и толщины среза a . Это достигается применением современных сборных высокопроизводительных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями в условиях высокоскоростного резания, например одной из крупнейших металлообрабатывающей компании мира TaeguTес (Южная Корея), филиалом которой в Украине является фирма ТаегуТек Украина (г. Днепр).

Для реализации высокоскоростного резания могут быть рекомендованы металлорежущие станки с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" производства компании Doosan (Южная Корея). Станки предназначены для высокоскоростной обработки деталей из разных материалов со сложными пространственными формами. Эксклюзивным дистрибьютором компании Doosan в Украине является ООО "ВариТек" (г. Днепр).

Компании TaeguTес и Doosan также тесно сотрудничают с Техническим Центром «ВариУс» (г. Днепр), который, работая на промышленном рынке Украины, является наибольшей компанией, специализирующейся на обеспечении предприятий оборудованием, инструментами, за-

пасными частями и т.д. Технический Центр «ВариУс» предоставляет 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 авторов настоящей монографии. Поэтому ниже рассмотрены технологические возможности предложенных металлорежущих станков и инструментов и разработанные на их основе высокоэффективные экологически безопасные технологии высокоскоростной механической обработки различных деталей.

Следует отметить, что зона резания на предлагаемых станках в процессе работы полностью изолирована, станки закрыты защитными кожухами. Все защитные системы станков спроектированы так, чтобы при нормальных условиях работы предотвратить возможные риски (контакт рабочего с применяемыми маслом и СОЖ, вдыхание паров СОЖ и пыли, вызванных особенностями обрабатываемых материалов и т.д.).

Установлено, что уровень ионизирующего излучения в точках рабочей зоны станка меньше предельного уровня. Следовательно, станок не является источником опасного уровня ионизирующих излучений. Установлено также, что уровень шума при нормальных рабочих условиях не превышает 80дБ, что не представляет опасности для пользователей станка. Все это позволяет обезопасить рабочего во время работы на станке и улучшает экологию производства, а применяемые технологии механической обработки на станке следует рассматривать экологически чистыми и безопасными технологиями.

6.3. Пятиосевой порталный обрабатывающий центр DOOSAN BM 2740U – лучшее решение для высокоскоростной обработки крупногабаритных авиационных деталей

Как показано выше, высокоскоростная механическая обработка является одним из приоритетных направлений современной технологии изготовления деталей летательных аппаратов. Внедрение такой обработки в авиационную промышленность позволяет существенно повысить

производительность труда при одновременном повышении точности обработки и качества изготовления самолетных деталей [38]. В авиационных конструкциях находят широкое применение высокопрочные алюминиевые, магниевые и титановые сплавы. При изготовлении деталей и узлов самолетов до 25 – 35 % от общей трудоемкости изготовления изделий составляют операции механической обработки на металлорежущих станках (рис. 6.2). Использование в конструкциях агрегатов самолета крупногабаритных монолитных деталей сложных форм из труднообрабатываемых материалов вызывает увеличение объема работ по механической обработке.



Рис. 6.2. Детали и узлы самолета, которые подвергаются механической обработке

Компания Doosan (Южная Корея), ориентируясь на заказчика, постоянно разрабатывает и внедряет передовые технологии металлообработки в машиностроении, создавая оборудование отличного качества. Ежегодно компания инвестирует в свое развитие, вследствие чего появляются новые модели оборудования и решения, успешно применяющиеся на предприятиях авиационной и космической промышленности для обработки резанием сложных деталей.

Пятиосевой порталный обрабатывающий центр Doosan BM 2740U (рис. 6.3) специально спроектирован для обработки авиационных деталей сложной формы за один установ, что позволяет улучшить качество получаемых изделий, а также снизить себестоимость их изготовления по

сравнению с традиционной обработкой на нескольких станках. Обрабатывающий центр Doosan BM 2740U уже в базовом исполнении оснащен целым набором дополнительных опций, позволяющих выполнять высокоскоростную прецизионную обработку целого ряда традиционных для аэрокосмической отрасли деталей. Точность позиционирования по трем линейным осям сохраняется постоянной при самом нагруженном режиме работы благодаря системе термокомпенсации. Кроме того, все линейные оси в стандарте оснащены прецизионными роликовыми направляющими и оптическими линейками.



Рис. 6.3. Обрабатывающий центр Doosan BM 2740U

Портальная конструкция станка с двумя симметрично расположенными фиксированными колоннами повышенной жесткости обеспечивает стабильные условия обработки без вибрации за счет сбалансированного распределения веса, а также эффективного рассеивания тепла, выделяемого в процессе обработки.

Универсальная высокоскоростная поворотная головка с прямым приводом позволяет выполнять непрерывную обработку деталей больших габаритов в течение длительного времени. Одновременная 5-ти осевая обработка позволяет значительно сократить время, необходимое для обработки деталей со сложным профилем.

Конус шпинделя станка (HSKA63) оснащается Dual contact system – системой, которая фиксирует инструмент по двум поверхностям. Контакт осуществляется не только по боковой поверхности, но и по торцу оправки, придавая системе фиксации инструмента дополнительную жесткость и обеспечивая высокую точность обработки на скоростях до 18 000

об./мин и выше. Эта система помогает свести к минимуму вибрации, шум и потери мощности, обычно характерные для высокоскоростной обработки. Dual contact system входит в комплект стандартной поставки.

Интересна также опробованная временем функция Heat displacement Control – Doosan Heat Control Device.

Для обеспечения точности обрабатываемых деталей в условиях массового производства (непрерывный график работы оборудования, коэффициент использования оборудования 0,9 – 0,95, повышенные режимы резания, частые переходы от черновой обработки к чистовой и обратно) станки оснащаются системами обратной связи с датчиками линейных перемещений (абсолютными измерительными линейками) HEIDENHAIN (Германия).

С этой целью, для контроля тепловых деформаций и смещений оси Z Doosan использует свою разработку – Heat Control Device. Информация о температурных колебаниях в режиме реального времени с датчиков, расположенных на шпинделе и станине, поступает в операционную программу. При этом изменение кинематических и термических характеристик, а также влияние нагрузки на точность в процессе обработки определяются линейными датчиками и учитываются системой управления, что позволяет достигать высочайшей точности позиционирования станка – до ± 3 мкм. Обрабатывающий центр Doosan BM 2740U управляется системой ЧПУ Heidenhain iTNC 530. Данная стойка отличается оптимизированной системой управления перемещением по траектории, коротким временем обработки кадра и специальными стратегиями обработки штампованных деталей. Цифровая архитектура и встроенное цифровое управление приводами с интегрированным преобразователем обеспечивают высокую скорость обработки при высочайшей точности контура, что особенно необходимо при обработке 2D контуров или 3D форм. Динамический контроль столкновений (опция DCM) системы iTNC 530 постоянно контролирует рабочую зону станка на предмет возможных столкновений рабочих органов станка с зажимными приспособлениями. Адаптивное управление подачей (опция AFC) автоматически регулирует контурную подачу в зависимости от мощности шпинделя и других параметров. Такой набор опций и возможностей станка позволяют оптимизировать время обработки, контролировать инструмент и щадить механику станка. С учетом всех вышеперечисленных особенностей, обрабатывающий центр Doosan BM 2740U позволяет поднять обработку авиационных деталей на качественно новый уровень.

6.4. Эффективность практического применения многофункциональных токарно-фрезерных обрабатывающих центров DOOSAN нового поколения серии PUMA SMX

Серия PUMA SMX – многофункциональные токарно-фрезерные обрабатывающие центры DOOSAN нового поколения. Все чаще руководителей машиностроительных предприятий Украины в целях повышения качества выпускаемой продукции и ее конкурентоспособности привлекают достоинства многофункционального современного металлорежущего оборудования [33; 43]. Такой тип оборудования интересен, прежде всего, объединением возможностей нескольких машин в одном станке, что позволяет экономить производственные площади, рабочее время и использовать самые современные технологические возможности. Производительность, точность и надежность являются основными критериями, которыми, по мнению потребителей, должно обладать оборудование. В то же время, возрастающая необходимость в производстве все более сложных деталей с минимальными затратами, требует применения оборудования с максимальной функциональной гибкостью.



Рис. 6.4. Многофункциональный токарно-фрезерный обрабатывающий центр PUMA SMX 2600S

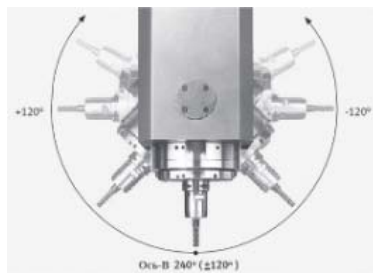


Рис. 6.5. Диапазон вращения оси B

Токарно-фрезерные обрабатывающие центры серии PUMA SMX (рис. 6.4) компании "DOOSAN Infracore Machine Tools" – это новое поколение многофункциональных обрабатывающих станков, отличающихся высокой производительностью, исключительной точностью и простотой в эксплуатации, которые предоставляют возможность использования

лучших решений в классе многофункционального оборудования. Токарно-фрезерные центры серии SMX являются мировым лидером в своем классе и обеспечивают отличные показатели высокоточной обработки за счет применения системы минимизации термической деформации, основанной на функциях температурной компенсации в процессе высокоскоростного резания. Эргономичный дизайн станка повышает комфорт оператора, обеспечивая удобство загрузки–выгрузки деталей, контроля процесса обработки и дальнейшего обслуживания, а в целом эффективную эксплуатацию всех технологических возможностей.

Краткие характеристики станков серии PUMA SMX:

- высочайшая жесткость ортогональной конструкции;
- увеличенное перемещение по оси Y, равное 300 ± 150 мм, что определяет ширину обрабатываемых поверхностей методом фрезерования – этот параметр лучший в классе аналогичных станков среди всех мировых производителей;
- эргономичный дизайн и компактные размеры;
- высокая точность и производительность за счет применения всех известных технологических разработок;
- применение систем автоматизированного измерения и функций компенсации;
- два высокомоощных токарных шпинделя, оснащенных двигателями типа "Built-in" (главный шпиндель и контр-шпиндель);
- автоматический магазин инструмента для фрезерного шпинделя на 40 позиций (в стандартной комплектации) с возможностью увеличения до 80 позиций;
- двигатель фрезерного шпинделя типа "Built-in" (встроенный в поворотную фрезерную головку) с увеличенной до 12 000 об./мин максимальной скоростью позволяет выполнять фрезерные операции любой сложности, что обеспечивается поворотом фрезерной головки на 240° ($\pm 120^{\circ}$) (рис. 6.5).

Высокая производительность. Снижение машинного времени обработки детали по-прежнему является важным критерием, влияющим на общую экономическую эффективность машиностроительного предприятия. Высочайшая производительность станков серии PUMA SMX достигается за счет сокращения общего времени обработки и количества операций путем комплексной механической обработки даже самых сложных детали за один установ. Одновременно сокращается время цикла и межоперационное время, чему способствуют непревзой-

денные показатели ускоренных перемещений до 48 м/мин. Кроме возможности комплексной обработки точением, фрезерованием, цикл производства детали сокращается за счет выполнения дополнительных операций с использованием вспомогательного шпинделя.

Превосходная точность. Высокую точность и скорость обработки на станках серии PUMA SMX обеспечивает использование высокопрочных и высокоточных направляющих типа LM. Кроме того, во время длительного процесса обработки точность сохраняется за счет минимизации термических деформаций шпинделя и осей подачи с помощью современной системы масляного охлаждения (рис. 6.6), обеспечивая постоянную степень точности вращающихся осей в пределах $0,0001^\circ$, что позволяет уйти от доводочных операций и уменьшить процент брака.

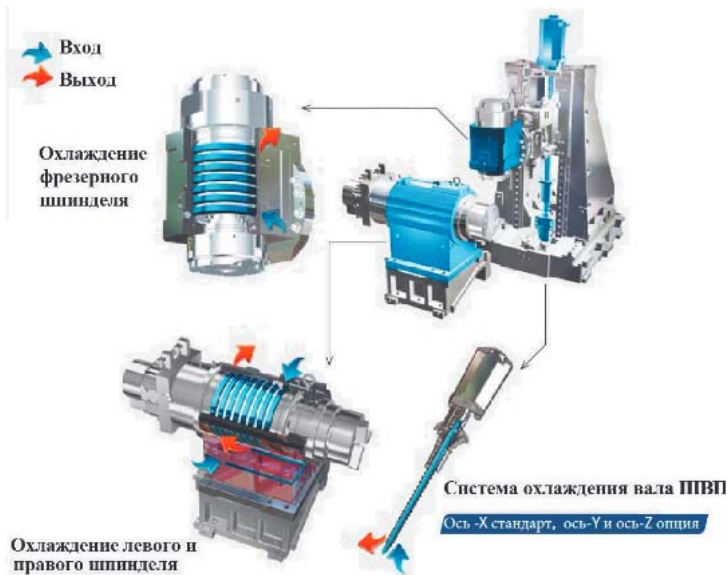


Рис. 6.6. Система масляного охлаждения

Для обеспечения прецизионной точности обрабатываемых деталей в условиях массового производства (непрерывный график работы оборудования, коэффициент использования оборудования – 0,90 – 0,95; повышенные режимы резания; частые переходы от черновой обработки к чистовой и т.п.) все модели станков серии PUMA SMX оснащают системами обратной связи с датчиками линейных перемещений (измерительными линейками) производства компании "HEIDENHAIN" (Германия). При этом кинематические и термические изменения, а также влия-

ние нагрузки в процессе обработки, определяются и учитываются в контуре управления, что позволяет достигать высочайшей точности позиционирования станка – до 3 мкм в любой момент эксплуатации.

Пятиосевая обработка. Для эффективной обработки сложных деталей станки серии PUMA SMX укомплектовывают системой ЧПУ FANUC 31i-B5, позволяющей выполнять непрерывную обработку одновременно по пяти осям. Данная система включает в себя следующие функции: TCP – функция контроля центральной точки инструмента (рис. 6.7) и 3D Cutter Compensation – трехмерная (упреждающая) компенсация режущего инструмента (рис. 6.8).

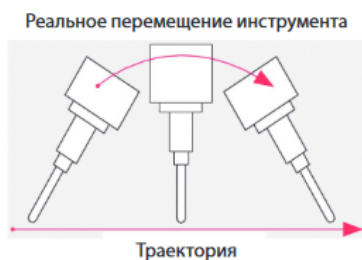


Рис. 6.7. Функция TCP

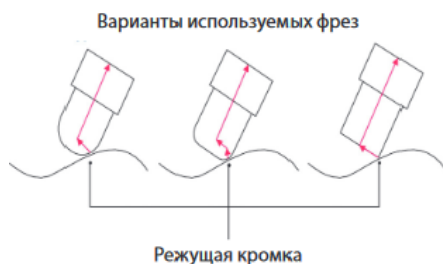


Рис. 6.8. Функция 3D Cutter Compensation

Благодаря данным функциям обработка сложнопрофильных поверхностей становится более простой и точной, например, при обработке деталей типа импеллер (механизм для создания реактивной тяги – пропеллер, крыльчатка, турбина) и лопатка. Отличительной особенностью станков серии PUMA SMX является их ортогональная конструкция, которая позволяет максимизировать перемещение по оси Y до 300 мм, увеличивая зону обработки и габариты обрабатываемых деталей. Также одним из основных преимуществ конструкции моделей станков данной серии является стандартное оснащение их прямым приводом (тип "Built-in"), встроенным непосредственно в узлы токарного и фрезерного шпинделей. Отсутствие передаточной трансмиссии позволяет не только повысить КПД и исключить вибрации шпинделя, но также обеспечивает более длительный срок эксплуатации в условиях непрерывного графика эксплуатации.

Для специфических задач, например, при обработке сложнопрофильных поверхностей деталей типа "вал" малых диаметров с максимальной длиной (до 1 500 мм), модели станков серии PUMA SMX осна-

щают программируемым гидравлическим люнетом с независимым серводвигателем. Начиная с 2015 года, производится выпуск удлиненной версии станка PUMA SMX с максимальной длиной обработки 2 500 мм.

Токарно-фрезерные обрабатывающие центры компании DOOSAN достойно зарекомендовали себя во всем мире, выпуская самые сложные детали для авиационной и оборонной промышленности Германии, Франции, Италии, России и США, а также для предприятий целого ряда стран Азии. Оборудование компании DOOSAN серии PUMA является эталоном в производстве токарных станков уже на протяжении 40 лет.

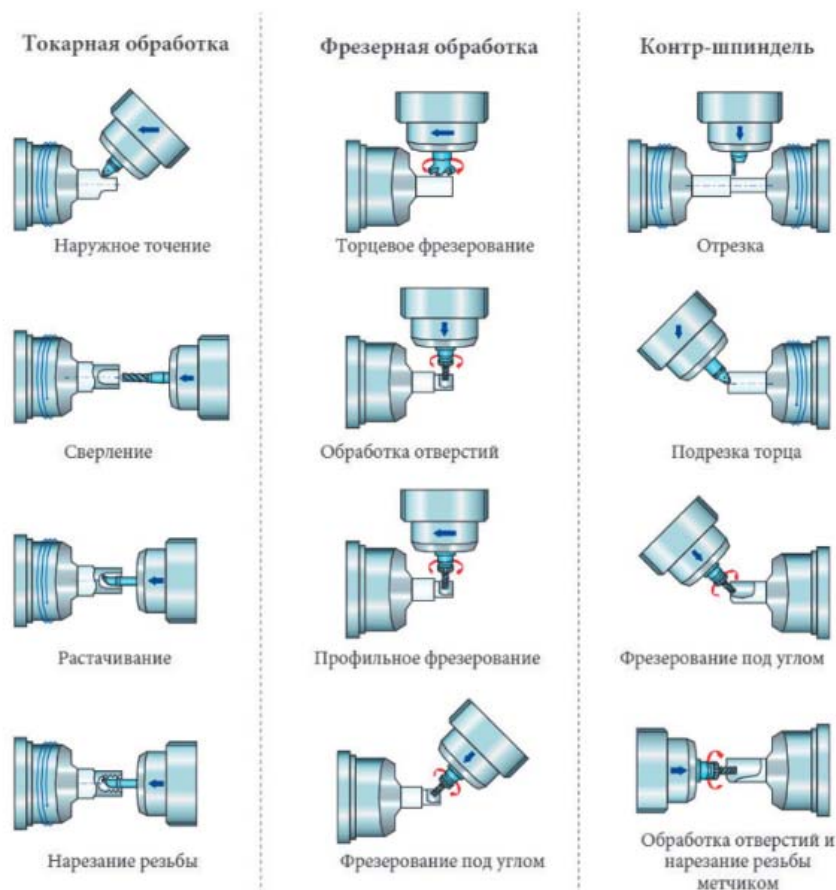


Рис. 6.9. Варианты обработки деталей на станке модели PUMA SMX 2600S

Варианты обработки деталей на станке модели PUMA SMX 2600S приведены на рис. 6.9. Только для требовательных европейских клиентов было поставлено более 25 тысяч токарных станков этой серии, среди которых более 500 многофункциональных токарно-фрезерных обрабатывающих центров. Применение станков серии PUMA SMX считается не только эффективным, но и престижным во всем мире, позволяя поднять производительность и технологические возможности предприятия на новый, более высокий уровень.

Большой гордостью для украинского представительства компании DOOSAN в Украине является то, что для обработки наиболее сложных и ответственных деталей в условиях современного производства предприятия ПАО "Мотор Сич", начиная с 2012 года, успешно эксплуатируются три станка предыдущей версии токарно-фрезерных обрабатывающих центров – PUMA MX 2600. Благодаря постоянным новым разработкам и усовершенствованиям компания DOOSAN продолжает путь к мировому лидерству в отрасли станкостроения, помогая своим клиентам улучшать качество выпускаемой продукции и расширять возможности производства.

Для обеспечения высокого уровня обслуживания, компания создала сеть официальных сертифицированных Сервисных Центров по всему миру, контролируя уровень удовлетворенности клиентов оборудованием DOOSAN. С этой целью, на базе украинского представительства – ООО "ВариТек" в городе Днепр создан один из лучших европейских Центров по гарантийному и сервисному обслуживанию, уровень подготовки и опыт специалистов которого позволяет решать сервисные задачи практически любого уровня.

Несмотря на то, что в Украине активно эксплуатируется уже более 200 обрабатывающих центров DOOSAN и их число постоянно растет, в 80 % случаев сервисная задача решается в течение первых суток после получения сигнала за счет достаточного штата собственных специалистов Центра и наличия оперативного запаса запасных частей в Украине и в Германии.

Выставочный Центр станков DOOSAN в г. Днепр позволяет постоянным клиентам ООО "ВариТек" всегда находиться в курсе последних новинок оборудования, а обучающий класс на постоянной основе занимается подготовкой или переподготовкой операторов и программистов-технологов клиентов, которые эксплуатируют оборудование с ЧПУ компании DOOSAN в Украине.

6.5. Эффективное применение сборных твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями в условиях высокоскоростной обработки

Многие авиа- и энергостроительные предприятия испытывают все возрастающее давление рынка, связанное с глобальным масштабом конкуренции и повышением себестоимости обработки более качественных, но труднообрабатываемых материалов. Возрастает спрос на новые инструментальные решения по эффективной обработке изделий, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, без больших дополнительных инвестиций. Решением являются инновационные режущие инструменты, которые не только превосходят по техническим характеристикам применявшиеся ранее, но и снижают затраты на производство продукции [44]. Так, одна из крупнейших металлообрабатывающих компаний мира TaeguTec (Южная Корея), отвечает на этот вызов рынка расширением серии инструмента ChaseMold и новыми геометриями пластин, соответствующими потребностям клиентов в аэрокосмической и энергетической отраслях на операциях обработки деталей, изготавливаемых из вязких и труднообрабатываемых материалов (рис. 6.10).



Рис. 6.10. Новые конструкции режущих пластин

Одна из новинок металлорежущего инструмента ChaseMold – стружколомающая геометрия MM серии пластин RYM(H)X – позволяет значительно снизить процент бракованных изделий при производстве дорогостоящей продукции авиационной промышленности. Благодаря таким особенностям, как усиленная режущая кромка и увеличенный передний угол (рис. 6.11), стружколом MM обеспечивает ощутимое снижение силы резания и предотвращает скол пластин на ответственных операциях механической обработки деталей. Выбор пластин с геометрией

ММ – это стабильная обработка и мягкое резание труднообрабатываемых и вязких материалов, таких как нержавеющие стали и сплавы на основе титана, широко используемые в аэрокосмической и энергетической отраслях, а также при производстве пресс-форм и штампов. Геометрии пластин MLL и L (рис. 6.12) оптимальны для обработки жаропрочных суперсплавов (HRSA), таких как сплавы на основе титана, кобальта и никеля. Пластины с этой геометрией режущей кромки отличаются более позитивным передним углом, способствующим повышению эффективности процесса резания и снижению усилий резания, а уникальный дизайн насечек не допускает налипания вязких материалов на переднюю поверхность пластины.



Рис. 6.11. Стружколом ММ



Рис. 6.12. Геометрия пластин MLL и L

Пластины ChaseMold со стружколомом L весьма эффективны для механической обработки деталей из жаропрочных сплавов, например, инконеля и титаносодержащих материалов, а вот стружколомающая геометрия ML – бесспорный лидер на операциях изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов при высоких режимах резания, т.е. в условиях высокоскоростной обработки. Серия испытаний вышеописанных разработок TaeguTec с аналогичными продуктами мировых производителей инструмента подтвердила их превосходство. Новые пластины серии ChaseMold превосходят ближайших конкурентов при обработке инконеля и титановых сплавов.

В 2015 году в производственных условиях ведущего украинского предприятия аэрокосмической отрасли была успешно испытана серия ChaseMold, показав положительные результаты (табл. 6.2) при обработке шасси, изготовленного из титана BT22 (рис. 6.13): достигнуто увеличение стойкости инструмента при высоком качестве обработки.

Эффект обработки гарантировал новый сплав ТТ3540 (рис. 6.14). Этот уникальный инструментальный материал был специально разработан специалистами TaeguTec для аэрокосмической отрасли с целью

эффективного фрезерования труднообрабатываемых материалов, таких как жаропрочные, нержавеющие и титановые сплавы. Новые инструменты в ряду ChaseMold превосходно зарекомендовали себя при обработке титановых сплавов в США, также широко используемых там для аэрокосмической отрасли.

Таблица 6.2

**Результаты испытаний инструмента ChaseMold
при обработке титана BT22**

	Серия ChaseMold
Деталь	Кронштейн
Обрабатываемый материал	Титан BT22
Станок	5-ти осевой обрабатывающий центр
Корпус фрезы	Модульная головка $\varnothing 32R6$ TERY 332-M16-12
Пластина	RYMX 1205-ML TT3540
Скорость, м/мин	35
Обороты, об./мин	350
Подача, мм/мин	150
Глубина резания, мм	2
Ширина резания, мм	1 – 32
Стойкость 1 кромки, мин	307 мин



Рис. 6.13. Шасси, изготовленное из титана BT22

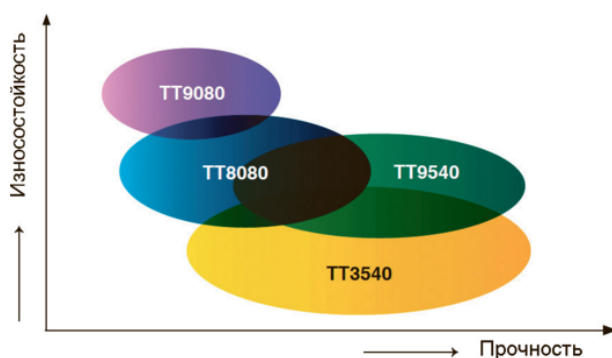


Рис. 6.14. Показатели износостойкости и прочности новых инструментальных материалов

Режущие пластины имеют PVD покрытие и являются самым современным решением в ряду фрезерных сплавов. Еще одна полезная новинка от инженеров компании TaeguTec – два новых типа пластин RYMX универсальной серии инструмента ChaseMold (рис. 6.15).



Рис. 6.15. Новые типы пластин RYMX

Ранее потребителям инструмента компании TaeguTec уже предоставлялась возможность использовать 8 режущих кромок на пластинах типа RYMX, но при этом глубина резания должна была находиться в пределах заданного значения. Как только глубина резания превышала рекомендованную, эта возможность просто сокращалась вдвое – рабочими оказывались только 4 режущие кромки.

Для повышения эффективности обработки разработаны и освоены производством пластины типа RYMX 12 с 6-ю режущими кромками для

обработки с глубиной резания до 2,5 мм (рис. 6.16) и RYMX 16 с 7-ю кромками для обработки с глубиной резания до 3,5 мм (рис. 6.17).



Рис. 6.16. Пластины типа RYMX 12

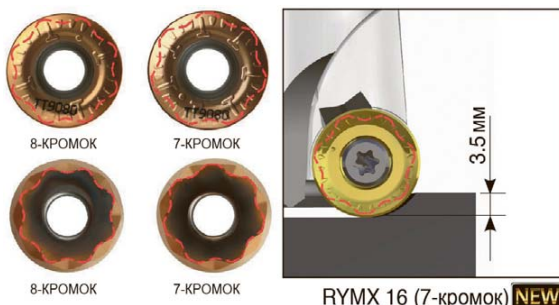


Рис. 6.17. Пластины типа RYMX 16

Более того, новые пластины снижают расходы на режущий инструмент, поскольку устанавливаются на стандартные корпуса фрез серии ChaseMold – торцовые и концевые фрезы, а также модульные головки.

6.6. Высокоскоростное точение режущими инструментами из керамики с износостойкими покрытиями

6.6.1. Направления эффективного применения современных металлорежущих инструментов

Применение современных сборных металлорежущих инструментов и станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" открыли новые технологические возможности механической обработки деталей машин, эффек-

тивного применения высокоскоростного резания, обеспечивающего повышение производительности и качества [40; 45; 109; 113]. Практикой установлено, что современные режущие пластины из керамики в условиях правильной эксплуатации являются эффективным средством для достижения высокой производительности по сравнению с твердосплавными пластинами [34].

Керамические сплавы характеризуются высокой твердостью и значительной сопротивляемостью к окислению по сравнению с другими инструментальными материалами, а также высокой стойкостью к образованию трещин и ударной прочностью при температуре выше 1 000°. Однако, они достаточно ломки при комнатной температуре. Механические и температурные свойства различных инструментальных материалов показаны в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Механические и температурные свойства материалов

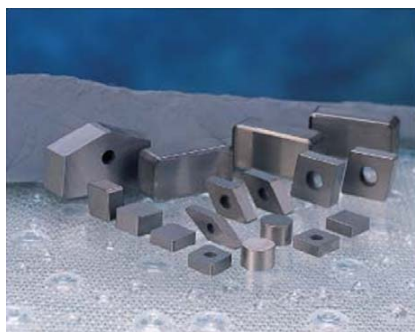
	Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄	PCBN	PCD	PCD Hardmetal
Плотность, г/см ³	4,0	3,2	3,4	3,5	14,9
Твердость, HV	1,900	1,700	3,700	7,000	1,400
Ударная вязкость, МПа/м ²	3	6	5	5	12
Теплопроводность, Вт·м/К	30	40	100	120	100
Температура окисления, °C	> 2,000	1,300	1,200	650	500

Алюмооксидная керамика (Al₂O₃) характеризуется значительной сопротивляемостью к окислению и высокой устойчивостью в условиях высокоскоростного непрерывного точения материалов на основе железа. Нитрид кремния (Si₃N₄) имеет высокую устойчивость к образованию трещин и значительную сопротивляемость к окислению. Это обеспечивает повышение эффективности черновой обработки материалов на основе железа.

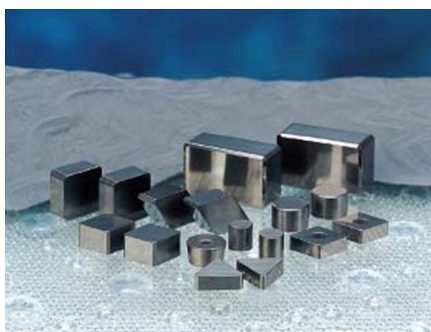
Практикой установлено, что режущие керамические пластины следует применять для обработки материалов после их закалки. Например, в условиях непрерывного точения чугуна и предварительной термообработки материалов рекомендуется использовать режущие керамические пластины на основе оксида алюминия. Режущие пластины на основе нитрида кремния показывают лучшие результаты в условиях черно-

вой обработки чугуна и высокоскоростной обработки жаропрочных материалов на основе никеля.

Режущие керамические пластины на основе оксида алюминия эффективно применять для высокоскоростной обработки закаленной стали благодаря значительной сопротивляемости к окислению и температурной стабильности. Компания TaeguTec (Южная Корея) разработала несколько видов таких керамических сплавов. Так, режущие пластины из керамического сплава AB30 (рис. 6.18а) применяют для точения углеродистых и низколегированных сталей, а режущие пластины из керамического сплава AB20 (рис. 6.18б) – для высоколегированных материалов и сталей с высокой твердостью.



а



б

Рис. 6.18. Режущие пластины из керамического сплава AB30 (а) и AB20 (б)

Режущие пластины из керамического сплава TB650 (CBN) рекомендуется использовать для обработки только закаленных сталей. На диаграмме (рис. 6.19) схематически показана область применения рассмотренных режущих пластин из керамических сплавов в зависимости от обрабатываемого материала и его твердости. Например, благодаря высокой твердости и стойкости к окислению сплав AB20 эффективнее применять для механообработки сверхтвердых материалов типа CrMoNi и инструментальных сталей.

Установлено, что наиболее эффективным решением проблемы высокоскоростной обработки чугуна является применение режущих керамических пластин благодаря их высокой твердости и средней вязкости. Режущие пластины из керамического сплава с чистого оксида алю-

миния AW20 (рис. 6.20а) эффективнее применять в условиях высокоскоростной обработки чугунных деталей типа цилиндр.

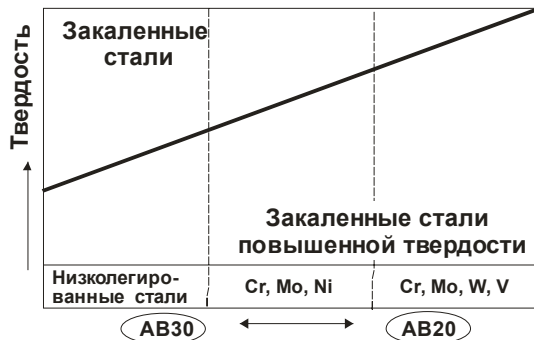


Рис. 6.19. Области применения режущих пластин из керамических сплавов в зависимости от обрабатываемого материала и его твердости

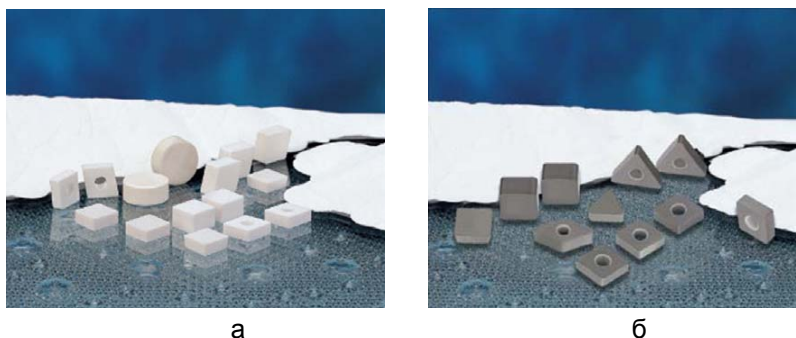


Рис. 6.20. Режущие пластины из керамического сплава из чистого оксида алюминия AW20 (а) и на основе нитрида кремния (AS500 и AS10) (б)

Характеризуясь значительной устойчивостью к окислению и температурной стабильности, керамический сплав из чистого оксида алюминия AW20 значительно превосходит по физико-механическим свойствам аналогичные сплавы, которые конкурируют с ним. Керамический сплав на основе нитрида кремния (AS500 и AS10 (рис. 6.20б)) имеет чрезвычайно высокую сопротивляемость к выкрашиванию и умеренную жесткость. Поэтому режущие пластины из данных керамических сплавов рекомендуют использовать для черновых операций токарной обработки

деталей из чугуна. Например, для обработки таких деталей, как чугунный автомобильный диск, а также для фрезерования блока цилиндров.

Высокопроизводительную обработку жаропрочных сталей, а также материалов на основе никеля лучше всего осуществлять керамическими пластинами. Данный тип материалов является труднообрабатываемым, его традиционно применяют в аэрокосмической отрасли. Поэтому режущие пластины из керамики на основе нитрида кремния (AS20) рекомендуется использовать для высокоскоростной обработки точением и фрезерованием сплава Инконель 718, который обладает высокой устойчивостью к выкрашиванию и умеренной температурной стабильностью.

В чем же заключаются преимущества от использования режущих пластин из керамических сплавов, разработанных компанией TaeguTec?

Главное преимущество режущих пластин из керамических сплавов заключается в том, что они обеспечивают чрезвычайно высокую производительность и значительно сокращают расходы на инструмент по сравнению с твердосплавными пластинами.

Как отмечалось выше, по физико-механическим свойствам керамические сплавы значительно превосходят твердые сплавы в случае правильного их применения. Физические характеристики режущих пластин из керамических сплавов, изготавливаемых компанией TaeguTec, представлены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Физические свойства керамических металлорежущих сплавов, изготавливаемых компанией TaeguTec

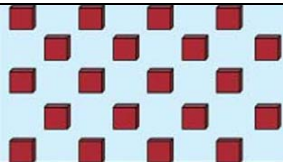
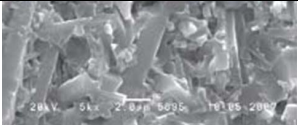
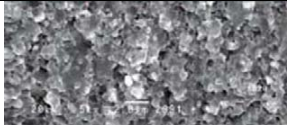
Сплав	AW20	AB20	AB30	AS500	AS10
Состав	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ -TiC	SiAlON	Si ₃ N ₄
Плотность	4,1	4,3	4,2	3,2	3,2
Твердость HRA (GPa)	93,8 (1,8)	94,5 (2,1)	94,5 (2,1)	93,9 (1,8)	93,7 (1,6)
Кс (МПа/м ^{1/2})	3,0	3,2	3,5	5,5	6,0

Как видно, керамические сплавы на основе нитрида кремния (AS10 и AS500) имеют высокую устойчивость к выкрашиванию по отношению к материалам на основе оксида алюминия, которые показывают более высокую твердость. Сравнение сплавов на основе нитрида кремния и

оксида алюминия можно выполнить на основе табл. 6.5. Исходя из продолговатой микроструктуры, можно сделать вывод, что нитрид кремния более вязкий, чем оксид алюминия. В то же время оксид алюминия является более твердым материалом из-за жесткой мелкозернистой структуры. Поэтому рекомендуется сплав AS10 (или AS500) использовать для черновой обработки чугунов, а сплавы AW20, AB20 и AB30 – для непрерывного точения на высоких скоростях.

Таблица 6.5

**Состав керамических пластин на основе оксида алюминия
и нитрида кремния**

Сплав		AS500 (нитрид кремния)	AB20 (оксид алюминия)
Состав	Основа	Si_3N_4	Al_2O_3
	Добавки	Al_2O_3 или окисел	Ti, Ti и др.
Стойкость к выкрашиванию		5 – 7	3 – 4
Твердость HV		1 600 – 1 900	1 800 – 2 100
Схематичная диаграмма и микроструктура			
			

Опыт эффективного использования режущих керамических пластин. Первоначально следует рассмотреть высокоскоростное точения цилиндров. Экспериментально установлено, что наиболее эффективно обработку цилиндров осуществлять с применением режущих керамических пластин на основе сплава AW20 (AW1030), которые характеризуются высокой устойчивостью по отношению к пластинам и которые изготовлены из других сплавов и обеспечивают высокое качество обработанных поверхностей. Это следует, например, из рис. 6.21. Так, стойкость режущих керамических пластин на основе сплава AW1030

вдвое превышает стойкость пластины-конкурента (A1). Режущая пластина из керамического сплава AW1030 состоит из чистых оксидов с PVD TiAl покрытием и специально подготовленной кромкой, за счет чего достигается высокая устойчивость пластины.

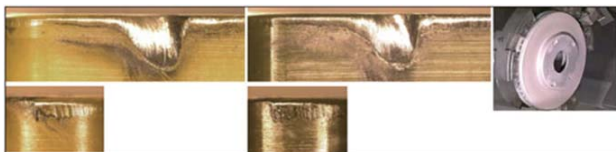


Рис. 6.21. Образец износа керамических пластин на основе SiAlON после обработки 150 деталей из сплава AS500 (а); после обработки 100 деталей из сплава В1 (конкурент)

Условия обработки: диск 15"; $V = 600$ м/мин; $f = 0,65$ мм/об.; $ap = 2 - 3$ мм, без охлаждающей жидкости. Пластина SNGX 150716 T7-CH.

Рассмотрим условия повышения эффективности процесса точения диска. В процессе высокоскоростного точения чугуновых дисков целесообразно использовать режущие пластины из керамического сплава AS500. Этот сплав имеет высокую твердость и высокую устойчивость к выкрашиванию благодаря специальному дизайну и новой технологии изготовления. Надежность этого сплава подтверждена большим количеством производственных испытаний во всем мире.

На рис. 6.21 показаны керамические пластины после точения дисков.

Установлено, что режущие пластины из керамического сплава AS500 имеют устойчивость на 30 % выше, чем ближайшие по качеству пластины-конкуренты с подобным составом сплава. Благодаря сочетанию двойной альфа / бета-фазы сплава SiAlON и кристаллической связи достигается высокая стойкость режущего инструмента из керамики. Альфа-фаза сплава SiAlON обеспечивает высокую износостойкость, а бета-фаза увеличивает устойчивость к выкрашиванию. В сумме эти свойства обеспечивают высокую производительность по сравнению с любыми конкурентами на операции точения диска.

Рассмотрим условия повышения эффективности процесса обработки валков, изготовленных из стали. Практикой установлено, что режущие керамические пластины могут эффективно использоваться на операциях чернового точения валков, изготовленных на основе железа

высокой твердости, особенно из быстрорежущей, высокохромистых или никельсодержащих сталей. Режущие пластины из керамического сплава AS500 (TaeguTec) рекомендуется использовать для чернового точения, а из керамического сплава AB20 – для чистовой обработки чрезвычайно твердых валков. Пример чернового точения валков показан на рис. 6.22.

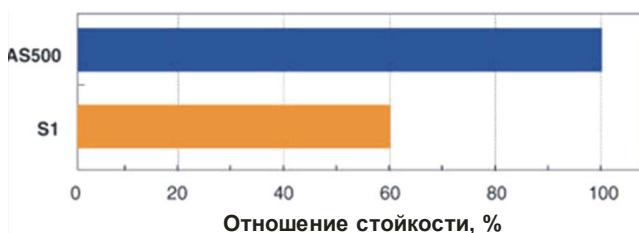


Рис. 6.22. Черновое точение валков (HS50) Ø 313 мм;

Условия обработки: $V = 50$ м/мин; $f = 0,5$ мм/об.; глубина резания 26 мм; без охлаждающей жидкости; пластина LNU6688T, AS500 (TaeguTec), S1 (Конкурент)

Как видно, стойкость режущих пластин из керамического сплава AS500 на 40 % выше стойкости сплава–конкурента на основе Si. На рис. 6.23 показаны результаты испытания режущих пластин на операциях чистового точения. В данном случае керамический сплав AB20 имеет высокую стойкость на финишных операциях обработки быстрорежущих валков.

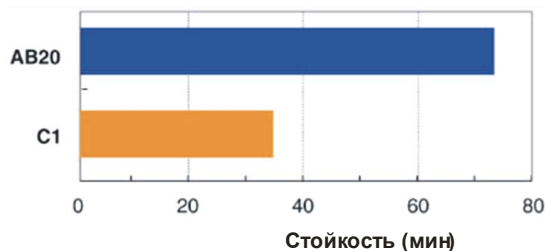


Рис. 6.23. Чистовое точение быстрорежущей стали (HS85): Ø 610 мм

Условия обработки: $V = 48$ м/мин; $f = 0,32$ мм/об.; глубина резания 4,3 мм; без охлаждающей жидкости; пластина T11-3219, AB (TaeguTec), C1 (Конкурент)

Подводя итоги, следует отметить, что компания TaeguTec производит уникальные и высококачественные металлорежущие керамические пластины для различных операций обработки, например таких, как высокоскоростное точения блоков цилиндров, обработка большими пла-

стинами твердосплавных валков и др. Керамический сплав на основе SiAlON AS500 является новейшей разработкой для высокоскоростного точения чугунных дисков, бандажей подшипников и чернового точения железосодержащих валков, а PVD–Сплав AW11030 является наиболее эффективным для непрерывного точения серого чугуна. Сплав PVD AB2010 обеспечивает высокую стойкость инструмента на операциях скоростного точения закаленных сталей.

6.7. Новые решения компании TaeguTec в применении токарных сплавов

Приступая к любой операции механической обработки, важно учитывать специфику и цель поставленной задачи для комплексного подхода в ее реализации. Другими словами, на результат будет влиять не только выбор оптимального набора оборудования или наиболее эффективной геометрии инструмента, но и правильно подобранные режимы эксплуатации станков, а также характеристики инструментальных сплавов.

Технологи компании TaeguTec учитывают особое значение инструментальных сплавов для решения огромного разнообразия промышленных задач, поэтому постоянно расширяют эффективные линейки инструмента новыми типами покрытий, усиливая свои лидирующие позиции в сегменте металлообработки.

Сегодня номенклатура южнокорейского производителя дополнилась очередными новинками, обеспечивающими высокую стойкость и стабильность получаемых результатов в таких случаях: надежный сплав TT7505 для высокоскоростной обработки чугуна и прочный сплав TT8080 для обработки нержавеющей и жаропрочных сплавов.

Вы обрабатываете чугун и ваша главная цель – производительность? Тогда обратите внимание на пластины производства TaeguTec с более высокой твердостью в сплаве TT7505. Или вы занимаетесь производством высокоточных деталей из нержавеющей сталей, не допускающих остановок для смены инструмента? Идеальным решением в данном случае станет сплав TT8080 (рис. 6.24).

Стойкость инструмента под защитой – сплав TT7505. Увеличивая производительность при обработке чугуна за счет повышения скоростных режимов, чаще всего приходится сталкиваться с износом режущей кромки по задней поверхности в виде лунки выкрашиванием

или же налипанием на режущую кромку, что является результатом трения, адгезии и диффузии. Все эти вопросы теперь решаются благодаря новому сплаву ТТ7505 для обработки чугуна при высокоскоростной обработке канавок.



Рис. 6.24. Режущие пластины компании TaeguTec

Сплав ТТ7505 является оптимальным для высокоскоростной обработки чугуна, включая операции непрерывного резания, гарантирует стабильность и более высокую стойкость инструмента (рис. 6.25). Дополнительным преимуществом сплава ТТ7505 является применение специальной технологии CVD-покрытия и недавно разработанной подложки для повышенной износостойкости и прочности, которые обеспечивают улучшенную производительность в целом.

Область применения

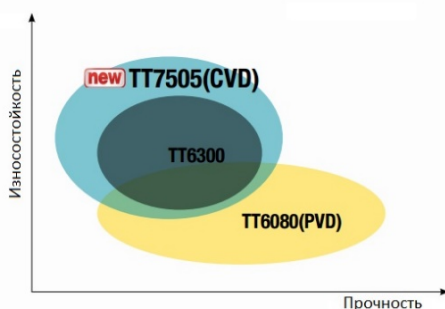


Рис. 6.25. Области применения сплавов ТТ7505 и ТТ8080

В результате ряда испытаний в Украине сплав ТТ7505 показал увеличение стойкости инструмента на 25 % в процессе обработки ковкого чугуна и на 15 – 20 % – при скоростной обработке серого чугуна.

Для нержавеющей стали и жаропрочных материалов – сплав ТТ8080. Новый сплав ТТ8080 с покрытием PVD (рис. 6.26) позволяет минимизировать негативные факторы при обработке жаропрочных материалов, такие как высокие температуры в зоне резания, а в результате – заниженная скорость и быстрый износ режущего инструмента.

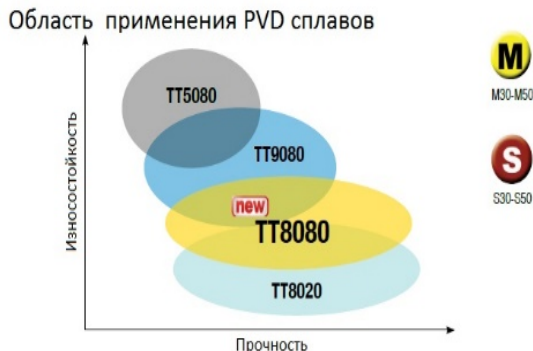


Рис. 6.26. Области применения PVD сплавов

Благодаря высокой трещиностойкости, новинка позволяет исключить расслаивание во время точения и достичь превосходных значений производительности и стойкости. Сплав ТТ8080 был адаптирован специально для токарных операций и особенно хорошо подходит для обработки нержавеющей стали и жаропрочных сплавов при низких скоростях и прерывистом резании.

Обновленный сплав ТТ8080 характеризуется отличной прочностью и высокой стойкостью к сколам, являясь идеальным выбором для прерывистой и черновой обработки нержавейки или инконели. В сравнении со сплавом предыдущего поколения ТТ8020, новинка ТТ8080 гарантирует повышенную стойкость инструмента и улучшенную стабильность обработки.

Испытания нового сплава ТТ8080 в условиях различных производственных условий во всем мире, а в 2016 году – и в Украине, показали значительное увеличение стойкости инструмента также и в сравнении с аналогичными решениями конкурирующих производителей инструмента из Европы, США и Азии. Например, при торцевом прерывистом точении "Корпуса клапана" на производстве корабельных двигателей HUNDAY в Южной Корее, сплав ТТ8080 с покрытием PVD увеличил стойкость инструмента на 160 %. В другом случае, при обработке штуцера трубы из

того же материала, новое покрытие увеличило стойкость инструмента на 71 % при наружном прерывистом точении. При непрерывной обработке кольца из материала 08X16H11M3 на украинской производственной площадке новинка показала увеличение стойкости на 30 % по сравнению с ранее применявшимся инструментом конкурента.

6.8. Новые решения компании TaeguTec в обработке композиционных материалов

Во многих отраслях промышленности, таких как автомобилестроение, аэрокосмическое направление и ветроэнергетика, а также при создании изделий для индустрии отдыха, передовые машиностроители стали все чаще использовать в серийном производстве композиционные материалы [35]. Причина в их высокой эффективности из-за облегченного веса и превосходной стабильности по сравнению со стандартными материалами. К примеру, такие композиты как волокнистый углепластик (пластик, армированный углеродным волокном) на 70 % легче конструкционной стали и на 40 % – алюминиевого сплава, но не уступают им по эксплуатационным показателям. Так, в аэрокосмической индустрии применение углепластиков только по причине облегченного веса позволяет достичь более высокой топливной эффективности и экономичности летательных машин. Лучшие мировые производители режущего инструмента определили эту тенденцию еще 25 – 30 лет назад и инвестировали в создание новых линеек сплавов, покрытий и геометрических форм, соответствующих задаче по обработке композиционных материалов, отслеживая достижения ученых.

В июне 2016 года компания TaeguTec существенно обновила номенклатуру инструментов для обработки композиционных материалов (рис. 6.27). Арсенал новинок для эффективной обработки пополнили фрезерные пластины в сплаве PCD (поликристаллический алмаз), концевые твердосплавные фрезы и сверла с алмазным покрытием. Эти новые инструментальные решения удовлетворяют уникальным условиям резания труднообрабатываемых материалов, поскольку объединяют в себе преимущества специального сплава, видоизмененной геометрии режущей кромки и высоких термохимических свойств алмазного покрытия.

Пластины из поликристаллического алмаза (PCD) (рис. 6.28) предназначены для фрезерной обработки на повышенных скоростях резания

и подачах, обеспечивая, тем самым, значительное снижение машинного времени в сравнении с другими, более традиционными для машиностроения материалами режущего инструмента. Благодаря специальной острой геометрии режущая кромка новинки предотвращает отслаивание поверхности композиционных материалов во время фрезерования даже при нагруженных условиях резания.



Рис. 6.27. Номенклатура инструментов для обработки композиционных материалов



Рис. 6.28. Пластины из поликристаллического алмаза (PCD)

Новые фрезерные пластины в сплаве PCD устанавливаются на корпуса фрез стандартной линейки ChaseMill (рис. 6.29), применяющейся при обработке изделий из металла.

Расширяя диапазон операций обработки углепластика, специалисты компании TaeguTec предлагают 4 конфигурации твердосплавных

концевых фрез с алмазным покрытием. Фрезы RRFE-типа (рис. 6.30) идеально подходят для обдирочных работ: исключают расслаивание, снижают усилия резания и вибрацию, обеспечивая высокую производительность инструмента при черновой обработке. Конфигурация твердосплавных концевых фрез RCFE TaeguTec с алмазным покрытием для обработки углепластика (рис. 6.31), также как RRFE-типа, исключает расслаивание, снижает усилия резания и вибрацию, обеспечивая высокую производительность инструмента при черновой обработке.



Рис. 6.29. Корпуса фрез стандартной линейки ChaseMill

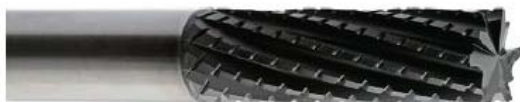


Рис. 6.30. Фреза RRFE-080-TT610



Рис. 6.31. Фреза RCFE-040-TTD610

Отличительной особенностью RCFE-фрез является несколько каналов для отвода стружки, что позволяет работать на повышенных режимах. Для чистовой обработки композитов специалисты компании TaeguTec рекомендуют использовать твердосплавную концевую фрезу серии RCOM с алмазным покрытием (рис. 6.32), которая исключает расслаивание, предотвращая образование заусенца, и представлена в двух конфигурациях: с левым и правым направлением спиралей канавок.



Рис. 6.32. Фреза RCOM-4060-TTD610



Рис. 6.33. Фреза RDCF-4100

Следующим предложением для обработки композиционных материалов являются фрезы серии RDCF с малым осевым наклоном спиральных канавок (рис. 6.33). Это решение также исключает расслаивание и образование трещин. Идеально подходит для выполнения чистовых операций.

При выборе инструментальных решений для обработки отверстий, компания TaeguTec рекомендует применять монокристаллические твердосплавные сверла с алмазным покрытием (рис. 6.34), которые обеспечивают максимальное качество поверхности без образования заусенцев при выполнении сквозных отверстий.



Рис. 6.34. Монокристаллическое твердосплавное сверло с алмазным покрытием CDF-050-034-06-TTD610

Учитывая особенности и отличия процессов механической обработки композиционных и традиционных материалов, специалисты компании TaeguTec разработали несколько вариантов режущих твердых сплавов, позволяющих обеспечить высочайшую стойкость инструмента при высокопроизводительной обработке композитов. В частности, инновационный PCD-сплав TD830, изготовленный из ультрамелкой алмазной фракции, демонстрирует отличную износостойкость, прочность и качество кромки, обладает исключительной стойкостью к абразивному износу и хорошей термической стабильностью.

Следующим, рекомендуемым специалистами компании, сплавом для обработки волокнистых углепластиков является новинка TTD610.

Благодаря передовой технологии нанесения наноалмазного покрытия, этот сплав обеспечивает непревзойденную стойкость инструмента и высокую стабильность обработки, демонстрирует отличную абразивную износостойкость (твердость более 8 000 по Виккерсу), обладая высокими показателями теплопроводности и ударной устойчивости.

6.9. Серия фрез CHASEFEED для фрезерования на высоких подачах

При механической обработке пресс-форм и штампов следует учитывать специфику данной отрасли, когда приходится фрезеровать тонкостенные заготовки из различных по обрабатываемости материалов. Кроме того, процесс нередко усложняется нестабильными условиями резания: маломощное оборудование, большой вылет инструмента, не жесткое приспособление и т.п. [42]. Эффективным решением подобных машиностроительных задач уже несколько лет выступает высокопроизводительная серия фрез и пластин ChaseFeed, которая также подходит и для черновых операций (рис. 6.35).



Рис. 6.35. Фрезы и пластины компании TaeguTec

В настоящее время специалисты компании TaeguTec дополняют серию высокоэффективными пластинами SBMT (рис. 6.36) и широкой номенклатурой корпусов фрез, которые обеспечивают такую же превосходную производительность на высоких скоростях подачи, но при меньших глубинах резания.



Рис. 6.36. Пластина SBMT

Улучшенный дизайн новой пластины включает в себя ряд очевидных, на фоне действующих аналогов, преимуществ. Так, специальная конструкция новой односторонней квадратной пластины SBMT с задним углом 5° заметно снижает силы резания по сравнению с двусторонними аналогами, а высокопозитивная режущая кромка в виде винтовой линии обеспечивает более мягкое и производительное фрезерование.

Следующим достоинством новинки SBMT являются варианты геометрий режущих кромок (рис. 6.37), покрывающие широкий диапазон применений. Таким образом, подбирая нужный стружколом, технолог Заказчика получает максимальную производительность при различных, зачастую нестабильных, условиях обработки. Универсальным решением для обработки сталей станет геометрия M; стружколом ML предназначен для низкоуглеродистых, нержавеющей и жаропрочных сталей, а также для борьбы с вибрацией при большом вылете инструмента; а геометрия MR рекомендована для закаленных сталей и прерывистого резания.

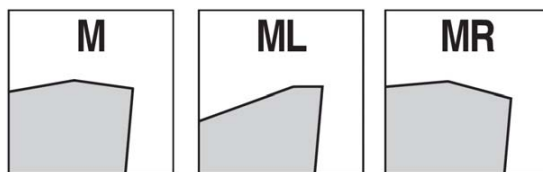


Рис. 6.37. Геометрия режущих кромок

Режимы обработки, в том числе и глубина резания, зависят от многих факторов, таких как мощность станка, длина инструмента, геометрия формообразующей пресс-формы и т.п. Специалисты компании TaeguTec учли данную зависимость и в серии пластин ChaseFeed, разработав пластины двух габаритов – SBMT09 и SBMT13, обеспечивающие максимальную глубину фрезерования 1,2 мм и 2 мм соответственно.

Кроме того, отличительной особенностью SBMT09 и SBMT13, в сравнении со стандартными односторонними пластинами, является возможность обработки на повышенных подачах за счет увеличенной толщины и поворота самой пластины на корпусе фрезы относительно угла в плане 90° . Для каждого габарита пластины SBMT производитель дает рекомендацию в виде параметра "Программируемый радиус R" (рис. 6.38), который имеет значения R3 для 09-го габарита и R4.5 для 13-го габарита. Такая опция необходима при расчете управляющих программ, где требуется задавать корректную геометрию инструмента (диаметр, радиус при вершине, вылет и т.д.).

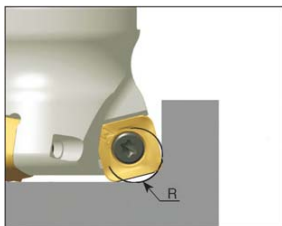


Рис. 6.38. Программируемый радиус

Серия пластин SBMT 09 (13) устанавливается на концевые фрезы $\varnothing 25 - 42$ мм, торцевые фрезы $\varnothing 32 - 125$ мм и фрезы модульного типа $\varnothing 25 - 42$ мм. Конструкция всех корпусов фрез ChaseFeed предусматривает охлаждение за счет каналов для подачи СОЖ.

На одном из машиностроительных предприятий Украины были проведены технические испытания новых пластин SBMT 09, результаты которых приведены в табл. 6.6. Показатели впечатляют: новинка продемонстрировала увеличение производительности в 2 раза при ощутимом снижении вибраций в процессе фрезерования.

Отдельные испытания на стойкость показали перспективность применения нового инструмента компании TaeguTec при высокоскоростной обработке. Так, при фрезеровании заготовки из инструментальной стали марки 4X5B2ФС применение высокопозитивной пластины SBMT позволило увеличить показатели стойкости инструмента на 88 %.

Проведенный анализ современных конструкций твердосплавных инструментов, металлорежущих станков с ЧПУ и технологических процессов обработки различных деталей указывает на их значительные возможности в плане повышения производительности и снижения себестоимости обработки.

Результаты испытаний новых пластин SBMT 09

Параметр	ТаeguТес	Инструмент другого производителя
Деталь	Пресс-форма 	
Обрабатываемый материал	Низколегированная сталь 09Г2С	
Инструмент	TESB 332-M16-09	D32 Z3
Пластина	BLMP 0904R-M TT9080	WNMX 09T316Z
Вылет фрезы, мм	180	
Скорость резания V, м/мин	120	120
Обороты шпинделя s, об/мин	1 200	1 200
Подача минутная F, мм/мин	2 500	2 000
Подача на зуб Fz, мм/зуб	0,69	0,55
Глубина резания Ap, мм	1	0,6
Объем снимаемого металла Q, см ³ /мин	80	38,4
Производительность	208 %	100 %

6.10. Программа вторичной переработки MATRIX компании ТаeguТес для охраны окружающей среды

22 апреля, в День охраны окружающей среды, компания ТаeguТес представила одну из своих популярных программ по утилизации отработанных твердосплавных пластин – решение, которое в ближайшем будущем даст весомые преимущества, как окружающей среде, так и промышленности. Программа утилизации MATRIX предлагает уникальное решение для легкой и эффективной переработки твердосплавного лома. Поддержка в ежедневных технологических операциях любого производственного участка металлообрабатывающих компаний сочетается с контролем и охраной окружающей среды с помощью программы

MATRIX RECYCLE, которая автоматизирует весь процесс, направляя поставщику инструмента по электронной почте предупреждение о времени сбора лома. Зачем утилизировать?



Рис. 6.39. Компоненты MATRIX

В настоящее время средняя цена на паравольфрамат аммония (ПВА) – основную руду для производства карбида вольфрама – составляет \$257,50 за метрическую тонну. Кроме того, ПВА, наряду с другим сырьем, используемым при изготовлении режущих инструментов, имеет ограниченный ресурс. Оценки могут различаться в зависимости от области геологии, но средний показатель составляет около 7 миллионов тонн запасов вольфрама во всем мире. С учетом нынешних тенденций потребления, прогнозируется, что оставшийся в шахтах запас сырья сможет обеспечить производство инструмента в среднем только на ближайшие 100 лет. Согласно имеющимся данным международной статистики, продукция из переработанных материалов может сократить выбросы углекислого газа на целых 40 %.

При утилизации материалов, используемых в производстве, предприятия смогут экономить на открытой добыче, сократить выбросы CO_2 , снизить общее количество энергии, необходимой для добычи этих ценных природных ресурсов, и сократить огромное количество воды, необходимой в горнодобывающей промышленности.

Исходя из собранных данных, возникает вопрос: так ли оправдано использование шахт, если повторная переработка предлагает более

дешевый и менее углеродоемкий подход к обеспечению развития различных отраслей, зависящих от этого важнейшего сырья. Учитывая вышесказанное, а также заботясь о будущих поколениях, компания TaeguTес – азиатский гигант в области механической обработки металлов – считает программу утилизации не просто более выгодным, но и более практичным, и даже – неизбежным эволюционным решением.

Выводы к разделу 6

1. Получены теоретические решения об условиях уменьшения температуры резания и глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. Установлено, что основным условием уменьшения этих двух наиважнейших параметров обработки является переход в область высокоскоростного резания лезвийными инструментами с применением износостойких инструментальных материалов с нанесенными на их рабочие поверхности износостойкими покрытиями.

2. Для правильного выбора оптимальных параметров режимов резания при точении с использованием современных лезвийных инструментов произведена оптимизация параметров процесса резания по критерию наименьшей себестоимости обработки. В результате получены аналитические зависимости, позволяющие производить расчет оптимальных значений глубины резания, скорости резания, периода стойкости инструмента, производительности и себестоимости обработки для разных условий. Теоретически доказана эффективность применения высокоскоростного резания, обеспечивающего увеличение производительности и качества обработки при одновременном уменьшении себестоимости обработки.

3. Показано, что пятиосевой порталный обрабатывающий центр DOOSAN BM 2740U – наилучшее решение для высокоскоростной обработки крупногабаритных авиационных деталей. Показано также, что токарно-фрезерные обрабатывающие центры серии PUMA SMX компании "DOOSAN Infracore Machine Tools" – это новое поколение многофункциональных обрабатывающих станков, которые отличаются высокой производительностью, точностью и простотой в эксплуатации, предоставляют возможность использования лучших решений в классе многофункционального оборудования. Токарно-фрезерные центры серии SMX являются мировым лидером в своем классе и обеспечивают высокие показатели высокоточной обработки за счет применения системы минимиза-

ции термической деформации, основанной на функциях температурной компенсации в процессе высокоскоростного резания.

4. Приведены характеристики новых инструментальных материалов и новых геометрических форм режущих пластин, изготовленных из твердых сплавов и керамических сплавов с износостойкими покрытиями. Приведены результаты исследований высокоскоростного точения инструментами из керамики термообработанных материалов, чугунов, жаропрочных материалов. Обобщен опыт эффективного применения режущих керамических пластин для обработки точением диска, стальных валков и др. Приведены примеры практического использования прогрессивных конструкций режущих инструментов и технологий высокоскоростного резания, которые подтверждают правильность полученных теоретических решений и сделанных выводов об основных направлениях повышения производительности, точности и качества обработки деталей, изготовленных из материалов повышенной твердости. Даны практические рекомендации по выбору прогрессивных инструментальных материалов и оптимальных режимов резания при высокоскоростной обработке на станках с ЧПУ.

5. Показано, что сплав TT7505 эффективно использовать для высокоскоростной обработки чугуна, а прочный сплав TT8080 – для обработки нержавеющей и жаропрочных сплавов южнокорейского производства. Для обработки композиционных материалов рекомендовано использовать фрезерные пластины из сплава PCD (поликристаллический алмаз), концевые твердосплавные фрезы и сверла с алмазным покрытием. Эти новые инструментальные решения удовлетворяют уникальным условиям резания труднообрабатываемых материалов, поскольку объединяют в себе преимущества специального сплава, видоизмененной геометрии режущей кромки и высоких термохимических свойств алмазного покрытия.

6. Установлено, что конфигурация твердосплавных концевых фрез RCFE TaeguTec с алмазным покрытием для обработки углепластиков, также как и фрез RRFE-типа, исключает расслоение, снижает усилия резания и вибрации, обеспечивая высокую производительность при черновой обработке. Отличительной особенностью RCFE-фрез является несколько каналов для отвода стружки, что позволяет работать на повышенных режимах резания. Для чистовой обработки композитов рекомендовано использовать твердосплавную концевую фрезу серии RCOM (компании TaeguTec) с алмазным покрытием, которая исключает рас-

слоение, образование заусенцев и представлена в двух конфигурациях: с левым и правым направлением спиралей канавок.

7. Для высокопроизводительной обработки композитов рекомендовано использовать режущие твердые сплавы TaeguTес, которые позволяют обеспечить наибольшую стойкость инструмента. Так, инновационный PCD-сплав TD830, изготовленный с ультрамелкой алмазной фракции, показывает высокую износостойкость, прочность и качество кромки, характеризуется исключительной стойкостью к абразивному износу и значительной термической стабильностью.

8. Для обработки волокнистых углепластиков рекомендован новый сплав TTD610. Благодаря передовой технологии нанесения наноалмазного покрытия, этот сплав обеспечивает непревзойденную стойкость инструмента и высокую стабильность обработки, отличается высокой абразивной износостойкостью (твердость более 8 000 по Виккерсу), обеспечивает высокие показатели теплопроводности и ударной стойкости.

9. Для механической обработки пресс-форм и штампов, когда приходится фрезеровать тонкостенные заготовки из разных по обрабатываемости материалов, предлагается высокопроизводительная серия фрез и пластин ChaseFeed, которая может быть использована и для черновых операций. В настоящее время компания TaeguTес дополнила серию высокоэффективными пластинами SBMT и широкой номенклатурой корпусов фрез, которые обеспечивают такую же производительность на высоких скоростях подачи, но при меньших глубинах резания. Проведенный анализ современных конструкций твердосплавных инструментов, металлорежущих станков с ЧПУ и технологических процессов обработки различных деталей указывает на их значительные возможности в плане повышения производительности и снижения себестоимости обработки.

10. Применение программы утилизации отработанных твердосплавных пластин MATRIX, разработанной компанией TaeguTес, позволяет автоматизировать весь процесс металлообработки, при этом поставщику инструмента по электронной почте направляется предупреждение о времени сбора лома. Показано, что при утилизации материалов, используемых в производстве, предприятия смогут экономить на открытой добыче руды для производства карбида вольфрама, сократить выбросы CO₂, снизить общее количество энергии, необходимой для добычи этих ценных природных ресурсов, и сократить огромное количество воды, потребляемой в горнодобывающей промышленности.

7. Опыт эффективного применения технологий механической обработки сборными твердосплавными инструментами с износостойкими покрытиями

7.1. Повышения эффективности механической обработки деталей гидравлических систем

Повышение производительности и снижение себестоимости обработки, обеспечение высоких требований к точности и качеству изготовления деталей гидравлических систем предполагает применение износостойких, обладающих высокой режущей способностью инструментов и высокоточных современных станков с ЧПУ. Это, например, стало определяющим фактором в решении проблемы экономичного изготовления деталей гидравлических систем, таких как плунжер, пята и сферическая втулка (рис. 7.1) [36; 96]. Поэтому ниже приведены примеры эффективного использования современных сборных твердосплавных лезвийных режущих инструментов с износостойкими покрытиями производства компании TaeguTес (Южная Корея) и станков типа "обрабатывающий центр" с ЧПУ для механической обработки ответственных деталей гидравлических систем [95].

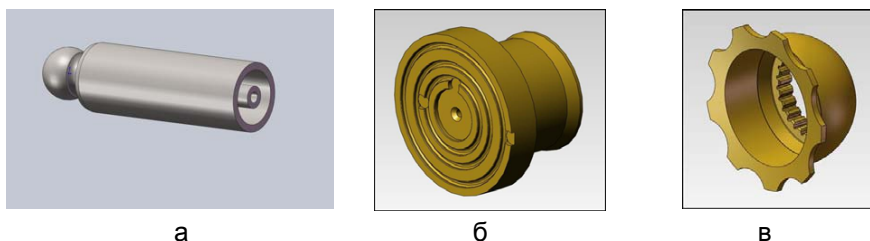


Рис. 7.1. Детали гидравлических систем: плунжер (а); пята (б); втулка сферическая (в)

Плунжер изготавливается из стали 40ХФ2, а пята и втулка сферическая – из литейной латуни ЛМцСКА. Обработку указанных деталей (более 10 разновидностей и типоразмеров деталей) предложено осуществлять на высокопроизводительном двухшпиндельном токарном обрабатывающем центре PUMA 2100MS с приводным фрезерным инстру-

ментом (ось С) и контр-шпинделем ("DOOSAN" производства Южная Корея), оснащенным револьверной головкой для смены инструмента и системой управления (ЧПУ) Fanuc Oi-TD (рис. 7.2). Для каждого изделия был изготовлен отдельный комплект зажимной оснастки, а для операций кольцевого фрезерования и глубокого сверления – станок комплектовался мощной гидростанцией на 70 бар.

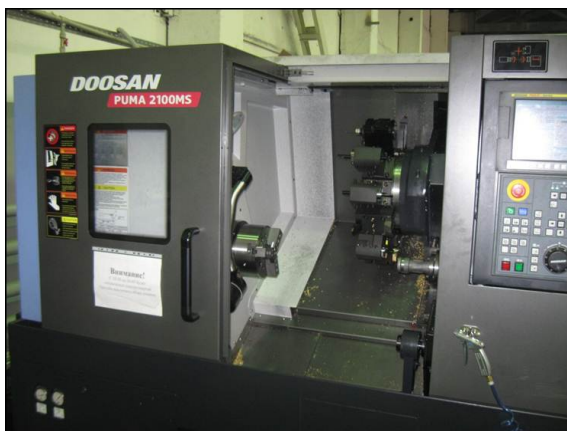


Рис. 7.2. Высокопроизводительный двухшпиндельный токарный обрабатывающий центр PUMA 2100MS с приводным фрезерным инструментом и контр-шпинделем ("DOOSAN")

При разработке новой технологии механической обработки деталей гидравлических систем был сделан основной упор на фактор экономичности, связанный, с одной стороны, с повышением производительности и уменьшением себестоимости обработки, а с другой стороны, с универсализацией оборудования с ЧПУ путем применения нестандартных режущих инструментов и специальной оснастки. Так, ранее рассмотренные детали: плунжер, пята и втулка сферическая обрабатывались на различном оборудовании. Даже отдельные операции приходилось выполнять на разных станках. Например, токарную обработку плунжера производили на одном оборудовании, а глубокое сверление – на специальном станке для глубокого сверления. В данный момент эти операции объединены и выполняются на одном станке "DOOSAN". Кроме того, используя станки агрегатного типа, сложно корректировать размер обрабатываемой детали в связи с износом режущего инструмента. Для введения коррекции на агрегатном станке необходимо затрачивать

более 5 минут. Для ввода коррекции на станке "DOOSAN" с ЧПУ – всего 20 секунд. Например, при обработке на агрегатном станке при обнаружении брака на 3-х обработанных деталях из 7, очевидно, и 4 последующие обработанные детали уйдут в брак. При использовании станка "DOOSAN" имеется возможность контролировать каждую деталь и таким образом исключается брак при обработке. При этом появляется возможность увеличения производительности обработки на каждой операции за счет того, что станок "DOOSAN" обладает повышенной жесткостью.

Следовательно, применение такого оборудования как станок с ЧПУ "DOOSAN" позволяет решить проблему экономичности и производительности обработки главным образом за счет его универсализации, возможности обработки трех рассматриваемых типов деталей (плунжер, пята и втулка сферическая) на одном станке. При этом сокращаются затраты на энергоресурсы. Для обслуживания станка необходим один человек, тогда как для обработки данных деталей на агрегатных станках необходимо более 5 человек, что позволяет экономить фонд заработной платы рабочих. Кроме того, минимизируется количество бракованных деталей. Характеристики станка "DOOSAN" позволяют производить токарную обработку деталей различной конфигурации. В случае изменения конструкции детали возможна быстрая переналадка оборудования.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований применения сборных конструкций твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями взамен традиционно используемых для обработки рассмотренных выше трех типичных деталей гидравлических систем: плунжера, пяты и втулки сферической (рис. 7.1). Первоначально рассмотрены возможности повышения эффективности операций механической обработки плунжера.

1. По существующей технологии полусточная обработка наружной цилиндрической поверхности плунжера производилась обычным контурным резцом из твердого сплава T15K6 с режимом резания: $V = 40$ м/мин, $S = 0,15$ мм/об., $t = 1,0$ мм. С целью повышения производительности и снижения трудоемкости и себестоимости обработки предложено использовать современный сборный токарный резец TDJNL 2525 M15 со сменной многогранной пластиной TT8125 DNMG 150608 FC с износостойким покрытием (рис. 7.3) производства компании TaeguTec (Южная Корея). Благодаря высоким стойкостным характеристикам многогранных сменных пластин с износостойким покрытием удалось интенсифицировать режим резания: $V = 100$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об., $t = 2,0$ мм.

Это позволило в 3 раза увеличить производительность обработки и главное – уйти от многочисленных перезаточек инструмента и таким образом уменьшить трудоемкость и себестоимость обработки.



Рис. 7.3. Сборный токарный резец со сменной многогранной пластиной TT8125



Рис. 7.4. Сборный токарный резец с углом в плане 93° и со сменной многогранной пластиной TT8115

2. Еще больший эффект был достигнут на операции чистовой токарной обработки, а также при формировании сферы и радиуса плунжера. Согласно действующей технологии, данная операция осуществляется тем же твердосплавным резцом с режимом резания: $V = 45$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об., $t = 0,08$ мм. Взамен этого резца предложено использовать современный сборный токарный резец SVJNL 2525 M13 с углом в плане 93° со сменной многогранной пластиной TT8115 (рис. 7.4) VNMG 130404 FG, которая по твердости выше пластины TT8125 (используемой для полустачевой обработки). Режим резания: $V = 250$ м/мин, $S = 0,12$ мм/об., $t = 0,3$ мм. В результате удалось повысить производительность обработки более чем в 10 раз.

3. Для сверления отверстий в плунжере по существующей технологии применялись центровочные сверла из быстрорежущей стали P18 с режимом резания: $V = 40$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об. Применение сверла ECEM 2060 из сплава UF 20 (рис. 7.5) позволило увеличить скорость резания до $V = 80$ м/мин при такой же подаче $S = 0,1$ мм/об.



Рис. 7.5. Сверло ECEM 2060 из сплава UF 20

С целью повышения производительности и качества обработки отверстий были разработаны и внедрены кардинально новые конструкции

сверл для глубокого сверления отверстия $\varnothing 3,15$ мм SPGD-03150-0410-30577-01 с длиной режущей части 125 мм. Сверление рекомендуется производить с режимом резания: $V = 60$ м/мин, $S = 0,08$ мм/об.

Далее приведены разработанные эффективные операции механической обработки детали "пяты" (рис. 7.1б).

1. По действующей технологии получистовая обработка наружной цилиндрической поверхности детали "пяты" производилась фасонным резцом из быстрорежущей стали P18 с режимом резания: $V = 100$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об., $t = 2,0$ мм. Взамен этого инструмента был применен современный сборный токарный резец TDJNL 2525 M15 со сменной многогранной пластиной DNMG 150608 ML из сплава K10, состоящего из WC+Co (рис. 7.6, табл. 7.1). Режим резания: $V = 350$ м/мин, $S = 0,25$ мм/об., $t = 1,5$ мм. В результате производительность обработки увеличилась в 6 раз, почти в такое же количество раз уменьшилась себестоимость обработки.



Рис. 7.6. Сборный токарный резец со сменной многогранной пластиной из сплава K10

Таблица 7.1

Механические и физические свойства твердого сплава K10

Модуль упругости, Н/мм ²	Предел прочности на изгиб, Н/мм ²	Предел прочности на сжатие, Н/мм ²	Твердость (HRA)	Теплопроводность, кал/(см·с·К)	Коэффициент теплового расширения, 10 ⁻⁶ /град
620	> 2 400	6 200	92,7	0,19	4,7

2. Обработка трех глухих отверстий $\varnothing 3,18 \pm 0,24$ мм ранее производилась специальным сверлом $\varnothing 3,18$ мм из быстрорежущей стали P18 отечественного производства с режимом резания $V = 30$ м/мин, $S = 0,05$ мм/об. В последствии на этой операции предложено применять специальное твердосплавное сверло BOF D3.18X0.7X60-6 из ультрамелко-

зернистого твердого сплава UF10 (рис. 7.7) с режимом резания $V = 120$ м/мин, $S = 0,07$ мм/об. Это позволило более чем в 5 раз повысить производительность обработки при одновременном уменьшении себестоимости обработки.

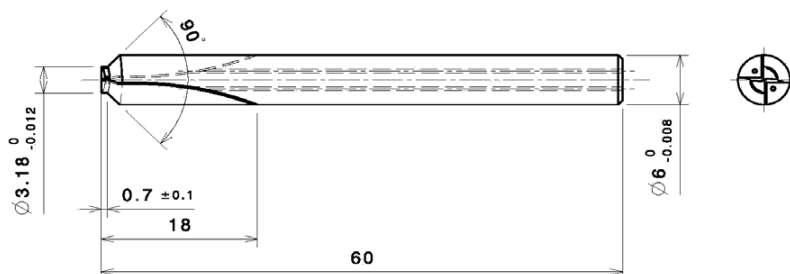


Рис. 7.7. Чертеж твердосплавного сверла BOF D3.18X0.7X 60-6 из сплава UF10

3. Обработка центрального отверстия $\varnothing 1,57^{+0,11}_{-0,04}$ мм ранее производилась специальной фрезой $\varnothing 1,57$ мм из быстрорежущей стали P18 отечественного производства с режимом резания $V = 30$ м/мин, $S = 0,05$ мм/об. Применение специальной твердосплавной фрезы SSD D1.6X20FX70-6 из сплава UF10 (рис. 7.8) с режимом резания: $V = 100$ м/мин, $S = 0,07$ мм/об. позволило в 5 раз увеличить производительность и снизить себестоимость обработки.

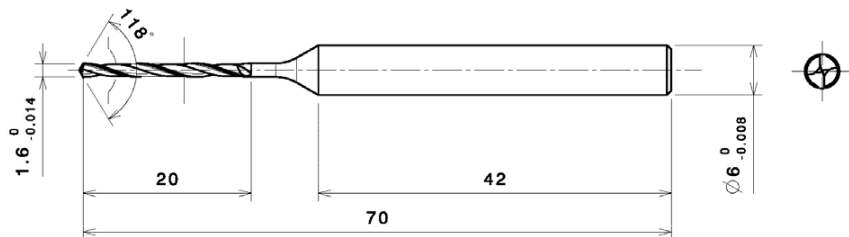


Рис. 7.8. Чертеж твердосплавной фрезы SSD D1.6X20FX 70-6 из сплава UF10

4. Точение торцовых канавок предложено выполнять с режимом резания: $V = 150$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об. канавочным резцом со сменной пластиной TTER 2525-2T8 и TDFT 1.25-0.38-D22 K10 соответственно.

Ранее операция производилась напайным канавочным резцом из быстрорежущей стали P18 с режимом резания: $V = 70$ м/мин, $S = 0,07$ мм/об. В итоге достигнуто увеличение производительности обработки до 3 раз.

5. Черновая операция растачивания отверстия $\varnothing 17,12 \pm 0,04$ мм выполняется резцом S16P SVJCR-11-UKR с использованием сменной пластины VCGT 110304 FL из сплава K10 (рис. 7.9) с режимом резания: $V = 110$ м/мин, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,5$ мм. Ранее данная операция выполнялась с использованием напайного расточного фасонного резца из быстрорежущей стали P18 с режимом резания: $V = 50$ м/мин, $S = 0,05$ мм/об., $t = 0,5$ мм. Это позволило до 4-х раз повысить производительность обработки.



Рис. 7.9. Сменная пластина из сплава K10

6. Для обработки сфер R1,52 и $\varnothing 3,94 \pm 0,11$ мм традиционно использовались специальные фрезы из быстрорежущей стали P18 с режимом резания: $V = 50$ м/мин, $S = 0,05$ мм/об. Благодаря использованию сборных фрез SBE 20304 и SBE 20394 из твердого сплава UF10, которые позволяют реализовать режим резания: $V = 150$ м/мин, $S = 0,08$ мм/об, удалось повысить скорость резания и производительность обработки в 3 раза.

7. Обработка стопорной канавки по новой технологии производится токарным резцом MVQNR 2525 M16 со сменной пластиной VNCG 160404 ML из сплава K10 с режимом резания: $V = 420$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об., $t = 0,5$ мм. Ранее использовался контурный резец из быстрорежущей стали P18 отечественного производства с режимом резания: $V = 110$ м/мин, $S = 0,08$ мм/об., $t = 0,1$ мм. Это позволило многократно (более чем в 10 раз) повысить производительность обработки.

Произведена оценка эффективности применения разработанных операций механической обработки детали "втулка сферическая" (рис. 7.1в).

1. По действующей технологии операция полустистовой обработки наружной цилиндрической поверхности детали "втулка сферическая", а также торцевой поверхности производилась фасонным резцом из

быстрорежущей стали P18 с режимом резания $V = 100$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об., $t = 2,0$ мм. Взамен этого инструмента был применен современный сборный токарный резец TDJNL 2525 M15 со сменной многогранной пластиной DNMG 150608 ML из сплава K10 (рис. 7.10). Это позволило реализовать следующий режим резания: $V = 350$ м/мин, $S = 0,25$ мм/об., $t = 1,5$ мм.



Рис. 7.10. Сборный токарный резец со сменной многогранной пластиной из сплава K10

2. Растачивание, а также обработка торца втулки ранее выполнялись контурным резцом из быстрорежущей стали P18 с режимом резания: $V = 110$ м/мин, $S = 0,08$ мм/об., $t = 0,1$ мм. Предложено обработку производить токарным резцом S25T SDUCR 11 с углом в плане 93° , оснащенный пластиной DCGT 11T304 FL из сплава K10 (рис. 7.11) с режимом резания: $V = 250$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об., $t = 1,0$ мм. В результате достигнуто увеличение производительности обработки более чем в 10 раз.



Рис. 7.11. Токарный резец с углом в плане 93° , оснащенный пластиной из сплава K10

3. Фрезерование круглых лысок ("звездочки") по действующей технологии производилось фрезой $\varnothing 10$ мм из быстрорежущей стали отечественного производства с режимом резания: $V = 30$ м/мин, $S = 0,08$ мм/об. Данная фреза была заменена на фрезу REMA 3 100C из твердого сплава UF10 (рис. 7.12). Это позволило интенсифицировать режим

резания: $V = 100$ м/мин, $S = 0,15$ мм/об. и более чем в 6 раз повысить производительность обработки.



Рис. 7.12. Фреза REMA из твердого сплава UF10

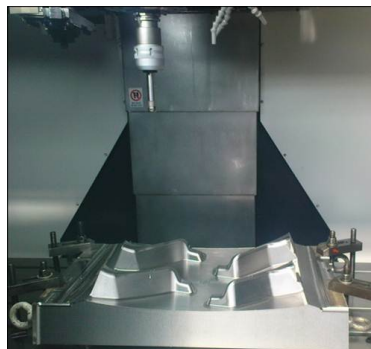
Таким образом показано, что применение сборных конструкций твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями при условии правильного установления режимов резания и других параметров обработки в соответствии с предложенными в работе практическими рекомендациями, позволило многократно увеличить производительность и уменьшить себестоимость обработки при одновременном обеспечении высоких показателей точности, качества и шероховатости обрабатываемых поверхностей. С целью повышения работоспособности инструментов при резании материалов с повышенными физико-механическими свойствами и расширения технологических возможностей металлорежущих станков, ниже приведены характеристики новых перспективных станков с ЧПУ и режущих твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями, предназначенных для обработки различных по обрабатываемости материалов.

7.2. Повышение эффективности механической обработки сложнопрофильных рабочих поверхностей сектора пресс-формы для шины диаметром 2 200 мм

Внедрение современных сборных твердосплавных режущих инструментов и оборудования с ЧПУ позволило решить в ПАО "Днепрполимермаш" (г. Днепр) проблему создания сложнопрофильных рабочих поверхностей сектора (элемента) пресс-формы для шины диаметром 2 200 мм (рис. 7.13). По действующей технологии обработка производилась в течение 180 часов [37; 96]. Внедрение новой технологии позволило исключительно за счет повышения режимов резания и уменьшения количества проходов сократить машинное время до 15,5 часов (рис. 7.14). В результате достигнуто уменьшение машинного времени в 11,5 раза, что дало возможность предприятию выиграть тендер на поставку изделий, стоимостью в миллионы долларов.



а



б

Рис. 7.13. Сектор в сборе (а) и его обработка на станке (б)

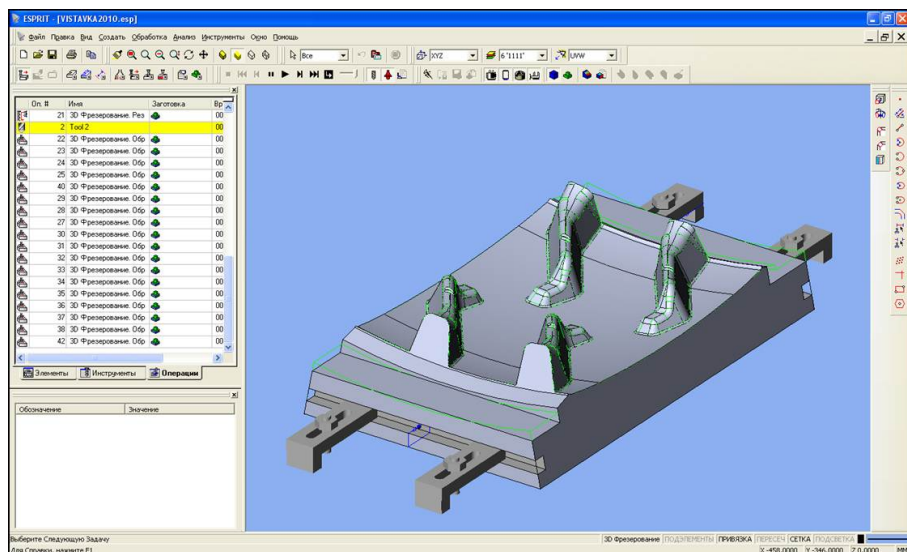


Рис. 7.14. Траектории движения инструмента в CAM системе Esprit

Эффект обусловлен применением новых сборных твердосплавных инструментов совместного производства компании TaeguTec (Южная Корея) и Технического Центра "ВариУс" (г. Днепр): торцевой фрезы $\varnothing 100$ мм с механическим креплением пластин SCRM90TN 6100-32R-22 (рис. 7.15а); концевой фрезы $\varnothing 32$ мм с механическим креплением пластин TE90AP 332-32-17-L (рис. 7.15б); сферической фрезы $\varnothing 25$ мм с механическим креплением пластины TBN 250-32M (рис. 7.15в).

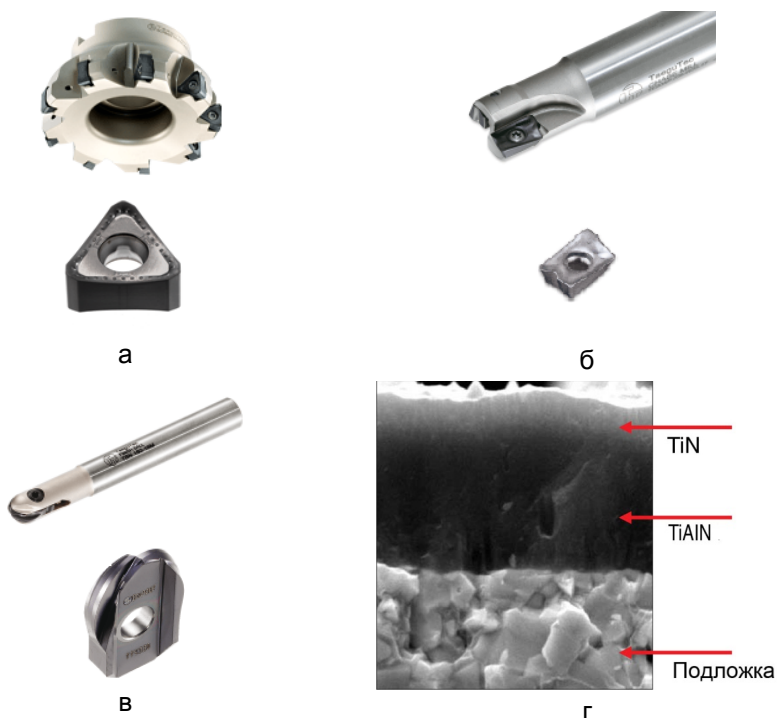


Рис. 7.15. Применяемые режущие инструменты (а, б, в) и структура сплава ТТ9080 с износостойким покрытием (г)

Используются пластины с износостойкими покрытиями (сплав ТТ9080, рис. 7.15г), обеспечивающими высокую стойкость режущих инструментов. Черновая обработка производится торцевой фрезой $\varnothing 100$ мм с режимом резания: скорость резания $V = 140$ м/мин ($n = 440$ об./мин); подача на зуб $S_Z = 0,11$ мм/зуб; подача стола $S = 300$ мм/мин; глубина – 6 мм; ширина – 70 мм.

Получистовая обработка производится концевой фрезы $\varnothing 32$ мм с режимом: скорость резания $V = 170$ м/мин ($n = 1\,700$ об./мин); подача на зуб $S_Z = 0,2$ мм/зуб; подача стола $S = 1\,000$ мм/мин; глубина – 1 мм; ширина – 23 мм.

Чистовая обработка производится концевой фрезы $\varnothing 21$ мм с режимом резания: скорость резания $V = 330$ м/мин ($n = 5\,000$ об./мин); подача на зуб $S_Z = 0,4$ мм/зуб; подача стола $S = 3\,900$ мм/мин; глубина – 0,3 мм; ширина – 0,5 мм.

Чистовая обработка производится и с применением сферической фрезы $\varnothing 25$ мм с режимом резания: скорость резания $V = 390$ м/мин; подача на зуб $F_z = 0,3$ мм/зуб; обороты шпинделя $S = 5\,000$ об./мин; подача стола $F = 3\,000$ мм/мин; глубина – 1 мм; ширина – 0,35 мм.

В работе применены нестандартные подходы к контролю качества – внедрены CAM системы ESPRIT (рис. 7.16 [41]). Применение данного программного средства позволяет исключить необходимость промежуточных замеров в процессе обработки детали, что дополнительно повышает производительность труда.

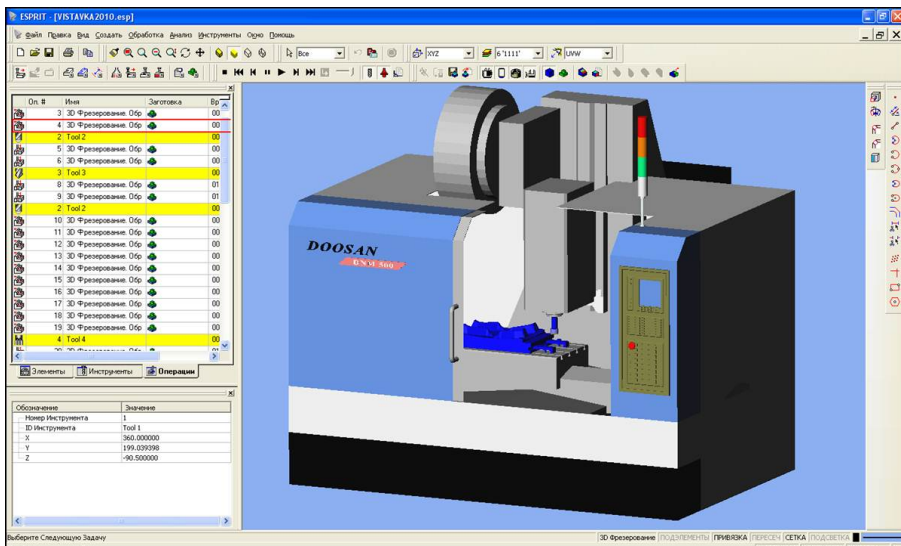


Рис. 7.16. Контроль и симуляция обработки в CAM системе Esprit

Таким образом, приведенные примеры наглядно показывают, что применение современного оборудования и сборных твердосплавных инструментов открывает новые технологические возможности в интенсификации процессов механической обработки ответственных деталей гидравлических систем, а также других деталей из труднообрабатываемых материалов. В результате достигается многократное увеличение производительности и снижение себестоимости обработки при обеспечении высоких требований по точности и качеству обрабатываемых поверхностей.

7.3. Повышение эффективности механической обработки детали "упор передний"

Одним из примеров эффективного использования современных сборных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями следует рассматривать фрезерование плоскостей и уступов корпусной детали "упор передний", изготовленной из стали 20ГЛ (легированной стали для отливок) [40]. Химический состав и механические свойства данной стали приведены в табл. 7.2 и табл. 7.3.

Таблица 7.2

Химический состав в % стали 20ГЛ

C	Si	Mn	S	P
0,15 – 0,25	0,2 – 0,4	1,2 – 1,6	до 0,04	до 0,04

Таблица 7.3

Механические свойства стали 20ГЛ (при температуре T = 20 °C)

Сортамент	Твердость	Временное сопротивление	Предел пропорциональности	Относительное удлинение при разрыве	Относительное сужение	Ударная вязкость,	Термо-обработка
	HB·10 ⁻¹ , МПа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	ψ , %	кДж/м ²	
Отливки К-25 ГОСТ 977-88	143 – 187	540	275	18	25	491	Нормализация 880 – 900 °C, отпуск 600 – 650 °C

Согласно существующей технологии, обработка рассматриваемой детали производится на вертикально-фрезерном станке модели 6Р13 (рис. 7.17) с использованием концевых и торцевой фрез (рис. 7.18). Общий вид заготовки и обработанной детали показаны на рис. 7.19. На рис. 7.20 приведена 3D модель детали в приспособлении и 3D модель детали.



Рис. 7.17. Вертикально-фрезерный станок модели 6P13



Рис. 7.18. Концевые (а) и торцовая (б) фрезы

Основной недостаток существующей технологии фрезерования – высокая трудоемкость обработки в связи с повышенными физико-механическими свойствами обрабатываемого материала и низкой стойкостью применяемых инструментов. С целью уменьшения трудоемкости обработки предложено фрезерование плоскостей деталей выполнять сборной торцевой фрезой $\varnothing 63$ мм TFMRY 463-22R-20 совместного производства компании TaeguTec (Южная Корея) и Технического Центра "ВариУс" (Украина) (рис. 7.21), оснащенной круглыми твердосплавными пластинами (рис. 7.22). Общий вид используемой оправки BT40 40 SEM 22×60 и ее характеристики приведены на рис. 7.23.

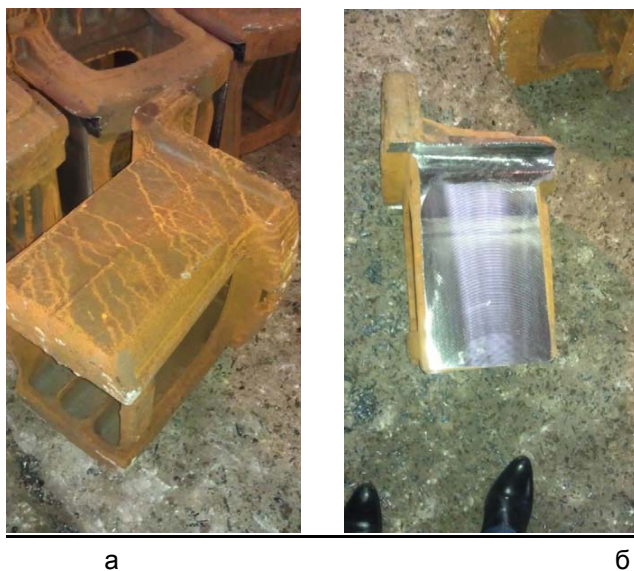


Рис. 7.19. Общий вид заготовки (а) и обработанной детали (б)

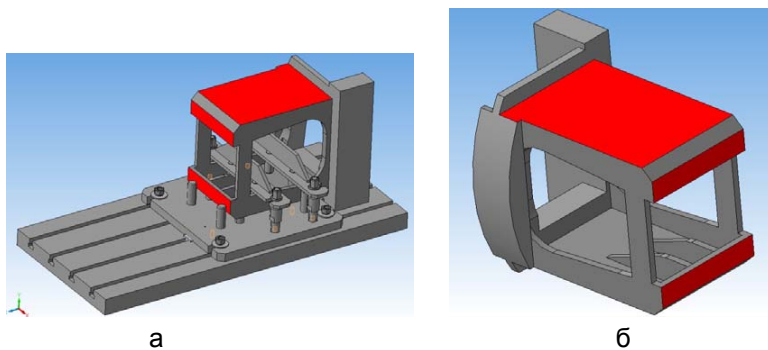
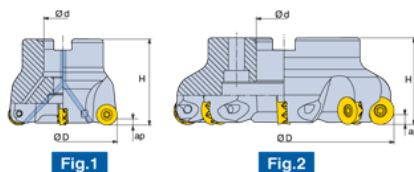
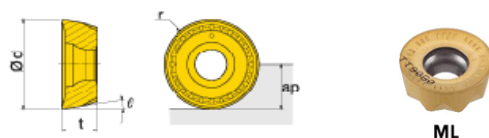


Рис. 7.20. 3D модель детали в приспособлении (а) и 3D модель детали (б)



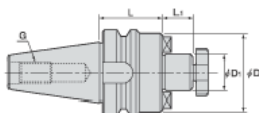
r	Z	D	d	H	ap	СОЖ	Рис	kg
10.00	4	63.00	22.000	50	10.00	О	1	0.459

Рис. 7.21. Фреза торцовая $\varnothing 63$ мм



r	d	t	ap	Рис
10.00	20.000	7.000	10.00	2

Рис. 7.22. Твердосплавная пластина из ТТ9080



D1	L	L1	D	G
22.00	60.00	0.00	47.00	M16

Рис. 7.23. Оправка

В качестве инструментального материала использовался твердый сплав ТТ9080 с износостойким покрытием PVD TiAlN/TiN (желтого цвета). Данный сплав является универсальным, его эффективной областью применения является обработка фактически всех видов сталей и чугунов. На рис. 7.24 показана структура твердого сплава ТТ9080 с износостойким покрытием PVD TiAlN/TiN.

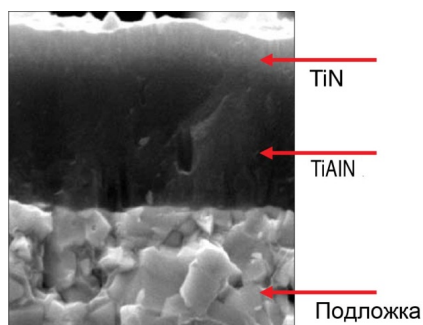


Рис. 7.24. Структура твердого сплава ТТ9080 с износостойким покрытием PVD TiAlN/TiN

В качестве инструментального материала использовался также твердый сплав ТТ7080 с износостойким покрытием PVD TiAlN/TiN (жел-

того цвета). Данный твердый сплав получил широкое применение при обработке всех видов сталей (по ISO: P10-P40). Структура твердого сплава TT7080 с износостойким покрытием PVD TiAlN/TiN показана на рис. 7.25.

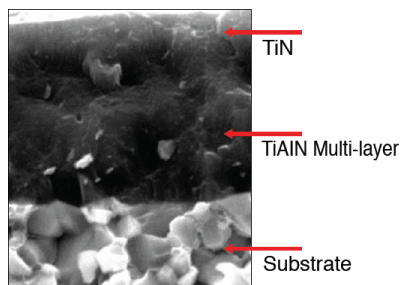


Рис. 7.25. Структура твердого сплава TT7080 с износостойким покрытием PVD TiAlN/TiN

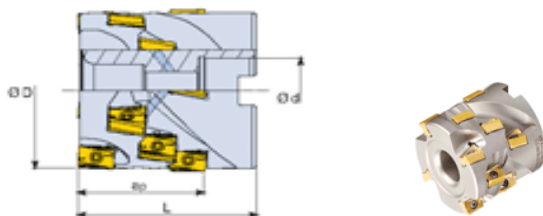
Фрезерование плоскостей деталей производилось на современном обрабатывающем центре DOOSAN DNM500 (рис. 7.26) с использованием режима резания: скорость резания $V = 150$ м/мин ($n = 760$ об./мин); подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб; подача $S = 305$ мм/мин.



Рис. 7.26. Обрабатывающий центр DOOSAN DNM500

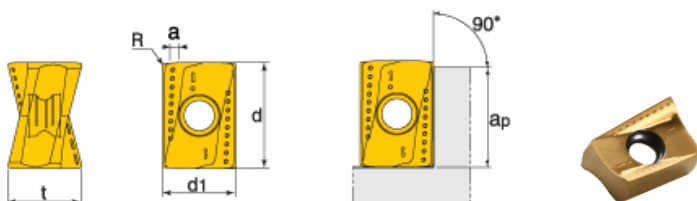
Фрезерование уступов на детали предложено производить фрезой кукурузной $\varnothing 63$ мм TES D63-56-27R-AN16 (рис. 7.27), оснащенной пластинами ANHX 160708R-M TT7080 (рис. 7.28). При этом использовалась

оправка BT40 SEMC 27×55 (рис. 7.29). В качестве инструментальных материалов использовались твердые сплавы ТТ9080 и ТТ7080 с износостойким покрытием PVD TiAlN/TiN (желтого цвета). Обработка уступов на детали производилась на современном обрабатывающем центре DOOSAN DNM500 (рис. 7.26) с использованием следующего режима резания: скорость резания $V = 120$ м/мин ($n = 605$ об./мин); подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб; подача $S = 180$ мм/мин.



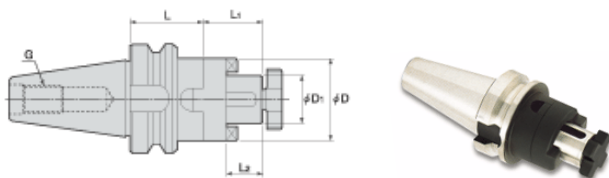
Зубьев	Z	D	d	L	ap
3	12	63.00	27.000	80.00	56.00

Рис. 7.27. Фреза кукурузная Ø 63 мм TES D63-56-27R-AN16



d	d1	a	t	r	ap
16.000	11.00	1.40	10.600	0.80	15.00

Рис. 7.28. Пластина ANHX 160708R-M ТТ7080



D1	L	L1	L2	D	G
22.00	53.00	0.00	19.0	40.00	M16

Рис. 7.29. Оправка BT40 SEMC 27×55

Внедрение в основное производство Папаснянского вагоноремонтного завода предложенной технологии фрезерования плоскостей и уступов деталей позволило уменьшить машинное время обработки с 40 мин (по существующей технологии) до 16 мин, т.е. в 2,5 раза.

7.4. Повышение эффективности механической обработки детали "цилиндр"

Как показано в разделе 1 работы, основным недостатком изготовления деталей гидравлических систем является низкая производительность и высокая трудоемкость их механической обработки. В значительной степени это относится к обработке такой ответственной детали как "цилиндр", производство которой освоено в ПАО "Насосэнергомаш". На рис. 7.30 показан чертеж и 3D модель заготовки, а на рис. 7.31 – чертеж и 3D модель детали. Фотографии заготовки и детали приведены на рис. 7.32 [40].

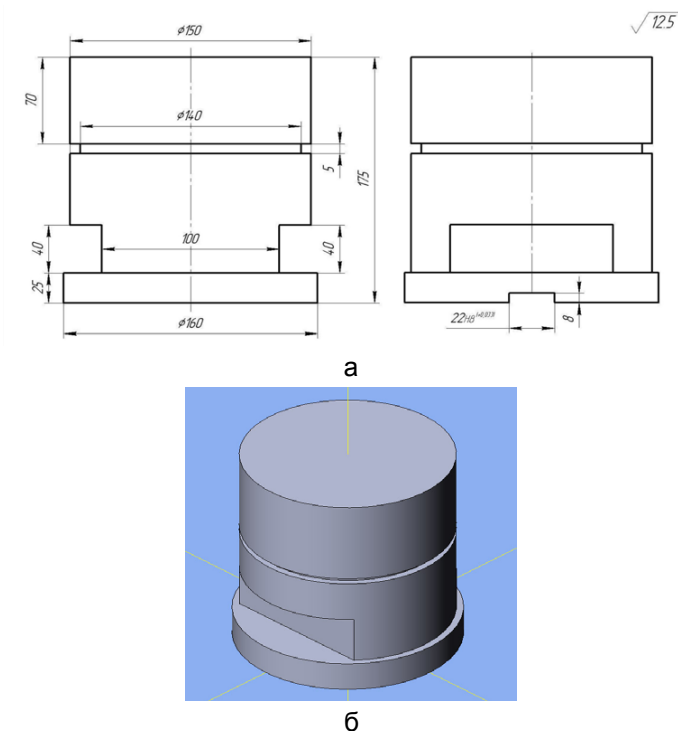
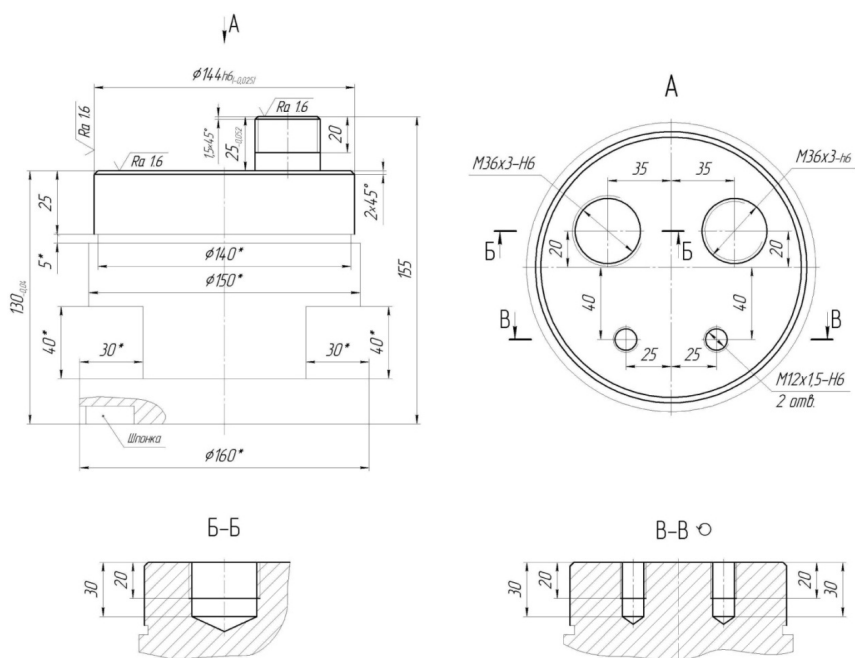
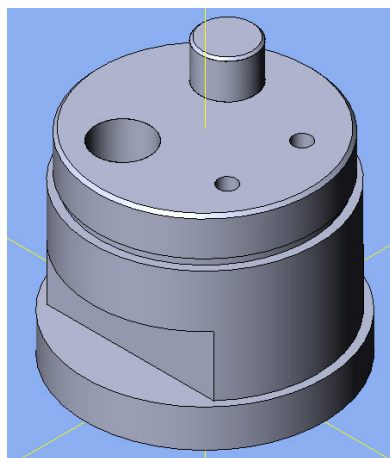


Рис. 7.30. Чертеж (а) и 3D модель (б) заготовки

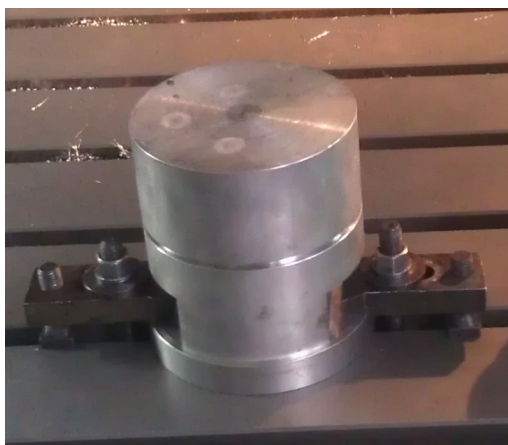


а



б

Рис. 7.31. Чертеж (а) и 3D модель (б) детали "цилиндр"



а



б

Рис. 7.32. Фотографии заготовки (а) и детали "цилиндр" (б)

Рассмотренная деталь изготавливается из конструкционной углеродистой качественной стали 45. Химический состав, механические и физические свойства стали 45 приведены в табл. 7.4 – табл. 7.6.

Таблица 7.4

Химический состав стали 45

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0,42 – 0,5	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,3	до 0,08

Таблица 7.5

Механические свойства стали 20ГЛ (при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Сортамент	Твердость $\text{HB} \cdot 10^{-1}$, МПа	Временное сопротивле- ние $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Относительное удлинение при разрыве δ_s , %	Относи- тельное сужение ψ , %
Прокат отожжённый ГОСТ 1050-88	207	540	13	40

Таблица 7.6

Физические свойства стали 45

Темпе- ратура T , град	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$, МПа	Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$, град $^{-1}$	Коэффициент теплопро- водности λ , Вт/(м·град)	Плотность ρ , кг/м 3	Удельная теп- лоемкость c , Дж/(кг·град)
20	2			7 826	
100	2,01	11,9	48	7 799	473
200	1,93	12,7	47	7 769	494
300	1,9	13,4	44	7 735	515
400	1,72	14,1	41	7 698	536
500		14,6	39	7 662	583
600		14,9	36	7 625	578
700		15,2	31	7 587	611
800			27	7 595	720
900			26		708

Традиционно обработка детали "цилиндр" производится на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ модели ГФ-2171 (рис. 7.33) с использованием концевых фрез, сверл, метчиков и плашек отечественного производства (рис. 7.34).

С целью повышения эффективности обработки данной детали предложено использовать современные сборные твердосплавные режущие инструменты совместного производства компании TaeguTec (Южная Корея) и Технического Центра "ВариУс" (рис. 7.35). Режущие части инструментов изготовлены из твердого сплава ТТ9080 с износостойким покрытием PVD TiAlN/TiN, из твердых сплавов ТТ1040 (по ISO:

P05–P20, K05–K20, H05–H25) и ТТ9030 (по ISO: P15–P35, M10–M30, S15–S25) с износостойким покрытием PVD TiAlN (черного цвета). Эффективной областью применения этих твердых сплавов является высокоскоростная обработка сталей, чугунов и закаленных сталей с твердостью до HRC 70. Применялся также твердый сплав без покрытия UF10 (по ISO: N20–N30). Его структура показана на рис. 7.36.

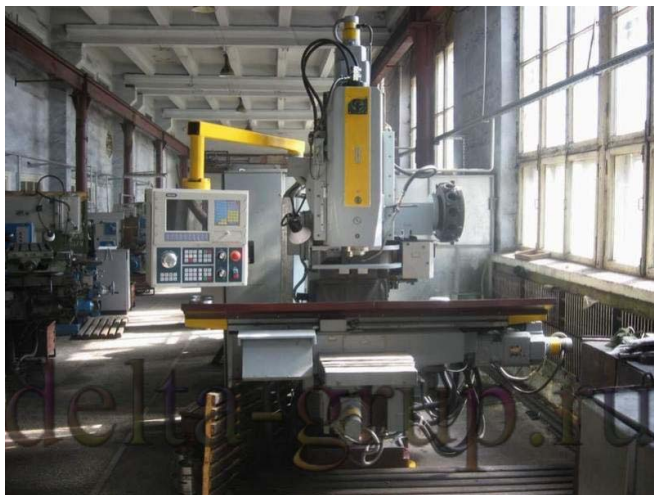


Рис. 7.33. Вертикально-фрезерный станок с ЧПУ модели ГФ-2171

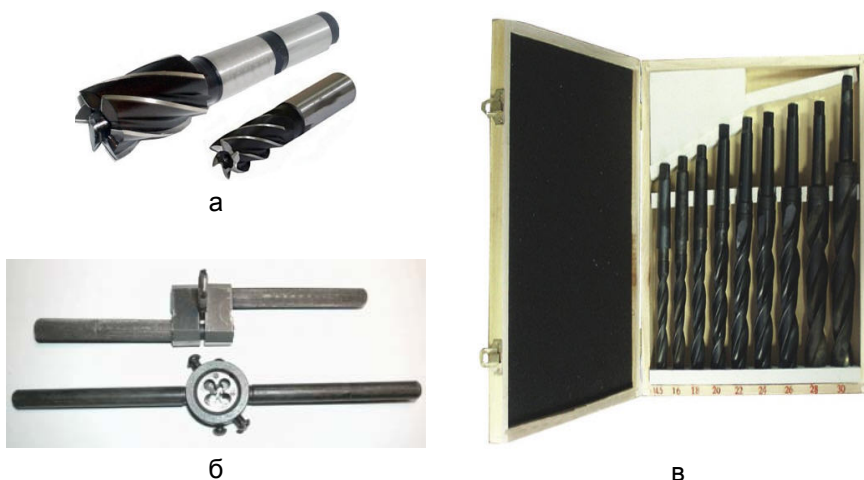


Рис. 7.34. Применяемые режущие инструменты: концевые фрезы (а), метчик и плашка (б), сверла (в)



Рис. 7.35. Используемые современные режущие инструменты

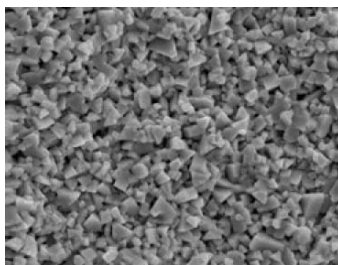


Рис. 7.36. Структура твердого сплава UF10

Фрезерование плоскости (размер $\varnothing 140$), предварительное фрезерование отверстия диаметром $\varnothing 144$ под резьбу М36 (внутреннюю и наружную) производилось концевой фрезой $\varnothing 20$ 3P TE90-220-20-10-L170, оснащенной твердосплавными пластинами ЗРКТ 100408R-М ТТ7080 с тремя режущими кромками (рис. 7.37). При этом использовались оправка BT50 TMC 32-135 и цанга CSR 32-20 (рис. 7.38).

Сверление 2-х отверстий под резьбу М12 производилось сверлом $\varnothing 10,3$ TCD 100-104-16T3-5D и коронкой TCD-103-P ТТ9080 (рис. 7.39). При этом использовались оправка BT50 ER 32×125 и цанга ER32 SEAL 15-16 (рис. 7.40).

Чистовое фрезерование отверстия $\varnothing 144$ под резьбу М36 производилось фрезой $\varnothing 18$ HES 4180T ТТ9030 с использованием оправки BT50 ER 32×125 и цанги ER32 SPR 19-20AA (рис. 7.41).

Фрезерование фасок 1,5×45 и 2×45, центровка отверстия и разметка производилось фасочной фрезой $\varnothing 12$ CEM 2120 UF10 с применением оправки BT50 ER 32×125 и цанги ER32 SPR 11-12 (рис. 7.42).

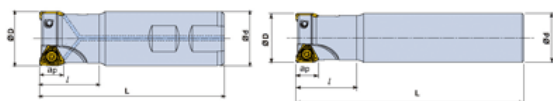


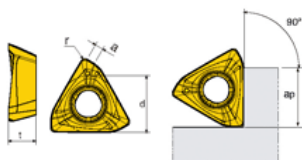
Fig.1

Fig.2



Z	D	d	L	l	ap	СОЖ
2	20.00	20.00	170.00	40.00	7.00	X

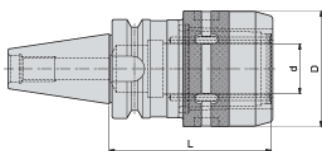
а



d	t	a	r	ap
6.90	4.000	0.90	0.80	7.00

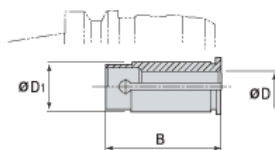
б

Рис. 7.37. Фреза концевая (а) и твердосплавная пластина с тремя режущими кромками (б)



d	D	L
32.00	74.00	135.00

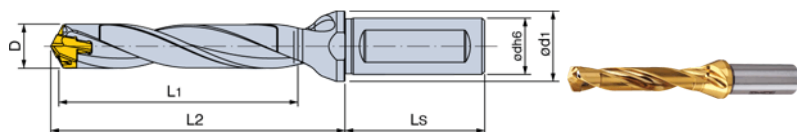
а



D	D1	B
20.00	32.00	65.00

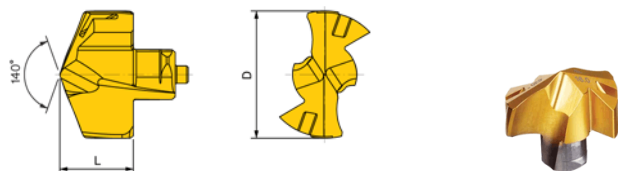
б

Рис. 7.38. Оправка (а) и цанга (б)



Dmin	Dmax	L	d	d1	L1	Ls	Po.Size
10.000	10.400	50.00	16.00	20.0	66.2	48.00	10

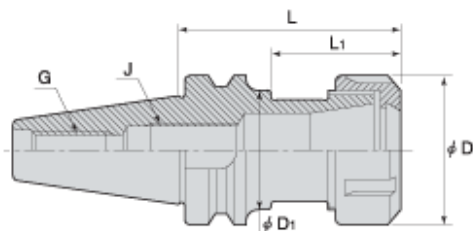
a



D	L	Po.Size
10.30	6.200	10

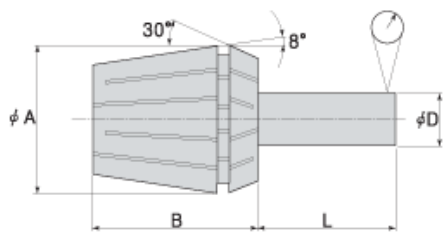
б

Рис. 7.39. Сверло (а) и коронка (б)



range	L	L1	D	D1	G	J
2-20	125.00	-	50.00	-	M24	M22X1.5

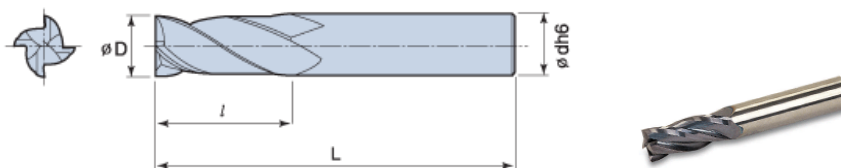
a



d min	d max	S s
15.00	16.00	ER 32

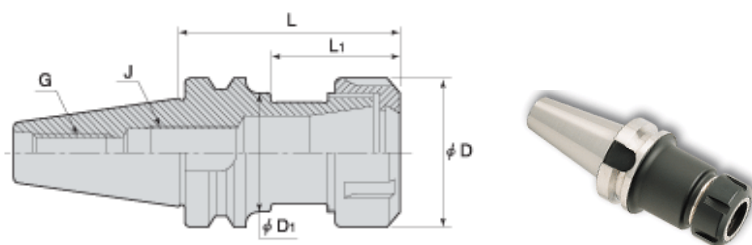
б

Рис. 7.40. Оправка (а) и цанга (б)



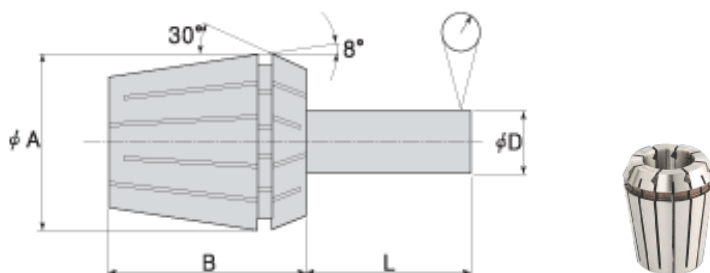
D	L	l	d
18.00	110.00	45.00	20.00

a



range	L	L1	D	D1	G	J
2-20	125.00	-	50.00	-	M24	M22X1.5

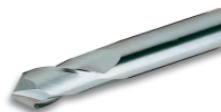
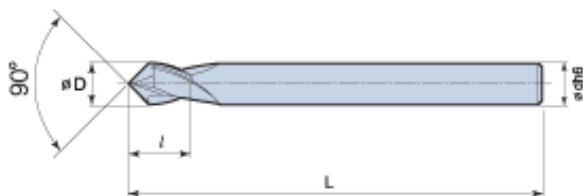
б



d min	d max	S s
19.00	20.00	ER 32

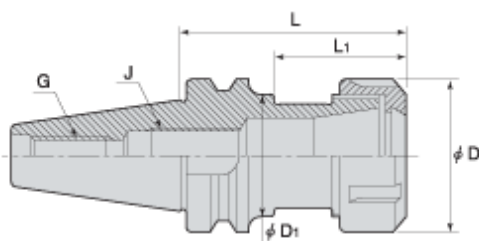
в

Рис. 7.41. Фреза (а), оправка (б) и цанга (в)



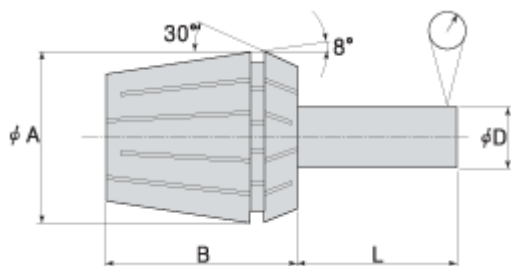
D	L	l	d
12.00	110.00	18.00	12.00

a



range	L	L1	D	D1	G	J
2-20	125.00	-	50.00	-	M24	M22X1.5

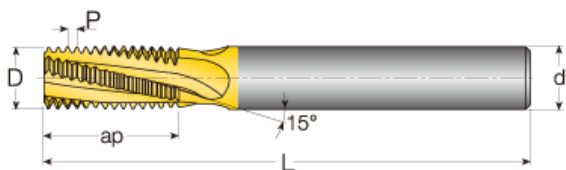
б



d min	d max	S s
11.00	12.00	ER 32

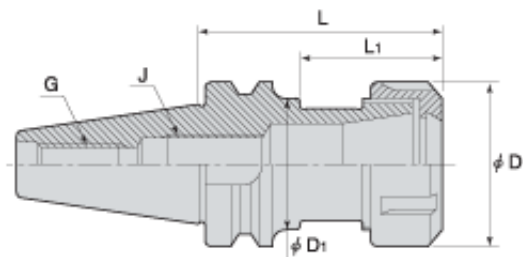
в

Рис. 7.42. Фасочная фреза (а), оправка (б) и цанга (в)



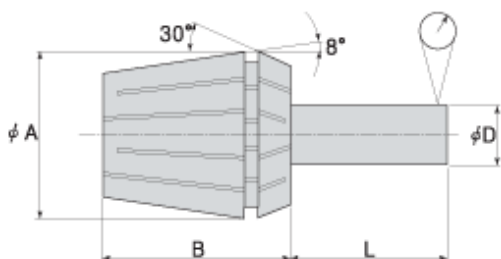
Шар	0	0	d	Style 1	D	Зубья	ap	L
1.50	M10	>12	8.00	C	7.00	0	24.80	76.00

а



range	L	L1	D	D1	G	J
2-20	125.00	-	50.00	-	M24	M22X1.5

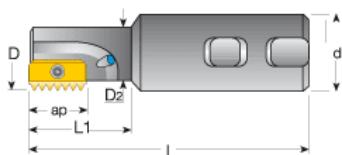
б



d min	d max	S s
7.00	8.00	ER 32

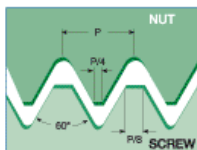
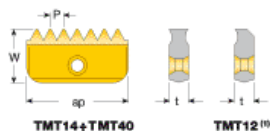
в

Рис. 7.43. Резьбофреза (а), оправка (б) и цанга (в)



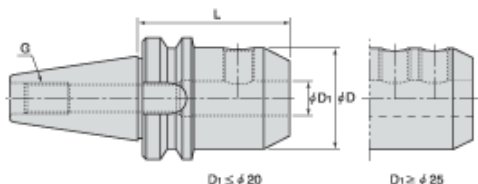
ap	D	d	D2	L	I2	СОЖ	Винт	Ключ	Tq(N.cm)
21.00	25.00	20.00	-	125.00	-	Y	TS21	TK21	515

а



Шар	ap	d1	t
3.00	21.00	12.00	4.700

б



D1	L	D	G
20	100.00	52.00	M24

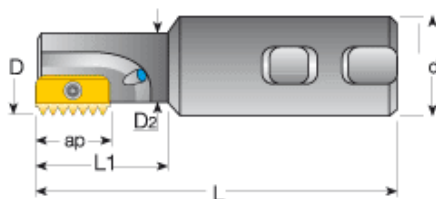
в

Рис. 7.44. Резьбофреза (а), пластина (б) и оправка (в)

Нарезание внутренней резьбы M36×3 осуществлялось резьбофрезой TMTSR 0025 K21, оснащенной твердосплавной пластиной TMT21 I 3.0 ISO TT9030, с использованием оправки BT50 ER 32×125 и цанги ER32 SPR 19-20 AA (рис. 7.45).

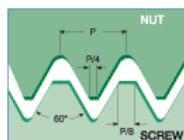
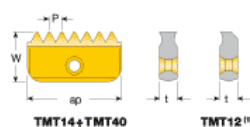
Обработка детали "цилиндр" по новой технологии производилась на обрабатывающем центре DOOSAN VM960 (рис. 7.46). Обработанная деталь в Esprit показана на рис. 7.47. Контроль линейных размеров производился с помощью измерительного инструмента производства IDF, такого как: штангенциркуль с цифровой индикацией ШЦЦ-I диапазон

0–250 мм (цена деления 0,01 мм); измеритель шероховатости TR-100; шаблон, для контроля фасок; калибр–пробка ГОСТ 16093–70.



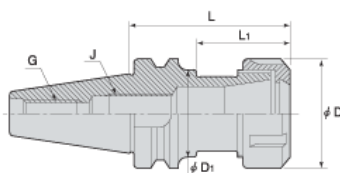
ap	D	d	D2	L	I2	СОЖ	Винт	Ключ	Tq(N.cm)
21.00	25.00	20.00	-	125.00	-	Y	TS21	TK21	515

а



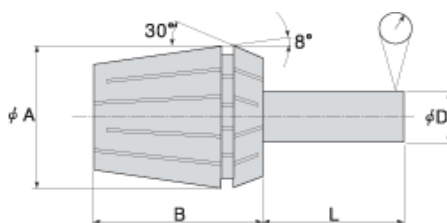
Шар	ap	d1	t
3.00	21.00	12.00	4.700

б



range	L	L1	D	D1	G	J
2-20	125.00	-	50.00	-	M24	M22X1.5

в



d min	d max	S s
19.00	20.00	ER 32

г

Рис. 7.45. Резьбофреза (а), пластина (б), оправка (в) и цанга (г)



Рис. 7.46. Обрабатывающий центр DOOSAN VM960

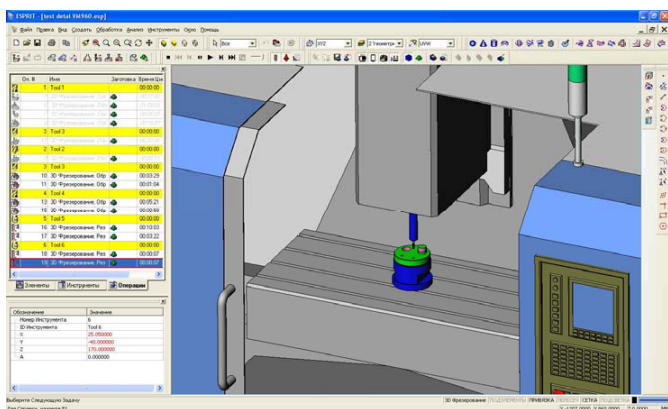


Рис. 7.47. Обработанная деталь в Esprit

В результате внедрения разработанных операций механической обработки детали "цилиндр" в основное производство ПАО "Насосэнергомаш" обеспечено уменьшение машинного времени в 3 раза: с 7,5 час (по существующей технологии) до 2,5 час.

Произведенные расчеты экономического эффекта от внедрения разработанных операций механической обработки деталей гидравлических систем, а также других деталей из труднообрабатываемых материалов, показали на их высокую результативность. Так, экономический эффект от внедрения разработанных операций механической обработки деталей гидравлических систем в Частном АО "Гидросила АПМ" в ценах 2008 года составил 90 420 гривен в год, а экономический эффект от внед-

рения разработанных операций механической обработки сложнопрофильных рабочих поверхностей сектора пресс-формы для шины диаметром 2 200 мм в ПАО "Днепрополимермаш" (г. Днепр) составил 54 800 гривен в год. Как видно, общий экономический эффект от внедрения разработанных операций механической обработки лишь на двух предприятиях составил 145 220 гривен в год. При этом достигнуто существенное снижение себестоимости и повышение производительности обработки при обеспечении требуемых параметров качества обрабатываемых поверхностей.

7.5. Разработка и внедрение прогрессивной технологии механической обработки турбинных лопаток

Специалисты компании TaeguTek Украина совместно с партнерами продолжают успешно реализовывать производственные задачи для флагманов украинской промышленности. Комплексный профессиональный подход технологического отдела компании – это эффективные решения и полное сопровождение процесса производства, начиная с момента получения чертежа. Блестящим примером такой технической поддержки является внедренная на крупном промышленном предприятии Украины эффективная технология обработки турбинных лопаток (рис. 7.48), благодаря которой оптимизированы затраты на переоснащение станочного парка и на 50 % увеличена производительность [39].

Деталь "Газотурбинная лопатка" является весьма ответственным элементом в аэрокосмической отрасли, обработка которого отличается жесткими требованиями по допускам и шероховатости поверхности. Согласно действующей технологии, обработка заготовки для турбинных лопаток сложной геометрии производится на устаревших электроэрозионных станках. Материал заготовки – труднообрабатываемая нержавеющая сталь 08X18H10T (рис. 7.49).

В связи с этим поставлена задача разработки и внедрения технологии механической обработки турбинных лопаток, сокращения инвестиций на модернизацию станочного парка производственного участка и оптимизации времени обработки без потерь производительности на предприятии. Решением задачи стала разработка технологии обработки детали "за два установка", т.е. ее поочередная обработка с каждой стороны. Обработку предложено производить на станке ФОЦ DNM400 южнокорейского производителя DOOSAN (рис. 7.50).



Рис. 7.48. Газотурбинная лопатка



Рис. 7.49. Заготовка газотурбинной лопатки



Рис. 7.50. Станок DOOSAN DNM400

Высокопроизводительное оборудование DOOSAN DNM400, обладающая высокой точностью обработки (позиционирование 5 мкм, повторяемость 2 мкм) успешно решает задачу изготовления турбинных лопаток с учетом требований по допускам и шероховатости поверхности изделия.

С одной стороны, предложенный метод не требовал технической сложной оснастки, тем не менее, переустановка детали могла снизить точность обработки. Кроме того, такая технология усложнялась разработкой и изготовлением специальных зажимных приспособлений. С другой стороны, полное изготовление детали "за один установ" предполагает приобретение пятиосевого фрезерного станка, что ведет к удорожанию проекта.

После проведенных расчетов и анализа показателей стоимости рассматриваемого оборудования и эффективности соответствующих технологий, специалисты компании ТаегуТек Украина остановились на варианте обработки лопатки при помощи трехосевого вертикального обрабатывающего центра DOOSAN DNM400.

Данное оборудование с поворотным столом и дополнительной осью обеспечило возможность изготовления требуемой детали за одну установку, позволив сократить машинное время на переустановку заготовки. Выбранная концепция подтвердила свою экономическую целесообразность, а также значительно превысила ожидания заказчика по требованиям к обработке.

Реализация проекта и результат. Предложенный метод был апробирован на тестовой детали, качество которой, а также точность соблюдения всех геометрических размеров, значительно превосходили старую технологию, дав заказчику "зеленый свет" для полноценного внедрения проекта. Следующим шагом в рамках предложенной технологии стала полная обработка лопатки "за один установ", включая прикорневые радиусы. Прежний метод и устаревшее оборудование не обеспечивали такой результат, т.к. требовали дополнительной дорогостоящей доработки вручную.

Благодаря комплексному подходу компании ТаегуТек Украина, реализованный проект увеличил производительность участка на 50 %. Такой эффект привел к сокращению инвестиций на модернизацию станочного парка – для выполнения требуемой программы заказчик приобрел 12 обрабатывающих центров DOOSAN (вместо 20 обрабатывающих центров, заложенных в первоначальный бюджет).

Дальнейшим развитием проекта "Обработка турбинных лопаток" стало приобретение 10 станков DOOSAN аналогичного класса, выполнение соответствующих пуско-наладочных операций и загрузки управляющих программ. Как результат, предприятие наладило серийный выпуск лопаток из нержавеющей стали уже через два года с момента обработки тестовой детали (рис. 7.51). Последующей поддержкой данного предприятия стало предоставление следующих услуг:

- усовершенствование управляющей программы на всю номенклатуру выпускаемых лопаток;
- обновление режущего инструмента, и, как следствие, дополнительное сокращение машинного времени на 15 % за счет упрощенной перенастройки оборудования;

- соответствующая подготовка операторов производственного участка в процессе проведения ПНР, что позволило расширить навыки подготовки и привязки требуемого режущего инструмента;
- своевременные профессиональные консультации сервисного Центра DOOSAN и ОГТ компании TaeguTec Украина.



Рис. 7.51. Изготовленная деталь "Лопатка"

Каждый реализованный проект – это не только реальная история успеха и развитие украинского машиностроения, но и стимул для компании TaeguTec Украина улучшать и внедрять новые технологии на базе постоянно обновляющегося инструмента компании TAEGUTEC (Южная Корея). Так, на сегодняшний момент рекомендованным решением для черновой обработки лопаток являются концевые фрезы с механическим креплением пластин.



Рис. 7.52. Серия фрез и пластин ChaseFeed

Благодаря более низкой стоимости, по сравнению с монолитными твердосплавными фрезами, инструмент со сменными насадками обеспечивает максимальную производительность и снижение затрат

именно для такого класса задач. И в данном случае, лучшим выбором станет высокопроизводительная серия фрез и пластин ChaseFeed (рис. 7.52). Серия фрез и пластин ChaseFeed специально разработана для эффективной черновой обработки, а дополнившая серию новая пластина SBMT обеспечивает лучшую производительность на высоких скоростях подачи при небольшой глубине резания.

7.6. Применение специального инструмента компании TaeguTec на предприятиях Украины

За 4 года активного применения режущего инструмента производства компании TaeguTec (Южная Корея) в Украине, специалисты компании TaeguTec Украина (г. Днепр) разработали и внедрили большое количество эффективных и уникальных решений по применению специального инструмента. В настоящее время компания TaeguTec Украина имеет в своем арсенале множество технологических решений практически для каждой отрасли промышленности.

Как известно, в массовом и крупносерийном производстве одним из основных параметров, влияющим на себестоимость изделия, является время его обработки. Для обеспечения минимального времени обработки без применения специального и комбинированного (фасонного) инструмента не обойтись. Специальный режущий инструмент применяется с целью выполнения одновременно нескольких операций или обработки нескольких поверхностей за одну операцию. Этим достигается существенная экономия основного (машинного) времени, а также вспомогательного времени, затрачиваемого на смену инструмента и т.п.

Фрезерный специальный инструмент – это, как правило, фасонный и комбинированный инструмент, изготавливается со специальным сложным профилем, который полностью повторяет геометрию обрабатываемой детали. Например, для одного успешного украинского предприятия специалистами компании TaeguTec Украина разработаны фасонные фрезы (рис. 7.53), соответствующие всем требованиям Заказчика. Эти фрезы имеют специальный профиль, с помощью которого производится обработка всей криволинейной геометрии детали за один проход. Пластины, устанавливаемые на корпусе фрезы, имеют от 2 до 8 режущих кромок в зависимости от конфигурации. Тип этих пластин – тангенциальный, что гарантирует высокую их стойкость в жестких условиях работы и снижает нагрузки на оборудование.

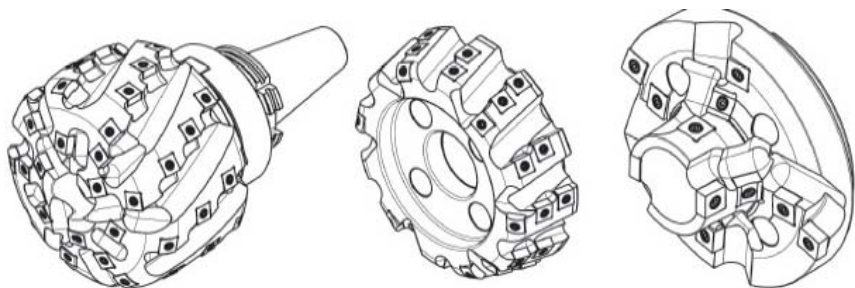


Рис. 7.53. **Фасонные фрезы, разработанные специалистами компании TaeguTec Украина**

Примером комбинированного фрезерного инструмента являются также специально разработанные комбинированные фрезы TaeguTec (рис. 7.54), которые были внедрены на предприятии железнодорожной направленности. На корпусах этих фрез устанавливаются стандартные пластины TaeguTec. Обе фрезы работают в паре и выполняют обработку одновременно до десятка поверхностей.

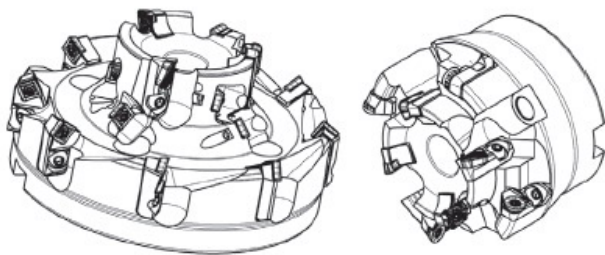


Рис. 7.54. **Специальные комбинированные фрезы**

Сверлильный специальный инструмент – это, как правило, комбинированный и многоступенчатый инструмент. С помощью комбинированных сверл можно выполнить за один проход (переход) такие операции как изготовление отверстий с фаской, с цековкой и другие. Операции сверления часто накладывают свои дополнительные требования, но в результате успешного внедрения сложного комбинированного инструмента значительно сокращается общее количество используемого инструмента и экономится машинное и вспомогательное время.

Один из украинских заказчиков поставил задачу сокращения машинного времени при обработке детали "Ступица". С помощью суще-

ствующего стандартного инструмента выполнить эту задачу практически невозможно, т.к. применявшийся ранее стандартный инструмент отличался также высоким качеством. Специалистами ТаегуТес были разработаны и успешно внедрены два специальных комбинированных сверла (рис. 7.55). Назначение первого сверла – рассверливание отверстия с припуском под чистовую расточку с одновременным образованием фаски. Корпус сверла выполнен с конусом DIN69871 40. Второе сверло предназначено для сверления отверстия с одновременной его цековкой.

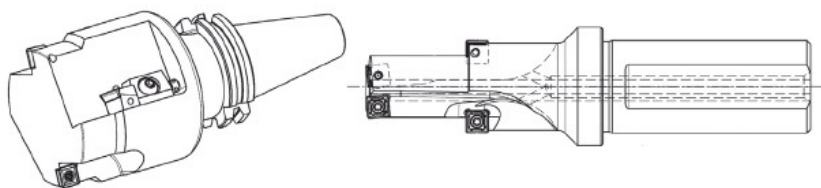


Рис. 7.55. Комбинированные сверла: для рассверливания отверстия с припуском под чистовую расточку и с одновременным образованием фаски

Все комбинированные сверла изготовлены с механическим креплением пластин. Режущие пластины имеют вид квадрата с четырьмя режущими кромками. Интересно, что в этом случае было применено и третье стандартное монокристаллическое сверло, (выбранное из общей номенклатуры режущего инструмента ТаегуТес), устанавливаемое в общий корпус комбинированного сверла. Такое решение позволило существенно снизить предполагаемые расходы заказчика на дорогой специальный инструмент. Для выполнения фаски на комбинированном корпусе также были установлены две квадратные пластины. В результате достигнуто существенное снижение машинного времени – с 25 мин до 14 мин.

На территории Украины многие предприятия используют для изготовления серийных токарных деталей токарные автоматы и полуавтоматы советского производства. У этих станков есть огромное преимущество в производительности по сравнению даже с современными станками с ЧПУ. Но есть и недостатки, такие как, возможность обработки деталей лишь по одной координате. Соответственно, для изготовления сложного профиля детали необходимо изготавливать либо несколько инструментов, либо использовать фасонный инструмент. В настоящее

время технологи отдают предпочтение напайному фасонному инструменту, так как станки работают с небольшими скоростями резания, а уровень их технического состояния весьма низок. В этих условиях считается нерациональным использование дорогостоящих специальных твердосплавных инструментов зарубежного производителя.

Компания ТаегуТес является одной из немногих компаний, в которой могут изготавливать фасонный инструмент для любого оборудования и для любых условий обработки. На территорию Украины компания постоянно предоставляет твердосплавные инструменты с механическим креплением пластин для замены фасонного напайного инструмента. В чем их преимущество? Если пластина одинакового профиля с напайным инструментом, то гарантированно обеспечивается увеличение стойкости инструмента за счет качества изготовления пластины. Также гарантируется постоянство стойкости пластины, а при износе пластины отсутствует необходимости извлекать весь инструмент – необходимо заменить лишь пластину, что многократно сокращает время, затрачиваемое на переналадку и переточку инструмента.

Фасонный инструмент получил применение не только на агрегатных станках. Для сокращения времени обработки фасонные резцы используются также на современных металлообрабатывающих станках и обрабатывающих центрах. Подтверждением тому служит следующий пример. Обработка фасонной канавки на предприятии традиционно производилась напайным инструментом, для переточки которого был приобретен специальный станок. Стойкость напайного инструмента небольшая, а время для переналадки инструмента составляло более 7 – 10 минут. Для серийного производства это очень большие цифры. В результате совместной работы технологов предприятия и специалистов компании ТаегуТек Украина разработан специальный резец (рис. 7.56) с механическим креплением пластины. Стойкость пластины увеличилась в несколько раз, а время переналадки пластины уменьшилось до минуты.

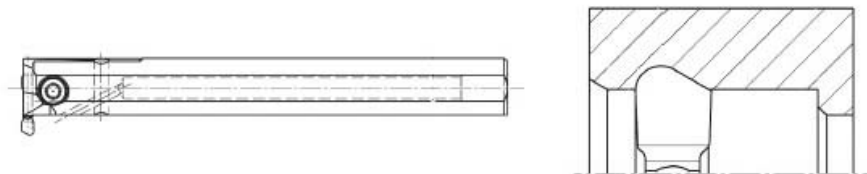


Рис. 7.56. Специальный резец с механическим креплением пластины

Следующий пример. Предприятие получило заказ на изготовление детали "корпус". Сложность изготовления данной детали состояла в изготовлении конструктивного элемента "седло", обработка которого требует применения специального "седельного" инструмента. Конструктивный элемент "седло" располагается в отверстии на достаточно большой глубине на торце детали. Сложность обработки обусловлена также высокой твердостью обрабатываемого материала (HRC 40 – 45). Поэтому сотрудниками компании ТаегуТек Украина совместно со специалистами предприятия был спроектирован "седельный" резец (рис. 7.57). После изготовления инструмента в южнокорейской компании ТаегуТес он был успешно внедрен на предприятии в Украине.

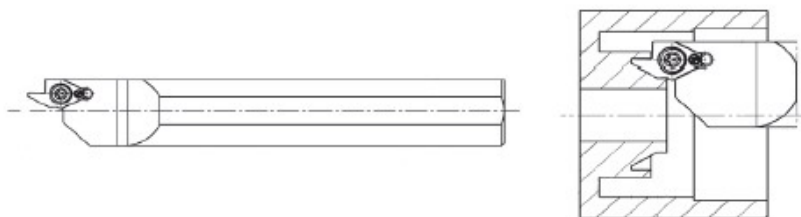


Рис. 7.57. "Седельный" резец

Следует отметить, что, несмотря на нестандартность решаемых задач и несерийность данной оснастки и инструмента, сроки разработки и производства полностью устраивают заказчиков. Это достигается в результате тесной кооперации специалистов компании ТаегуТес, работающих в Украине и в Южной Корее. В Украине разрабатывается техническое задание, созревает идея его реализации и рассчитывается экономический эффект. Специалисты же в Южной Корее проверяют и дорабатывают предложенные эскизы проектов, а затем качественно выполняют опытные образцы. При необходимости в испытательном центре компании ТаегуТес в Южной Корее производится тестовая партия изделий, которая затем направляется заказчику для контроля испытаний.

7.7. Экономическая целесообразность применения нового прогрессивного инструмента в производстве

Некоторая стабилизация экономики в Украине обязательно сказывается на количестве новых современных производств, ориентированных на применение станков с ЧПУ. Пути решения вопроса создания

или возобновления производства разные. Это может быть закупка новейших обрабатывающих центров или модернизация старого оборудования современными системами ЧПУ и электроавтоматикой. Но главной целью является достижение высоких показателей производительности и качества. Одним из естественных этапов в решении этой задачи является подбор оснастки и инструмента. Интересное наблюдение – понимание важности этого этапа приходит немного позже, когда оборудование есть, материалы закуплены, персонал зарплату получает, а продукции все нет и нет. Причина банальна и даже нормальна – идет процесс отладки технологии.

Закупка инструмента и оснастки влечет за собой новые расходы, ошибки, корректировку себестоимости и др. Как добиться максимальных результатов на этом этапе, и какие подходы применимы в обеспечении производства инструментом – рассмотрим ниже, на примере внедрения инструмента крупнейшей инструментальной компании TaeguTec.

Вначале следует оценить целесообразность анализа этого вопроса. На рис. 7.58 представлены составляющие себестоимости продукции. Как видно, доля режущего инструмента в себестоимости очень невелика – около 3 %, поэтому ее первоначально в бизнес-плане даже не рассматривают.



Рис. 7.58. Составляющие себестоимости продукции

На общем фоне производственных затрат это не очень большая сумма и часто собственники предприятий соглашаются на первом этапе оплатить ее – лишь бы начать выпуск продукции. И это абсолютно верный подход, но только вначале. В дальнейшем начинается борьба за каждый процент себестоимости. И этот процесс не так уж прост, а главное, не ограничивается снижением себестоимости в рамках вышеупомянутых 3 %.

Методов снижения расходов на механическую обработку может быть всего три:

- снижение стоимости инструмента как расходного материала;
- увеличение стойкости инструмента, а значит, уменьшение объемов закупки инструмента;
- замена инструмента на более производительный инструмент с целью увеличения скорости резания, либо изменение всего технологического процесса обработки.

Первый и второй методы понятны, имеют прямое влияние на бюджет закупок и поэтому наиболее применимы среди служб, контролирующих закупки уже работающих предприятий. На рис. 7.59 – 7.62 видно, насколько эффективны эти методы.



Рис. 7.59. Влияние снижения стоимости инструмента как расходного материала на составляющие себестоимости продукции

В первом случае удалось снизить стоимость инструмента на целых 20 %, в результате чего себестоимость продукции уменьшилась на 0,6 % (рис. 7.59). Во втором случае в результате замены производителя инструментов удалось добиться увеличения стойкости инструмента в 2 раза. В итоге достигнуто снижение себестоимости на 1,5 % (рис. 7.60). Это тоже хороший результат.



Рис. 7.60. Влияние увеличения срока службы инструмента на составляющие себестоимости продукции

Третий случай – это приобретение у "серьезного" производителя инструментов дорогостоящего и высокоэффективного инструмента, увеличивающего скорость резания. Что это значит? Например, в результате применения нового дорогостоящего инструмента удалось увеличить производительность на 20 %. В результате в расчете на одну деталь уменьшены затраты на оплату труда, накладные и административные расходы, снижен износ оборудования. Из рис. 7.61а видно, что такой подход позволил снизить себестоимости на 15 %. И даже если этот инструмент будет в 1,5 раза дороже ранее применявшегося инструмента, все равно получится экономия до 13,5 % (рис. 7.61б). Не правда ли – отличный результат! За счет этой экономии можно произвести и реализовать дополнительную продукцию и получить дополнительную прибыль (рис. 7.62).



а



б

Рис. 7.61. Влияние увеличения скорости резания (производительности обработки) на составляющие себестоимости продукции



	Сейчас	30 % скидка	60 % увеличе- ние срока службы	20 % увеличе- ние скорости резания
Переменные издержки				
Режущие инструменты	0,30\$	0,21\$	0,20\$	0,45\$
Заготовка	2,20\$	2,20\$	2,20\$	2,20\$
Фиксированные издержки				
Машины	2,60\$	2,60\$	2,60\$	2,60\$
Труд	2,80\$	2,80\$	2,80\$	2,24\$
Строительство и управление	2,10\$	2,10\$	2,10\$	1,68\$
Затраты на деталь	10,00\$	9,91\$	9,90\$	8,65\$
Экономия		1 %	1 %	15 % и более

Рис. 7.62. Пример влияния стоимости режущего инструмента и увеличения скорости резания на себестоимость продукции

На рис. 7.62 приведены конкретные данные о влиянии снижения стоимости инструмента как расходного материала, увеличении срока службы инструмента и увеличении скорости резания (производительности обработки) на себестоимость продукции. Как видно, в последнем случае достигается наибольший эффект – себестоимость продукции уменьшается на 15 % и более.

7.8. ESPRIT – лучший программный инструмент для производства

Комплекс ESPRIT, разработанный компанией DP Technology (США), используют крупнейшие западные производители – лидеры в своих сегментах рынка [32]. В их числе – Boeing, NASA, Peugeot, Citroen, Audi, Volvo, Ford, Man, Nakamura-Tome, MoriSeiki, Mazak, Doosan, Fanuc, Завод "Салют", ВСМПО-АВИСМА, НПО "Сатурн" (Россия), ПО "ЮжМаш", Крюковский вагоностроительный завод (Украина) и многие другие предприятия, где применяются современные металлорежущие станки с ЧПУ

типа "обрабатывающий центр" (рис. 7.63). В целом управляющие программы с помощью ESPRIT разрабатывают на 15 000 предприятиях по всему миру. На украинских заводах с ESPRIT пока знакомы мало, хотя его применяют уже на сотнях заводов России – в основном при программировании электроэрозионной и пятиосевой фрезерной обработки. Для удобства российских пользователей интерфейс ESPRIT переведен на русский язык.



Рис. 7.63. Современный обрабатывающий центр

Walter Lentz, главный NC-программист компании Halliburton Manufacturing: *"Раньше на разработку программ для наших токарных и фрезерных станков мы затрачивали дни, плюс как минимум еще день для отладки на станке. Теперь же для этого требуются часы или даже минуты. Сегодня для создания 200 новых управляющих программ в месяц и модификации 60 000 уже готовых мы обходимся всего десятью программистами".*

Специалисты инжиниринговой компании "ТвисТ" активно внедряют ESPRIT для разработки управляющих программ при внедрении технологического оборудования на заводах заказчиков. Инжиниринговая компания "ТвисТ" имеет большой практический опыт в инновационных проектах по техническому перевооружению украинских машиностроительных предприятий (рис. 7.64). Реализовано более 250 промышленных проектов, поставлено и введено в действие более 150 единиц технологического оборудования.

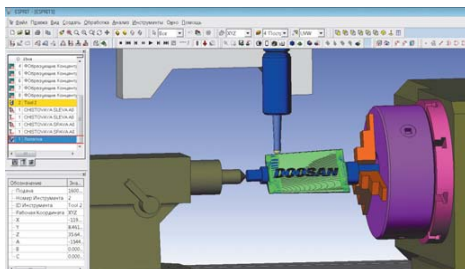
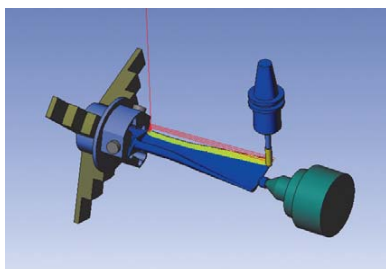
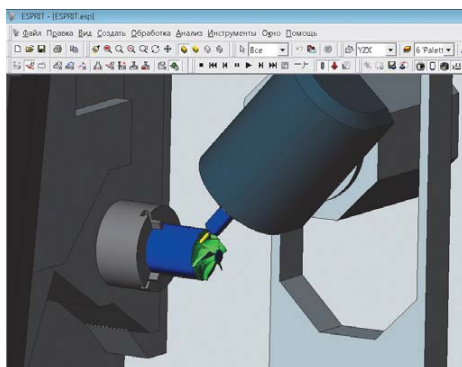
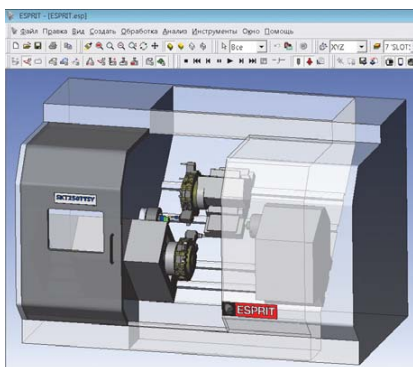


Рис. 7.64. Элементы комплекса ESPRIT

Сергей Кулик, инженер отдела программирования станков с ЧПУ инжиниринговой компании "ТвистТ": *"При запуске токарного обрабатывающего центра DOOSAN PUMA 700 XLY (PMЦ 5.5 м, ось Y) для изготовления крупногабаритных валов на предприятии АО "Сумской завод "Насосэнергомаш" использовался программный комплекс ESPRIT. Фрезерный модуль постпроцессора обрабатывался непосредственно возле станка. В результате удалось достигнуть полной автоматизации выдачи данных управляющих программ без последующей "ручной" корректировки и ускорить введение сложнейшего станка в эксплуатацию"*.

Почему ESPRIT так популярен среди разработчиков управляющих программ (УП) и так высоко ценится владельцами предприятий? Потому, что его применение позволяет:

- затрачивать на создание и отладку управляющих программ не дни, а часы или даже минуты;

- применять одно САМ-средство для программирования обработки на всех станках с ЧПУ в цехе — как самых простых, так и самых сложных;
- экономить производственные ресурсы и оберегать от поломки дорогостоящее оборудование, инструмент и оснастку, что достигается благодаря возможности быстро обнаружить и исправить ошибки в обработке еще до передачи УП в цех;
- использовать при подготовке УП как лучший мировой опыт, так и опыт собственных специалистов, благодаря наличию в системе ESPRIT пополняемой базы знаний KnowledgeBase и возможности автоматического применения оптимальных режимов обработки;
- получить важные конкурентные преимущества: повысить качество обработки, уменьшить машинное время, ускорить подготовку выпуска новых изделий, сократить сроки окупаемости станков.

Чубенко М. Г., ведущий программист ПО "Южный машиностроительный завод" г. Днепр: *"В современных условиях производства деталей путем обработки резанием требуется высокий уровень автоматизации технологического процесса, в частности использование надежных САМ – CAD систем. На нашем предприятии успешно применяются САМ системы: ESPRIT, DELCAM, MASTERCAM. Хочется выразить особую благодарность высококвалифицированным специалистам, сопровождающим каждый программный продукт. Однако специфика нашего производства требует эффективного обслуживания многоосевого и многошпиндельного оборудования. Мы сделали выбор в пользу ESPRIT. Комплекс ESPRIT позволяет нашим пользователям легко решать вопросы, связанные с автоматизацией программирования станков любой сложности за счет возможности полного моделирования процесса обработки деталей. Одним из многочисленных преимуществ ESPRIT является доступ к огромной базе трехмерных моделей станков разных производителей и базе рабочих постпроцессоров всех известных систем ЧПУ. Кроме того, комфортная работа с данной программой обеспечивается возможностью создания пользовательских 3D-моделей оборудования, а также благодаря великолепному сопровождению от представительства в Украине в любое время суток".*

Все виды современной механической обработки

Средствами ESPRIT эффективно программируются все виды обработки, которые востребованы современным машиностроительным производством. В их числе 2–5-осевая фрезерная обработка, 2–22-осевая токарная обработка, обработка на многофункциональных

токарно-фрезерных центрах и станках с осью В, а также 2–5-осевая электроэрозионная обработка (рис. 7.65).

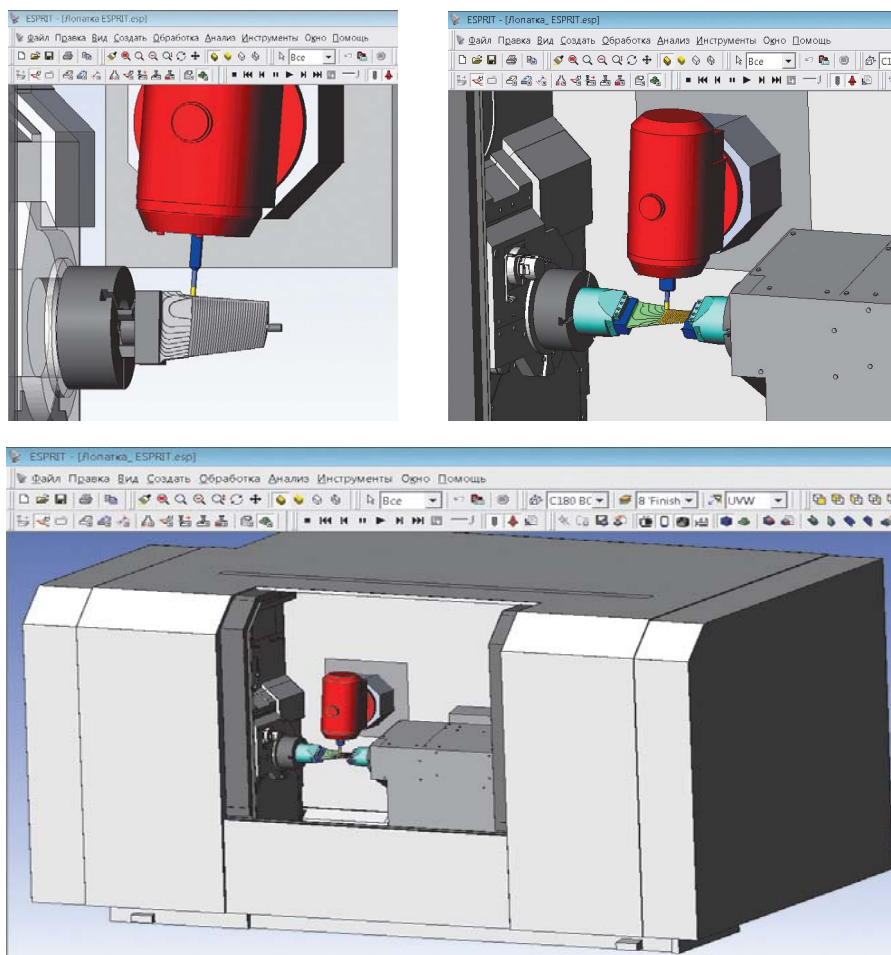


Рис. 7.65. 3D модели в комплексе ESPRIT

Легко, удобно, быстро

Возможности программного комплекса позволяют легко и быстро (и это без преувеличения!) разрабатывать управляющие программы, как для простых, так и для самых сложных станков. Основанный на платформе Windows, комплекс ESPRIT использует все преимущества этой операционной системы – удобный и настраиваемый интерфейс, инте-

грацию с Microsoft Office для создания документации, поддержку OpenGL, online-помощь, основанную на технологии HTML. Благодаря наличию обширного набора трансляторов, ESPRIT напрямую работает с 3D-моделями из любой САПР, импортируя их без каких-либо повреждений. Это позволяет исключить необходимость редактирования или восстановления исходной геометрии. К тому же при разработке управляющих программ появляется возможность использования 3D-моделей любого типа: твердотельные, поверхностные, каркасные, фасетные (в формате STL). Все это значительно повышает эффективность процесса разработки управляющих программ и уменьшает его длительность. С помощью встроенного языка Microsoft Visual Basic можно создавать макросы для автоматизации любых этапов программирования. Благодаря этому, для рутинных операций, на которые раньше уходили часы, потребуется лишь несколько минут.

Красильников Д.А., главный технолог ОАО Казанский оптико-механический завод: *"После того как мы приобрели современный и сложный токарно-фрезерный станок, нам потребовался хороший инструмент для его программирования. Обратили внимание на ESPRIT. Компания поставщик провела обучение наших специалистов, по завершению которого они самостоятельно подготовили управляющие программы для тестовой детали и отработали её на станке. Мы довольны результатом. Действительно, ESPRIT легко освоить и просто использовать. А для программирования сложного оборудования он просто незаменим"*.

Лучшие методы плюс производственный опыт

ESPRIT KnowledgeBase позволяет замкнуть цепь между разработчиками управляющих программ и цехом, так как с ее помощью весь приобретенный опыт сохраняется в единой базе знаний и впоследствии может быть легко использован. Любой технолог-программист одним нажатием кнопки может выбрать наиболее подходящий метод обработки, исходя из особенностей новой детали. При этом система автоматически предлагает оптимальный процесс обработки, режущий инструмент и режимы резания. Освобождая технологов-программистов от рутинных операций, KnowledgeBase дает им возможность сосредоточиться на совершенствовании процессов обработки, а предприятию – выйти на принципиально новый уровень производственных возможностей. Каждый раз, когда при создании управляющей программы используется база знаний, процесс обработки автоматически проверяется на соответ-

ствие лучшим методикам и обновляется, что позволяет постоянно повышать качество обработки. Таким образом, KnowledgeBase помогает устранить из процесса разработки УП догадки и предположения и обеспечить лучший результат на каждом её этапе. Все это вместе способствует повышению производительности и рентабельности производства. Универсальный постпроцессор ESPRIT позволяет быстро создавать качественные управляющие программы в G-кодах. Каждый пользователь ESPRIT получает полный доступ к обширной библиотеке готовых постпроцессоров для конкретных станков и стоек ЧПУ, в том числе, сертифицированных ведущими производителями оборудования. Благодаря открытой архитектуре ESPRIT, пользователи могут без особого труда корректировать их, исходя из своих предпочтений и производственных требований.

Визуализация и проверка на столкновения

Быстрая, точная и надежная проверка обработки средствами ESPRIT позволяет не прибегать к дорогостоящей отладке управляющих программ непосредственно на станке. Визуализация процесса обработки в среде ESPRIT даст полную уверенность в его правильности, позволяя сравнить модель детали, "обработанной" в ESPRIT, с ее конструкторской версией. Система проводит всестороннюю проверку УП, моделируя всю среду обработки – станок, инструмент, оснастку, приспособление, заготовку и деталь. Высококачественная визуализация обработки в режиме реального времени и надежный метод обнаружения столкновений гарантируют, что даже самые сложные детали будут корректно изготовлены с первого раза, а дорогой станок, инструмент и оснастка не будут повреждены. Таким образом, применение ESPRIT позволит сократить простои оборудования, максимально увеличить производительность и уменьшить стоимость станочной обработки.

Всегда с поддержкой

Каждый день перед производственниками встают всё новые задачи, и для их успешного решения требуются новые подходы. Система поддержки ПО ESPRIT обеспечивает полный доступ к различным ресурсам для изучения возможностей программного продукта, автоматизированное обновление ПО, доступ к web-ресурсам ESPRIT и подписку на журнал "ESPRIT de CORPS", где обсуждаются актуальные проблемы программирования станочной обработки и способы их решения. Пользователи, подписавшиеся на активную поддержку, систематически получают обновления программного продукта. Каждый новый релиз предла-

гает значительное расширение функциональных возможностей, сделанное с учетом многочисленных пожеланий пользователей. Отдача от таких обновлений будет высокой, а затраты времени на освоение новых возможностей – минимальными.

7.9. Технологическое обеспечение качества механической обработки поршней

ПАО "Автрамат" более 80 лет занимается производством деталей цилиндро-поршневой группы для автомобилей, тракторов и сельхозтехники, тепловозов, компрессоров и других машин, в которых используется поршневой двигатель с кривошипно-шатунным механизмом. Как известно, в двигателе поршень работает в самых тяжелых условиях. Во время работы он подвергается высоким циклическим, механическим и тепловым нагрузкам, которые повторяются тысячи раз в минуту (максимальное ускорение поршня во время работы современного ДВС достигает величин $15\,000 - 20\,000\text{ м/с}^2$, что соответствует перегрузке $1\,500\text{ g} - 2\,000\text{ g}$) [12]. Это вызывает значительные механические напряжения с опасностью усталостного разрушения поршня и требует разработки конструкций, обеспечивающих безопасное распределение напряжений в поршне, а также применения материалов с высокими механическими характеристиками [20].

Установлено, что температура газов в процессе сгорания может достигать $1\,800 - 2\,600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эта температура значительно превышает точку плавления поршневого сплава и, чтобы не плавиться, поршень должен эффективно передавать тепло сгорания стенке цилиндра и охлаждающей жидкости. Чтобы исключить усталостное разрушение поршня в связи с высокими термическими напряжениями, а также исключить расширение (сжатие) поршня, вероятность его заклинивания, необходимо обеспечить достаточную теплопередачу, использовать бочкообразную форму поршня и изготавливать его из сплавов с высокой теплопроводностью. При этом важно снизить интенсивность трения между поршнем, поршневыми кольцами и стенкой цилиндра при скольжении, и тем самым уменьшить поверхностный износ и расход масла. Это достигается созданием поверхностей с низким коэффициентом трения, заданным распределением давления боковой поверхности поршня на стенку цилиндра и антифрикционным покрытием юбки поршня.

Материалы, из которых изготавливаются поршни, должны обладать высокой механической прочностью и хорошей обрабатываемостью; низкой плотностью для уменьшения инерционных сил, вызванных возвратно-поступательным движением и переходными режимами; высокой теплопроводностью; коэффициенты теплового расширения материала поршня и стенки цилиндра должны быть близки по значению для уменьшения зазора; материал должен обладать высокими антифрикционными свойствами для предотвращения заедания и снижения потерь на трение и высокой износостойкостью. Сплавы алюминия с некоторым количеством легирующих элементов (кремний, медь, магний, никель и др.) удовлетворяют вышеперечисленным требованиям. Кремний в количестве 5 – 22 % придает сплаву жаропрочность, уменьшает коэффициент теплового расширения, улучшает литейные свойства, но при этом "охрупчивает" сплав и ухудшает обрабатываемость. Медь в количестве 1 – 8 % улучшает механические свойства материала. Магний (0,8 – 1,3 %) придает сплаву высокие механические характеристики, повышая предел прочности. Никель (0,5 – 2 %) придает сплаву жаропрочность и жаростойкость. Титан (0,05 – 2 %) улучшает механические свойства материала, за счет создания с алюминием интерметаллидных соединений уменьшает ползучесть. Различают три типа алюминиевых сплавов, применяемых в производстве поршней, которые отличаются главным образом содержанием кремния: 1) доэвтектические сплавы (содержание кремния ниже, чем в точке эвтектики – обычно около 9 %, а для сплавов алюминий-кремний точка эвтектики 11 – 13 %); 2) эвтектические сплавы (содержание кремния составляет 11 – 13 % – в зависимости от количества других легирующих элементов); 3) заэвтектические сплавы, в них содержится значительное количество нерастворенного кремния в алюминии, что обеспечивает повышение износостойкости, но ухудшает технологические свойства (содержание кремния может колебаться от 13 до 25 %). Основным сплавом, применяемым в ОАО "Автрамат" для производства поршней, является эвтектический сплав АК12М2МгН(АЛ25). В некоторых дизельных двигателях большой мощности используются чугунные (стальные) поршни или составные поршни с головкой из стали (чугуна) в тех случаях, когда термические и механические нагрузки слишком велики для алюминия.

Типовой технологический процесс производства поршней (рис. 7.66) включает: заливку в кокиль; термообработку; черновую механическую обработку наружных поверхностей; черновую обработку отверстия под

поршневой палец, чистовую обработку по наружной поверхности с приданием ей овально-бочкообразной формы и точением канавок под поршневые кольца, расточку канавок под стопорные кольца в отверстии под поршневой палец, обработку камеры сгорания (для поршней дизельных двигателей), чистовую обработку пальцевого отверстия; нанесение покрытий.



Рис. 7.66. Изготавливаемые поршни

В настоящее время, благодаря многолетнему опыту технологический процесс изготовления поршня фактически доведен до совершенства, осуществляется с применением современного оборудования и режущих инструментов. Вместе с тем, имеет место и ряд нерешенных проблем, связанных главным образом с механической обработкой, в частности, с обработкой наружной поверхности поршня. С целью снижения стоимости и повышения ресурса работы поршней современных ДВС мировые тенденции привели к уходу от нанесения антифрикционных покрытий и замене их на микрорельеф на наружной поверхности поршня и соответственно на внутренней стороне цилиндра ДВС. Микрорельеф – это винтовая линия по наружной поверхности поршня с глубиной профиля порядка 0,014 мм, шагом 0,3 мм и углом раскрытия 170° (рис. 7.67).

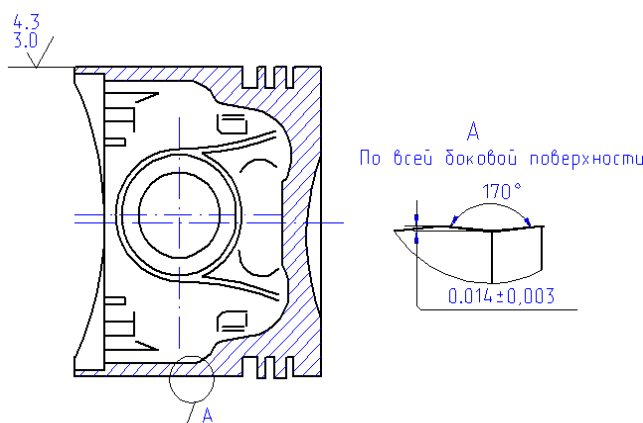


Рис. 7.67. Эскиз микрорельефа на наружной поверхности поршня

В отличие от антифрикционных покрытий, которые предотвращают пару цилиндр–поршень от задиоров лишь в относительно короткий период времени (при обкатке двигателя), данный микрорельеф работает на протяжении всего жизненного цикла пары. В результате микрочастички масла, попадая вовнутрь микрорельефа поверхности, обеспечивают "жидкое трение" в паре цилиндр–поршень, увеличивая тем самым ресурс работы двигателя. Вполне очевидно, что данное решение является важнейшим резервом повышения эффективности ДВС. Однако, реализация его на практике представляет значительные сложности. Подтверждением тому является относительно низкая отражательная способность обработанной наружной поверхности поршня, что связано со сложностью обеспечения оптимального соотношения параметров шероховатости поверхности R_a/R_{max} . Согласно работе [163], существенно повысить отражательную способность обработанной поверхности можно при значениях $R_a/R_{max} = 0 \dots 0,29$. Поэтому реализация данных значений R_a/R_{max} при обработке наружной поверхности поршня представляется важной и актуальной задачей, направленной на повышение эксплуатационных свойств обработанной поверхности и на обеспечение требуемого товарного вида изготавливаемого поршня. В связи с этим был проведен комплекс экспериментальных и теоретических исследований по технологическому обеспечению высокой отражательной способности наружной поверхности поршня на основе установления ее связи с микрошероховатостью поверхности. Экспериментально установлено, что чем

больше высота микронеровностей обработанной поверхности, тем ниже ее отражательная способность. Например, приведенная на рис. 7.68а профилограмма обработанной поверхности соответствует ее высокой отражательной способности, тогда как для профилограммы, показанной на рис. 7.68б, характерна "матовость" поверхности, что свидетельствует о ее высокой светорассеивающей способности. Этим доказано, что повысить отражательную способность поверхности можно уменьшением высоты микронеровностей профиля.

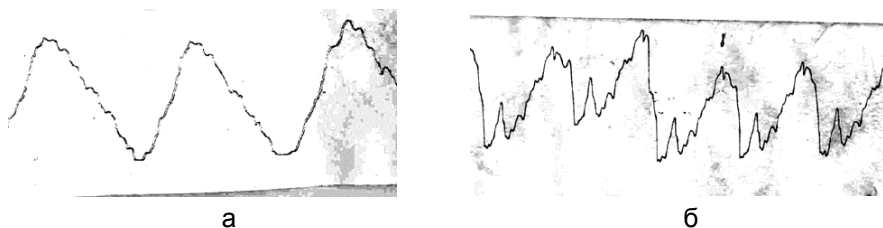


Рис. 7.68. Профилограммы обработанной поверхности

К сожалению, реализовать на практике профиль поверхности, показанный на рис. 7.68а, сложно. Как правило, имеет место профиль поверхности, показанный на рис. 7.68б. Это может быть связано с износом лезвия резца и образованием на нем значительных микронеровностей, возникновением вибраций в процессе резания, особенностью обработки юбки поршня по копиру (т.е. обработки сложнопрофильной поверхности), а также прерывистым характером процесса резания, обусловленным наличием на обрабатываемой поверхности отверстия под поршневой палец. Очевидно, все указанные причины связаны с силовым фактором процесса резания и поэтому основным путем повышения эффективности в данном случае необходимо рассматривать снижение сил резания и повышение износостойкости инструмента.

В связи с этим, в настоящее время вместо резцов из твердого сплава типа ВК6 при окончательной обработке наружной поверхности поршня используются алмазные резцы [4; 19] из поликристаллических алмазов типа АТП, PCD, PKD, обладающие более высокой режущей способностью и повышенной износостойкостью. Экспериментальные исследования показали, что при обработке алмазным резцом (рис. 7.69) на сплошной наружной поверхности поршня может быть достигнута требуемая микрошероховатость поверхности и соответственно ее высокая

отражательная способность [98]. При обработке участка поверхности, на котором расположено отверстие под поршневой палец, в силу прерывистости процесса резания отражательная способность обработанной поверхности ниже. Следовательно, в этом случае в связи с ударным характером взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью происходит повышенный износ и затупление инструмента, в технологической системе возникают вибрации, что собственно и приводит к ухудшению микрошероховатости поверхности (увеличению отношения $R_a / R_{\max} > 0,29$) и снижению ее отражательной способности.

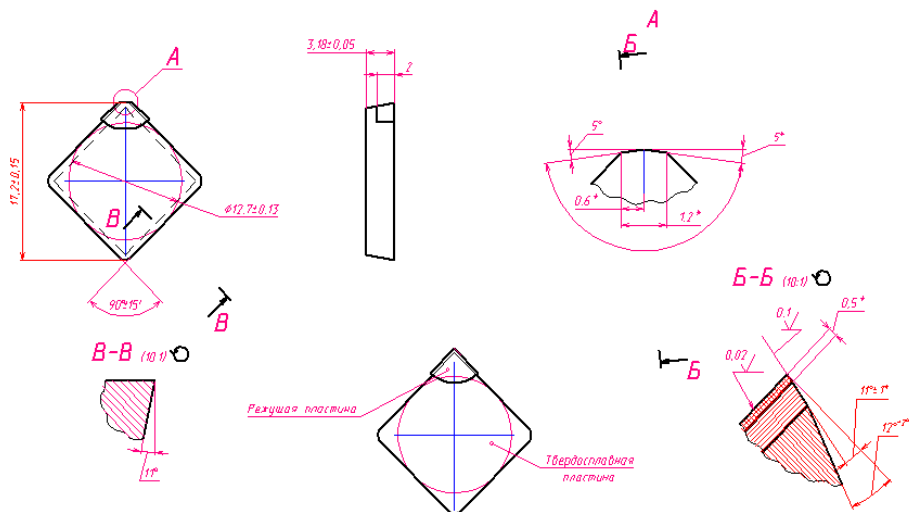


Рис. 7.69. Геометрические параметры резца

Установлено также, что после определенной приработки алмазного резца, когда его режущее лезвие принимает устойчивую (износостойкую) форму, микрошероховатость обработанной поверхности уменьшается, что ведет к повышению ее отражательной способности. При этом установлено, что скорость процесса приработки тем выше, чем меньше зернистость исходного порошка, из которого запекался алмаз. Оптимальная зернистость исходного порошка должна быть не более 1 ... 1,5 мкм, т.к. зернистость существенно влияет на остроту режущей кромки инструмента (рис. 7.69) при его заточке. С целью поиска наиболее эффективного решения проведены стойкостные испытания алмазных резцов различных производителей (Украина, Россия, ЕЭС, Корея и Япония).

Была поставлена задача установления наилучшего соотношения параметров цена/качество, поскольку стоимость подобного инструмента различных производителей колеблется в очень широких пределах и, зачастую, отличается до 10 раз. Как следует из табл. 7.7, наилучшие результаты по периоду стойкости получены при обработке резцом производителя ЕЭС № 2. Однако, соотношение параметров цена/качество лучше у резцов производства Украины. Установлено, что чем меньше зернистость исходного порошка, из которого изготовлен инструмент, тем выше отражательная способность обработанной поверхности.

Таблица 7.7

**Экспериментальные значения стойкости резцов
различных производителей и шероховатости
обработанной поверхности**

(условия обработки: обрабатываемый материал – алюминиевый сплав АК10М2Н;
режим резания: $t = 0,1$ мм; $V = 257,5$ м/мин; $S = 0,32$ мм/об.;
геометрические параметры резца: $\alpha = 11^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\varphi = \varphi_1 = 5^\circ$; $\lambda = 0^\circ$)

Произ- во- дитель РИ	Шеро- хо- ватость, Ra	Период стойкости, T _{ст}		Период стойкости до блеска, T _{ст бл}		Соотношение цена / качество, C = Ц/T _{ст}				
		T _{ст}	T _{ст}	T _{ст} мин бл	T _{ст м бл}	по блеску, C _{бл}	по нара- ботке, C _{рес}	по блеску, C _{бл}	по нара- ботке, C _{рес}	
		мкм	мин	м	мин	м	грн./мин	грн./мин	грн./м	грн./м
Украина	4,3...3,0	2054,3	528952,4	813	209419,7	0,150	0,060	0,001	0,0002	
ЕЭС №1	4,3...3,0	5244,1	1350244,4	960	247172,8	0,904	0,166	0,0035	0,0006	
ЕЭС №2	4,3...3,0	5922,7	1524975,2	797	205179,4	0,840	0,113	0,0033	0,0004	
Россия	4,3...3,0	3774,0	971729,5	1734	446470,3	0,202	0,093	0,001	0,0004	

Таким образом, выявлена четкая взаимосвязь между стойкостью резца, микрошероховатостью и отражательной способностью обработанной поверхности. Чем выше стойкость резца, тем выше качество обработки с точки зрения обеспечения микрошероховатости и отражательной способности поверхности.

Поликристаллический алмаз состоит из микроскопических частиц алмаза и связующего вещества. Под воздействием высокого давления и

температуры частицы спекаются, и получается чрезвычайно твердый материал с уникальными свойствами. Между зернами алмаза образуется непосредственная связь, остается лишь немного островков связки, тогда как, например, у поликристаллического кубического нитрида бора частицы непосредственно друг с другом не связаны.

Поликристаллические алмазы классифицируют по размеру зерна (средним значениям): 2 мкм (мелкозернистый поликристаллический алмаз), 10 мкм (среднезернистый поликристаллический алмаз) и 25 мкм (крупнозернистый поликристаллический алмаз).

Крупнозернистый поликристаллический алмаз обладает большей прочностью и износостойкостью по сравнению со средне- и мелкозернистыми алмазами. Вследствие этого он обеспечивает высокую стойкость при черновой обработке, однако не обеспечивает высокого качества поверхности, поэтому не используется при чистовой обработке.

Таким образом, экспериментально установлено, что по соотношению параметров цена/качество из всего многообразия предлагаемых на рынке резцов (с точки зрения их стоимости) наиболее эффективно использовать резцы производства Украины. Однако в силу того, что зарубежные производители применяют при изготовлении инструментов более мелкодисперсные порошки, добиться улучшения отражающей способности обработанной поверхности данным инструментом проще, чем отечественным.

Выводы к разделу 7

1. Экспериментально установлено, что применение прогрессивных сборных твердосплавных резцов с износостойкими покрытиями на операциях механической обработки (точения, растачивания, фрезерования, сверления) деталей гидравлических систем (плунжера, пяты, втулки сферической) взамен традиционно используемых резцов из быстрорежущей стали позволяет до 10 раз повысить производительность обработки и во столько же раз уменьшить себестоимость обработки. Это открывает новые возможности эффективного применения высокоскоростного резания, осуществляемого на современных высокооборотных металлообрабатывающих станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр", и позволяет обработку сложных по конфигурации деталей с обеспечением высоких требований на их обработку с одного станка, что существенно повышает производительность обработки. Экспериментально доказа-

на возможность снижения трудоемкости и себестоимости обработки деталей гидравлических систем за счет универсализации оборудования с ЧПУ путем использования нестандартных режущих инструментов и специальной оснастки.

2. Экспериментально установлено, что применение сборных твердосплавных фрез с износостойкими покрытиями взамен монолитных фрез позволило в 11,5 раз уменьшить трудоемкость обработки сложно-профильных рабочих поверхностей сектора пресс-формы для шины диаметром 2 200 мм. Эффект достигнут за счет интенсификации режимов резания и уменьшения количества проходов фрезы. Применены нестандартные подходы к контролю качества – внедрены САМ системы ESPRIT, что исключает промежуточные замеры в процессе обработки детали и дополнительно повышает производительность труда.

3. Приведены примеры эффективного применения разработанных технологий механической обработки (точения, растачивания, фрезерования, сверления) деталей машин (например, "упор передний" и "цилиндр"), изготовленных из труднообрабатываемых материалов, сборными режущими твердосплавными лезвийными инструментами с износостойкими покрытиями, которые обеспечивают многократное снижение себестоимости и повышение производительности обработки. Показана эффективность применения специального инструмента компании TaeguTec на предприятиях Украины и обоснована экономическая целесообразность применения нового прогрессивного инструмента в производстве.

4. Разработана и внедрена на крупном промышленном предприятии Украины эффективная технология обработки турбинных лопаток, благодаря которой оптимизированы затраты на переоснащение станочного парка и на 50 % увеличена производительность обработки. Технология основана на обработке детали "за два установка", т.е. ее поочередная обработка с каждой стороны на станке ФОЦ DNM400 южнокорейского производителя DOOSAN с учетом требований по допускам и шероховатости обрабатываемых поверхностей.

5. Разработана эффективная технология механической обработки поршней резцами из поликристаллических алмазов, обеспечивающая высокое качество обрабатываемых поверхностей. Экспериментально выявлена взаимосвязь между стойкостью резца, микрошероховатостью и отражательной способностью обработанной поверхности. Чем выше стойкость резца, тем выше качество обработки с точки зрения обеспечения микрошероховатости и отражательной способности поверхности.

Выводы

В работе обобщен опыт практического использования методов механической обработки изделий, изготовленных из металлических и неметаллических материалов повышенной твердости, и приведены новые разработанные высокопроизводительные технологии алмазно-абразивной и лезвийной обработки, обеспечивающие повышение технологических и экологических показателей обработки. Показана эффективность применения технологий шлифования алмазными кругами на прочных металлических связках с дополнительным электроэрозионным воздействием на рабочую поверхность круга и обрабатываемую деталь, что позволяет постоянно поддерживать высокую режущую способность круга – основного источника повышения технологических и экологических показателей обработки. Показано, что алмазное электроэрозионное шлифование и автономная электроэрозионная правка алмазного круга в отличие от электрохимического шлифования и соответственно электрохимической правки алмазного круга не требует применения вредных для здоровья рабочего электролитов, обработка производится с применением безвредной обычной технической воды.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований алмазного электроэрозионного шлифования и заточки твердосплавных инструментов. Показано, что для эффективного осуществления процесса шлифования алмазными кругами на металлической связке М1-01 необходимо использовать периодическую электроэрозионную правку, обеспечивающую восстановление режущей способности алмазного круга. Это улучшает экологию производства. При шлифовании алмазными кругами на более прочной металлической связке М2-01 необходимо использовать электроэрозионное шлифование, по сути, осуществляя непрерывную электроэрозионную правку алмазного круга, так как в противном случае он быстро засаливается и теряет режущую способность, особенно при обработке высокопрочных покрытий, наплавочных материалов и сталей. На основе полученных результатов разработаны эффективные технологии алмазного электроэрозионного шлифования, а также шлифования алмазными кругами на металлических связках с применением периодической электроэрозионной правки различных изделий, изготовленных из металлических и неметаллических материалов повышенной твердости (твердых сплавов, износостойких наплавов и покрытий, алмазов, керамик и ферритов, технического стекла, хрусталя

и т.д.). Для научно обоснованного выбора оптимальных условий шлифования, включая механические и электрические параметры режима шлифования, проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса алмазного электроэрозионного шлифования, что позволило выявить его новые физические и технологические закономерности и реализовать в разработанных процессах шлифования. Так, установлена эффективность применения схемы круглого глубинного алмазного электроэрозионного шлифования с небольшой скоростью вращения детали 0,5 ... 5 м/мин и долевой продольной подачей, близкой к единице. В результате обеспечивается повышение производительности обработки и снижение расхода алмаза при высоком качестве обработанных поверхностей. Эффект обработки достигается за счет уменьшения максимальной толщины среза отдельным зерном круга и постоянного поддержания высокой режущей способности алмазного круга.

В работе также приведены практические рекомендации по использованию современных технологий лезвийной обработки деталей, изготовленных из материалов с повышенной твердостью, основанных на применении сборных режущих твердосплавных и керамических инструментов с износостойкими покрытиями на высокооборотных металлорежущих станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр". Экспериментально установлено, например, что применение этих технологий на операциях механической обработки (точения, растачивания, фрезерования, сверления) деталей гидравлических систем (плунжера, пяты, втулки сферической) взамен традиционно используемых резцов из быстрорежущей стали позволяет до 10 раз повысить производительность обработки и в столько же раз уменьшить себестоимость обработки. Это открывает новые возможности эффективного применения высокоскоростного резания и позволяет обработку сложных по конфигурации деталей с обеспечением высоких требований на их обработку производить с одного станка, что существенно повышает производительность обработки.

Показана эффективность применения программы утилизации отработанных твердосплавных пластин MATRIX, разработанной компанией TaeguTec, что позволяет экономить на открытой добыче руды для производства карбида вольфрама, сократить выбросы CO₂, снизить общее количество энергии, необходимой для добычи этих ценных природных ресурсов, и сократить огромное количество воды, потребляемой в горнодобывающей промышленности.

Список литературы

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. проф. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 390 с.
2. Алмазная обработка : учебн. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, А. А. Якимов. – К. : ИСДО, 1996. – 168 с.
3. Алмазно-электролитическая обработка инструмента / И. П. Захаренко, Ю. Я. Савченко. – К. : Наукова думка, 1978. – 224 с.
4. Алмазные инструменты и их применение в машиностроении / М.Ф. Семко, В. А. Качер, А. Ф. Раб, М. Д. Узунян. – Харьков: Изд-во "Прапор", 1965. – 132 с.
5. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А. А. Андилахай. – Мариуполь : ПГТУ, 2006. – 190 с.
6. Анельчик В. Д. Повышение эффективности шлифования деталей с молибденовыми покрытиями : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / В. Д. Анельчик. – Одесса, 1985. – 16 с.
7. Беззубенко Н. К. Алмазно-искровое шлифование труднообрабатываемых наплавочных материалов / Н. К. Беззубенко, Г. В. Новиков // Оптимизация процессов алмазно-абразивной обработки : тезисы докл. конф. – Волгоград, 1986. – С. 23–24.
8. Беззубенко Н. К. К вопросу выбора режима работы режущих зерен при алмазно-искровом шлифовании / Н. К. Беззубенко // Резание и инструмент. – Харьков, 1979. – Вып. 22. – С. 3–6.
9. Беззубенко Н. К. Место нового процесса алмазно-абразивно-искрового шлифования в ряду комбинированных электрохимических и электротехнических методов обработки / Н. К. Беззубенко // Резание и инструмент. – Харьков, 1974. – Вып. 9. – С. 133–139.
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, 1995. – 56 с.
11. Беззубенко Н. К. Процесс алмазно-искрового шлифования / Н. К. Беззубенко // Резание и инструмент, 1981. – Вып. 26. – С. 39–42.
12. Белогуб А. В. Цилиндро-поршневая группа. Техника и технологии / А. В. Белогуб. – Харьков : Автрамат, 2004. – 40 с.

13. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
14. Високопродуктивне шліфування: навч. посібник / О. В. Якимов, Ф. В. Новіков, Г. В. Новіков, О. О. Якимов. – К. : ІСДО, 1995. – 180 с.
15. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М. : Гос. издат. физ.-мат. литературы, 1959. – 783 с.
16. Високопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М. Ф. Семко, Ю. П. Внуков, А. И. Грабченко и др. – К. : Вища школа, 1979. – 232 с.
17. Гаврилов В. Н. Оборудование станков для электроалмазной заточки резцов / В. Н. Гаврилов, А. Г. Саркисов // Электронная обработка металлов. – 1966. – №5. – С. 15–18.
18. Гальваническое покрытие никель–железо с мелкодисперсным алмазным порошком для огранки природных алмазов / Г. Н. Знаменский, И. А. Цисарь, Ц. М. Гавинский и др. // Алмазы и сверхтвердые материалы, 1981. – Вып. 9. – С. 4–5.
19. Гинзбург Б. И. Экономика и организация применения сверхтвердых материалов / Б. И. Гинзбург. – К. : Наукова думка, 1983. – 240 с.
20. Гладкий І. П. Властивості та технологія обробки металевих та неметалевих конструкційних матеріалів : навч. посібник / І. П. Гладкий, В. І. Мощенок, В. П. Тарабанова. – Харків : ХНАДУ, 2004. – 276 с.
21. Глубинное шлифование кругами из сверхтвердых материалов / И. П. Захаренко, Ю. Я. Савченко, В. И. Лавриненко. – М. : Машиностроение, 1988. – 56 с.
22. Гостев В. В. Алмазно-электрохимическое шлифование твердых сплавов / В. В. Гостев. – К. : Вища школа, 1974. – 128 с.
23. Грабченко А. И. О расширении технологических возможностей алмазного шлифования / А. И. Грабченко // Резание и инструмент. – Харьков : Вища школа, 1981. – Вып. 26. – С. 36–39.
24. Грабченко А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А. И. Грабченко. – Харьков : Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. – 184 с.
25. Гродзинский Э. Я. Абразивно-электрохимическая обработка / Э. Я. Гродзинский. – М. : Машиностроение, 1976. – 55 с.
26. Гродзинский Э. Я. Станки и оснастка для шлифования с электрической активацией рабочей поверхности круга / Э. Я. Гродзинский, И. В. Голубев, А. Т. Маковицкая // Станки и инструмент, 1981. – № 4. – С. 10–12.

27. Гродзинский Э. Я. Электрохимическая и электроэрозионная абразивная обработка / Э. Я. Гродзинский, Л. С. Зубатова // Станки и инструмент, 1982. – № 3. – С. 28–29.
28. Гуцаленко О. Г. Алмазно-электроэрозионное шлифование деталей с теплостойкими наплавками : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 "Технология машиностроения" / О. Г. Гуцаленко. – К., 1985. – 16 с.
29. Дитиненко С. А. Повышение эффективности технологии прецизионной обработки твердосплавных цилиндрических поверхностей / С. А. Дитиненко, Ф. В. Новиков // Физические и компьютерные технологии : труды 9-й Междунар. научн.-техн. конф., 3–4 июня 2004, Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2004. – С. 7–11.
30. Евсеев Д. Г. Физические основы процесса шлифования / Д. Г. Евсеев, А. И. Сальников. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1978. – 128 с.
31. Епифанов В. И. Технология обработки алмазов в бриллианты / В. И. Епифанов, А. Я. Песина, А. В. Зыков. – М. : Высшая школа, 1971. – 203 с.
32. Жовтобрюх В. А. ESPRIT – лучший программный инструмент для производства. Опыт работы в Украине и в России / В. А. Жовтобрюх // Физические и компьютерные технологии : труды 20-й междунар. научн.-практ. конф., 23–24 декабря 2014, Харьков. – Д. : ЛИРА, 2015. – С. 125–130.
33. Жовтобрюх В. А. Многофункциональные токарно-фрезерные обрабатывающие центры "DOOSAN" / В. А. Жовтобрюх, К. А. Бобух, Dooyoung Jeong // Фізичні та комп'ютерні технології : матеріали 22-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 грудня 2016, Харків. – Д. : ЛІРА, 2016. – С. 18–21.
34. Жовтобрюх В. А. Направления эффективного применения современных металлорежущих инструментов / В. А. Жовтобрюх // Фізичні та комп'ютерні технології : матеріали 22-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 грудня 2016, Харків. – Д. : ЛІРА, 2016. – С. 22–28.
35. Жовтобрюх В. А. Новые решения TaeguTec для обработки композиционных материалов / В. А. Жовтобрюх // Новые и нетрадиционные технологии в ресурс- и энергосбережении : материалы междунар. научн.-техн. конф., 21–23 сентября 2016, Одесса. – Одесса : ОНПУ, 2016. – С. 58–60.
36. Жовтобрюх В. А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных

- параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / В. А. Жовтобрюх. – Мариуполь : ПГТУ, 2012. – 21 с.
37. Жовтобрюх В. А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидроаппаратуры / В. А. Жовтобрюх // Физические и компьютерные технологии: труды 17-й Междунар. науч.-техн. конф., 20–21 сентября 2011, Харьков. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2011. – С. 68–73.
 38. Жовтобрюх В. А. Пятиосевой порталный обрабатывающий центр DOOSAN BM 2740U – лучшее решение для высокоскоростной обработки крупногабаритных авиационных деталей / В. А. Жовтобрюх, Dooyoung Jeong // Физические и компьютерные технологии : труды 21-й междунар. научн.-практ. конф., 24–25 декабря 2015, Харьков. – Д. : ЛІРА, 2016. – С. 19–21.
 39. Жовтобрюх В. А. Разработка и внедрение прогрессивной технологии механической обработки турбинных лопаток / В. А. Жовтобрюх // Фізичні та комп'ютерні технології : матеріали 22-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 грудня 2016, Харків. – Д. : ЛІРА, 2016. – С. 28–31.
 40. 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.
 41. Жовтобрюх В. А. Разработка эффективных технологических процессов механической обработки сложнопрофильных деталей и их метрологическое обеспечение / В. А. Жовтобрюх // Качество, стандартизация, контроль : теория и практика. Материалы 11-й междунар. науч.-практ. конф., Ялта. – Киев : АТМ Украины, 2011. – С. 53–56.
 42. Жовтобрюх В. А. Серия CHASEFEED от TaeguTec – лидер фрезерования на высоких подачах / В. А. Жовтобрюх // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении : материалы междунар. научн.-техн. конф., 21–23 сентября 2016, Одесса. – Одесса : ОНПУ, 2016. – С. 60–62.
 43. Жовтобрюх В. А. Серия PUMA SMX – многофункциональные токарно-фрезерные обрабатывающие центры DOOSAN нового поколения / В. А. Жовтобрюх // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо-

- и энергосбережении : материалы междунар. научн.-техн. конф., 21–23 сентября 2016, г. Одесса. – Одесса : ОНПУ, 2016. – С. 53–57.
44. Жовтобрюх В. А. Эффективное применение режущих инструментов в условиях высокоскоростной обработки / В. А. Жовтобрюх // Физические и компьютерные технологии : труды 21-й междунар. научн.-практ. конф., 24–25 декабря 2015, Харьков. – Д. : ЛИРА, 2016. – С. 22–25.
45. Завалеев В. А. Использование способа КИНТ для упрочнения инструмента / В. А. Завалеев, А. А. Романов // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : труды 5-й междунар. научн.-техн. конф., 28–29 мая 2002, Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2002. – С. 142–147.
46. Захаренко И. П. Алмазная заточка твердосплавного инструмента совместно со стальной державкой / И. П. Захаренко, А. А. Шепелев. – К. : Наукова думка, 1976. – 218 с.
47. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки / И. П. Захаренко. – К. : Техника, 1980. – 212 с.
48. Захаренко И. П. Сверхтвердые абразивные материалы в инструментальном производстве / И. П. Захаренко. – К. : Вища школа, 1985. – 211 с.
49. Иванов Н. П. Интенсивность электроэрозии алмазных кругов при использовании источника постоянного тока / Н. П. Иванов, Л. Е. Кобзарь // Резание и инструмент. – Харьков : Вища школа, 1984. – Вып. 31. – С. 26–31.
50. Иванов Н. П. Электроэрозионное формирование высоты рельефа рабочей поверхности алмазных кругов при использовании источника постоянного тока / Н. П. Иванов // Резание и инструмент. – Харьков : Вища школа, 1984. – Вып. 32. – С. 21–27.
51. Инструмент из синтетических алмазов для ограночного шлифования и полирования / В. В. Рогов, В. Н. Попельнюк, В. В. Абрамов, В. Е. Кочубко // Сверхтвердые материалы, 1986. – № 4. – С. 57–58.
52. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова. – М. : Машиностроение, 2005. – 555 с.
53. Интенсифицированный способ алмазно-искрового шлифования. Новые технологические процессы / М. Ф. Семко, Н. К. Беззубенко, И. С. Сальтевский, А. Т. Калашников. – М. : ГОСИНТИ, Экспресс-информация, 1975. – Вып. 11/2. – 4 с.

54. Исследование технологических возможностей конкурентоспособного алмазно-искрового шлифования износостойких труднообрабатываемых наплавленных покрытий ремонтно-восстановительного производства деталей тракторов и автомобилей. Отчет по НИР, № гос. регистр. 0185.00805591. – Харьков : ХПИ, 1987. – 50 с.
55. Калашников А. Т. Исследование физических особенностей и технологических возможностей алмазно-искрового шлифования : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / А. Т. Калашников. – М., 1977. –16 с.
56. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки : учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, А. А. Якимов. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 212 с.
57. Кашук В. А. Справочник заточника / В. А. Кашук, Д. А. Мелехин. – М. : Машиностроение, 1982. – 228 с.
58. Кобзарь Л. Е. Исследование работоспособности алмазных кругов на различных металлических связках при алмазно-искровом внутреннем круглом шлифовании / Л. Е. Кобзарь, Ю. М. Троянов, В. И. Гетман // Резание и инструмент. – Харьков : Вища школа, 1980. – Вып. 23. – С. 54–57.
59. Коломиец В. В. Алмазные правящие ролики при врезном шлифовании деталей машин / В. В. Коломиец, Б. И. Полупан. – К. : Наукова думка, 1983. – 144 с.
60. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 185 с.
61. Королев А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов : Из-во Саратов. ун-та, 1987. – Часть 1. "Состояние рабочей поверхности инструмента". – 160 с.
62. Королев А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов : Из-во Саратов. ун-та, 1989. – Часть 2. "Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке". – 160 с.
63. Кремнев Г. П. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении : учеб. пособие / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков. – Д. : ЛИРА, 2016. – 297 с.
64. Кремнев Г. П. Системы технологий : учеб. пособие / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков, В. М. Колесник. – Д. : ЛИРА, 2015. – 140 с.

65. Лавріненко В. І. Надтверді абразивні матеріали в механообробці : енциклопедичний довідник / В. І. Лавріненко, М. В. Новіков / Під заг. ред. академіка НАНУ Новікова М. В. – К. : ІНМ НАН України, 2013. – 456 с.
66. Ларшин В. П. Интегрированная технологическая система шлифования сложнопрофильных деталей (на примере резьбошлифования) : автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / В. П. Ларшин. – Одесса, 1995. – 33 с.
67. Лебедев В. Г. Кинетика изменения температур критических точек при шлифовании закаленных сталей / В. Г. Лебедев, Н. М. Клименко // Труды Одесск. политехн. ун-та. – Одесса : ОПУ, 2000. – Вып. 2(11). – С. 47–50.
68. Левченко Н. В. Электроалмазное шлифование инструментальных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Н. В. Левченко. – Харьков, 1970. – 16 с.
69. Линчевский П. А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П. А. Линчевский, Т. Г. Джугурян, А. А. Оргиян. – К. : Техника, 2001. – 300 с.
70. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Изд. 2-е, перераб. доп. – Л. : Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1984. – 103 с.
71. Малыхин В. В. Повышение эффективности шлифования вольфрамосодержащих и безвольфрамовых твердых сплавов совместно со сталью алмазными кругами на металлической связке: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Малыхин Виталий Викторович. – Харьков, 1985. – 262 с.
72. Марчук В. І. Підвищення ефективності та якості безцентрового переривчастого шліфування поверхонь обертання : монографія / В. І. Марчук, Ю. А. Лук'янчук. – Луцьк : РВВ Луцького НТУ, 2014. – 140 с.
73. Маталин А. А. Технология машиностроения : учебник для машиностроительных вузов по специальности "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты" / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.
74. Матюха П. Г. Выбор длины электрода–инструмента при электроэрозионной правке шлифовальных кругов / П. Г. Матюха, В. И. Марты-

- нов, В. П. Цокур // Резание и инструмент. – Харьков : Вища школа, 1988. – Вып. 40. – С. 36–42.
75. Матюха П. Г. Теоретические и экспериментальные исследования кинематики процесса и рельефа круга при алмазно-искровом шлифовании : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / П. Г. Матюха. – М., 1980. – 16 с.
76. 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.
77. Михайлуца Э. Б. Исследование электроэрозионного метода правки и режущей способности инструментов из сверхтвердых материалов на металлических связках : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Э. Б. Михайлуца. – Харьков, 1975. – 16 с.
78. Моделирование систем : монография / Г. А. Оборский, А. Ф. Дашенко, А. В. Усов, Д. В. Дмитришин. – Одесса : Астропринт, 2013. – 664 с.
79. Мочалов В. Д. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазно-эрозионном шлифовании : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / В. Д. Мочалов. – К., 1980. – 21 с.
80. Немилов Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов / Е. Ф. Немилов. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 164 с.
81. Новиков Г. В. Обоснование и выбор оптимального электрического режима электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках / Г. В. Новиков // Вісник Харк. держ. техн. ун-ту сільськ. госп-ва. – Харків : ХДТУСГ, 2005. – Вип. 33. – С. 180–185.
82. Новиков Г. В. Обработка алмазными кругами на металлических связках неметаллических материалов / Г. В. Новиков // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : труды 5-й Междунар. научн.-техн. конф., 28–29 мая 2002, Харьков. – Харьков : ХПКП "ФЭД", 2002. – С. 8–11.
83. Новиков Г. В. Опыт эффективного применения электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке при обработке натуральных алмазов / Г. В. Новиков // Вісник Харк. нац. техн. ун-ту

- сільськ. госп-ва. ім. Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2010. – Вип. 106. – С. 105–111.
84. Новиков Г. В. Оценка энергий, затрачиваемых на резание и трение в общем энергетическом балансе процессов алмазного и алмазно-искрового шлифования / Г. В. Новиков, В. В. Малыхин // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : материалы III Междунар. научн.-техн. конф. В 2 частях. – Курск : КГТУ, 2005. – Ч. 2. – С. 138–143.
85. Новиков Г. В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: дис. ... канд. техн. наук, спец. : 05.02.08 "Технология машиностроения" / Новиков Григорий Васильевич. – Харьков, 1989. – 210 с.
86. Новиков Г. В. Правка алмазных кругов без снятия их со станка / Г.В. Новиков, Л. Е. Кобзарь // Резание и инструмент. – Харьков : Вища школа, 1989. – Вип. 42. – С. 20–23.
87. Новиков Ф.В. Исследование себестоимости обработки при шлифовании уплотнений торцовых с рэлитовым слоем / Ф. В. Новиков, В. П. Ткаченко // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : труды 5-й Междунар. научн.-техн. конф., 28–29 мая 2002, Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2002. – С. 12–18.
88. Новиков Ф. В. Качество и производительность торцового алмазного шлифования уплотнительных колец из композиционного материала на основе релита / Ф. В. Новиков, В. П. Ткаченко // Вісник Харк. держ. техн. ун-ту сільськ. госп-ва. – Харків : ХДТУСГ, 2004. – Вип. 26. – С. 22–30.
89. Новиков Ф.В. Кинематика формообразования торцовой поверхности вращающегося кольца при шлифовании / Ф. В. Новиков, В. П. Ткаченко // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : труды 7-й Междунар. научн.-техн. конф., 27–28 мая 2003, Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2003. – С. 29–33.
90. Новиков Ф. В. Механика круглого алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями и пути ее оптимального управления : автор. дис. ... канд. техн. наук, спец: 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Ф. В. Новиков. – К., 1984. – 21 с.
91. Новиков Ф. В. Опыт применения экологически безопасных технологий алмазно-абразивной обработки материалов / Ф. В. Новиков // Фізичні та комп'ютерні технології : матеріали 22 Міжнар. наук.-

- практ. конф., 7–9 грудня 2016, Харків. – Д. : ЛІРА, 2016. – С. 300–304.
92. Новиков Ф. В. Плоское алмазное шлифование твердого сплава "Рэлит" / Ф. В. Новиков, В. П. Ткаченко // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : труды 4-й Междунар. научн.-техн. конф., 23–24 октября 2001, Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2001. – С. 187–190.
93. Новиков Ф. В. Повышение качества обработки при алмазном шлифовании композиции "Твердый сплав "Рэлит" – нержавеющая сталь" / Ф. В. Новиков, В. П. Ткаченко // Вісник Харк. держ. техн. ун-ту сільськ. госп-ва. – Харків: ХДТУСГ, 2002. – Вип. 10. – С. 251–256.
94. Новиков Ф. В. Повышение качества обработки при круглом наружном алмазном шлифовании специальных твердосплавных инструментов / Ф. В. Новиков, С. А. Дитиненко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. научн.-техн. сборник. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2004. – Вип. 67. – С. 74–85.
95. Новиков Ф. В. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх // Физические и компьютерные технологии : труды 20-й междунар. научн.-практ. конф., 23–24 декабря 2014, Харьков. – Д. : ЛІРА, 2015. – С. 3–9.
96. Новиков Ф. В. Разработка эффективных технологий механической обработки деталей машин / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх // Автомобильный транспорт : сб. научн. трудов. – Харьков : ХНАДУ, 2011. – Вип. 29. – С. 212–215.
97. Новиков Ф. В. Режущий рельеф алмазного круга и его роль в формировании технологических показателей шлифования // Резание и инструмент. – Харьков : Вища школа, 1984. – Вип. 32. – С. 64–70.
98. Новиков Ф. В. Технологическое обеспечение качества механической обработки поршней / Ф. В. Новиков, А. В. Медведев // Физические и компьютерные технологии : труды 17-й Междунар. научн.-техн. конф., 20–21 сентября 2011, Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2011. – С. 77–83.
99. Новиков Ф. В. Технология и теория прецизионной обработки твердосплавных инструментов алмазными кругами на металлических связках / Ф. В. Новиков, С. А. Дитиненко // Физические и компьютерные технологии : труды 8-й Междунар. научн.-техн. конф., 9–10 декабря 2003, Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2003. – С. 34–39.

- 100.Новиков Ф.В. Технология электроэрозионной правки торцовых алмазных кругов и шлифование твердосплавных уплотнительных колец / Ф. В. Новиков, В. П. Ткаченко // Физические и компьютерные технологии : труды 8-й Междунар. научн.-техн. конф., 9–10 декабря 2003, Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2003. – С. 21–24.
- 101.Новиков Ф. В. Условия снижения энергоемкости и повышения производительности обработки при алмазном шлифовании твердых сплавов / Ф. В. Новиков, М. И. Гасанов // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. научн.-техн. сборник. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2004. – Вып. 67. – С. 57–64.
- 102.Новиков Ф. В. Условия формирования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке / Ф. В. Новиков, В. П. Ткаченко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. научн.-техн. сборник. – Харьков : ХГПУ, 2001. – Вып. 60. – С. 171–176.
- 103.Новиков Ф. В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования : автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Ф. В. Новиков. – Одесса, 1995. – 36 с.
- 104.Новиков Ф. В. Эффективная технология доводки алмазным порошком торцовых поверхностей колец с релитовым слоем на специальном станке / Ф. В. Новиков, В. П. Ткаченко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. научн.-техн. сборник. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2004. – Вып. 66. – С. 141–144.
- 105.Новинюк О. С. Алмазно-эрозионное зубохонингование / О. С. Новинюк, Э. Я. Гродзинский, А. С. Коньшин. – М. : Машиностроение, 1986. – 88 с.
- 106.Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування : монографія / Ф. В. Новіков. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.
- 107.Новіков Ф. В. Математичне моделювання і оптимізація процесів металообробки : монографія / Ф. В. Новіков. – Харків : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 384 с.
- 108.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.
- 109.Новіков Ф. В. Теорія високоякісної обробки деталей машин : монографія / Ф. В. Новіков. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2013. – 384 с.
- 110.Новіков Ф. В. Фінішна обробка деталей різанням : монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 270 с.

111. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов : Изд-во. Саратов. ун-та, 1979. – 232 с.
112. Новые кинематические схемы шлифовальных станков / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко, Ф. В. Новиков, В. А. Фадеев // Наука и социальные проблемы общества : человек, техника, технологии и окружающая среда : Материалы Междунар. научн.-практ. конф., Харьков, 14–16 мая 2001. В восьми частях. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2001. – Ч. 8. – С. 9–11.
113. 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.
114. Основы алмазного шлифования / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, А. Ф. Раб и др. – К. : Техника, 1978. – 192 с.
115. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И. П. Захаренко. – К. : Наукова думка, 1981. – 300 с.
116. Особенности алмазного электроэрозионного круглого шлифования / И. В. Голубев, А. И. Стебаев, Э. Я. Гродзинский, А. Т. Крапивко // Алмазы и сверхтвердые материалы. – М., 1982. – Вып. 6. – С. 5–6.
117. Палей М. М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М. М. Палей, Л. Г. Дибнер, М. Д. Флид. – М. : Машиностроение, 1988. – 288 с.
118. Пахалин Ю. А. Алмазное контактно-эрозионное шлифование / Ю. А. Пахалин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 178 с.
119. Перерозин М. А. Алмазная обработка стекла / М. А. Перерозин. – К. : Техника, 1982. – 62 с.
120. Перерозин М. А. Справочник по алмазной обработке стекла / М. А. Перерозин. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.
121. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – М. : Машиностроение, 1977. – 263 с.
122. Порошки, инструмент и пасты из синтетических алмазов. Каталог-справочник / Е. Б. Верник, В. Ф. Селех. – К. : Наукова думка, 1981. – 143 с.
123. Прогресивні технології механічної обробки : монографія / Ф. В. Новіков, А. Г. Крюк, В. Г. Шкурупій та ін. ; за заг. ред. докт. техн. наук, професора Новікова Ф. В. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2012. – 372 с.

124. Прогрессивные методы абразивной обработки твердосплавного бурового инструмента / Э. В. Рыжов, Ю. П. Линенко-Мельников, В. Г. Красник. – М. : Машиностроение, 1986. – 48 с.
125. Прогрессивный процесс круглого алмазного шлифования многолезвийных инструментов / А. Ф. Раб, Ф. В. Новиков, С. А. Сошников, Н. И. Дубина // Повышение эффективности инструментального производства : Материалы XI Всесоюзной конференции инструментальщиков Урала. – Пермь, 1982. – С. 76–77.
126. Работоспособность алмазных кругов / М. Ф. Семко, М. Д. Узунян, Ю. А. Сизый, М. С. Пивоваров. – К. : Техника, 1983. – 95 с.
127. Резников А. Н. Выбор режимов шлифования синтетическими сверхтвердыми материалами при заданной шероховатости поверхности изделия / А. Н. Резников, О. Б. Федосеев // Вестник машиностроения, 1976. – № 6. – С. 69–70.
128. Рогов В. В. Основы финишной алмазно-абразивной обработки неметаллических деталей в приборостроении : автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / В. В. Рогов. – К., 1992. – 39 с.
129. Рыбицкий В. А. Алмазное шлифование плазменных покрытий / В. А. Рыбицкий // Сверхтвердые материалы, 1983. – С. 57–59.
130. Рыбицкий В. А. Алмазное шлифование твердых сплавов / В. А. Рыбицкий. – К. : Наукова думка, 1980. – 224 с.
131. Рыбицкий В. А. Опыт внедрения алмазного шлифования деталей с защитными покрытиями. Методическое пособие / В. А. Рыбицкий // "Знание" Украинской ССР, 1987. – 23 с.
132. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов. – К. : Наукова думка, 1984. – 272 с.
133. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э. В. Рыжов, С. А. Клименко, О. Г. Гуцаленко. – К. : Наукова думка, 1994. – 180 с.
134. Сагарда А. А. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишнаевский. – К. : Техника, 1974. – 179 с.
135. Сальтевский И. С. Особенности износа кругов при электроалмазном шлифовании / И. С. Сальтевский // Резание и инструмент. – Харьков : Вища школа, 1975. – Вып. 14. – С. 108–109.
136. Сальтевский И. С. Приближенный метод кинематического расчета шероховатости поверхности / И. С. Сальтевский, Г. В. Новиков // Ре-

- зание и инструмент. – Харьков : Вища школа, 1987. – Вып. 38. – С. 11–16.
137. Сверхтвердые абразивные материалы в инструментальном производстве / И. П. Захаренко. – К. : Вища школа, 1985. – 152 с.
138. Семко М.Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. П. Ходоровский. – Харьков : Вища школа, Изд-во при Харьк. ун-те, 1980. – 192 с.
139. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков : ГП "УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с.
140. Синтетические алмазы в машиностроении / В. Н. Бакуль и др. – К. : Наукова думка, 1976. – 350 с.
141. Синтетические сверхтвердые материалы. В 3-х томах. – К. : Наукова думка, 1986. – Т. 3. "Применение синтетических сверхтвердых материалов". – 280 с.
142. Сошников С. А. Исследование силовых и энергетических характеристик глубинного алмазного шлифования / С. А. Сошников, А. Ф. Раб // Контактные процессы при больших пластических деформациях : темат. сб. научн. трудов. – Харьков, 1982. – С. 61–66.
143. Сошников С. А. Повышение работоспособности алмазных кругов при шлифовании твердосплавных изделий с прерывистыми поверхностями : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / С. А. Сошников. – Тула, 1984. – 23 с.
144. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента / В. Н. Бакуль и др. – К. : Техника, 1971. – 208 с.
145. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2007. – 688 с.
146. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
147. Теплофизика механической обработки : учеб. пособие / А. В. Якимов, П. Т. Слободяник, А. В. Усов. – К. – Одесса : Лыбидь, 1991. – 240 с.
148. Технология алмазной правки шлифовальных кругов / В. Ф. Романов, В. В. Авакян. – М. : Машиностроение, 1980. – 118 с.
149. Ткаченко В. П. Особенности технологии изготовления и эффективность применения торцовых уплотнений с релитовыми парами трения / В. П. Ткаченко // Вісник Харк. держ. техн. ун-ту сільськ.

- госп-ва. – Харків : ХДТУСГ, 2002. – Вип. 10. – С. 231–236.
- 150.Ткаченко В. П. Повышение эффективности алмазного торцового шлифования торца вращающегося кольца / В. П. Ткаченко // Високі технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ", 2003. – Вип. 1. – С. 147–155.
- 151.Ткаченко В. П. Повышение эффективности технологии прецизионной обработки уплотнительных колец из композиционного материала на основе релита: автореф. дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / В. П. Ткаченко. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2003. – 21 с.
- 152.Ткаченко В. П. Теоретический подход к проектированию маршрутно-операционной технологии алмазно-абразивной обработки / В. П. Ткаченко, Ф. В. Новиков // Технологические системы в машиностроении : труды Междунар. научн.-техн. конф., посв. памяти выдающихся ученых Коганова И. А. и Лашнева С. И. – Тула, 2002. – С. 372–374.
- 153.Узунян М. Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М. Д. Узунян. – Харків : НТУ "ХПІ", 2003. – 359 с.
- 154.Узунян М. Д. Высокопроизводительное шлифование безвольфрамовых твердых сплавов / М. Д. Узунян, Ю. С. Краснощек. – М. : Машиностроение, 1988. – 80 с.
- 155.Узунян М. Д. Оптимальные условия алмазно-искровой обработки безвольфрамового сплава ТН-20 / М. Д. Узунян, В. Я. Крючков // Сверхтвердые материалы, 1981. – № 1. – С. 42–44.
- 156.Фадеев В. А. Алмазное шлифование твердых сплавов с введением в зону резания дополнительной энергии постоянного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / В. А. Фадеев. – Харьков, 1995. – 21 с.
- 157.Федорович В. А. Алмазное шлифование сверхтвердых материалов с управлением режущим рельефом : автореф. дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / В. А. Федорович. – Харьков, 1981. – 21 с.
- 158.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.
- 159.Формирование режущей поверхности алмазного инструмента на металлической связке при электроэрозионной правке / Беззубенко Н. К. и др. // Синтетические алмазы, 1975. – № 1. – С. 18–20.

160. Фукс М. Я. Состояние поверхностного слоя после алмазной и эльборовой обработки / М. Я. Фукс, Н. К. Беззубенко, Б. М. Свердлова. – К. : Вища школа, 1979. – 160 с.
161. Чачин В. И. Профилирование алмазных шлифовальных кругов / В. И. Чачин, В. Д. Дорофеев. – Минск : Наука и техника, 1974. – 160 с.
162. Чачин В. И. Электроэрозионная обработка в среде слабых электролитов / В. И. Чачин, В. Д. Дорофеев, Г. Д. Гриндин // Вест. АН БССР. Физ. тех. науки, 1974. – № 1. – С. 21–26.
163. Шкурупій В. Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок / В. Г. Шкурупій, Ф. В. Новіков // Физические и компьютерные технологии : труды 12-й Междунар. научн.-техн. конф., 7–8 июня 2006, Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2006. – С. 9–19.
164. Шкурупій В. Г. Системи технологій. Навч. посібник / В. Г. Шкурупій, Ф. В. Новіков, Ю. В. Шкурупій. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2008. – Ч. 1. – 480 с.
165. Шкурупій В. Г. Системи технологій. Навч. посібник / В. Г. Шкурупій, Ф. В. Новіков, Ю. В. Шкурупій. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2008. – Ч. 2. – 288 с.
166. Шлифование с автоматической стабилизацией режущей способности круга / И. В. Голубев, Э. Я. Гродзинский, В. К. Свешников, А. И. Стебаев // Станки и инструмент, 1984. – № 1. – С. 20–22.
167. Шлифование труднообрабатываемых материалов кругами из алмазов и эльбора : монография / П. Г. Матюха, В. В. Полтавец, А. В. Бурдин, В. В. Габитов. – Черкассы : Вертикаль, издатель Кандыч С. Г., 2015. – 252 с.
168. Электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, Н. В. Левченко, А. Ф. Раб. – К. : Вища школа, 1974. – 120 с.
169. Якимов А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1984. – 212 с.
170. Якимов А. В. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, А. А. Якимов. – К. : Техника, 1993. – 152 с.
171. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1975. – 175 с.
172. Якимов А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – К. : Вища школа, 1986. – 175 с.

Содержание

	Стр.
Введение	3
Раздел 1. Технологические и экологические проблемы алмазной обработки материалов повышенной твердости	7
1.1. Концепции развития механической обработки материалов и создания металлорежущих станков	7
1.2. Проблемы алмазного шлифования деталей из твердых сплавов и высокопрочных сталей	16
1.3. Методы восстановления режущей способности алмазных кругов на металлических связках	27
1.4. Теоретическое обоснование условий эффективного применения электроэрозионной правки алмазных кругов	35
1.5. Новые кинематические схемы шлифовальных станков для алмазного шлифования	44
1.6. Условия снижения энергоемкости и повышения производительности обработки при алмазном шлифовании твердых сплавов	50
1.7. Оценка энергий, затрачиваемых на резание и трение в общем энергетическом балансе процессов алмазного и алмазно-искрового шлифования	60
1.8. Разработка и внедрение эффективных процессов круглого наружного и плоского алмазного электроэрозионного шлифования материалов повышенной твердости	65
Выводы к разделу 1	68
Раздел 2. Эффективная технология прецизионной алмазно-абразивной обработки уплотнительных колец из композиционного материала на основе твердого сплава "Релит"	70
2.1. Научные предпосылки повышения качества и производительности обработки уплотнительных колец из композиционного материала на основе твердого сплава "Релит"	70
2.2. Кинематика формообразования торцевой поверхности вращающегося кольца при шлифовании	72
2.3. Экспериментальные исследования технологии электроэрозионной правки торцовых алмазных кругов на металлических связках	76

2.4. Экспериментальные исследования производительности обработки и износостойкости алмазного торцового круга при шлифовании	83
2.5. Исследование качества обработки при торцовом алмазном шлифовании	87
2.6. Условия снижения температуры резания при шлифовании ..	90
2.7. Влияние ширины рабочей части торцового алмазного круга на показатели шлифования	93
2.8. Экспериментальные исследования плоского алмазного шлифования торцовых поверхностей релитовых уплотнений .	96
2.9. Себестоимость обработки при шлифовании торцовых релитовых уплотнений	102
2.10. Эффективное применение разработанной технологии алмазно-абразивной обработки релитовых торцовых уплотнений	109
Выводы к разделу 2	114
Раздел 3. Алмазное электроэрозионное шлифование деталей с покрытиями и наплавочными материалами	116
3.1. Существующие подходы к шлифованию деталей с покрытиями и наплавочными материалами	116
3.2. Экспериментальные исследования процессов алмазного электроэрозионного многопроходного и глубинного шлифования высокопрочных покрытий	120
3.3. Расчет параметров шероховатости обработанных поверхностей и максимальной толщины среза при глубинном шлифовании	128
3.4. Определение максимально возможной производительности обработки с учетом шероховатости обработанной поверхности и максимальной толщины среза	139
3.5. Экспериментальные исследования основных технологических параметров электроэрозионного алмазного глубинного шлифования	149
3.6. Технологическое обеспечение алмазного электроэрозионного глубинного шлифования	159
3.6.1. Используемые источники технологического тока	159
3.6.2. Разработка специального генератора импульсного тока	162
3.6.3. Модернизация станка для осуществления алмазного электроэрозионного глубинного шлифования	164

3.7. Разработка эффективной технологии круглого наружного глубинного алмазного шлифования деталей двигателя внутреннего сгорания с высокопрочными покрытиями	168
3.8. Круглое наружное глубинное алмазное шлифование буро- вых инструментов с высокопрочными покрытиями	180
Выводы к разделу 3	184
Раздел 4. Алмазное шлифование изделий, изготовленных из неме- таллических материалов повышенной твердости	186
4.1. Алмазное шлифование деталей из керамик и ферритов	186
4.1.1. Условия повышения эффективности алмазного шли- фования деталей из керамик и ферритов	186
4.1.2. Торцовое алмазное двухстороннее шлифование керамических пластин на станках модели 3102	188
4.1.3. Торцовое шлифование деталей из ферритов и керамик крупногабаритными алмазными сборными кругами на станках модели 3Д756	192
4.2. Шлифование природных алмазов в бриллианты	198
4.2.1. Существующие технологии шлифования природных алмазов в бриллианты	198
4.2.2. Высокопроизводительная обработка природных алма- зов в бриллианты и расширение технологических воз- можностей применения алмазных кругов на металличе- ских связках	202
4.3. Алмазная обработка изделий из стекла, хрусталя и твердых пород камня	210
4.3.1. Проблемы алмазной обработки изделий из стекла и хрусталя	210
4.3.2. Условия эффективного применения электроэрозион- ной правки алмазного круга на металлической связке для нарезания граней на изделиях из хрусталя	214
4.3.3. Расчет и анализ шероховатости обработанной поверхности при нарезании граней на изделиях из хрусталя	226
4.3.4. Электроэрозионная правка крупногабаритных алмазных сегментных пил, используемых для обработки твердых пород камня	229
Выводы к разделу 4	232

Раздел 5. Перспективы эффективного использования крупногабаритных алмазных кругов на металлических связках	235
Выводы к разделу 5	241
Раздел 6. Современные технологии механической обработки лезвийными режущими инструментами	243
6.1. Обоснование условий эффективного применения высокоскоростного резания материалов	243
6.2. Определение оптимальных параметров режимов резания по критерию наименьшей себестоимости обработки и научные предпосылки их реализации	246
6.3. Пятиосевой портальный обрабатывающий центр DOOSAN VM 2740U – лучшее решение для высокоскоростной обработки крупногабаритных авиационных деталей	250
6.4. Эффективность практического применения многофункциональных токарно-фрезерных обрабатывающих центров DOOSAN нового поколения серии PUMA SMX	255
6.5. Эффективное применение сборных твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями в условиях высокоскоростной обработки	261
6.6. Высокоскоростное точение режущими инструментами из керамики с износостойкими покрытиями	265
6.6.1. Направления эффективного применения современных металлорежущих инструментов	265
6.7. Новые решения компании TaeguTec в применении токарных сплавов	273
6.8. Новые решения компании TaeguTec в обработке композиционных материалов	276
6.9. Серия фрез CHASEFEED для фрезерования на высоких подачах	280
6.10. Программа вторичной переработки MATRIX компании TaeguTec для охраны окружающей среды	283
Выводы к разделу 6	285
Раздел 7. Опыт эффективного применения технологий механической обработки сборными твердосплавными инструментами с износостойкими покрытиями	288
7.1. Повышения эффективности механической обработки деталей гидравлических систем	288

7.2. Повышение эффективности механической обработки слож- нопрофильных рабочих поверхностей сектора пресс-формы для шины диаметром 2 200 мм	296
7.3. Повышение эффективности механической обработки дета- ли "упор передний"	300
7.4. Повышение эффективности механической обработки дета- ли "цилиндр"	306
7.5. Разработка и внедрение прогрессивной технологии механи- ческой обработки турбинных лопаток	320
7.6. Применение специального инструмента компании TaeguTec на предприятиях Украины	324
7.7. Экономическая целесообразность применения нового прогрессивного инструмента в производстве	328
7.8. ESPRIT – лучший программный инструмент для произ- водства	333
7.9. Технологическое обеспечение качества механической обработки поршней	340
Выводы к разделу 7	347
Выводы	349
Список литературы	351

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**Новіков Федір Васильович
Жовтобрюх Валерій Олексійович
Новіков Григорій Васильович**

**СУЧАСНІ
ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНІ
ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА**

Монографія

(Російською мовою)

Відповідальний за випуск
Новіков Ф. В.

В авторській редакції

Підп. до друку 01.02.2017 р.
Формат 60х84/16. Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 21,62.
Наклад 300 пр. Заказ № 25.

Видавництво і друкарня «Ліра»
49000, м. Дніпро, вул. Наукова, 5
Свідоцтво про внесення до Держреєстру
ДК №188 від 19.09.2000.