

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ОДЕССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

НОВИКОВ ФЕДОР ВАСИЛЬЕВИЧ

ФИЗИЧЕСКИЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения
Специальность: 05.03.01 – Процессы механической обработки; станки и инструмент

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Харьковском научно-производственном объединении “Прогресс” и НТК “Абразив”.

Научный консультант – Заслуженный деятель науки и техники Украины, Лауреат Государственной премии Украины, доктор технических наук, профессор Якимов Александр Васильевич.

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук, профессор Лебедев Владимир Георгиевич
2. Академик Академии инженерных наук Украины, доктор технических наук, профессор Проволоцкий Александр Евдокимович
3. Доктор технических наук, профессор Вerezуб Владимир Николаевич

Ведущая организация – Научно-производственное объединение “ФЭД”, г. Харьков

Защита состоится 30 октября 1995 г. в 14 часов на заседании Специализированного Совета Д 05.06.06 при Одесском государственном политехническом университете по адресу: 270044, г. Одесса, проспект Шевченко, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан 28 сентября 1995 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета,
доцент

Г.А. Оборский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Создание и широкое применение алмазных кругов для шлифования материалов с повышенными физико-механическими свойствами (твердые сплавы, высокопрочные стали, покрытия, наплавки, керамики, ферриты и т.п.) стало важным фактором ускорения научно-технического прогресса в машиностроении, повышения производительности и качества обработки. В особой мере это относится к алмазным кругам на металлических связках, характеризующимся высокой износостойкостью и производительностью обработки, обеспечивающим эффективное использование наиболее прочных синтетических алмазов. Их применение позволило на ряде операций шлифования исключить из технологического цикла предварительную малоэффективную обработку кругами из обычных абразивов, повысить производительность и улучшить качество обработанных поверхностей. Вместе с тем, как показывает практика шлифования, такие круги не склонны к самозатачиванию, работают нестабильно, быстро засаливаются, теряют режущую способность и требуют частых правок. Известные методы механической правки алмазных кругов на металлических связках, как правило, малоэффективны, в особенности правки кругов на высокопрочных металлических связках типа М2-01. Гораздо большими технологическими возможностями располагают методы электроэрозионной и электрохимической правки. Введение в зону резания или автономно дополнительной энергии в виде электрических разрядов или электрохимии позволяет исключить засаливание круга, обеспечивает поддержание его высокой режущей способности независимо от прочности металлической связки. На рабочей поверхности круга формируется развитый режущий рельеф, характеризующийся значительным выступанием алмазных зерен над уровнем связки и большим объемом межзеренного пространства, достаточным для свободного размещения образующихся стружек и других продуктов обработки. По сути, в процессе правки формируется принципиально новый алмазный инструмент с хорошо развитым (регулируемым) режущим рельефом, что создает объективные предпосылки шлифования с повышенными параметрами срезов (увеличение толщины, длины среза и, соответственно, производительности обработки). Однако на практике потенциальные возможности инструмента используются не полностью: обработка производится с применением режимов резания, кинематических схем и способов шлифования, а также шлифовальных станков, традиционных для обычного абразивного и алмазного шлифования. Это приводит к повышенному расходу алмаза и увеличению себестоимости обработки и не позволяет добиться существенного увеличения производительности обработки, необходимого для эффективного применения алмазных кругов на операциях предварительного шлифования при съеме больших припусков, т.е. алмазные круги используют в основном при чистовом шлифовании и доводке. Предварительное шлифование по-прежнему производится кругами из обычных абразивов с относительно низким качеством обработки. Такое ограничение применения алмазных кругов связано, прежде всего, с отсутствием теоретических основ алмазного шлифования и значимых теоретических решений, определяющих

ших условия существенного повышения производительности обработки с учетом обеспечения экономически обоснованного расхода алмаза и высокого качества обработки. В связи с этим представляется важным и актуальным решение крупной научной проблемы создания теоретических основ шлифования алмазными кругами с хорошо развитым режущим рельефом (сформированным за счет введения в зону резания или автономно дополнительной электрической энергии) на базе разработки глубоких математических моделей кинематики процесса шлифования на уровне микросрезов и физики резания с учетом износа зерен, их силовой нагруженности и прочностных свойств круга и обрабатываемого материала для выявления, обоснования и реализации физических и кинематических условий существенного повышения производительности обработки при съеме больших припусков.

АВТОР ЗАЩИЩАЕТ:

1. Разработанные теоретические основы шлифования алмазными кругами на металлических связках с использованием электрофизикохимических методов правки, исключая установленные аналитические зависимости основных физических и технологических параметров шлифования; новый подход к расчету оптимальных механических и электрических параметров режима шлифования; результаты исследований, раскрывающие физическую сущность алмазного шлифования с позиций переменности величины линейного износа зерна до момента его объемного разрушения и выпадения из связки круга и постоянства величины нагрузки, действующей на отдельное зерно круга.
2. Выявленные и обоснованные кинематические и физические условия существенного повышения производительности обработки за счет применения новых соотношений между глубиной шлифования t и максимальной (вероятностной) толщиной среза $H_{max} / t < H_{max}$, $t > H_{max}$ и оптимальных значений величины линейного износа зерна до момента его объемного разрушения и выпадения из связки круга, обусловленных прочностными свойствами круга и технологическими ограничениями обработки.
3. Разработанные высокопроизводительные способы алмазного шлифования на основе применения кинематических схем глубинного, многопроходного и сверхскоростного шлифования, реализующие новые области эффективного сочетания параметров режимов шлифования и дополнительные высокочастотные колебательные движения круга или заготовки с большой амплитудой.
4. Математическую модель высокопроизводительного глубинного алмазного шлифования с относительно небольшой скоростью заготовки и продольной подачей, близкой к высоте круга; установленную максимально возможную производительность обработки, обусловленную прочностными свойствами рабочей поверхности круга и технологическими ограничениями обработки, и реализующие ее оптимальные режимы резания.
5. Внедренные в производство процессы шлифования труднообрабатываемых материалов алмазными кругами на металлических связках с использованием электрофизикохимических методов правки, позволившие в 2...5 раз увеличить

производительность обработки при экономически обоснованном расходе алмаза и высоком качестве обработки.

Цель работы. Разработка теоретических основ процесса шлифования алмазными кругами на металлических связках с хорошо развитым режущим рельефом круга (сформированным за счет введения в зону резания или автономно дополнительной электрической энергии) для решения крупной научной и народнохозяйственной проблемы существенного повышения производительности шлифования труднообрабатываемых материалов при съеме больших припусков.

Общая методика исследований. Методически работа выполнялась в три этапа. На первом этапе разработана упрощенная кинематическая модель шлифования идеальным неизнашиваемым кругом с учетом вероятностного участия зерен в резании, что позволило определить общие закономерности съема материала и формообразования поверхностей в пределах дуги контакта круга с заготовкой и установить зависимости основных физических и технологических параметров обработки. На втором этапе разработана уточненная физическая модель алмазного шлифования с учетом износа зерен и прочностных свойств рабочей поверхности круга и обрабатываемого материала, что позволило приблизить расчетную схему шлифования к реальной и уточнить решения, полученные в рамках разработанной кинематической модели. На третьем этапе определена максимально возможная производительность обработки, обусловленная прочностными свойствами рабочей поверхности круга и технологическими ограничениями обработки, и на ее основе выявлены и обоснованы физические и кинематические условия существенного повышения производительности и реализующие ее новые способы, схемы и условия шлифования, что позволило разработать и внедрить высокопроизводительные процессы алмазного шлифования.

Теоретические исследования проводились на базе основ технологии машиностроения и теории резания материалов с привлечением разделов математического анализа, теории вероятностей и сопротивления материалов. Экспериментальная проверка теоретических результатов проводилась по основным параметрам шлифования: производительности, шероховатости обработки, износу алмазного круга, силам и энергоемкости шлифования, остаточным напряжениям обработанной поверхности при глубинном и многопроходном круглом наружном и плоском шлифовании алмазными кругами на металлических связках в режиме их электрофизикохимической правки ряда материалов: твердых сплавов и сталей в диапазонах режимов шлифования, установленных на основе теоретических исследований. Измерительная аппаратура и средства контроля применялись стандартные. В работе предложены новые методики исследований, состоящие в расчетно-экспериментальном определении ряда физических параметров, которые описаны в основном содержании работы.

Научная новизна. Автором лично разработаны теоретические основы шлифования алмазными кругами на металлических связках с хорошо развитым режущим рельефом круга и на их базе выявлены, обоснованы и реализованы кинематические и физические условия существенного повышения производи-

тельности обработки, состоящие в применении новых соотношений глубины шлифования и максимальной (вероятностной) толщины среза и управлении величиной линейного износа зерна до момента его объемного разрушения и выпадения из связки с учетом прочностных свойств рабочей поверхности круга и основных технологических ограничений обработки, что позволило разработать высокопроизводительные способы алмазного глубинного, многопроходного и сверхскоростного шлифования (реализующие новые области эффективного сочетания параметров режимов шлифования и дополнительные высокочастотные колебательные движения круга или заготовки с использованием методов электрофизикохимической правки круга) и решить важную научную и народнохозяйственную проблему рационального применения алмазных кругов на металлических связках взамен кругов из обычных абразивов на операциях шлифования труднообрабатываемых материалов при съеме больших припусков.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов и выводов, представленных в работе, следует из сравнения теоретических результатов с собственными и полученными другими авторами экспериментальными данными; сопоставления решений с известными в литературе и полученными другими методами.

Практическая ценность и реализация работы. Практическая ценность научных результатов состоит в том, что они определяют новые области эффективного сочетания режимов шлифования алмазными кругами на металлических связках, позволяющие повысить производительность обработки при существующем оборудовании и алмазных кругов в 2...5 раз и показывающие пути создания новых шлифовальных станков и алмазных кругов для повышения производительности обработки до 10 раз и более. Разработанные высокопроизводительные процессы алмазного шлифования внедрены на предприятиях тяжелого машиностроения, автотракторсельхозмаша, станкоинструментальной, электротехнической промышленности Украины и стран СНГ для обработки твердосплавных и быстрорежущих инструментов и штампов, деталей из высокопрочных графитов и ферритов, деталей двигателей из труднообрабатываемых сплавов. Разработанные методики расчета оптимальных режимов шлифования использованы также при проектировании станков для сверхскоростного шлифования со скоростью круга до 600 м/с, для автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ и т.д.

Общий экономический эффект от внедрений результатов работы, подтвержденный нормативными документами, составил свыше 1,0 млн. руб. в год (цены 1991 года).

Апробация работы. Основные положения и результаты, представленные в диссертации, докладывались на трех Международных конференциях (г. Киев, 1981; Мишкольц, Венгрия, 1982 и 1986), пяти Всесоюзных конференциях (г. Харьков, 1981 и 1984; г. Подольск, 1982; г. Пермь, 1983; г. Краматорск, 1982) и восемнадцати Всесоюзных и Республиканских семинарах (г. Москва, 1988; г. Одесса, 1987, 1989, 1990; г. Киев, 1981, 1982, 1989; г. Харьков, 1982, 1986, 1993; г. Барнаул, 1989; г. Пенза, 1982; г. Краснодар, 1983; г. Днепропетровск, 1983; г. Волжский, 1981; г. Хмельницкий, 1983; г. Севастополь, 1987;

г. Курск, 1984). Диссертация полностью докладывалась на заседаниях кафедр “Технология машиностроения” Одесского политехнического института, Тульского политехнического института, Ульяновского политехнического института, Челябинского политехнического института, на заседании кафедры резания материалов Харьковского политехнического института, на заседании секции совета Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля, г. Киев.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 60 печатных работ, получено 7 авторских свидетельств.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, девяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 313 страницах машинописного текста, содержит 105 рисунков, 50 таблиц, список литературы из 195 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа посвящена решению проблемы повышения производительности алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов при съеме больших припусков. Отмечается, что известные процессы алмазного шлифования (включая глубинное и многопроходное) не могут быть рационально использованы вследствие относительно низкой производительности и высокого износа круга. Увеличить производительность шлифования можно путем применения алмазных кругов на металлических связках с использованием электрофизикохимических методов их правки. Показано, что для эффективного ведения процесса шлифования указанными кругами (за счет поддержания их “острого” режущего рельефа) необходимо выполнение условия примерного равенства скоростей износа зерен и связки. С физической точки зрения это означает равномерное во времени (периодическое) выпадение из связки наиболее выступающих зерен под действием предельных нагрузок со стороны обрабатываемого материала. Очевидно, чем выше прочность удержания зерна в связке, тем выше ресурс его работы. Следовательно, повысить эффективность шлифования можно за счет выполнения условия равенства “трех сил”: силы, действующей на зерно; силы, удерживающей зерно в связке, и разрушающей зерно силы, т.е. необходимо, чтобы моменту выпадения зерна из связки предшествовало его объемное разрушение. Соблюдение этого условия возможно путем регулирования величины линейного износа зерна до момента его выпадения из связки (степень затупления зерна) за счет применения оптимальных электрических параметров электрофизикохимических методов правки круга. Выбор оптимального значения величины линейного износа зерна необходимо производить из условия обеспечения максимально возможной производительности обработки с учетом прочностных свойств рабочей поверхности круга и технологических ограничений обработки. Из этого следует, что решение проблемы существенного повышения производительности шлифования алмазными кругами с хорошо развитым режущим рельефом (сформированным за счет использования методов электрофизикохимических методов правки) сводится к определению оптимальных значений величины линейного износа зерна и реализующих их оптимальных значе-

ний электрических и механических параметров режима шлифования, обеспечивающих выполнение условий равенства “трех сил”.

На рис. 1 приведена блок-схема предлагаемого решения, согласно которой связь между входными и выходными (технологическими) параметрами шлифования осуществляется посредством блока кинематических и блока физических параметров, а также величины линейного износа зерна x . Изменяя величину x с учетом наличия обратной связи можно в широких пределах изменять кинематические, физические и, соответственно, выходные (технологические) параметры или, наоборот, входные параметры с целью достижения требуемых выходных параметров. Предлагаемое решение является новым, т.к. в теории шлифования и на практике вопросы управления величиной x с позиции выполнения условий равенства “трех сил” не решались. Известны решения по управлению высотой выступания зерен над уровнем связки круга, используя электрохимическую правку. Однако они не предусматривают выполнения условий равенства “трех сил” за счет регулирования величиной x .

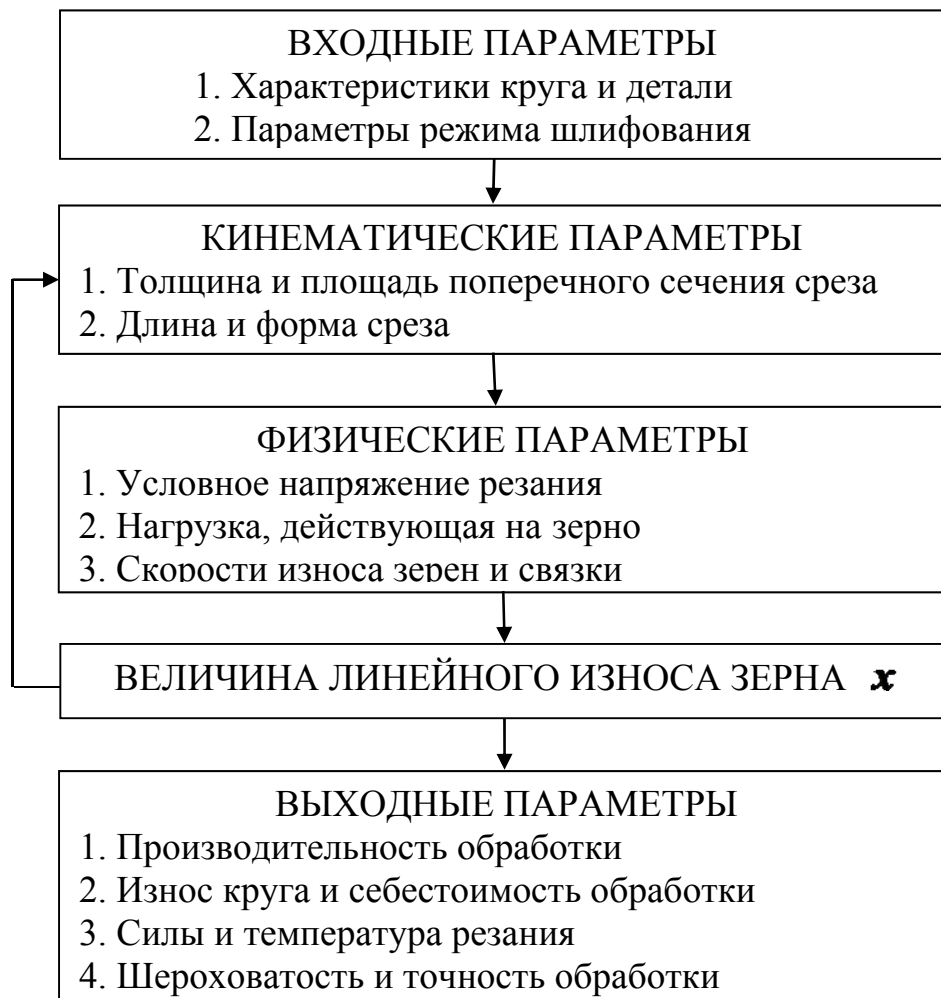


Рис. 1. Взаимосвязь параметров процесса шлифования

Для реализации предложенного решения и соответственно выявления и обоснования условий существенного повышения производительности алмазного шлифования, в работе разработаны кинематическая и физическая модели процесса, которые в совокупности дают достаточно полное представление о

физической сущности и основных закономерностях процесса и определяют теоретические основы алмазного шлифования.

Сущность кинематической модели состоит в установлении закономерностей съема материала и формообразования поверхностей вдоль дуги контакта круга с заготовкой. Необходимость разработки такой модели связано с тем, что в известных расчетных схемах, например, предложенной Е.Н. Масловым, зона шлифования рассматривается в виде “пятна контакта” круга с заготовкой, в пределах которого все зерна равнонагружены и работают в одинаковых условиях. В действительности, в связи с криволинейным характером контакта круга с заготовкой, разновысотным расположением зерен на рабочей поверхности круга и их вероятностным участием в резании, процесс шлифования подчиняется более сложным закономерностям и, следовательно, не может в полной мере быть описан усредненными параметрами, например, средней толщиной среза и т.д. Об этом свидетельствуют важные теоретические результаты, полученные в последние годы с использованием теоретико-вероятностного подхода в теории шлифования Д.Г. Евсеевым, С.Н. Корчаком, А.В. Королевым, Ю.К. Новоселовым, В.И. островским, А.Н. Сальниковым, А.Н. Резниковым, Л.Н. Филимоновым, Л.В. Худобиным, А.В. Якимовым, Н.Д. Аврутиным, О.Б. Федосеевым и другими исследователями.

Основу разработанной кинематической модели шлифования составляет аналитическое решение об описании границы завершения диспергирования режущими зернами материала, подводимого в зону резания, вдоль дуги контакта круга с заготовкой. Следуя рис. 2, граница проведена по вершинам микронеровностей обрабатываемого материала, имеет сложную конфигурацию, соединяет обрабатываемую поверхность с обработанной и по аналогии с лезвийной обработкой определяет положение условной (вероятностной) поверхности резания при шлифовании. Характерные точки границы являются основой для расчета физических и технологических параметров шлифования (максимальной толщины среза, параметров шероховатости обработки, фактической длины дуги контакта круга с заготовкой и т.д.), что позволяет с единых позиций вполне однозначно аналитически описать закономерности процесса во всем (возможном) диапазоне изменения глубины шлифования, включая многопроходное и глубинное шлифование.

Расчетами установлено, что положение границы определяется соотношением двух параметров – максимальной (вероятностной) толщины среза H_{max} и глубины шлифования t . В случае $t < H_{max}$ (многопроходное шлифование) граница принимает примерно симметричную форму относительно осевой плоскости шлифования, в случае $t > H_{max}$ (глубинное шлифование) – асимметричную форму.

Расчетами установлено, что процент работающих зерен для случая $t > H_{max}$ составляет приблизительно 50%, а для случая $t < H_{max}$ – 5...10% (т.е. зерна проходят почти “след в след”, что, как будет показано выше, является важным фактором увеличения производительности обработки).

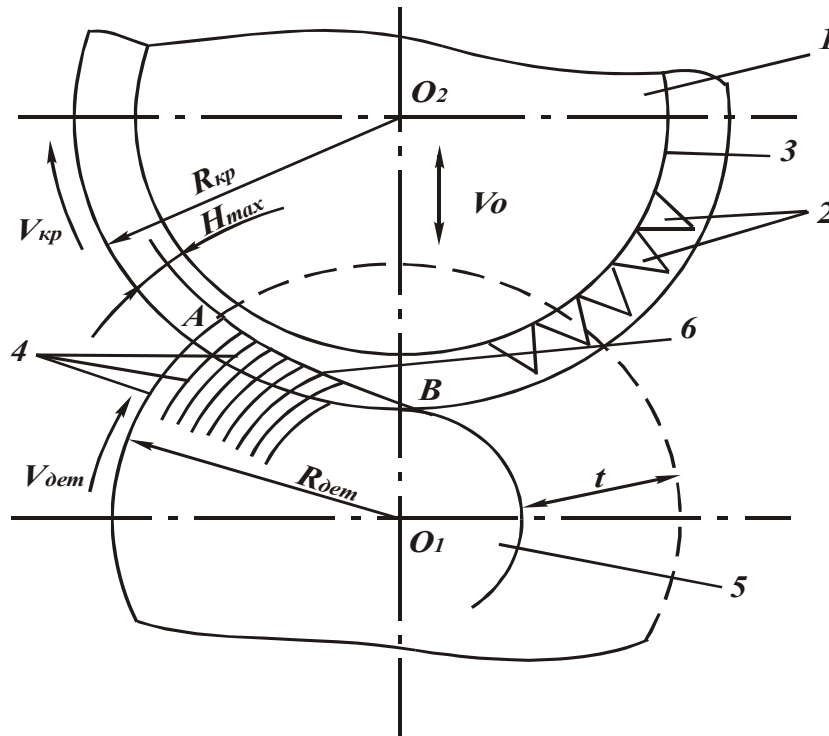


Рис. 2. Расчетная схема процесса шлифования: 1 – круг; 2 – зерна; 3 – линия, определяющая положение условной поверхности резания; 4 – цилиндрические оболочки, которыми представлен снимаемый припуск; 5 – заготовка.

В случае $t > H_{max}$ зависимость для определения положения границы принимает простой вид:

$$H = H_{max} \cdot \sqrt[6]{\frac{t_T}{t}}, \quad (1)$$

где t_T – координата текущей элементарной цилиндрической оболочки, которыми условно представлен в расчетной схеме снимаемый припуск, м.

Соответственно, параметры границы H_{max} и R_{max} (параметр шероховатости обработки, м) описываются зависимостями

$$H_{max} = \left(\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \right)^{0,33}, \quad (2)$$

$$R_{max} = 10 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \right)^{0,4}, \quad (3)$$

где \bar{X} – зернистость круга, м; m – объемная концентрация; $V_{заг}$, $V_{кр}$ – соответственно скорости заготовки и круга, м/с; $\rho = \frac{1}{R_{заг}} + \frac{1}{R_{кр}}$; $R_{заг}$, $R_{кр}$ – соответственно радиусы заготовки и круга, м.

Приведенные в табл. 1 значения толщины среза, полученные по расчетным зависимостям ряда авторов, показывают на большое расхождение расчет-

ных и экспериментальных данных. Например, для расчетной зависимости, предложенной Е.Н. Масловым, это расхождение превышает 1000 раз. Наиболее правильный результат получен с использованием зависимости (2). Имеющееся здесь расхождение расчетных и экспериментальных значений H_{max} (до 40%) связано с тем, что в кинематической модели не учитывается износ зерен.

Таблица 1

Расчетные значения толщины среза H_{max} ($R_{заг}=80 \cdot 10^{-3}$ м; $R_{кр}=150 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{X}=0,225 \cdot 10^{-6}$ м; $m=100$; $V_{кр}=30$ м/с; $t=0,1 \cdot 10^{-3}$ м; $V_{заг}=1$ м/мин;)

Автор	Авто работы	Е.Н. Маслов	Г.Б. Лурье	А.Н. Резников	Эксперимент
$H_{max} \cdot 10^{-6}$, м	14,7	0,007	0,12	1,1	10,5

Полученные результаты уточнены в рамках разработанной в работе физической модели шлифования. Установлены расчетные зависимости, которые содержат новый безразмерный параметр $\eta = \frac{x}{H}$, определяющий степень линейного износа зерен и изменяющийся в пределах 0...1 (для “острого” режущего рельефа круга $\eta \rightarrow 0$, для затупленного $\eta \rightarrow 1$):

$$H_{max} = \left[\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \cdot (1-\eta)^2}{m \cdot V_{кр} \cdot (1+\eta)} \right]^{0,33}, \quad (4)$$

$$R_{max} = 10 \cdot \left[\frac{(1-\eta)^2}{(1+\eta)} \cdot \frac{\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \right]^{0,4}. \quad (5)$$

С учетом параметра η ($\eta > 0$) значения H_{max} и R_{max} снижаются, следовательно, уменьшается (и даже устраняется) расхождение между расчетными и экспериментальными значениями H_{max} , приведенными в табл. 1. Сравнение экспериментальных значений максимальной толщины стружки с соответствующими расчетными значениями параметра H_{max} показало их приблизительное совпадение при $\eta=0,2$, табл. 2.

Из этого следует, что учет величины линейного износа зерен x (посредством параметра η) в расчетных зависимостях позволяет привести в соответствие теорию и практику шлифования.

Из всех входящих в зависимости (4) и (5) параметров наибольшее влияние на H_{max} и R_{max} оказывает η . Это указывает на преобладающую роль величины η в формировании основных физических и технологических параметров шлифования и подтверждает выдвинутую гипотезу об эффективности управления процессом шлифования на основе регулирования величины η .

Для установления значения η , удовлетворяющего условию равенства “трех сил”, в рамках разработанной физической модели шлифования получено новое аналитическое решение, определяющее условное напряжение резания σ

и коэффициент резания при шлифовании $K_{ш}$:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{ш}}, \quad (6)$$

$$K_{ш} = \frac{(1-\eta) + 2 \cdot f \cdot \eta}{(1+\eta)}, \quad (7)$$

где f – коэффициент трения; $\sigma_{сж}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, МПа.

Таблица 2

Расчетные значения H_{max} и экспериментальные значения максимальных толщин стружек в мм (исходные данные: $m=100$; $\bar{X}=0,2 \cdot 10^{-6}$ м; $V_{кр}=30$ м/с; $R_{кр}=0,15$ м; $R_{заг}=0,02$ м;)

№ п/п	Режим шлифования		η			Максимальная толщина стружки, мм
	t , мм	$V_{заг}$, м/мин	0	0,2	0,5	
1	0,05	0,5	0,0130	0,010	0,0071	0,013
2	0,05	0,8	0,0154	0,0124	0,0034	0,013
3	0,05	1,0	0,0167	0,0135	0,0091	0,013
4	0,05	2,0	0,021	0,0170	0,0115	0,013
5	0,1	0,5	0,0148	0,0119	0,0081	0,014
6	0,1	1,0	0,0187	0,0151	0,0102	0,015
7	0,1	2,0	0,0236	0,0191	0,0129	0,014
8	0,2	0,5	0,0167	0,0135	0,0091	0,015
9	0,2	1,0	0,0210	0,0170	0,0115	0,017

Следуя зависимости (6), параметр σ при обработке данного материала определяется лишь коэффициентом $K_{ш}$. Чем он больше, тем меньше σ , т.е. добиться снижения σ можно за счет поддержания на рабочей поверхности круга развитого режущего рельефа; применения эффективных технологических сред, снижающих трение круга с обрабатываемым материалом; прерывистого шлифования, обеспечивающего работу круга в режиме самозатачивания и т.д. Параметры режима шлифования и характеристики круга непосредственного влияния на σ не оказывают, они связаны с σ посредством коэффициента $K_{ш}$. По сути, зависимости (6) и (7) определяют физическую сущность процесса шлифования, что имеет важное теоретическое и практическое значение.

Достоверность полученного решения оценивалась экспериментально на основе сравнения значений η , полученных в соответствии с зависимостью (7) с учетом экспериментальных данных $K_{ш}$ и полученных по зависимости (5) с учетом экспериментальных данных R_{max} , рис. 3. Расхождение значений η не превышает 20%, что указывает на достоверность теоретического решения.

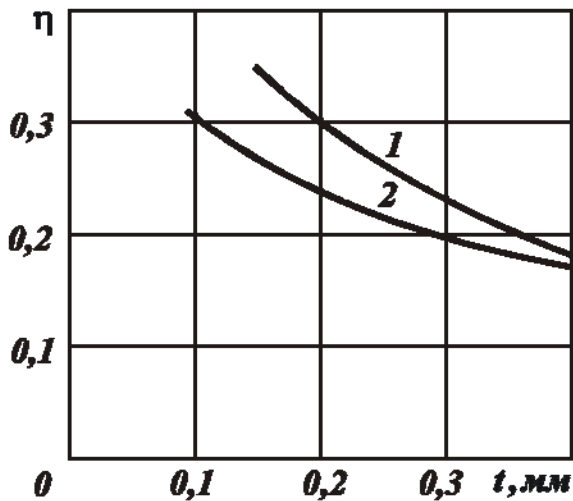


Рис. 3. Зависимость η от глубины шлифования t : 1 – по данным $K_{ш}$; 2 – по данным R_a . Обр. мат. – Т15К10; круг – 1А1 300х25 АС6 200/160 М1-10 4; $V_{кр} = 35$ м/с; $V_{заг} = 1$ м/мин; $S_d = 0,9$.

Множитель $(1 - \eta)$ в зависимостях (4), (5) может быть выражен через $K_{ш}$, исходя из зависимости (7)

$$(1 - \eta) = \frac{2 \cdot (K_{ш} - f)}{(1 + K_{ш} - 2 \cdot f)}. \quad (8)$$

Это по-новому вскрывает физическую сущность шлифования, состоящую в том, что все основные параметры определяются не просто коэффициентом резания при шлифовании или коэффициентом трения режущих зерен с обрабатываемым материалом, как это принято считать в теории шлифования, а их разностью $(K_{ш} - f)$, которая по мере затупления зерна $K_{ш} \rightarrow f$ стремится принять нулевое значение и приводит к прекращению съема материала. Данная закономерность хорошо согласуется с экспериментальными данными

М.Д. Узуняна, согласно которым коэффициент $K_{ш}$ при алмазно-искровом шлифовании твердых сплавов меньше, чем $K_{ш}$ при обычном алмазном шлифовании на величину коэффициента трения обрабатываемого материала со связкой круга, т.е. введение электрической энергии в зону резания позволяет практически исключить трение обрабатываемого материала со связкой круга, а следовательно, разность $(K_{ш} - f)$ определяет коэффициент “чистого” резания без учета трения обрабатываемого материала со связкой круга.

Используя зависимость (6), установлена связь между величиной η и нагрузкой, действующей на максимально выступающее зерно P

$$\eta = 1 - \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \cdot \left(\frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P} \right)^{1,5}. \quad (9)$$

Следуя зависимости (9), с увеличением η , т.е. по мере затупления зерна, нагрузка P возрастает. Следовательно, существуют такие значения η , при которых нагрузка P принимает значения, соответствующие прочности зерна на раздавливание (разрушающей нагрузки) и прочности удержания зерна в связке. Существует также значение η , соответствующее условию одновременного равенства прочности зерна на раздавливание и прочности удержания зерна в связке, т.е. обеспечивающего выполнение условия равенства “трех сил”. Это подтверждает основную предпосылку работы о существовании условия равенства “трех сил” и возможности его реализации на основе управления величиной линейного износа зерна (в данном случае определяемой η) за счет применения оптимальных электрических режимов электрофизикохимической правки круга. Основой для выбора оптимальных электрических параметров может быть

условие поддержания постоянной в процессе шлифования заданной (расчетной) силы резания $P_z = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}}$ или мощности резания $N = P_z \cdot V_{кр}$, где Q – производительность обработки, м³/с,

$$\sigma = \frac{m \cdot V_{кр}}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}} \cdot \frac{P^{1,5}}{(2 \cdot \sigma_{сж})^{0,5}}. \quad (10)$$

Расчетные значения P_z и N соответствуют оптимальному значению η , установленному по зависимости (9).

Предложенное решение положительно отличается от известного решения, связанного с управлением высотой выступления зерна над уровнем связки круга за счет использования электрохимической правки. Это обусловлено тем, что величина η оказывает определяющее влияние на условия формирования основных физических и технологических параметров шлифования, а высота выступления зерна над уровнем связки является своего рода “инструментом” для реализации заданного значения η , т.е. величина η является первичным, а высота выступления зерна над связкой – вторичным параметром управления процессом шлифования.

Учитывая то, что параметр $\sigma_{сж}$ определен не для всех обрабатываемых материалов (в частности, композиций материалов), в работе получено приближенное решение для расчета основных параметров шлифования

$$\eta = 1 - \frac{A}{P} \cdot \left(\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \cdot A^2}{m \cdot V_{кр} \cdot P^2} \right)^{\frac{(2-n)}{(2n-1)}}, \quad (11)$$

$$H_{max} = \left(\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \cdot A^2}{m \cdot V_{кр} \cdot P^2} \right)^{\frac{1}{(2n-1)}}, \quad (12)$$

$$\sigma = A \cdot \left(\frac{m \cdot V_{кр} \cdot P^2}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \cdot A^2} \right)^{\frac{n}{(2n-1)}}, \quad (13)$$

где A – параметр, определяющий прочностные свойства обрабатываемого материала; n – показатель энергоемкости процесса ($n=0,5 \dots 1,0$).

В табл. 3 приведены значения A и P , полученные расчетно-экспериментальным путем на основе экспериментальных данных P_z , R_{max} и теоретических зависимостей

$$A = \frac{4^{\frac{n}{6}} \cdot (3-n) \cdot (6-n) \cdot P_z \cdot R_{max}^{\frac{5n}{6}} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{заг}}}{2,64 \cdot B \cdot t^{\left(\frac{1-n}{6}\right)}}, \quad (14)$$

$$P = \frac{4^{\frac{n}{6}} \cdot (3-n) \cdot (6-n) \cdot P_z}{2,64 \cdot B \cdot t^{\left(\frac{1-n}{6}\right)}} \cdot R_{max}^{\frac{5}{12}} \cdot \left(\frac{630\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{кр} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{заг}} \right). \quad (15)$$

Установлено, что при шлифовании алмазными кругами на металлических связках с использованием электроэрозионной правки параметр A (для $n=0,75$) остается приблизительно постоянным в широком диапазоне изменения режимов шлифования. Некоторое уменьшение параметра A с увеличением $V_{заг}$ и t связано с повышением температуры резания и снижением прочности обрабатываемого материала, что хорошо согласуется с соответствующими экспериментальными данными С.Н. Корчака.

Таблица 3

Значения параметров A и P (круг 1А1 300х25 АС6 200/160 100% МО4; обр. мат. – Т5К10, $V_{кр} = 35$ м/с, $B = 22,5 \cdot 10^{-3}$ м)

$V_{заг}$, м/мин	5	5	5	10	10	10
$t \cdot 10^{-3}$, м	0,05	0,1	0,2	0,05	0,1	0,15
$A \cdot 10^5$, Н/м ^{1,25}	5,34	5,14	4,76	4,52	3,51	3,4
P , Н	1,92	1,68	1,78	1,78	1,59	1,66

Данная закономерность выявлена для различных характеристик кругов, обрабатываемых материалов и схем шлифования, в том числе на основе экспериментальных данных ряда авторов. Так, например, при плоском многопроходном шлифовании алмазным кругом на органической связке быстрорежущей стали Р6М5 параметр A с изменением режимов шлифования изменялся в “узких пределах” $(10 \dots 13,6) \cdot 10^5$ Н/м^{1,25}, а при круглом врезном шлифовании алмазным кругом на металлической связке М2-01 стали ХВГ и стали 45 (по экспериментальным данным мощности резания и шероховатости обработки, полученным Д.А. Пашковым) – в пределах $(13 \dots 15) \cdot 10^5$ Н/м^{1,25}, т.е. независимо от схемы шлифования и характеристики круга параметр A принимает приблизительно одни и те же значения при изменении режимов шлифования в широких пределах. Аналогичные результаты получены при заточке твердосплавного инструмента совместно со сталью (по экспериментальным значениям силы резания и шероховатости обработки, полученным И.П. Захаренко и А.А. Шепелевым): параметр A изменялся в небольших пределах $(8 \dots 10) \cdot 10^5$ Н/м^{1,25}, т.е. параметр A достаточно объективно характеризует сопротивляемость материала резанию и может быть использован для оценки обрабатываемости материала шлифованием.

Из табл. 3 следует, что параметр P в установившемся процессе шлифования, независимо от условий обработки, остается приблизительно постоянным, близким к разрушающей зерно нагрузке. Аналогичные данные были получены при шлифовании алмазными кругами на металлических связках других характеристик. Этим показано, что параметр P при шлифовании независимо от

условий обработки остается приблизительно постоянным, а переменным является параметр η (в соответствии с зависимостями (9) и (11)).

Это принципиально новое решение, т.к. в теории шлифования принято считать переменным параметром величину нагрузки P , действующую на зерно, с изменением которой связывают условия изменения основных физических и технологических параметров: износ круга, силы и температуры резания, параметров качества обработки в зависимости от условий шлифования. В действительности, изменение указанных параметров происходит не за счет изменения параметра P , а за счет изменения величины η .

Сделанный вывод вытекает, в частности, из зависимости для расчета относительного расхода алмаза q , характер изменения которого определяется величиной η :

$$q = \frac{10^{-3} \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot \Delta_i \cdot V_{кр}}{\rho_m \cdot V_{заг} \cdot t \cdot \eta}, \quad (16)$$

где ρ_a , ρ_m - соответственно плотности алмаза и обрабатываемого материала, кг/м³; Δ_i - линейный износ зерна за одно касание с материалом, м; α - коэффициент, учитывающий плотность связи в зависимости от концентрации алмазных зерен.

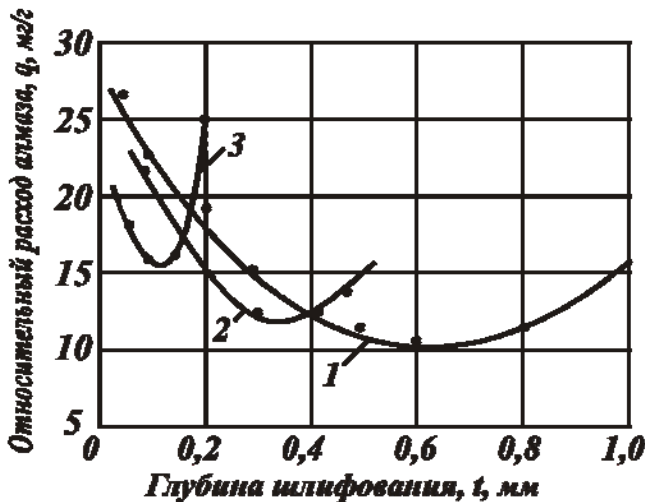


Рис. 4. Зависимость относительного расхода алмаза q от глубины шлифования t : обр. мат. - ВК15, круг - 1А1 300х25 АС6 250/200 М1-02 4, $V_{кр}=35$ м/с, $S_d=0,9$, 1 - $V_{заг}=1$ м/мин, 2 - $V_{заг}=3$ м/мин, 3 - $V_{заг}=6$ м/мин.

При условии $\eta \rightarrow 0$, т.е. с увеличением $V_{заг}$, t при $P = const$ в соответствии с зависимостью (11), относительный расход алмаза $q \rightarrow \infty$, что хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными данными различных авторов. Например, с известными экспериментальными данными А.А. Сагарды по анализу выпавших из связки алмазных зерен, когда с увеличением глубины шлифования количество выпавших зерен с площадками износа (что соответствует снижению величины η) уменьшается.

Второй важной особенностью зависимости (16) является ее экстремальность. Нетрудно видеть, что при изменении t , $V_{заг}$ с учетом зависимости (10) функция q проходит точку минимума, т.е. существует экстремальное значение η , которое для $n=0,75$ равно $\eta_{экстр} = 0,88$. Приведенные на рис. 4 экспериментальные зависимости $q-t$ для различных значений $V_{заг}$ хорошо согласуются с

экспериментальными данными А.А. Сагарды по анализу выпавших из связки алмазных зерен, когда с увеличением глубины шлифования количество выпавших зерен с площадками износа (что соответствует снижению величины η) уменьшается.

результатами аналитических исследований. Так, с увеличением $V_{заг}$ минимум q возрастает, а экстремальная глубина шлифования смещается в область меньших значений t , что свидетельствует о возможности снижения q в условиях глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью заготовки.

Экспериментально подтверждено, что в точках минимума относительного расхода алмаза, независимо от сочетания параметров режима шлифования, величина линейного износа зерна принимает практически одно значение, соответствующее приблизительно $\eta=0,88$.

Теоретически установлено, что аналогично относительному расходу алмаза q , по экстремальной зависимости при $P = const$ с увеличением t изменяется себестоимость обработки C , представленная в работе в безразмерных величинах:

$$\frac{C}{C_{экстр}} = \frac{0,34}{\left[\alpha_1^{0,5} \cdot (1 - 0,12 \cdot \alpha_1^{1,25} \cdot \alpha_2^{2,5})^3 \right]} + \frac{0,5}{(\alpha_1 \cdot \alpha_2)}, \quad (17)$$

$$\text{где } \alpha_1 = \frac{t}{t_{экстр}}, \quad \alpha_2 = \frac{V_{заг}}{V_{заг_{экстр}}}.$$

Минимум себестоимости обработки достигается при $\eta=0,76$. Данное теоретическое решение соответствует многочисленным экспериментальным данным, приведенным в научно-технической литературе, согласно которым себестоимость обработки с увеличением глубины шлифования проходит точку минимума. Этим доказано, что экстремум себестоимости обработки обусловлен изменением параметра η при $P = const$. Установлено также, что экстремальные безразмерные значения себестоимости обработки, относительного расхода алмаза и соответствующие им значения глубины шлифования отличаются лишь постоянными множителями. Следовательно, оптимизация параметров процесса шлифования сводится к определению оптимального значения η в соответствии с зависимостью

$$\eta = 1 - 0,12 \cdot \alpha_0^{1,25}, \quad (18)$$

$$\text{где } \alpha_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2^2.$$

Зная оптимальное значение η , по приведенным расчетным зависимостям определяются остальные параметры шлифования. При этом величину P следует принимать равной предельной нагрузке на раздавливание зерна (взятой из справочной литературы), что позволит реализовать условие равенства “трех сил” и повысить производительность обработки.

Прочность обрабатываемого материала учитывается параметром $\sigma_{сж}$ (из справочной литературы) или с использованием параметра A , установленного расчетно-экспериментальным путем. Таким образом, в работе разработано два подхода к расчету параметров шлифования: “чисто” аналитический с использованием справочных данных P , $\sigma_{сж}$ и приближенный, требующий предварительного определения параметра A .

Полученные решения о переменности величины η и постоянстве R при шлифовании позволили выявить, обосновать и реализовать условия существенного повышения производительности алмазного шлифования. Для этого определена максимально возможная производительность обработки, обусловленная прочностными свойствами рабочей поверхности круга, т.е. при фиксированной (предельной) площади поперечного сечения среза $S = 0,5 \cdot \psi \cdot H_{max}^2 \cdot \frac{(1+\eta)}{(1-\eta)}$ и $\eta=0$. Значения параметра ψ , равного проценту работающих зерен, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расчетные значения ψ при $H_{max}=10 \cdot 10^{-6}$ м

$t \cdot 10^{-6}$, м	1	5	10	50	100
ψ	0,0665	0,1525	0,4319	0,44	0,44

$$Q = \frac{\sqrt{2} \cdot m \cdot V_{кр} \cdot B}{450 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \cdot \left[\frac{H_{max}^3}{2 \cdot \sqrt{t_{nT}}} + \sum_{i=0}^{n-2} t_{iT}^{5/2} \right], \quad (19)$$

$$V_{заг} = \frac{Q}{B \cdot t}, \quad (20)$$

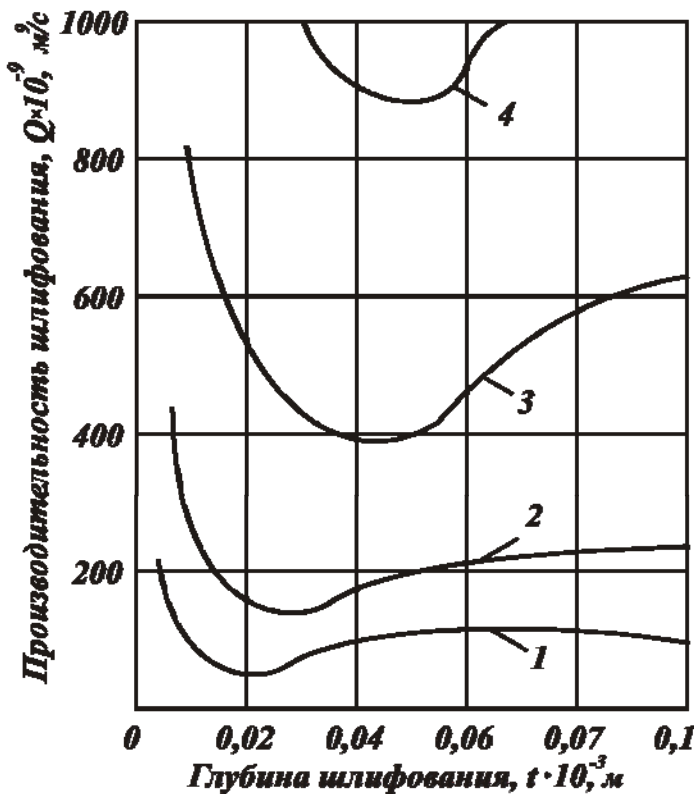


Рис. 5. Зависимость производительности шлифования Q от глубины шлифования t . Исх. данные: $m = 100$, $\bar{X} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, $B = 22,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho = 17$ м⁻¹, $V_{кр} = 30$ м/с; 1 – $S = 400$ мкм²; 2 – $S = 900$ мкм²; 3 – $S = 1600$ мкм²; 4 – $S = 2500$ мкм².

где B – ширина круга, м; $t_{iT} = t_T + i \cdot t$; $t_{nT} = t_T + (n-1) \cdot t$; t_T – координата текущей элементарной оболочки, которыми условно представлен снимаемый припуск, м; n – число проходов круга.

Установлено, что в общем случае производительность обработки Q с увеличением глубины шлифования t изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума, рис. 5. Скорость заготовки при этом непрерывно уменьшается. Доказано, что в точке минимума Q глубина шлифования t равна параметру H_{max} . Это соответствует переходу от схемы многопроходного ($t < H_{max}$) к схеме традиционного глубинного шлифования ($t > H_{max}$).

С физической точки зре-

ния минимум Q при $S = const$ обусловлен существованием самой короткой по длине стружки Δl (рассматривая производительность обработки пропорциональной $S \cdot \Delta l$), поскольку с увеличением и уменьшением глубины шлифования t , начиная со значения $t = H_{max}$, длина стружки Δl возрастает (в первом случае за счет роста длины дуги контакта круга с заготовкой, во втором – за счет увеличения $V_{заг}$).

Проведенный анализ известных методов алмазного и абразивного шлифования показал, что все они, как правило, реализуют условие $t = H_{max}$, т.е. минимум Q . Очевидно, для абразивного шлифования это эффективно, т.к. за счет больших нагрузок на зерна обеспечивается режим интенсивного самозатачивания круга и поддерживается его высокая режущая способность. Для алмазного шлифования это условие приводит к повышенному износу круга, что, собственно, и предопределяет низкую эффективность применения алмазных кругов при высокопроизводительном шлифовании и нецелесообразность их использования взамен обычных абразивных кругов при съеме больших припусков.

Полученная экстремальная зависимость $Q - t$ определяет кинематические условия существенного повышения производительности обработки, состоящие в реализации новых соотношений между параметрами t и H_{max} ($t < H_{max}$, $t > H_{max}$), т.е. в реализации левой и правой ветвей зависимости.

Разработаны способы шлифования (в т.ч. на уровне изобретения), реализующие левую ветвь зависимости $Q - t$, которые основаны на применении схем многопроходного (рис. ба) и глубинного (рис. бб) круглого наружного шлифования с относительно большой скоростью заготовки, близкой к скорости круга, глубинного круглого наружного шлифования периферией круга с относительно небольшой скоростью заготовки и большой продольной подачей (рис. бв), глубинного круглого наружного шлифования с относительно небольшой скоростью заготовки и дополнительными тангенциальными высокочастотными колебательными движениями круга большой амплитуды (рис. бг), глубинного плоского торцевого шлифования с использованием дополнительных высокочастотных колебательных движений круга или заготовки в направлении, перпендикулярном направлению подачи круга (рис. бд). Установлено, что эффективность шлифования в данном случае обусловлена прохождением зерен почти “след в след” и возможностью увеличения H_{max} при фиксированном значении S (т.е. нагрузки на зерно), что позволяет обработку вести с большой скоростью круга $V_{кр}$, до 600 м/с и выше. Применение таких условий обеспечивает увеличение производительности обработки в 10 раз и более, что хорошо согласуется с опытом зарубежных станкостроительных фирм, которые вышли на создание шлифовальных станков со скоростью круга до 300 м/с.

Реализация предложенных схем шлифования требует создания новых станков с большими скоростями заготовки и круга, в связи с чем в ЭНИМС (г. Москва) переданы результаты исследований автора для проектирования и изготовления гаммы станков с ЧПУ для сверхскоростного шлифования со ско-

ростью круга до 600 м/с. Создание таких станков позволит кардинально изменить содержание шлифовальных работ.

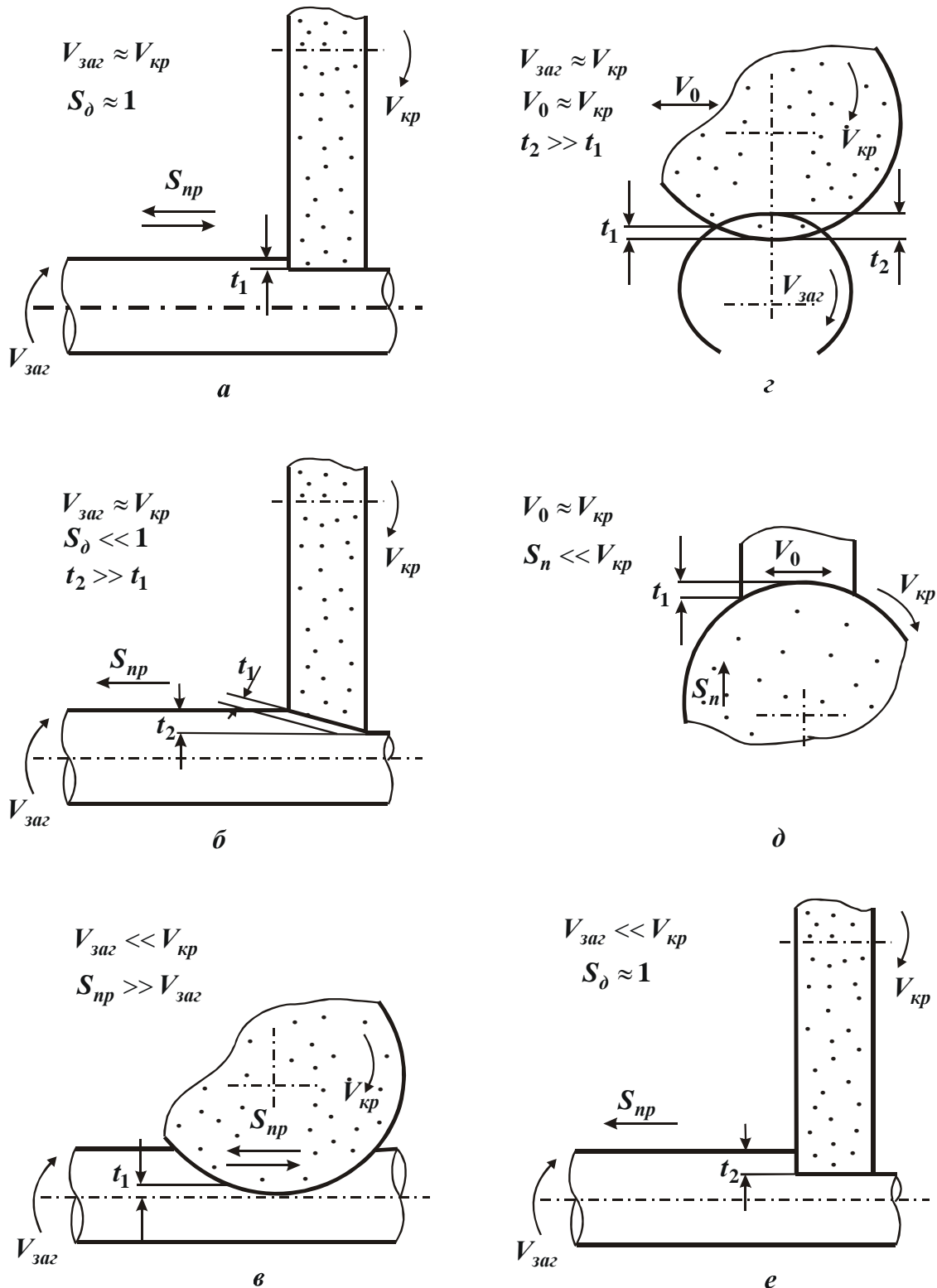


Рис. 6. Высокопроизводительные способы шлифования.

Основной кинематической схемой, реализующей правую ветвь зависимости $Q - t$, является глубинное круглое шлифование с относительно небольшой

скоростью заготовки и продольной подачей, близкой к высоте круга, рис. 6е. Эффективность схемы обусловлена, прежде всего, увеличением t и, соответственно, площадью обработки:

$$Q = \frac{B \cdot m \cdot V_{кр}}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \cdot (1 - \eta)^{\frac{(2n-1)}{(2-n)}} \cdot \left(\frac{P}{A}\right)^{\frac{3}{(2-n)}}, \quad (21)$$

$$V_{заг} = \frac{m \cdot V_{кр}}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{t \cdot \rho}} \cdot (1 - \eta)^{\frac{(2n-1)}{(2-n)}} \cdot \left(\frac{P}{A}\right)^{\frac{3}{(2-n)}}. \quad (22)$$

Например, при съеме припуска величиной до 50 мм за один проход круга, т.е. увеличении t в 1000...5000 раз по сравнению с обычным многопроходным шлифованием, производительность обработки в соответствии с зависимостью (21) может быть увеличена в 30...70 раз, что хорошо согласуется с опытом применения глубинного абразивного шлифования, где достигнута производительность обработки $Q = 10000 \text{ мм}^3/(\text{мин} \cdot \text{мм})$ и выше (по данным П.И. Ящерицына). Эффективность схемы обусловлена также реализацией более высоких значений P и снижением $\eta \rightarrow 0$ (определяющих физические условия повышения производительности), что обеспечивается применением прочных алмазных

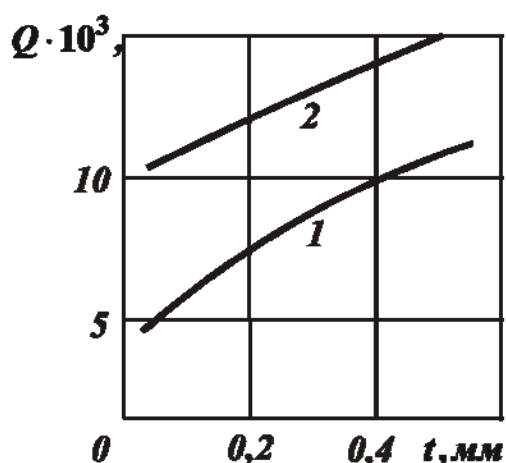


Рис. 7. Зависимость производительности обработки Q от глубины шлифования t . Обр. мат. – ВК8; круг – 1А1 300х25 АС6 250/200 М1-02 4, $V_{кр} = 35$ м/с, $S_d = 0,9$; 1 – скорость линейного износа круга $h_x = 0,005$ мм/мин; 2 – скорость линейного износа круга $h_x = 0,01$ мм/мин.

зерен и металлических связей, эффективных методов электрофизикохимической правки круга, позволяющих поддерживать на его рабочей поверхности развитый режущий рельеф. Шлифование с заданным оптимальным значением η (определяемым экономически обоснованным расходом алмаза) достигается за счет установления скорости заготовки $V_{заг}$ в соответствии с зависимостью (22) и электрических параметров правки круга из условия $P_z = const$, $N = const$ по зависимости (10).

Теоретические результаты подтверждены экспериментально, рис. 7. С увеличением t (при постоянной скорости линейного износа круга, что соответствует приблизительно одному значению нагрузки на зерно) производительность обработки возрастает. Этим показано, что эффект глубинного шлифования состоит в возможности более интенсивного увеличения t по сравнению с уменьшением $V_{заг}$, в результате чего их произведение $t \cdot V_{заг}$, определяющее Q , возрастает. В зарубежной научной литературе эффект повышения Q связывают не с интенсификацией режимов шлифования, а с уменьшением вспомогательного времени (уменьше-

нием числа проходов круга и т.д.), т.е. глубинное шлифование рекомендуется выполнять таким образом, чтобы увеличение t было пропорционально снижению скорости заготовки $V_{заг}$, в результате чего их произведение $t \cdot V_{заг}$ остается таким же, как и при обычном многопроходном шлифовании. Очевидно, такой подход не позволяет в полной мере реализовать высокие возможности глубинного шлифования.

Предложенная в работе схема круглого наружного глубинного алмазного шлифования положительно отличается от известной схемы глубинного шлифования, разработанной в ИСМ АН Украины, согласно которой скорость продольной подачи $S_{пр}$ уменьшают пропорционально увеличению глубины шлифования t , а скорость заготовки $V_{заг}$ оставляют такой же, как и при многопроходном шлифовании. Следуя зависимости

$$H_{max} = \left[\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3}{m \cdot V_{кр}} \cdot \left(\frac{V_{заг} \cdot Q \cdot \rho}{B} \right)^{0,5} \right]^{0,33}, \quad (23)$$

добиться увеличения $Q = S_{\partial} \cdot B \cdot V_{заг} \cdot t$ (где S_{∂} – долевая продольная подача) при фиксированном значении H_{max} (определяющем при глубинном шлифовании нагрузку, действующую на зерно) можно за счет снижения $V_{заг}$ и соответственно $S_{пр}$. Следовательно, применение глубинного шлифования с относительно большой $V_{заг}$ малоэффективно, это ведет к повышенному износу алмазного круга, т.е. скорость заготовки при глубинном шлифовании необходимо уменьшать.

Выполненные исследования показали, что одним из основных ограничений применения предложенной схемы глубинного шлифования может быть повышенная теплонапряженность процесса вследствие увеличения теплового потока (за счет роста Q) и уменьшения скорости перемещения теплового источника (т.е. уменьшения скорости заготовки $V_{заг}$). В связи с этим, определена максимально возможная производительность обработки Q и реализующие ее параметры режима шлифования с учетом ограничения по температуре резания θ :

$$Q = \frac{0,074 \cdot B \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \theta^2 \cdot (1 - \eta)^{1,8}}{A^2 \cdot \psi^2 \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}} \cdot \left(\frac{P}{A} \right)^{1,2}, \quad (24)$$

$$V_{заг} = \frac{Q}{B \cdot t}, \quad (25)$$

$$V_{кр} = \frac{330,6 \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \bar{X}^3 \cdot \theta^2 \cdot (1 - \eta)^{0,2}}{m \cdot A^2 \cdot \psi^2 \cdot t} \cdot \left(\frac{A}{P} \right)^{1,2}, \quad (26)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ψ – коэффициент, показывающий, какая часть работы переходит в теплоту, поглощаемую заготовкой.

Следуя зависимости (24), с увеличением t (при $\theta = const$ и $P = const$) производительность Q уменьшается. Компенсировать уменьшение Q можно за

счет снижения $\eta \rightarrow 0$ и увеличения P , поскольку эти два параметра входят в зависимость (24) со значительно большей степенью, чем глубина шлифования t . Важным условием повышения Q при глубинном шлифовании следует рассматривать также уменьшение $V_{кр}$ по зависимости (26) в связи с ростом t и P . Поэтому для поддержания $V_{кр}$ на традиционном уровне 30...50 м/с необходимо увеличивать зернистость и уменьшать концентрацию круга, что хорошо согласуется с практикой обычного абразивного глубинного шлифования, основанного на применении крупнозернистых высокопористых кругов. Установлено, что при выполнении этих условий температура резания не превышает 300°C.

Необходимо отметить, что основной эффект снижения температуры резания обусловлен снижением η , применяя эффективные методы электроэрозионной и электрохимической правки круга. Выполненные рентгенографические исследования обработанных поверхностей твердых сплавов показали, что при глубинном алмазном шлифовании с непрерывной правкой круга и использовании оптимальных режимов резания в поверхностном слое заготовки формируются благоприятные сжимающие напряжения, т.е. роль теплового фактора в процессе несущественна, доминирует силовой фактор. Для снижения температуры резания (без уменьшения Q и увеличения q) в работе предложен новый способ глубинного прерывистого шлифования, согласно которому длину впадины прерывистого круга l_2 принимают в 2...6 раз больше длины рабочего выступа круга l_1 , а скорость заготовки $V_{заг}$ и глубину шлифования t устанавливают в соответствии с зависимостями:

$$V_{заг} = \frac{V_{заг0}}{\left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)^2}, \quad (27)$$

$$t = t_0 \cdot \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)^2, \quad (28)$$

где $V_{заг0}$, t_0 – оптимальные значения $V_{заг}$ и t для сплошного круга той же характеристики, что и прерывистый круг.

Для реализации данного способа $V_{заг}$ необходимо уменьшать, а t – увеличивать, т.е. чем больше t , тем больше l_2 и выше эффект шлифования.

Предложенная схема глубинного алмазного шлифования с относительно небольшой скоростью заготовки обеспечивает чистоту обработки в пределах $R_a < 1,25$ мкм. Причем, чем выше глубина шлифования t при условии $H_{max} = const$, тем меньше параметр шероховатости R_a , определяемый в соответствии с зависимостью

$$R_a = 0,2 \cdot H_{max} \cdot \left(\frac{H_{max}}{4 \cdot t}\right)^{0,2}. \quad (29)$$

Таким образом, наряду с повышением производительности обработки и

снижением относительного расхода алмаза при заданной температуре резания, предложенный процесс глубинного шлифования позволяет обеспечить достаточно высокую чистоту обработки. Это позволяет рассматривать его как способ чистовой обработки.

В работе также дано теоретическое обоснование теоретических возможностей процесса глубинного шлифования с постоянным тангенциальным усилием. Показана его высокая эффективность применительно к шлифованию заготовок с неравномерным припуском алмазным кругом, работающим в режиме затупления.

Эффективность установленных в работе решений проверялась на различных операциях шлифования и заточки инструментов в лабораторных и производственных условиях. В результате достигнута высокая производительность обработки – 20...30 тыс. мм³/мин и более при экономически обоснованном расходе алмаза (в пределах 5 мг/г) и высоком качестве обработанных поверхностей. Это позволяет эффективно использовать алмазные круги как на операциях окончательного, так и предварительного шлифования труднообрабатываемых материалов при съеме больших припусков.

На основе проведенных исследований разработаны высокопроизводительные процессы глубинного алмазного шлифования с использованием электрофизикохимических методов правки круга, применительно к обработке твердосплавных и быстрорежущих инструментов и штампов, высокопрочных графитов и ферритов, других труднообрабатываемых материалов. В частности, разработан высокопроизводительный процесс глубинного алмазного круглого наружного шлифования твердосплавных и быстрорежущих многолезвийных инструментов с режимами резания: $t=0,1...1,0$ мм; $V_{заг} = 0,5...5,0$ м/мин; $S_{\delta} \approx 1,0$.

Рекомендуется использовать алмазные круги, в том числе крупногабаритные диаметром 500 мм, на относительно “мягких” металлических связках типа М1-01 и на прочных связках типа М2-01 в режиме непрерывной электроэрозионной правки.

В целом разработанные процессы внедрены на предприятиях пяти отраслей с экономическим эффектом свыше 1 млн рублей в год (в ценах 1991 года).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны физические и кинематические основы алмазного шлифования, которые позволили выявить, обосновать и реализовать кинематические и физические условия существенного повышения производительности обработки за счет применения новых соотношений глубины шлифования t и максимальной (вероятностной) толщины среза H_{max} ($t < H_{max}$, $t > H_{max}$) и управления величиной линейного износа зерна до момента его объемного разрушения и выпадения из связки круга с учетом прочностных свойств рабочей поверхности круга и основных технологических ограничений обработки.

2. Разработаны высокопроизводительные способы алмазного шлифования, реализующие новые области эффективного сочетания параметров режимов шлифования и дополнительные высокочастотные колебательные движения круга или заготовки с большой амплитудой, позволяющие в 2...5 раз повысить производительность обработки на существующем шлифовальном оборудовании (случай $t > H_{max}$) и до 10 раз и выше – на перспективном оборудовании (случай $t < H_{max}$).

На основе установленной экстремальной зависимости производительности обработки от глубины шлифования показано, что условие $t < H_{max}$ реализуется при глубинном, многопроходном и сверхвысокоскоростном шлифовании с относительно большой скоростью заготовки, близкой к скорости круга, а условие $t > H_{max}$ – при глубинном шлифовании с относительно небольшой скоростью заготовки. Показано также, что все многообразие известных способов алмазного шлифования реализует условие $t \approx H_{max}$, соответствующее минимуму производительности обработки, чем, собственно, и обусловлена низкая эффективность применяемых способов алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов при съеме больших припусков.

3. Разработана кинематическая модель процесса алмазного шлифования, в которой закономерности съема материала и формообразование вполне однозначно определены положением условной (вероятностной) поверхности резания при шлифовании, устанавливающей границу завершения диспергирования режущими зернами материала, подводимого в зону резания, и полученной с учетом вероятностного расположения зерен на рабочей поверхности круга и их участия в резании.

На основе координат характерных точек поверхности и их производных получены расчетные зависимости, описывающие основные параметры шлифования во всем возможном диапазоне изменения глубины шлифования, включая многопроходное и глубинное шлифование.

4. Разработана упрощенная физическая модель глубинного алмазного шлифования с относительно небольшой скоростью заготовки (случай $t > H_{max}$), впервые рассматривающая во взаимосвязи кинематические параметры с параметрами процесса стружкообразования, износа круга, установившегося режущего рельефа круга и вероятностного участия зерен в резании, что позволило:

- уточнить результаты, полученные в рамках разработанной кинематической модели шлифования в плане учета параметров установившегося режущего рельефа круга в зависимости от условий обработки;
- установить замкнутую систему уравнений, с единых позиций описывающих все основные физические и технологические параметры шлифования с учетом параметров режима резания, характеристик круга и заготовки, включая физико-механические свойства зерен и обрабатываемого материала;
- раскрыть физическую сущность процесса, состоящую в том, что переменным параметром является величина линейного износа зерна до момента его объемного разрушения и выпадения из связки, а постоянным (независимо от схемы шлифования и режимов резания) – величина нагрузки, действующая на отдель-

ное зерно круга. Показано, что эти параметры являются определяющими при алмазном шлифовании. Показано также, что в общем случае все основные физические и технологические параметры шлифования определяются разностью коэффициента резания при шлифовании и коэффициента трения, которая, по мере затупления зерен, стремится к нулю и приводит к прекращению процесса съема материала;

– сформулировать физические условия существенного увеличения производительности обработки при одновременном уменьшении расхода алмаза, температуры резания и повышении чистоты и точности обработки, основанные на реализации условия равенства “трех сил” путем управления величиной линейного износа зерен.

5. Разработан новый подход к расчету оптимальных параметров режимов алмазного шлифования, включая механические и электрические параметры, в котором в качестве условий оптимизации использована величина нагрузки, действующая на отдельное зерно круга, а в качестве оптимизируемого параметра - величина линейного износа зерна до момента его объемного разрушения и выпадения из связки круга, что впервые позволило определить максимально возможную производительность обработки и реализующие ее режимы шлифования с учетом прочностных свойств рабочей поверхности алмазного круга и основных технологических ограничений обработки, включая износ круга и себестоимость обработки, силы и температуру резания, шероховатость и точность обработки и другие параметры.

6. Доказано существование оптимальных значений величины линейного износа зерна до момента его объемного разрушения и выпадения из связки, обусловленных экстремальностью зависимости относительного расхода алмаза от глубины шлифования. Установлено, что в точках минимума относительного расхода алмаза, не зависимо от сочетания параметров режима шлифования, величина линейного износа зерна принимает практически одно значение. Этим доказано существование оптимального (с точки зрения износостойкости круга) режущего рельефа алмазного круга, который может быть реализован режимом самозатачивания или режимом непрерывной электрофизикохимической правки.

7. На основании исследований разработаны высокопроизводительные процессы алмазного шлифования твердосплавных и быстрорежущих инструментов и штампов, деталей из высокопрочных графитов и ферритов и других труднообрабатываемых материалов, позволившие исключить предварительное шлифование абразивными кругами, повысить производительность и качество обработки при экономически обоснованном износе алмазного круга и решить актуальную народнохозяйственную проблему рационального применения алмазных кругов при съеме больших припусков. Новизна технических решений подтверждена 7 авторскими свидетельствами на изобретения.

8. Внедрение результатов работы на предприятиях пяти отраслей обеспечило фактически годовой экономический эффект свыше 1,0 млн. рублей (в ценах 1991 года). Положительные результаты внедрений позволили отраслевым организациям принять разработки к широкому внедрению в масштабах соответствующих отраслей.

В работе получены новые результаты по малоисследованным или вовсе неисследованным проблемам алмазного шлифования. Завершенные исследования, представленные в работе, создают основы для дальнейшего развития теории шлифования, оптимизации и проектирования высокопроизводительных процессов алмазного шлифования.

В целом осуществлено теоретическое обобщение и решена крупная научная проблема в области технологии машиностроения и механической и физико-технической обработки, состоящая в разработке физических и кинематических основ алмазного шлифования и на их базе выявлении, обосновании и реализации физических и кинематических условий существенного повышения производительности обработки при съеме больших припусков, что имеет важное теоретическое и народнохозяйственное значение.

Основное содержание и результаты диссертации отражены в работах:

1. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Якимов А.А. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами. – К.: Техніка, 1993. – 152 с.
2. Якімов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якімов О.О. Високопродуктивне шліфування: Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с.
3. Якимов А.А., Новиков Ф.В. Повышение эффективности алмазного прерывистого шлифования. – Вестник машиностроения, 1988. №7, с. 45-47.
4. Новиков Ф.В., Якимов А.А. Математическое обеспечение САПР ТП шлифования. – В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении. Пермь: ППИ, 1987, с. 21-28.
5. Новиков Ф.В. Вероятностный расчет максимальной толщины среза и шероховатости обработанной поверхности при шлифовании. – В кн.: Резание и инструмент, вып. 30. Харьков: Вища школа, 1983, с. 73-78.
6. Новиков Ф.В. Кинетика образования режущего рельефа круга в процессе шлифования. – В кн.: Контактные процессы при больших пластических деформациях. Харьков: ХАИ, 1982, с. 37-43.
7. Новиков Ф.В., Сошников С.А., Лысенко А.В. Оптимизация высокопроизводительного шлифования и вопросы качества алмазной обработки твердого сплава инструментального назначения. – Редколлегия журнала “Сверхтвердые материалы”. Деп. в ВИНТИ, 19.04.84, № 2475-84 ДЕП.
8. Новиков Ф.В. Закономерности износа алмазного круга в процессе шлифования. – В кн.: Прогрессивные технологические процессы, оборудование и инструмент. Харьков: ХАИ, 1987, с. 119-126.
9. Новиков Ф.В., Дубина Н.И. Механизм износа круга в условиях обычного и управляемого процесса шлифования. – Тез. докл. Всесоюзн. научн.-техн. конф. “Новые конструкции и прогрессивные технологии производства инструмента”, Харьков, 1984, с. 278-282.
10. Новиков Ф.В. Режущий рельеф алмазного круга и его роль в формировании технологических показателей шлифования. – В кн.: Резание и инструмент, вып. 32, Харьков: Вища школа, 1984, с. 64-70.

11. Новиков Ф.В. Расчет шероховатости шлифованной поверхности с учетом стабилизации режущего рельефа алмазного круга. – В кн.: Резание и инструмент, вып. 35, Харьков: Вища школа, 1986, с. 115-121.
12. Новиков Ф.В. Теоретический анализ износа и стабилизации рельефа алмазного круга. – В кн.: Резание и инструмент, вып. 36, Харьков: Вища школа, 1986, с. 104-110.
13. Новиков Ф.В., Якимов А.А. Элементы механики высокопроизводительного прерывистого шлифования. – В кн.: Пути повышения эффективности процессов резания материалов, Волгоград, 1988, с. 151-157.
14. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании. – В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении. Пермь, 1983, с. 52-57.
15. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Некоторые принципы условной оптимизации алмазного шлифования. – В кн.: Производство и применение сверхтвердых материалов, Киев, 1983, с. 154-156.
16. Сухоруков Ю.Н., Якимов А.А., Новиков Ф.В. Исследования влияния коэффициента шлифования на режущую способность прерывистых кругов. – В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении. Пермь: ППИ, 1990, с. 21-34.
17. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Об условиях самозатачивания алмазного круга. – В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной упрочняющей технологии в машиностроении, Пермь: ППИ, 1984, с. 70-77.
18. Новиков Ф.В., Якимов А.А. Элементы механики прерывистого высокопроизводительного алмазного шлифования. – В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении. Пермь: ППИ, 1988, с. 64-69.
19. Сошников С.А., Новиков Ф.В. Модель рабочего рельефа алмазно-абразивного инструмента и качество обработанной поверхности при алмазном высокопроизводительном шлифовании. – В кн.: Исследования в области инструментального производства и обработки металлов резанием, Тула: ТПИ, 1984, с. 128-135.
20. Новиков Ф.В., Серов Б.С. Особенности автоматизированного расчета оптимальных режимов резания с учетом динамических явлений при шлифовании кругами из СТМ. – Вестник Харьковского политехн. ин-та, № 226. Автоматизация проектирования в технологии машиностроения, вып. 1, 1989, с. 46-49.
21. Новиков Ф.В., Якимов А.А., Новиков Г.В., Казимирчик Ю.А. Управление процессом шлифования восстановленных деталей авиационной техники с износостойкими покрытиями. – В кн.: Вопросы совершенствования технологии ремонта воздушных судов. Киев: КНИИГА, 1988, с. 9-14.
22. Новиков Ф.В., Сошников С.А., Гуцаленко Ю.Г. Разработка единой замкнутой системы показателей процессов шлифования. – Тез. докл. научн.-техн. конф. “Повышение эффективности внедрения средств механизации и автоматизации, новых технологических процессов в металлообработке”, Курск, 1984, с. 31-33.

23. Новиков Ф.В., Новиков Г.В. Анализ параметров процесса алмазного шлифования с позиций изменяющегося рельефа круга. – В кн.: Исследования в области технологии механической обработки и сборки машин. Тула: ТПИ, 1986, с. 40-47.
24. Малыхин В.В., Новиков Ф.В., Узунян М.Д. Математическая модель стружкообразования при микрорезании. – В кн.: Резание и инструмент, вып. 35, Харьков: Вища школа, 1986, с. 102-108.
25. А.С. СССР № 1542782 МКИ В 24 В 1/00. Способ шлифования цилиндрической детали. Новиков Ф.В. – Оpubл. в Б.И. 1990, № 6.
26. А.С. СССР № 1426756 МК4 В 24 В 1/00. Способ глубинного шлифования цилиндрической детали. Новиков Ф.В., Якимов А.А. – Оpubл. в Б.И. 1988, № 36.
27. А.С. СССР № 1484607 МКИ В 24 В 1/00. Способ глубинного шлифования цилиндрической детали. Новиков Ф.В., Суворов Е.И., Жаровский О.Н., Новиков Г.В. – Оpubл. в Б.И. 1989, № 21.
28. А.С. СССР № 1514588 МКИ В 24 В 51/00. Способ управления процессом круглого врезного шлифования. Новиков Ф.В., Жаровский О.Н., Гришкевич А.В., Билецкий Ю.С. – Оpubл. в Б.И. 1989, № 38.
29. А.С. СССР № 1539046 МКИ В 24 В 1/00. Способ круглого продольного шлифования. Новиков Ф.В., Суворов Е.И., Якимов А.А., Новиков Г.В. – Оpubл. в Б.И. 1990, № 4.
30. А.С. СССР № 1542783 МКИ В 24 В 1/00. Способ глубинного шлифования. Новиков Ф.В., Суворов Е.И., Якимов А.А. – Оpubл. в Б.И. 1990 № 6.
31. А.С. СССР № 1645104 МКИ В 24 В 1/00. Способ шлифования кругом из синтетических сверхтвердых материалов. – Новиков Ф.В., Суворов Е.И., Якимов А.А., Новиков Г.В. – Оpubл. в Б.И. 1991, № 16.

АННОТАЦИЯ

Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.02.08 – “Технология машиностроения”, 05.03.01 – “Процессы механической обработки; станки и инструмент”. Одесский государственный политехнический университет, г. Одесса, 1995.

Защищаются физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования, позволившие выявить, обосновать и реализовать условия существенного повышения производительности обработки за счет применения новых способов шлифования и управления величиной линейного износа зерна до момента его разрушения, что обеспечило эффективное применение алмазных кругов взамен абразивных на операциях предварительного шлифования труднообрабатываемых материалов при съеме больших припусков.

Ключевые слова: алмазное шлифование, износ круга, оптимизация шлифования.

NOVIKOV F.V. The physical and kinematic bases of high-performance diamond grinding: Abstract. Dis. for the scientific. Doctor degree. tehn. Sciences: spec. 05.02.08 "Technology of mechanical engineering"; 05.03.01 "The processes of machining, machine tools and instruments" / F. V. Novikov. - Odessa, 1995. - 36 p.

Protect the physical and kinematic bases of high-performance diamond grinding, allowed to identify, justify and implement the conditions for a significant increase in processing performance through the use of new methods of grinding and control the amount of linear grain wear until its destruction, ensuring effective use of diamond wheels instead of the abrasive on the preliminary grinding operations of hard materials when renting large allowances.

Keywords: diamond grinding, wheel wear, optimization of grinding.

Подписано к печати 10.09.95 г. Формат 60x84 1/16 Бумага тип.

Печать офсетная. Усл.-печ. л. 2,15. Уч.-зд. л. 2,29

Тираж 100. Зак. 1018

Типография завода ФЭД. 310023, г. Харьков, ул. Сумская, 132

