

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

Одесса - 1995

621
621.7

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00761246 (Q)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

ОДЕССКИЙ ПОЛТЕХНИЧЕСКИЙ 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

Одесса – 1995

АВ 33.157

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 Расимович.

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук, профессор Лебедев Владимир Георгиевич
2. Академик Академии Инженерных наук Украины, доктор технических наук, профессор Прокопчик Александр Ефимович
3. Доктор технических наук, профессор Ререзуб Владимир Николаевич

Ведущая организация - Научно-производственное объединение "ЭД", 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 " _____ " _____ 1995г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета,
докцент

Г.А.Сборский

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

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.д. / 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 прерок. 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 спосо-

бор шлифования, а также шлифовальных станков, традиционных для обычного абразивного и алмазного шлифования. Это приводит к повешенному 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 используются 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 условия существенного повешения 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 повешения производительности обработки при съеме больших припусков.

АВТОР ЗАЩИЩАЕТ:

1. Разработанные теоретические основы шлифования алмазными кругами на металлических связках с использованием электрофизикохимических методов правки, включающие 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 объемного разрушения и выпадения из связки круга и постоянства величины нагрузки, действующей на отдельное зерно круга.
2. Выявление 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 формирования поверхностей в пределах дуги контакта круга с заготовкой и установить зависи-

мости 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 выделены 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 и 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 шпанажах 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 и на их базе выделены, обоснованы и реализованы кинематические и физические условия существенного повышения производительности обработки, состоящие в применении новых соотношений глубины шлифования t и максимальной /вероятностной/ толщины среза H_{max} / $t < H_{max}$, $t > H_{max}$ / и управлении величиной линейного износа зерна до момента его объемного разрушения и выпадения из связки с учетом прочностных свойств рабочей поверхности

ности 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; сопоставление 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 кругах 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 внепрены на предприятиях тяжелого машиностроения, тракторсельхозмашиностроения, 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 внедрения результатов работы, подтвержденный нормативными документами, составил свыше 1,0 млн.руб. в год /цену 1991 года/.

Апробация работ. Основные положения и результаты, представленные в диссертации, докладывались на трех Международных конференциях /г. Киев, 1931; Милколыг, Ренгрия, 1932 и 1936/, пяти Всесоюзных конференциях /Харьков, 1931 и 1934; Поцольск, 1932; Пермь, 1933; Краматорск, 1932/ и восемнадцати Всесоюзных и Республиканских семинарах /Москва, 1933; Одесса, 1937, 1939, 1940; Киев, 1931, 1932, 1939; Харьков, 1932, 1936, 1933; Барнаул, 1939; Пенза, 1932; Краснодар 1933; Днепропетровск, 1933; Волжский, 1931; Хмельницкий, 1933; Севастополь, 1937; Курск, 1934/. 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 специализированного 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 скорости износа зерен и связки. С физической точки зрения это означает равномерное во времени /периодическое/ выпа-

ценне 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 электрофизикохимической правки/ сводится к определению оптимальных значений величины линейного износа зерна и реализующих их оптимальных значений электрических и механических параметров режима шлифования, обеспечивающих выполнение условия 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, и также величины линейного износа зерна X . Изменяя величину X с учетом наличия обратной связи можно в широких пределах изменить 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 с позиций выполнения условий равенства "трех сил" не решались. Известны решения по управлению высотой выступающих зерен над уровнем связки круга, используя электрохимическую правку. Однако они не предусматривают выполнение условия равенства "трех сил"

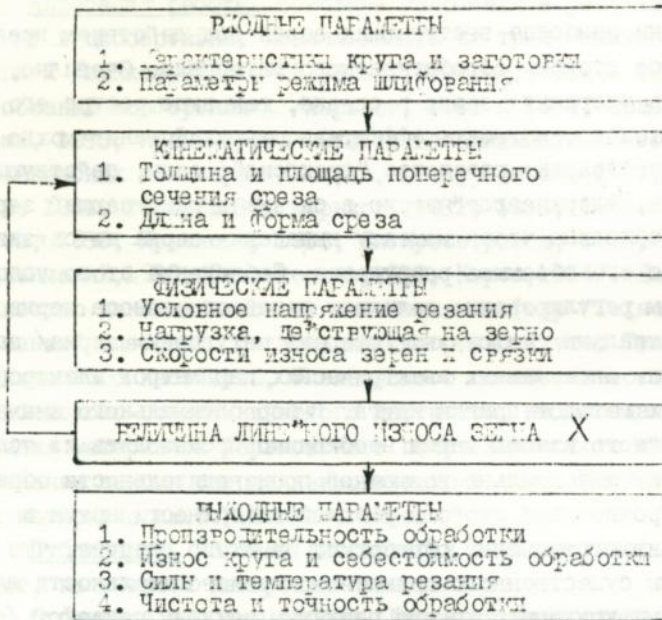


Рис.1. Взаимосвязь параметров процесса шлифования

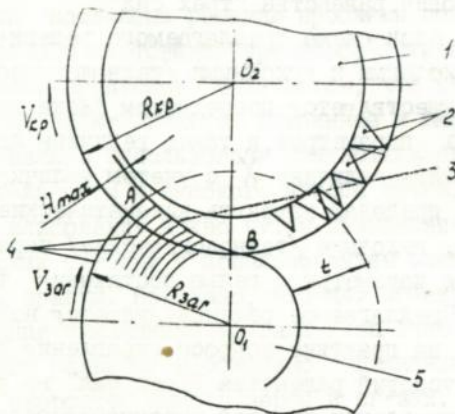


Рис.2. Расчетная схема процесса шлифования
 1- круг, 2- резание зерна, 3- линия, определяющая положение условно поверхности резания, 4- цилиндрические оболочки, которыми представлен снимаемый припуск, 5- заготовка

за счет регулирования величиной X .

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 поверхности вдоль дуги контакта круга с заготовкой. Необходимость разработки такой модели связана 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, разновременным расположением зерен на рабочей поверхности круга и их вероятностном участии 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. Аверутиним, О.Б. Федосеевым и другими исследователями.

Основу разработанной кинематической модели шлифования составляет аналитическое решение об описании границах загершения 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 граница являются основой для расчета физических и технологических параметров шлифования /максимальной толщины среза, параметров шероховатости обработки,

фактически длины пути контакта круга с заготовкой и т.д./, что позволяет с единих позиций вполне однозначно аналитически описать закономерности процесса во всем /возможном/ диапазоне изменении глубины шлифования, включая многопроходное и глубинное шлифование.

Расчетами установлено, что положение границы определяется соотношением двух параметров - максимальной /пероэнтностной/ 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/ - ассиметричную 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, считается важным фактором увеличения производительности обработки/.

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 круга; $V_{заг}$, $V_{кр}$ - 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 рас-

Таблица 1

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

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

хождение расчетных и экспериментальных данных. Например, для расчетной зависимости, предложенной Е.Н. Масловым, это расхождение превышает 1000 раз. Наиболее правильным 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 учтен износ зерен.

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 $0 \dots 1$ /для "острого" режущего рельефа круга $\eta \rightarrow 0$, для затупленного $\eta \rightarrow 1$ /:

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

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

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 $\eta \approx 0,2$, табл.2.

Таблица 2

Расчетные значения H_{max} и экспериментальные значения максимальных толщин стружек в мм /исх.
 данные: $m = 100$; $\bar{X} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $V_{кр} = 30 \text{ м/с}$;
 $R_{кр} = 0,15 \text{ м}$; $R_{заг} = 0,02 \text{ м}$

Эп/п	Режим шлифования		η			Максимальная толщина струж- ки
	$t, \text{ мм}$	$V_{заг}, \frac{\text{м}}{\text{мин}}$	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	0,167	0,013	0,0031	0,013
4.	0,05	2,0	0,021	0,0170	0,0115	0,013
5.	0,1	0,5	0,0148	0,0119	0,0031	0,014
6.	0,1	1,0	0,0187	0,0151	0,0102	0,015
7.	0,1	2,0	0,0236	0,0131	0,0129	0,014
8.	0,2	0,5	0,0167	0,0135	0,0031	0,015
9.	0,2	1,0	0,0210	0,0170	0,0115	0,017

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 величиной η .

Для установления значения η , удовлетворяющего условию равенства "трех сил", в рамках разработанной "физической" модели шлифования получено новое аналитическое, определяющее условное напряжение резания σ и коэффициент резания при шлифовании $K_{ш}$:

$$\sigma = \frac{2}{K_{ш}} \cdot [\sigma]_{сж} \quad /6/$$

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

где f - коэффициент трения;
 $[S]_{\text{ож}}$ - предел прочности обрабатываемого материала на сжатие,
 МПа.

Следует зависимости /6/, параметр δ при обработке данного материала определяется лишь коэффициентом $K_{\text{ш}}$. Чем он больше, тем меньше δ , т.е. добиться снижения δ можно за счет поддержания на рабочей поверхности круга разбитого 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 непосредственно влияют на δ не оказывают, они связаны с δ посредством коэффициента $K_{\text{ш}}$. 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 $K_{\text{ш}}$ 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.

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

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

Это по-новому раскрывает 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 $|K_{\text{ш}} - f|$, которая по мере затупления зерна $K_{\text{ш}} \rightarrow f$ стремится принять нулевое значение и приводит к прекращению съема материала. Данная закономерность хорошо согласуется с экспериментальными данными М.Д. Узуняна, согласно которым коэффициент $K_{\text{ш}}$ при алмазно-искровом шлифовании твердых сплавов меньше, чем $K_{\text{ш}}$ при обычном алмазном шлифовании на величину коэффициента трения обрабатываемого мате-

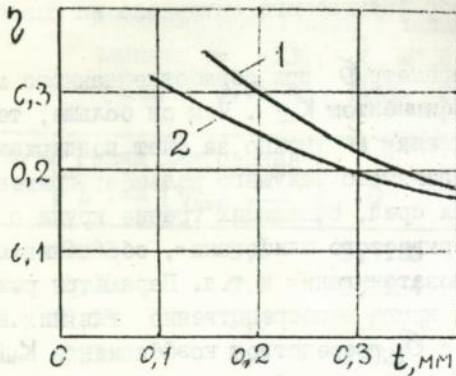


Рис.3. Зависимость h_t от глубины шлифования t
 1 - по данным K_w
 2 - по данным K_a
 Обр. мат. - Т15К10, круг - 1А1 300 x 25 АС6 200/160 - М1 - 10 -4, $V_{кр} = 35 \text{ м/с}$, $V_{заг} = 1 \text{ м/мин}$, $S_g = 0,3$

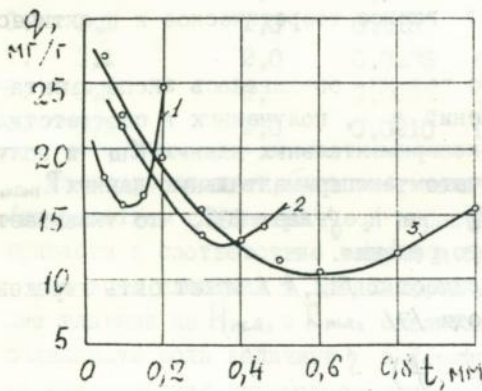


Рис.4. Зависимость относительного расхода алмаза q от глубины шлифования t
 Обр. мат. - К15, круг - 1А1 300 x 25 АС6 250/200 - М1 - 02 -4, $V_{кр} = 35 \text{ м/с}$, $S_g = 0,3$
 1 - $V_{заг} = 1 \text{ м/мин}$,
 2 - $V_{заг} = 3 \text{ м/мин}$,
 3 - $V_{заг} = 6 \text{ м/мин}$

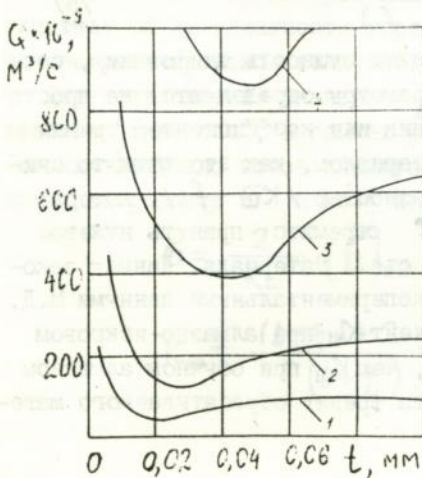


Рис.5. Зависимость производительности шлифования Q от глубины шлифования t
 Исх. данные: $m = 100$, $\bar{x} = 0,2 \times 10^{-3}$
 $B = 22,5 \times 10^{-3} \text{ м}$, $\rho = 17 \text{ м}^{-1}$,
 $V_{кр} = 30 \text{ м/с}$,
 1 - $S = 400 \text{ мм}^2$,
 2 - $S = 300 \text{ мм}^2$,
 3 - $S = 1600 \text{ мм}^2$,
 4 - $S = 2500 \text{ мм}^2$

риала 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 Р

$$\eta = 1 - \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \cdot \left(\frac{2 \cdot [6]_{сж}}{P} \right)^{1,5} \quad /9/$$

Следуя зависимости /9/, с увеличением η , т.е. по мере затупления зерна, нагрузка Р возрастает. Следовательно, существуют такие значения η , при которых нагрузка Р принимает значения, соответствующие прочности зерна на раздавливание /разрушающей нагрузке/ 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 $P_z = \sigma \cdot Q / V_{кр}$ или мощности резания $N = P_z \cdot V_{кр}$, /где Q - производительность обработки, м³/с,

$$\sigma = \frac{m \cdot V_{кр}}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}} \cdot \frac{P^{1,5}}{(2 \cdot [6]_{сж})^{0,5}} \quad /10/$$

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 выступающего 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 выступания зерна над уровнем стелется своего рода "инструментом" для реализации заданного значения ζ , т.е. величина ζ является первичным, а высота выступания зерна над связкой - вторичным параметром управления процессом шлифования.

Учитывая то, что параметр $[G]_{сж}$ определен не для всех обрабатываемых материалов /в частности, композиций материалов/, в работе получено приближенное решение для расчета основных параметров шлифования

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

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

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

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_2 , R_{max} и теоретических зависимостей:

$$A = \frac{4^{\frac{n}{6}} \cdot (3-n) \cdot (6-n) \cdot P_2 \cdot R_{max}^{\frac{5n}{8}}}{2,64 \cdot B \cdot t^{(1-n/6)}} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{заг}} \quad /14/$$

$$P = \frac{4^{\frac{n}{6}} \cdot (3-n) \cdot (6-n) \cdot P_2 \cdot R_{max}^{\frac{5}{12}}}{2,64 \cdot B \cdot t^{2/3}} \cdot \left(\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{кр} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{заг}} \right)^{0,5} \quad /15/$$

Установлено, что при шлифовании алмазными кругами на металлических связках с использованием электроэрозионной прарки 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 ма-

тернала, что хорошо согласуется с соответствующими экспериментальными данными С.Н. Корчака.

Таблица 3

Значения параметров A и P /круг 1А1 300x25 АС6
200/160 - 100% -М04; обр.мат. -Т5К10, $V_{кр} = 35$ м/с;
 $B = 22,5 \cdot 10^{-3}$ м/

$V_{зат}$, 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	1,2	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...13,6/ 10^5 Н/м^{1,25}, а при круглом фрезном шлифовании алмазным кругом на металлической связке М2-01 стали ХРГ и стали 45 /по экспериментальным данным мощности резания и шероховатости обработки, полученным Д.А.Пашковым/- в пределах /13...15/ 10^5 Н/м^{1,25}, т.е. независимо от схем шлифования и характеристик 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...10/ 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 установленном процессе шлифования, независимо от условий обработки, остается приблизительно постоянным, близким к разрушающей нагрузке. Аналогичные данные были получены при шлифовании алмазными кругами на металлических связках других характеристик. Этим показано, что пара-

метр 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 кругов, 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 .

$$q = \frac{10^{-3} \cdot \rho_a \cdot d \cdot \Delta i \cdot V_{кр}}{\rho_m \cdot V_{заг} \cdot t \cdot \eta}, \quad /16/$$

где ρ_a, ρ_m - соответственно, плотности алмаза и обрабатываемого материала, кг/м³; Δi - линейный износ зерна за одно касание с кругом, м; d - коэффициент, учитывающий плотность связи в зависимости от концентрации алмазов. При $\eta \rightarrow 0$, 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.О.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. Второю 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 $\mu = 0,75$ равно $\eta_{экст.} = 0,88$. Приведенные на рис.4 экспериментальные зависимости $q-t$ для различных значений $V_{заг}$ хорошо согласуются с 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 глубокого 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 $\eta = 0,38$.

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

$$\frac{C}{C_{\text{экстр}}} = 0,34 / [d_1^{0,5} \cdot (1 - 0,12 \cdot d_1^{1,25} \cdot d_2^{2,5})^3] + 0,5 / (d_1 \cdot d_2), \quad /17/$$

где $d_1 = \frac{t}{t_{\text{экстр}}}$, $d_2 = \frac{V_{\text{заг}}}{V_{\text{заг экстр}}}$.

Минимум себестоимости 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 величины η при $P = \text{const}$. 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

$$\eta = 1 - 0,12 \cdot d_0^{1,25}, \quad /18/$$

где $d_0 = d_1 \cdot d_2^2$.

Значит оптимальное значение η , по приведенным расчетным зависимостям определяются остальные параметры шлифования. При этом величину P следует принимать равною 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 $[C]$ /ж/из справочной литературы/ или с исполь-

зованием параметра A , установленным расчетно-экспериментальным путем. Таким образом в работе разработано два подхода к расчету параметров шлифования: "чисто" аналитически с использованием справочных данных P , $[6]_{\text{сж}}$ и приближенный, требующий предварительного определения параметра A .

Полученные решения о переменности величины b и постоянстве P 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 $S = 0,5 \cdot \Psi \cdot H_{\text{max}}^2 \cdot \frac{(1+b)}{(1-b)}$ и $b = 0$. Значения параметра Ψ , равного проценту работающих зерен, приведены в табл. 4.

Таблица 4
Расчетные значения Ψ при $H_{\text{max}} = 10 \cdot 10^{-6}$ м.

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

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

$$V_{\text{заг}} = \frac{Q}{B \cdot t}, \quad /20/$$

где B - ширина круга, м; $t_{i\tau} = t_{\tau} + i \cdot t$, $t_{\text{нт}} = t_{\tau} + (n-1) \cdot t$,
 t_{τ} - 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 $t < H_{\text{max}}$ к схеме традиционного глубинного шлифования $t > H_{\text{max}}$.

С физической точки зрения минимум Q при $S = \text{const}$ обусловлен

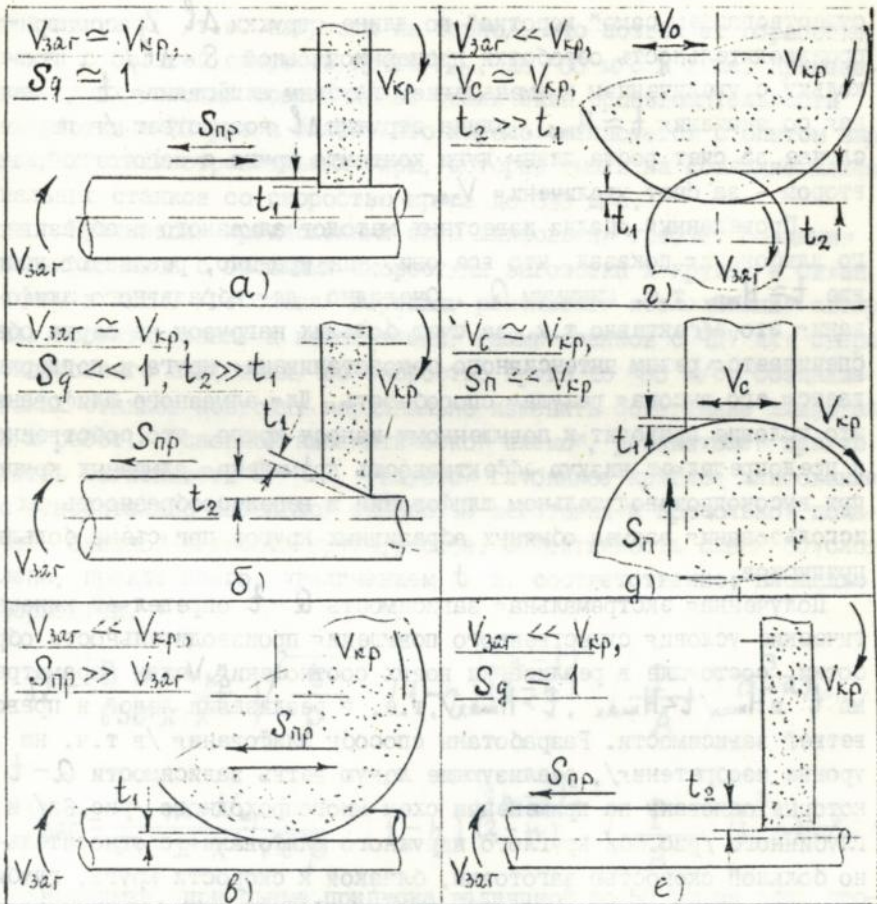


Рис. 6. Высокопроизводительные способы шлифования

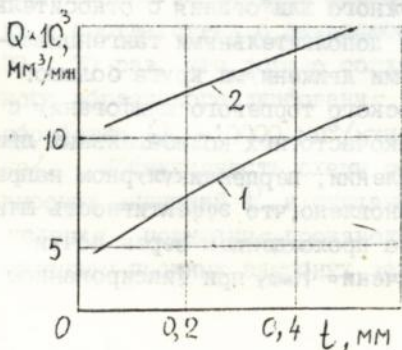


Рис. 7. Зависимость производительности обработки Q от глубины шлифования t

Обр. мат. - РКБ, круг - 1А1 300x25 АСБ 250/200 М1 - D2 -4, $V_{кр} = 35 \text{ м/с}$, $S_g = 0,9$

- 1 - скорость линейного износа круга $h_A = 0,005 \text{ мм/мин}$,
- 2 - скорость линейного износа круга $h_A = 0,01 \text{ мм/мин}$

существованием само* коротко* по длине стружки Δl /рассматривая производительность обработки пропорциональной $S \times \Delta l /$, поскольку с увеличением и уменьшением глубины шлифования t , начиная со значения $t \approx H_{max}$, длина стружки Δl возрастает /в первом случае за счет роста длины дуги контакта круга с заготовкой*, вторым - за счет увеличения $V_{заг}$.

Проведенный анализ известных методов алмазного и абразивного шлифования показал, что все они, как правило, реализуют условие $t \approx H_{max}$, 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.6а/ и глубинного /рис.6б/ 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.6в/, глубинного круглого наружного шлифования с относительно небольшой скоростью заготовки и дополнительными тангенциальными высокочастотными колебательными движениями круга большой амплитуды /рис.6г/, глубинного плоского торцевого шлифования с использованием дополнительных высокочастотных колебательных движений круга или заготовки в направлении, перпендикулярном направлению подачи круга /рис.6д/. 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 исследования автора для проектирования и изготовления гаммы станков с ЧПУ для сверхскоростного шлифования со скоростью круга до 600 м/с. Создание таких станков позволит кардинально изменить содержание шлифовальных работ. 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.3е. Эффективность схемы обусловлена, прежде всего, увеличением t и, соответственно, площадью обработки.

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

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

Например, при съеме припуска величиной до 50 мм за один проход круга, т.е. увеличением 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 $Q = 10000 \text{ мм}^3/\text{мин мм}$ и выше /по данным П.И. Дячерил-на/. Эффективность схемы обусловлена также реализацией более высоких значений P и снижением $\eta \rightarrow 0$ /определяющих физические условия повышения производительности/, что обеспечивается применением прочных алмазных зерен и металлических срезов, эффек-

тивных методов электрофизикохимической правки круга, позволяющих поддерживать на его рабочей поверхности разнотипный рельеф. Шлифование с заданным оптимальным значением t /определяемым экономически обоснованным расходом алмаза/ достигается за счет установления скорости заготовки $V_{зг}$ в соответствии с зависимостью /22/ и электрических параметров правки круга из условия $P_2, N = const$ 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 доказано, что эффект глубинного шлифования состоит в возможности более интенсивного увеличения t по сравнению с уменьшением $V_{зг}$, в результате чего их произведение $t \times V_{зг}$, определяющее Q возрастает. В зарубежной научно-технической литературе эффект повышения Q связывают не с интенсификацией режимов шлифования, а с уменьшением вспомогательного времени /уменьшением числа проходов круга и т.д./, т.е. глубинное шлифование рекомендуется выполнять таким образом, чтобы увеличение t было пропорционально снижению скорости заготовки $V_{зг}$, в результате чего их произведение $t \times V_{зг}$ остается таким же как и при обычном многопроходном шлифровании. 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 $V_{зг}$ оставляют такой же как и при многопроходном шлифровании. Следуя зависимости /23/

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

добиться увеличения $Q = S_g \cdot B \cdot V_{зг} \cdot t$ /где S_g - долевая продольная подача/ при фиксированном значении H_{max} /определяемом при глубинном шлифовании нагрузкой на зерно/ можно за счет снижения $V_{зг}$ 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 ограничений по температуре резания θ .

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

$$V_{заг} = \frac{Q}{B \cdot t} \quad /25/$$

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

где λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м·к; c - удельная теплоемкость, Дж/кг·к; $\bar{\Psi}$ - коэффициент, показывающий, какая часть работы переходит в теплоту, поглощаемую заготовкой.

Следует заметить, что зависимость /24/, с увеличением t /при $\theta = c_{lim} t$ и $P = c_{lim} t$ / 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 . Таким образом, для 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 , применяются 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 незначительна, доминирует силовой фактор. Для снижения температуры резания /без уменьшения Q и увеличения g / в работе предложен новый способ глубинного прерывистого шлифования, согласно которому длину радиуса 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

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

$$t = t_0 \cdot (1 + l_2/l_1)^2, \quad /23/$$

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

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

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

$$R_a = 0,2 \cdot H_{max} \cdot \left(\frac{H_{max}}{4 \cdot t} \right)^{0,2} \quad /23/$$

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 "чистого" обработки.

В работе также дано теоретическое обоснование технологических 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 режимов 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 смене 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, $V_{\text{эл.г}} = 0,5..5,0$ м/мин; $S_f \approx 1,0$.

Рекомендуется использовать алмазные круги, в том числе крупногабаритные $\varnothing 500$ мм, на относительно "мягких" металлических связках типа М1-02 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 1931 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 соотноше-

нии глубины шлифования t и максимально /перотностно/ 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 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 /случае $t > H_{max}$ / и до 10 раз и более - на перспективном оборудовании /случае $t < H_{max}$ /.

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 формообразования влчине однозначно определены положением условной /перотностно/ поверхности резания при шлифовании, устанавливающей границу завершения диспергирования режущими зернами материала, подводимого в зону резания, и полученной с учетом перотностного 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 алмаз-

ного 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 веростного участка 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 отдельное зерно круга. Показано, что эти параметры являются определяющими при алмазном шлифровании. Показано также, что в общем случае все основные физические и технологические параметры шлифования определяются разностью коэффициента резания при шлифровании 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 условия 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, независимо 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 непрерывно-электроразводной механической правки.

7. На основании исследований разработаны высокопроизводительные процессы алмазного шлифования твердосплавных и быстрорежущих инструментов и штампов, деталей из высокопрочных графитов и берритов 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.

3. Внедрение результатов работ на предприятиях пяти отраслей обеспечило фактически годовой экономической эффект свыше 1,0 млн. рублей /в ценах 1991 года/. Положительные результаты внедрения позволили отраслевым организациям принять разработки к широкому внедрению в масштабах соответствующих отраслей.

В работе получены новые результаты по мало исследованным или вовсе неисследованным проблемам алмазного шлифования. Завершенные исследования, представленные в работе, создают основу 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-технологической обработки, состоящая в разработке физических и кинематических основ алмазного шлифования и на их базе выявлены, обоснованы и реализованы физические и кинематические условия 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.Р., Новиков Ф.В., Якимов А.А. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами. - К.: Техніка, 1993. - 152 с.
2. Якимов О.В., Новиков Ф.Р., Новиков Г.Р., Якимов О.О. Высокопродуктивное шлифование: Навч. посібник. - К.: ІСДО, 1995. - 190 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 круглом продольном шлифовании. - В кн.: Резание и инструмент, вып. 20, Харьков: РИЦа школа, 1983, с. 73-78.
6. Новиков Ф.В. Кинетика образования режущего рельефа алмазного 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 глубинного шлифования и вопросы качества алмазно-обработки твердого сплава инструментального назначения. - Редколлегия журнала "сверхтвердые материалы". Деп. ВНИИТИ, 19.04.84, №2475-84 ДЭП.
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 объемного и управляемого процесса шлифования. - Тез. докл. Всесоюз. научно-технич. конференций "Новые конструкции и прогрессивная технология 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., Жимов А.А. Элементы механики высокопроизводительного прерывистого алмазного 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 шлифровании. - В кн.: Совершенствование абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении, Пермь: ПИИ, 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., Жимов А.А., Новиков Ф.В. Исследование влияния коэффициента шлифования на режущую способность прерывистых кругов. - В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении, Пермь: ПИИ, 1990, с. 21-34.
17. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Об условиях самозатачивания алмазного круга. - В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении, Пермь: ПИИ, 1984, с. 70-77.
18. Новиков Ф.В., Жимов А.А. Элементы механики прерывистого высокопроизводительного алмазного шлифования. - В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении, Пермь: ПИИ, 1988, с. 64-69.
19. Сошников С.А., Новиков Ф.В. Модель рабочего рельефа алмазно-абразивного инструмента и качество обработанных поверхностей при алмазном высокопроизводительном шлифровании. - В кн.: Исследование 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 шлифровании кругами из СТМ. - Вестник Харьковского политехнического

- института, №236. Автоматизация проектирования в технологии машиностроения, вып.1, 1989, с.46-49.
21. Новиков Ф.В., Якимов А.А., Новиков Г.Р., Казимирчик Ю.А. Управление процессом шлифования восстановленных деталей аэриационной техникой износоустойчивым покрытием. - Р кн.: Вопросы совершенствования технологии ремонта воздушных судов. Киев: КНИГА, 1988, с.3-14.
22. Новиков Ф.В., Сошников С.А., Губаленко Ю.Г. Разработка единой замкнутой системы показателя процессов шлифования. - Тез. докл. науч.-технич. конференции "Повышение эффективности внедрения средств механизации и автоматизации, новых технологических процессов в металлообработку", Курск, 1984, с.31-33.
23. Новиков Ф.В. Анализ параметров процесса алмазного шлифования с позиций изменяющегося рельефа круга. - Р кн.: Исследования в области технологии механической обработки и сборки машин, Тула: ТПИ, 1986, с.40-47.
24. Маджидин В.В., Новиков Ф.В., Узунян М.Д. Математическая модель стружкообразования при микрорезании. - Р кн.: Резание и инструмент, вып.35, Харьков: Рица школа, 1986, с.102-103.
25. А.С. СССР №1542732 МКМ В 24 В 1/00. Способ шлифования цилиндрической детали. Новиков Ф.В. - Опубл. в Б.И. 1990, № 6.
26. А.С. СССР №1426756 МКМ В 24 В 1/00. Способ глубинного шлифования цилиндрической детали. Новиков Ф.В. - Опубл. в Б.И. 1983, № 36.
27. А.С. СССР №1434607 МКМ В 24 В 1/00. Способ глубинного шлифования цилиндрической детали. Новиков Ф.В., Суворов Е.И., Жаровский С.Н., Новиков Г.В. - Опубл. в Б.И. 1989, № 21.
28. А.С. СССР №1514588 МКМ В 24 В 51/00. Способ управления процессом круглого врезного шлифования. Новиков Ф.В., Жаровский С.Н., Гришкевич А.В., Билецкий Ю.С. - Опубл. в Б.И. 1989, № 38.
29. А.С. СССР №153046 МКМ В 24 В 1/00. Способ круглого продольного шлифования. Новиков Ф.В., Суворов Е.И., Якимов А.А., Новиков Г.В. - Опубл. в Б.И., 1990, № 4.
30. А.С. СССР №1542733 МКМ В 24 В 1/00. Способ глубинного шлифования. Новиков Ф.В., Суворов Е.И., Якимов А.А. - Опубл. в Б.И., 1990, № 6.
31. А.С. СССР №1645104 МКМ В 24 В 1/00. Способ шлифования кругом из синтетических сверхтвердых материалов. Новиков Ф.В., Суворов Е.И., Якимов А.А., Новиков Г.В. - Опубл. в Б.И. 1991, № 16.

Новиков

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 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. Physical and cinematic basics of high-productivity diamond polishing. Dissertation for the seeking of Doctor of technical sciences degree on speciality 05.02.08 - "Machinebuilding technology", 05.03.01 - "Processes of mechanical treatment, tools and instrument". Odessa state polytechnical university, city of Odessa, 1995.

Submitted physical and cinematic basics of diamond polishing, which explored, formulated and realigned conditions of significant increase in productivity of treatment by using new methods of polishing and control of linear wear of a seed until it breaks, which provides an effective, use of diamond wheels instead of abrasive wheels on pre-polishing operations of hard-cut materials with large amounts of cut-offs.

Подписано к печати 10.09.95 г. Формат 60x84 1/16 бумага тип. 3/8
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7ч.-изд. л.
Тираж 100. Зак. 1018

Типография завода ЗЭК. ЗИСОЗЗ, г.Харьков, ул.Сумская, 132

14822

AB 33.157