

На правах рукописи

НОВИКОВ ФЕДОР ВАСИЛЬЕВИЧ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО  
ЩЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ  
МАТЕРИАЛОВ

Специальность: 05.02.08 - Технология машиностроения

Специальность: 05.03.01 - Процессы механической и  
физико-химической 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 Морозов Виктор Алексеевич
2. доктор технических наук, профессор Новосалов Юрий Константинович
3. доктор технических наук, профессор Усов Анатолий Васильевич

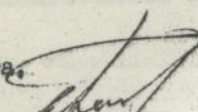
Ведущая организация - производственное объединение "Завод имени Малышева", г. Харьков

Защита состоится " 16 " ноября 1993 г.  
в 14<sup>00</sup> часов на заседании специализированного Совета Д.05.06.01 при Одесском политехническом университете по адресу: 270044, г. Одесса, проспект Шевченко, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского политехнического университета.

Автореферат разослан " 12 " октября 1993 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
профессор

  
Белокошев И.М.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00810638 (Q)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Создание и промышленное производство абразивных инструментов из синтетических сверхтвердых материалов /СТМ/ стало важным фактором ускорения научно-технического прогресса в машиностроении, повышения производительности труда и улучшения качества выпускаемой продукции. В настоящее время проблеме эффективного использования абразивных инструментов из СТМ и в особенности кругов из СТМ на операциях шлифования уделяется значительное внимание, ей посвящены монографии и многочисленные публикации. Большой вклад в развитие научных основ шлифования кругами из СТМ внесли В.Н.Бакуль, А.П.Гаврил, Д.Е.Дорофеев, Б.И.Костецкии, Д.Е.Анальчик, Т.Н.Доладзе, В.А.Морозов, Н.В.Новиков, Ю.К.Новоселов, В.И.Островский, В.Н.Полураев, А.Н.Резников, Э.В.Рыков, А.А.Сагарда, Г.И.Саягин, М.Ф.Семко, Л.К.Старков, А.В.Усов, Л.Н.Филимонов, Л.В.Худобин, И.Х.Ченовецкий, А.В.Якимов, П.И.Ядерницын, Н.К.Беззубенко, А.И.Грабченко, Э.Я.Гроцзинский, И.Л.Захаренко, Г.П.Кремнев, Ю.П.Линенко-Мельников, С.А.Мопов, А.Ф.Раб, В.А.Рыбцкии, М.Д.Уаунян, О.А.Химач, А.А.Шепелев, и многие другие.

Однако разработанные процессы шлифования кругами из СТМ применяются в основном при чистовом шлифовании и доводке, т.е. при съеме относительно небольших припусков. Использование их в условиях предварительного шлифования, т.е. при съеме значительных припусков, как правило, экономически нецелесообразно, что связано с относительно низкой производительностью обработки и высоким износом круга. Вместе с тем, с созданием и использованием новых труднообрабатываемых материалов, повышением требований к качеству обрабатываемых поверхностей и эксплуатационных характеристик деталей машин возникает необходимость перехода на полную обработку кругами из СТМ без предварительной обработки кругами из обычных абразивов. В особой мере это относится к шлифованию твердосплавных и быстрорежущих инструментов и штампов, деталей из технической керамики и высокопрочных графитов, износостойких наплавов и покрытий и других труднообрабатываемых материалов, когда дефекты предварительной абразивной обработки не всегда удается устранить последующей алмазной или эльборной доводкой.

Все это указывает на необходимость разработки высокопроизводительных процессов шлифования кругами из СТМ, позволяющих суцеств-

венно повысить производительность обработки, снизить износ круга и обеспечить требуемое качество обрабатываемых поверхностей.

В последние годы перспективным направлением повышения производительности обработки стало создание комбинированных методов шлифования кругами из СТМ на металлических связках, основанных на введении в зону резания или автономно дополнительной электрофизикохимической энергии. Работами А.И.Грабченко, Н.К.Беззубенко и Э.Я.Гродзинского показано, что данные методы обеспечивают эффективное управление параметрами рельефа круга, полностью исключают засаливание круга и повышают его режущую способность. Вместе с тем на практике они осуществляются с применением режимов резания, кинематических схем и способов шлифования, а также шлифовальных станков, традиционных для обычного абразивного и алмазного шлифования. Это не позволяет в полной мере использовать значительные технологические возможности шлифования кругами из СТМ с хорошо развитым режущим рельефом /сформированным за счет применения дополнительной электрофизикохимической энергии/ и реализовать максимально возможную производительность обработки, обусловленную прочностными свойствами рабочей поверхности круга из СТМ. В связи с этим представляется важным и актуальным решение крупной научной проблемы оптимизации режимов шлифования кругами из СТМ с использованием дополнительной электрофизикохимической энергии для обоснования и реализации условий существенного повышения производительности обработки при съеме значительных припусков.

#### АВТОР ЗАЩИЩАЕТ:

1. Новый теоретический подход к расчету оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ с использованием дополнительной электрофизикохимической энергии.
2. Научное положение о возможности существенного повышения производительности шлифования кругами из СТМ за счет применения новых соотношений (глубины шлифования  $t$  и максимальной /приведенной веродностной/ толщины среза  $H_{max}$  ( $t < H_{max}$ ,  $t > H_{max}$ ) и оптимальных значений величины линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связки круга и величины нагрузки, действующей на отдельное зерно круга.
3. Математическую модель процесса шлифования кругами из СТМ и установленные функциональные связи между параметрами режима резания, характеристиками круга и заготовки, включая физико-механические свойства зерен, связки и обрабатываемого материала, и основны-

физическими и технологическими параметрами шлифования.

4. Высокопроизводительные способы шлифования кругами из СТМ, основанные на использовании новых сочетаний параметров режимов шлифования и введении дополнительных кинематических движений круга и заготовки. 5. Теоретические основы высокопроизводительного глубинного шлифования кругами из СТМ, реализующие максимально возможную производительность обработки для различных технологических ограничений обработки, включая прочностные свойства рабочей поверхности круга. 6. Внедренные в производство высокопроизводительные процессы шлифования кругами из СТМ труднообрабатываемых материалов, позволившие в 2...5 раз повысить производительность обработки при экономически приемлемом износе круга и высоком качестве обработки.

Цель работы. Разработка теоретического подхода к расчету оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ с использованием дополнительной электрофизикохимической энергии и на его основе обоснование и реализация условий существенного повышения производительности обработки при съеме значительных припусков.

Общая методика исследований. Теоретическое обобщение существующих расчетных схем и математических моделей процесса шлифования, а на этой основе разработка теоретического подхода к расчету оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ, позволяющего учесть наряду с традиционными кинематическими и геометрическими параметрами ряд новых физических параметров шлифования, а именно: величину линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связки круга, величину нагрузки, действующей на отдельное зерно круга и т.д., которые определяют условия существенного повышения производительности обработки. Установление максимально возможной производительности обработки, обусловленной прочностными свойствами рабочей поверхности круга и технологическими ограничениями обработки, и реализующих ее оптимальных режимов шлифования, а на этой основе обоснование условий повышения производительности обработки и создание высокопроизводительных способов шлифования кругами из СТМ. Экспериментальная проверка результатов теоретических исследований по основным технологическим параметрам шлифования. Создание и внедрение в промышленность высокопроизводительных процессов шлифования кругами из СТМ при съеме значительных припусков. Теоретические исследования проводились на базе основ технологии машиностроения и теории резания материа-

лов с привлечением методов теоретической механики, сопротивления материалов, теории вероятностей и разделов математического анализа.

Научная новизна. Автором лично разработан новый теоретический подход к расчету оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ, учитывающий возможности управления режущим рельефом круга за счет использования электрофизикохимической энергии и реализующий максимально возможную производительность обработки, обусловленную прочностными свойствами рабочей поверхности круга и технологическими ограничениями обработки; теоретически обоснованы и реализованы условия существенного повышения производительности обработки, состоящие в применении новых соотношений глубины шлифования  $t$  и максимальной /приведенной вероятностной/ толщины среза  $H_{max}$ . ( $t < H_{max}$ ,  $t > H_{max}$ ) и оптимальных значений величины линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связки круга и величины нагрузки, действующей на отдаленное зерно круга; созданы высокопроизводительные способы шлифования кругами из СТМ, основанные на применении новых сочетаний параметров режима шлифования и введении дополнительных кинематических движений круга и заготовки.

В целом дано теоретическое обобщение и решена крупная научная проблема в области технологии машиностроения и механической и физико-химической обработки, состоящая в оптимизации режимов шлифования кругами из СТМ с использованием дополнительной электрофизикохимической энергии и обосновании и реализации условий существенного повышения производительности обработки при смене значительных припусков, что имеет важное теоретическое и народнохозяйственное значение.

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 кругами из СТМ, позволяющие повысить производительность обработки при существующем оборудовании и кругах из СТМ в 2...5 раз и показывающие пути создания новых шлифовальных станков и кругов из СТМ для повышения

производительности обработки до 10 раз и более. Разработанные высокопроизводительные процессы шлифования кругами из СТМ внедрены на предприятиях тяжелого машиностроения, автотракторосельхозмаши, станкоинструментальной, электротехнической и оборонной промышленности Украины и стран СНГ для обработки твердосплавных и быстрорежущих инструментов и штампов, деталей из высокопрочных графитов и ферритов, деталей двигателей из труднообрабатываемых сплавов и т.д. Разработанные методики расчета оптимальных режимов шлифования используются также при проектировании станков для сверхскоростного шлифования со скоростью круга до 600 м/с, для автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ.

Общий экономический эффект от внедрения 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; Мишколец, Венгрия, 1982 и 1986/, пяти Всесоюзных конференциях /Харьков, 1981 и 1984; Подольск, 1982; Пермь, 1983; Краматорск, 1982/ и шестнадцати Всесоюзных и Республиканских семинарах /Москва, 1988; Одесса, 1987, 1989, 1990; Киев, 1981, 1982, 1989; Харьков, 1982, 1986; Пенза, 1982; Краснодар, 1983; Днепрпетровский, 1983; Волжский, 1981; Хмельницкий, 1983; Севастополь, 1987; 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 специализированного совета Института сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля, г. Киев.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 57 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 301 странице машинописного текста, содержит 106 рисунков, 50 таблиц, список литературы из 195 наименований.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа посвящена решению проблемы повышения производительности шлифования кругами из СТМ при съеме значительных припусков. В работе на основе анализа действующих технологических процессов

шлифования труднообрабатываемых материалов и литературных данных показано, что существующие процессы шлифования кругами из СТМ /включая глубинное и многопроходное шлифование/, как правило не могут быть эффективно использованы при съеме значительных припусков вследствие относительно низкой производительности обработки. Установлено, что основным фактором, сдерживающим рост производительности обработки, является высокий износ круга из СТМ, который с увеличением производительности обработки, независимо от условий шлифования, интенсивно возрастает и резко увеличивает себестоимость обработки. Для обоснования условий повышения производительности обработки  $Q$  в работе рассматривается аналитическая зависимость  $Q = V_{кр} \cdot S_{мгн}$  /где  $V_{кр}$  - скорость круга, м/с;  $S_{мгн} = n_p \cdot S$  - мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми работающими зернами, м<sup>2</sup>;  $n_p$  - количество одновременно работающих зерен;  $S = P/B$  - площадь поперечного сечения среза отдельным зерном, м<sup>2</sup>;  $P$  - нагрузка, действующая на отдельное зерно, н;  $B = f(a_z/\rho, A)$  - условное напряжение резания, МПа;  $a_z$  - толщина среза, м;  $\rho = \psi(X)$  - радиус округления режущей части зерна, м;  $X$  - величина линейного износа зерна, м;  $A$  - параметр, характеризующий прочностные свойства обрабатываемого материала/, которая предполагает увеличение  $Q$  за счет регулирования пяти параметров:  $V_{кр}, n_p, a_z, X, P$ , так как

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

Отмечается, что в теории шлифования известны и реализованы на практике условия повышения  $Q$  за счет регулирования кинематическими параметрами  $V_{кр}, n_p, a_z$ . Технологические возможности повышения  $Q$  путем регулирования физическими параметрами  $X$  и  $P$  не обоснованы, что свидетельствует о недоиспользовании режущих свойств круга. Исходя из этого в работе сделан вывод о существовании значительных резервов повышения производительности обработки на основе применения оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ, полученных с учетом физических параметров  $X$  и  $P$ . Правомочность сделанного вывода подтверждается результатами экспериментальных исследований, выполненных в ИСМ, которые свидетельствуют о существовании тесной корреляции между производительностью обработки, удельным расходом алмаза, шероховатостью обработки и прочностными свойствами рабочей поверхности круга /определяемыми параметром  $P$  / и степенью износа выщавших из связки алмазных зерен /определяемых параметром  $X$  /. Так установлено, что с повышением производительности обработки при

$\alpha$  — *cost* параметр,  $X$  уменьшается и приводит к интенсивному росту удельного расхода алмаза, т.е. существует оптимальное значение  $X$ , реализующее максимально возможную производительность при экономически приемлемом износе алмазного круга. При этом уровень максимальной возможной производительности обработки определяется значением  $P$ . Следовательно, выбор оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ необходимо производить с учетом оптимальных значений  $X$  и  $P$ , определяемых прочностными свойствами зерен и связки круга и технологическими ограничениями обработки.

В работе отмечается, что реализация данного подхода стала возможной благодаря созданию методов комбинированного шлифования кругами из СТМ, позволяющих за счет использования электрофизикохимической энергии эффективно управлять параметрами режущего рельефа круга, а следовательно регулировать в процессе шлифования параметрами  $X$  и  $P$ . Регулирование параметрами  $X$  и  $P$  также возможно за счет осуществления работы круга из СТМ в режиме самозатачивания. Таким образом в работе показано, что решение проблемы повышения производительности обработки требует решения научной проблемы оптимизации режимов шлифования кругами из СТМ на основе разработки нового теоретического подхода к расчету оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ, учитывающего возможности управления режущим рельефом круга за счет использования электрофизикохимической энергии и реализующего максимально возможную производительность обработки, обусловленную прочностными свойствами рабочей поверхности круга и технологическими ограничениями обработки. Разработка теоретического подхода предопределяет создание математических моделей шлифования и установление аналитических зависимостей, увязывающих производительность обработки, параметры режима шлифования и характеристики круга с оптимальными значениями параметров  $X$  и  $P$ , и на их основе выработка новых теоретических решений об условиях повышения производительности обработки при смене значительных припусков. Теоретическими предпосылками работы стали новые научные результаты, полученные 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, Н.Д.Аврутиным, О.Б.Федосеевым.

Методически работа выполнялась в три этапа. На первом этапе разработана упрощенная математическая модель шлифования идеальным /неизнашиваемым/ кругом, на втором этапе — с учетом изменения пара-

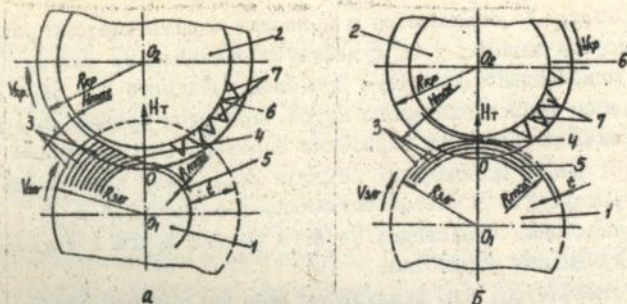


Рис.1. Расчетные схемы процесса шлифования.  
 1- заготовка; 2-круг; 3-цилиндрические оболочки, которыми представлен снимаемый припуск; 4-линия, определяющая положение условной поверхности резания; 5-слой, определяющий шероховатость обработанной поверхности; 6-уровень связки круга; 7-режущие зерна.

метров режущего рельефа круга и соответственно параметров  $X$ ,  $P$  и на третьем этапе решались оптимизационные задачи и дано теоретическое обоснование условий повышения производительности обработки и реализующих ее оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ.

В разработанной упрощенной математической модели шлифования впервые аналитически описана граница завершения диспергирования режущими зернами материала, подводимого в зону резания, вдоль дуги контакта круга с заготовкой. По аналогии с лезвийной обработкой, эта граница определяет положение условной поверхности резания при шлифовании и позволяет с единых позиций определить основные параметры шлифования во всем /возможном/ диапазоне изменения глубины шлифования.

Зависимость, определяющая положение условной поверхности резания, аналитически описывается

$$H = \sqrt[6]{4 t_{нт}} \cdot \sqrt[3]{\frac{H_{нт\max}^3}{2 t_{нт\rightarrow\text{экстр}}} + \sum_{i=0}^{n-2} t_{i\rightarrow\text{экстр}}^{5/2} - \sum_{i=0}^{n-2} t_{i\tau}^{5/2}}, \quad //1/$$

где  $H_{нт\max}$  - максимальная /приведенная вероятностная/ толщина среза, м;

$t_{нт\rightarrow\text{экстр}}$  - координата экстремальной цилиндрической бесконечно тонкой оболочки, /которыми условно представлен снимаемый припуск/, соответствующая экстремуму положения условной поверхности резания, м;

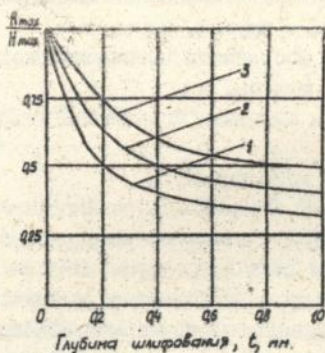


Рис.2. Изменение отношения  $R_{max}/H_{max}$  от глубины шлифования  $t$

1- $H_{max}=0,01$ мм; 2- $H_{max}=0,02$ мм; 3- $H_{max}=0,05$ мм.

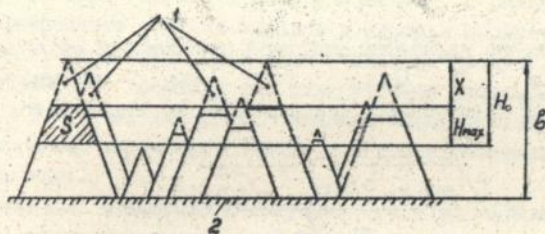


Рис.3. Расчетная схема параметров шлифования с учетом износа зерен.

1- изношенные части зерен;  
2- уровень связки.

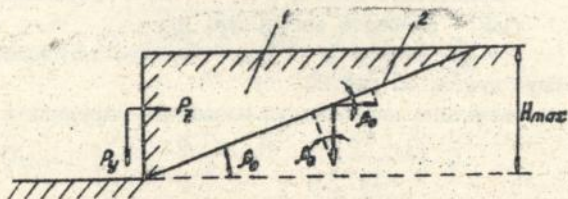


Рис.4. Расчетная схема параметров стружкообразования при шлифовании

1- обрабатываемый материал;  
2- плоскость сдвига.

$t_{\text{лтр экстр}}$  - координата экстремальной цилиндрической оболочки при  $i$ -том контакте ее с кругом, м;

$t_{\text{лтр}}$  - текущая координата цилиндрической оболочки при  $i$ -том контакте ее с кругом, м;

$t_{\text{лтр}} = t_{\text{л}} + t_{\text{лтр}}$ ,  $t_{\text{л}}$  - исходная координата экстремальной цилиндрической оболочки, м;

$t$  - глубина шлифования, м.

В общем виде условная поверхность резания при шлифовании имеет сложную конфигурацию, рис. I. Расчетами установлено, что ее положение определяется соотношением двух параметров -  $H_{\text{max}}$  и  $t$ . В случае  $t > H_{\text{max}}$  (многопроходное шлифование), условная поверхность резания принимает ассиметричный вид относительно осевой плоскости шлифования, рис. Iа), в случае  $t < H_{\text{max}}$  (глубинное шлифование) - приблизительно симметричный вид (рис. Iб).

В случае  $t > H_{\text{max}}$  зависимость (I) может быть упрощена

$$H = H_{\text{max}} \cdot \sqrt[6]{\frac{t_{\text{л}}}{t}} \quad (2)$$

Соответственно параметры условной поверхности резания при шлифовании  $H_{\text{max}}$  и  $R_{\text{max}}$  (где  $R_{\text{max}}$  - максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности, м) описываются зависимостями

$$H_{\text{max}} = \sqrt[3]{\frac{630 \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{\text{заг}} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{\text{кр}}}} \quad (3)$$

$$R_{\text{max}} = \sqrt{\frac{10^5 \cdot \sigma^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{\text{заг}}^2 \cdot \rho}{m^2 \cdot V_{\text{кр}}^2}} \quad (4)$$

где  $\bar{X}$  - зернистость круга, м;  $m$  - объемная концентрация круга;  $V_{\text{заг}}$  - скорость заготовки, м/с;  $V_{\text{кр}}$  - скорость круга, м/с;  $\rho = \frac{1}{R_{\text{заг}}} + \frac{1}{R_{\text{кр}}}$ ,  $R_{\text{заг}}$  - радиус заготовки, м;  $R_{\text{кр}}$  - радиус круга, м. рис.2.

Полученные расчетные зависимости позволили определить параметр

$$S = 0,5 \cdot \Psi \cdot H_{\text{max}}^2 \quad (5)$$

$\psi$  - безразмерный коэффициент, определяющий процент работающих зерен.

Таблица I

Расчетные значения		$\psi$ для $H_{\max} = 10^{-5}$ м				
$t \cdot 10^{-6}$ , м		1,0	5,0	10,0	50,0	100,0
$\psi$		0,0665	0,1525	0,4319	0,44	0,44

Как следует из табл. I, в случае  $t < H_{\max}$  процент работающих зерен незначителен и изменяется в пределах 6...15%. В случае  $t > H_{\max}$  процент работающих зерен выше и составляет 44%. Физически это обусловлено тем, что в случае  $t < H_{\max}$  зерна проходят в основном "след в след" и снимают небольшие по площади поперечного сечения срезы. Причем, чем меньше глубины шлифования  $t$  при заданном значении  $H_{\max}$ , тем меньше параметр  $\psi$  и соответственно  $S$ . В случае  $t > H_{\max}$  зерна проходят в основном по "свежему" обрабатываемому материалу и снимают срезы, по площади поперечного сечения близкие к площади поперечного сечения режущей части зерна. Из проведенного анализа следует, что в случае  $t < H_{\max}$  реализуются относительно небольшие значения параметра  $S$  и, как будет показано выше, появляется возможность увеличения параметра  $H_{\max}$  и соответственно производительности обработки.

Приведенные зависимости получены без учета износа зерен. С учетом износа зерен зависимости для определения параметров  $S$ ,  $H_{\max}$  и  $R_{\max}$  несколько видоизменяются.

$$S = 0,5\psi \cdot H_{\max}^2 \cdot \frac{(1+\eta)}{(1-\eta)} \quad (6)$$

$$H_{\max} = \sqrt[3]{\frac{630\sigma \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{\text{заг}} \cdot \sqrt{t\rho} \cdot (1-\eta)^2}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot (1+\eta)}} \quad (7)$$

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \cdot \frac{10^5 \sigma^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{\text{заг}}^2 \cdot \rho}{m^2 \cdot V_{\text{кр}}^2}} \quad (8)$$

где  $\eta = \frac{\chi}{H_0}$  - безразмерный параметр, определяющий степень затупления зерен и изменяющийся в пределах 0...1;  $\chi$  - величина

линейного износа максимально выступающего над связкой зерна, м;

$H_0$  - максимальная глубина внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга, отсчитывая ее от вершины неизношенно-го максимально выступающего над связкой зерна, м (рис.3).

В отличие от аналогичных зависимостей (3) и (4), зависимости (7) и (8) содержат новый параметр  $\eta$ , который из всех входящих параметров оказывает на  $H_{max}$  и  $R_{max}$  наибольшее влияние. Это свидетельствует о существовании значительных резервов шлифования, связанных с управлением параметром  $\eta$ .

Необходимо отметить, что приведенные зависимости позволяют впервые количественно оценить влияние износа зерен на основные параметры шлифования и объяснить многообразие, зачастую противоречивых, экспериментальных зависимостей, с которыми сталкиваются исследователи. Например, позволяют объяснить противоречивую экспериментальную зависимость, полученную в ИСм. Г.Киев, согласно которой с увеличением производительности обработки в 50 раз толщина среза оставалась практически неизменной.

Как следует из зависимости (7), данная закономерность обусловлена тем, что одновременно с ростом  $t$  или  $V_{заг}$  происходит увеличение величины  $\eta$ , которая собственно и нивелирует рост параметра  $H_{max}$ .

Приведенные зависимости проверены экспериментально. Сравнение расчетных значений  $H_{max}$  с экспериментальными значениями максимальной толщины стружек указывает на одинаковый характер их изменения в зависимости от изменения режимных параметров, табл.2. Показано, что в случае  $\eta = 0 \dots 0,2$ , расчетные значения в наибольшей степени отражают реальные условия шлифования.

Таблица 2

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

№ пп	Режим шлифования		$\eta$			Максимальная толщина стружки
	$t$ , 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	0,0084	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

Используя расчетную схему процесса стружкообразования при резании отдельным зерном (рис.4), в работе получена аналитическая зависимость для определения условного напряжения резания при шлифовании

$$\sigma = \frac{2}{K_{ш}} \cdot [\sigma]_{сж} \quad (9)$$

где  $K_{ш} = \frac{(1-\eta)+2 \cdot f \cdot \eta}{(1+\eta)}$  - коэффициент резания при шлифовании;  $f$  - коэффициент трения;  $[\sigma]_{сж}$  - предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, МПа.

В случае высокопроизводительного шлифования, когда  $\eta \rightarrow 0$ , зависимость (9) принимает вид

$$\sigma = \frac{2}{(1-\eta)} \cdot [\sigma]_{сж} \quad (10).$$

Подчиняя зависимости (7) и (10) условию  $\rho = \sigma \cdot S$ , в работе установлена взаимосвязь между величиной линейного износа зерна, определяемой параметром  $\eta$ , и нагрузкой, действующей на отдельное зерно  $\rho$ , а также между параметрами  $H_{max}$ ,  $S$ ,  $\sigma$  и  $\rho$ .

$$\eta = 1 - \frac{630 \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot \sqrt{t \rho}}{m \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{2 [\sigma]_{сж}}{\rho} \right)^{1,5} \quad (11)$$

$$H_{max} = \frac{630 \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot \sqrt{t \rho}}{m \cdot V_{кр}} \cdot \frac{2 [\sigma]_{сж}}{\rho} \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{m \cdot V_{кр}}{630 \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot \sqrt{t \rho}} \cdot \frac{\rho^{1,5}}{(2 \cdot [\sigma]_{сж})^{0,5}} \quad (13)$$

Анализ зависимости (11) показывает, что для каждого режима шлифования, каждый характеристики круга из СТМ и марки обрабатываемого

материала существует своя вполне конкретная величина линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связки, определяемая предельным значением  $P = \text{const}$ . Это подтверждает выдвинутую автором научную предпосылку о необходимости оптимизации режимов шлифования с позиций переменности величины  $\eta$  при заданном предельном значении параметра  $P$ , что позволяет установить максимально возможную производительность обработки, обусловленную прочностными свойствами рабочей поверхности круга и экономически приемлемым расходом СТМ.

Это также упрощает решение оптимизационных задач и сводит поиск оптимальных соотношений между параметрами  $S$  и  $B$  к определению оптимальных значений величины  $\eta$  при заданном предельном значении  $P$ , обеспечивающих максимально возможную производительность обработки.

Необходимо отметить, что полученное теоретическое решение соответствует аналогичным экспериментальным данным, полученным Д.Г.Евсеевым, С.Н.Корчаком, Л.В.Худобиным, А.А.Сагардой, А.В.Якимовым, А.И.Грабченко, С.А.Поповым и другими учеными.

Учитывая то, что параметр  $[B]_{\text{сш}}$  определен не для всех обрабатываемых материалов, в работе получено приближенное решение для расчета основных параметров шлифования.

$$\eta = 1 - \frac{A}{P} \left( \frac{630 \pi \bar{X}^3 \cdot V_{\text{заг}} \cdot \sqrt{t_p} \cdot A^2}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot P^2} \right)^{\frac{2-n}{2n-1}} \quad (14)$$

$$H_{\text{max}} = \left( \frac{630 \pi \bar{X}^3 \cdot V_{\text{заг}} \cdot \sqrt{t_p} \cdot A^2}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot P^2} \right)^{\frac{1}{2n-1}} \quad (15)$$

$$B = A \cdot \left( \frac{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot P^2}{630 \pi \bar{X}^3 \cdot V_{\text{заг}} \cdot \sqrt{t_p} \cdot A^2} \right)^{\frac{n}{2n-1}} \quad (16)$$

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

В приведенные зависимости (14), (15) и (16) входят два неизвестные параметры  $A$  и  $P$ , которые определяются расчетно-экспериментальным путем на основе экспериментального определения тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  и шероховатости обработки  $R_{\text{max}}$  по зависимостям

$$A = \frac{4^{\frac{n}{6}} \cdot (3-n)(6-n) \cdot P_z}{2,64 \cdot B \cdot t^{1-\frac{n}{6}}} \cdot R_{\max}^{\frac{5n}{6}} \cdot \frac{V_{\text{кр}}}{V_{\text{заг}}} \quad (17)$$

$$\rho = \frac{4^{\frac{n}{6}} \cdot (3-n)(6-n) \cdot P_z \cdot R_{\max}^{\frac{5}{12}}}{2,64 \cdot B \cdot t^{\frac{1}{3}}} \cdot \left( \frac{630 \alpha \cdot X^3 \cdot V_{\text{кр}} \cdot \rho}{m \cdot V_{\text{заг}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

или на основе экспериментальных данных тангенциальной  $P_z$  и коэффициента резания  $K_w$  (для  $n = 0,75$ ) в соответствии с зависимостями

$$A = \frac{4,45 \cdot P_z}{B \cdot t^{0,875}} \cdot \left( \frac{200 \alpha \cdot X^3 \cdot K_w^2 \cdot \sqrt{2\rho}}{3m} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{V_{\text{кр}}}{6,75 V_{\text{заг}}} \right)^{0,75} \quad (19)$$

$$\rho = A \cdot \left( \frac{630 \alpha \cdot X^3 \cdot V_{\text{заг}} \cdot \sqrt{t\rho}}{m \cdot V_{\text{кр}}} \right)^{0,42} \cdot \frac{1}{K_w^{0,16}} \quad (20)$$

В работе установлено, что в установившемся процессе шлифования независимо от изменения параметров режима резания параметры  $A$  и  $\rho$  (для  $n = 0,75$ ) остаются практически постоянными, табл.3. Наблюдаемое уменьшение  $A$  с увеличением  $V_{\text{заг}}$  связано с повышением температуры резания и изменением физико-механических свойств обрабатываемого материала, что хорошо согласуется с данными С.Н.Корчака.

Таблица 3.

Значения параметров  $A$  и  $\rho$  (круг IAI 300x25  
AC6 200/160 - 100% - M04; обр.мат. - Т5К10,  $V_{\text{кр}} =$   
35 м/с;  $B = 22,5 \cdot 10^{-3}$  м)

$V_{\text{заг}}$ , 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 <sup>1,25</sup>	5,34	5,14	4,76	4,52	3,51	3,4
$\rho$ , Н	1,92	1,68	1,78	1,78	1;59	1,66

Причем, такая закономерность выявлена для различных характеристик кругов, обрабатываемых материалов и схем шлифования.

Так, например, при плоском многопроходном шлифовании кругом КР 160/125 - 100% - Б8 быстрорежущей стали Р6М5 параметр  $A$  изменялся в пределах  $(10...13,6) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^{1,25}$ , а при круглом врезном шлифовании кругом 1АГ 600x40 АС15 350/300 - 100% - М1 стали ХВГ и стали 45 (по экспериментальным данным мощности резания и шероховатости обработки, полученным Д.А.Пашковым) - в пределах  $(13...15) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^{1,25}$ , т.е. независимо от схемы шлифования и характеристик круга параметр  $A$  остается приблизительно одинаковым.

Аналогичные результаты получены при исследовании заточки по жесткой схеме (по экспериментальным данным силы резания и шероховатости обработки, полученным И.П.Захаренко и А.А.Шепелевым). При совместной обработке твердого сплава совместно со сталью значения  $A$  находятся в пределах  $(8...16) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^{1,25}$ , т.е. параметр

$A$  достаточно объективно характеризует сопротивляемость материала резанию и может быть использован для оценки обрабатываемости материала шлифованием. Кроме того, параметр  $A$  по-новому позволяет оценить влияние технологических сред, импрегнирования кругов и других факторов.

Чрезвычайный интерес представляют полученные значения параметра  $P$ , поскольку впервые появилась возможность количественной оценки в реальном процессе шлифования величины нагрузки, действующей на максимально выступающее зерно, которая (как показывают расчетно-экспериментальные данные, полученные автором и приведенные в работе) в установившемся процессе стремится принять предельное значение, соизмеримое с прочностью зерна на раздавливание или в зависимости от вида связки - соизмеримое с прочностью удержания зерна в связке. Возможность определения параметра  $P$  расчетно-экспериментальным путем открывает широкие перспективы в изыскании новых резервов повышения эффективности шлифования. Во-первых, это создание новых кругов из СИМ, в которых может быть реализовано условие равенства прочности собственно зерен и прочности удержания их в связке, что позволит в максимальной степени использовать высокие режущие возможности СИМ. Во-вторых, это принципиально новый подход к разработке высокопроизводительных процессов шлифования кругами из СИМ, заключающийся в установлении таких соотношений режимных параметров, которые бы обеспечивали реализацию условия примерного равенства "трех сил" - силы, действующей на максимально выступающее зерно; силы, определяющей прочность зерна на раз-

давливание и силы, удерживающей зерно в связке. Необходимо отметить, что условие примерного равенства "трех сил" следует рассматривать как достаточное условие высокопроизводительного шлифования кругами из СТМ на металлических связках, поскольку необходимое условие, заключающееся в поддержании при обработке заданного значения параметра  $\eta$ , на практике уже реализовано путем применения электроэрозионной или электрохимической правки круга.

Приведенные выше зависимости справедливы для высокопроизводительного шлифования кругом из СТМ, когда  $K_{ш} > f$ , где  $f$  - коэффициент трения. В случае, когда значения  $K_{ш}$  и  $f$  соизмеримы, т.е. для условий малопроизводительного шлифования, основные параметры процесса описуются зависимостями (7), (8), при подстановке в них  $(1 - \eta) = \frac{2(K_{ш} - f)}{(1 + K_{ш} - 2f)}$ . Полученные таким образом зависимости по-новому вскрывают физическую сущность шлифования, состоящую в том, что все основные параметры обработки определяются не просто коэффициентом резания при шлифовании или коэффициентом трения, а их разностью  $(K_{ш} - f)$ , которая при определенных условиях, в особенности при шлифовании по упругой схеме, стремится к нулю и приводит к прекращению процесса съема материала. Причем, такая закономерность справедлива как для кругов из СТМ, так и для абразивных кругов, что подтверждается результатами экспериментальных исследований изменения глубины шлифования, составляющих силы резания при шлифовании, а также  $(K_{ш} - f)$  с течением времени обработки при плоском шлифовании по упругой схеме, табл.4.

Таблица 4

Изменение параметров  $t$ ,  $P_z$ ,  $K_{ш}$ ,  $(K_{ш} - f)$   
с течением времени обработки (круг - 24А436К5;  
обр.мат. - Р18;  $V_{кр} = 30$  м/с;  $V_{заг} = 6$  м/мин;  
 $P_{ш} = 60$  Н;  $f = 0,25$ )

$\tau$ , мин	$t \cdot 10^{-3}$ , м	$P_z$ , Н	$K_{ш}$	$(K_{ш} - f)$
0,1	0,037	28,8	0,48	0,23
0,5	0,013	22,4	0,373	0,123
1,0	0,008	21,5	0,358	0,108
2,0	0,006	19,9	0,3	0,05
3,0	0,005	16,4	0,273	0,023
5,0	0,003	15,4	0,256	0,006

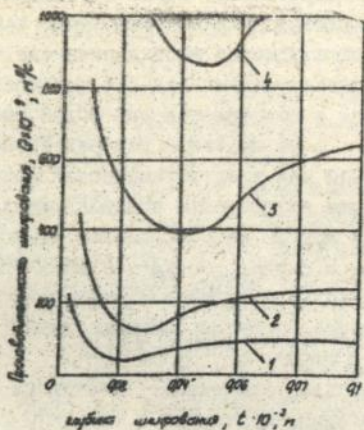


Рис. 5. Изменение производительности шлифования  $Q$  от глубины шлифования  $t$ .

Исх. данные:  $m = 100$ ;  $\bar{X} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $B = 22,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

$\rho = 17 \text{ 1/м}$ ;  $V_{кр} = 30 \text{ м/с}$ ;  $1 - S = 4 \cdot 10^2 \text{ мм}^2$ ;

$2 - S = 9 \cdot 10^2 \text{ мм}^2$ ;  $3 - S = 16 \cdot 10^2 \text{ мм}^2$ ;

$4 - S = 25 \cdot 10^2 \text{ мм}^2$ .

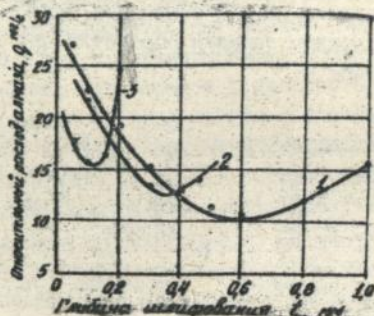


Рис. 6. Изменение относительного расхода алмаза  $q$  от глубины шлифования  $t$ .

Усл. обработки: круг 1А1 300x25 АС6 250/200 М1-01 4;

Обр. материал Ж 15;  $V_{кр} = 35 \text{ м/с}$ ;  $B = 22,5 \text{ мм/об}$ ;

1- $V_{заг} = 1 \text{ м/мин}$ ; 2- $V_{заг} = 3 \text{ м/мин}$ ; 3- $V_{заг} = 6 \text{ м/мин}$ .

Экспериментально установлено, что в связи с затуплением круга глубина шлифования во времени уменьшалась в 13 раз. При этом  $K_{ш}$  уменьшился лишь в 1,875 раз, т.е. используя только величину изменения  $K_{ш}$ , нельзя обосновать причину столь значительного снижения  $t$  и соответственно производительности обработки. Если же рассматривать изменение разности параметров ( $K_{ш} - f$ ), которая за 5 мин обработки уменьшилась в 38,3 раз (при этом  $t$  уменьшилась в 8 раз), то можно заключить, что она хорошо коррелируется с изменением  $t$  и соответственно определяет режущую способность круга. Следовательно, основным путем повышения эффективности обработки в условиях, когда  $K_{ш}$  соизмерим с  $f$  является увеличение  $K_{ш}$  и снижение  $f$ , что достигается поддержанием при шлифовании оптимального значения параметра  $\eta$  и управлением фрикционными процессами при шлифовании (применением эффективных технологических сред и т.д.).

Приведенные выше зависимости позволяют определить максимально возможную производительность обработки  $Q$  и реализующие ее режимы шлифования, обусловленные прочностными свойствами рабочей поверхности круга из СТМ.

$$Q = \frac{\sqrt{2} \cdot m \cdot V_{кр} \cdot B}{450 \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \cdot \left[ \frac{H_{max}^3}{2\sqrt{t_{нТ}}} + \sum_{i=0}^{n-2} t_{ir}^{\frac{5}{2}} \right], \quad (21)$$

$$V_{кор} = \frac{\sqrt{2} \cdot m \cdot V_{кр}}{450 \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{t, \rho}} \cdot \left[ \frac{H_{max}^3}{2\sqrt{t_{нТ}}} + \sum_{i=0}^{n-2} t_{ir}^{\frac{5}{2}} \right], \quad (22)$$

где  $B$  - ширина шлифования, м.

Принимая в качестве условия оптимизации предельное значение  $S$  при  $\eta = 0$ , установлено, что зависимость производительности обработки от глубины шлифования имеет экстремум, рис.5. Причем, доказано, что минимум  $Q$  достигается при условии  $t \propto H_{max}$ . Здесь параметр  $t$  соответствует глубине шлифования, приходящейся на оборот заготовки. С физической точки зрения минимум  $Q$  обусловлен, во-первых, трансформацией симметричной формы условной поверхности резания (относительно осевой плоскости шлифования, как это показано на рис.1) в ассиметричную, вследствие различного соотношения параметров  $t$  и  $H_{max}$  ( $t < H_{max}$  и  $t > H_{max}$ ), во-вторых, существованием самой короткой по длине стружки, поскольку с увеличением и уменьшением  $t$ , начиная со значения  $t \propto H_{max}$ , длина стружки возрастает.

В работе показано, что все существующие и применяемые на практике схемы многопроходного и глубинного шлифования кругами из СТМ (исключая однопроходное глубинное шлифование пазов и канавок), реализованы для случая  $t \propto H_{\max}$ . Этим, собственно, и предопределяется относительно низкая производительность шлифования кругами из СТМ и нецелесообразность их применения взамен обычных абразивных кругов при съеме значительных припусков.

Приведенная на рис. 5 экстремальная зависимость определяет основные пути повышения производительности шлифования кругами из СТМ, которые состоят в реализации новых соотношений между максимальной (приведенной вероятностной) толщиной среза и глубиной шлифования:

$t < H_{\max}$  и  $t > H_{\max}$ , т.е. в реализации правой и левой ветвей экстремальной зависимости  $Q - t$ . Показано, что условие  $t < H_{\max}$  реализуется при шлифовании с весьма высокой скоростью заготовки (соизмеримой со скоростью круга) и небольшой глубиной шлифования, приходящейся на оборот заготовки и составляющей сотые и тысячные доли микрометра. Наиболее просто такое условие выполнимо при круглом врезном и продольном (многопроходном с весьма высокой продольной подачей или глубинном с весьма малой продольной подачей).

Скорость радиальной подачи  $S_{\text{рад}}$ , м/с, и скорость продольной подачи  $S_{\text{прод}}$ , м/с в этих случаях определяются

$$S_{\text{рад}} = \frac{V_{\text{кр}}}{2\pi \cdot R_{\text{заг}}} \cdot \left( \frac{m \cdot H_{\max}^{3,35}}{630\pi \cdot X^3 \cdot \sqrt{\rho}} \right)^{1,18} \quad (23)$$

$$S_{\text{прод}} = \frac{B \cdot V_{\text{кр}}}{2\pi \cdot R_{\text{заг}} \cdot t} \cdot \left( \frac{m \cdot H_{\max}^{3,35}}{630\pi \cdot X^3 \cdot \sqrt{\rho}} \right)^{1,18} \quad (24)$$

Установлено, что при изменении  $H_{\max}$  в пределах (37,5... 60,0)  $\cdot 10^{-6}$  м параметр  $S_{\text{прод}}$  изменяется в пределах 0,254... 1,63 м/мин. Учитывая то, что в известных способах круглого продольного глубинного шлифования кругами из СТМ реализована  $S_{\text{прод}}$  в пределах 0,03...0,05 м/мин, применение предложенного решения позволяет повысить производительность обработки в несколько раз.

В работе также показаны новые возможности от реализации условия  $t < H_{\max}$  при шлифовании периферией или торцом круга, когда кругу или заготовке в направлении, перпендикулярном направлению подачи, дополнительно сообщают движение с относительно высокой скоростью, включая ультразвуковые колебания.

В этом случае за счет создания эффекта прохождения зерен почти "след в след", уменьшается параметр  $\xi$  и появляется возможность существенного увеличения производительности обработки при одновременном снижении износа круга.

Теоретически доказано, что одним из наиболее эффективных способов реализации условия  $t < H_{max}$  является применение сверхскоростного шлифования, в частности, со скоростью круга 600 м/с и выше. Эффективность достигается за счет снижения нагруженности зерен и температуры резания, что подтверждается данными фирмы "Дюринг", имеющий опыт создания станков для сверхскоростного шлифования со скоростью круга 200...300 м/с.

Производительность обработки в данном случае определяется зависимостью

$$Q = \frac{B \cdot \lambda \cdot C \cdot \rho_m \cdot \Theta^2 \cdot H_{max}^{2\nu}}{\pi \cdot A^2 \cdot \bar{\psi}^2} \cdot \sqrt{\frac{\delta}{H_{max} \cdot \rho}} \quad (25)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $C$  - удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\rho_m$  - плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\Theta$  - температура резания, К;  $\bar{\psi}$  - коэффициент, показывающий, какая часть работы переходит в теплоту, поглощаемую обрабатываемой заготовкой.

Из зависимости (25) следует, что  $Q$  в случае  $t < H_{max}$  не зависит от  $t$ , т.е. рекомендуется в качестве оптимального значения  $t$  использовать весь возможный диапазон изменения

$0 < t < H_{max}$ . Для реализации указанного значения  $t$ , скорость круга необходимо устанавливать в соответствии с зависимостью

$$V_{кр} = \frac{1,79 \cdot 10^3 \cdot \bar{\chi}^3 \cdot \lambda \cdot C \cdot \rho_m \cdot \Theta^2}{m \cdot A^2 \cdot \bar{\psi}^2 \cdot H_{max}^{2,35} \cdot t^{0,45}} \quad (26)$$

Расчетами установлено, что добиться существенного увеличения  $Q$  при заданной температуре резания  $\Theta$  можно в условиях, когда  $V_{кр} = 600 \dots 1000$  м/с, а скорость заготовки превышает значения скорости круга, используемые в современных шлифовальных станках.

Учитывая, что реализация условия  $t < H_{max}$  требует создания нового шлифовального оборудования, в работе основное внимание уделено обоснованию возможностей шлифования для случая  $t > H_{max}$ , которое может быть осуществлено на действующем оборудовании.

Показано, что основным способом реализации условия  $t > t_{max}$  является глубинное шлифование с относительно небольшой скоростью заготовки и долевой продольной подачей, близкой к единице. Применение такого способа позволяет при экономически приемлемом расходе СТМ повысить производительность обработки до уровня 30...50 тыс. мм<sup>3</sup>/мин, что вполне конкурентноспособно с существующим абразивным шлифованием и позволяет эффективно использовать круги из СТМ при смене значительных припусков.

Показано, что возможности такого способа шлифования обусловлены главным образом величиной  $\eta$ . Как следует из зависимости (27), с увеличением величины  $\eta$  производительность обработки  $Q$  снижается, что при определенных условиях может полностью нивелировать преимущества высокопроизводительного глубинного шлифования кругами из СТМ.

$$Q = \frac{B \cdot m \cdot V_{кр}}{630 \alpha \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \cdot (1 - \eta)^{\frac{(2n-1)}{(2-n)}} \cdot \left(\frac{\rho}{A}\right)^{\frac{3}{(2-n)}} \quad (27)$$

Следовательно, основным путем повышения  $Q$  для случая  $t > t_{max}$  является поддержание в процессе оптимального значения параметра  $\eta$  на основе соблюдения определенных соотношений режимных параметров, выраженных относительно скорости заготовки

$$V_{scr} = \frac{m \cdot V_{кр}}{630 \alpha \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{t \cdot \rho}} \cdot (1 - \eta)^{\frac{(2n-1)}{(2-n)}} \cdot \left(\frac{\rho}{A}\right)^{\frac{3}{(2-n)}} \quad (28)$$

Оптимальные значения  $\eta$  устанавливаются из условия обеспечения экономически приемлемого расхода СТМ (или допустимой себестоимости обработки) с учетом ограничений по качеству обработки.

В связи с этим в работе получены зависимости для определения основных технологических параметров обработки.

Для определения относительного расхода СТМ рассмотрена расчетная схема, в которой интенсивность износа круга определяется как функция времени между объемным разрушением двух наиболее выступающих из связки зерен. Принято, что величина износа наиболее выступающего зерна в момент его объемного разрушения равна  $\chi_1$ , а второго нижерасположенного, в тот же момент -  $\chi_2$ , где

$\chi_2 < \chi_1$ . Для того, чтобы произошло объемное разрушение второго зерна, оно должно претерпеть дополнительный линейный износ на вели-

чину  $\Delta_0 = X_1 - X_2 = \eta \cdot \Delta$ , где  $\Delta$  - расстояние между вершинами двух наиболее выступающих зерен. Из приведенной зависимости следует определяющее влияние величины  $\eta$  на  $\Delta_0$ , что согласуется с практикой шлифования.

Используя полученную зависимость аналитически описан относительный расход СГМ:

$$q = \frac{10^{-3} \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot \Delta i \cdot V_{\text{кр}}}{\rho_m \cdot V_{\text{заг}} \cdot t \cdot \eta} \quad (29)$$

где  $\rho_a$  - плотность СГМ, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta i$  - линейный износ зерна за одно касание с кругом, м.

Характер изменения зависимости (29) определяется величиной  $\eta$ , которая при  $\eta \rightarrow 0$  приводит к бесконечному росту  $q$ , что хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными данными, приведенными в научной литературе. Второй важной особенностью зависимости (29) является ее экстремальность. Нетрудно видеть, что при однофакторном изменении глубины шлифования  $t$  и других параметров обработки для случая  $t > H_{\text{max}}$  функция  $q$  проходит точку минимума, т.е. всегда существует экстремальное значение  $\eta$ , которое для  $n = 0,75$  равно  $\eta_{\text{экстр}} = 0,88$ . Важной особенностью экстремальной зависимости  $q - t$  является также и то, что, независимо от соотношения режимных параметров в точке минимума  $q$  всегда реализуется одно значение параметров  $X$  и  $H_{\text{max}}$ :

$$X = \eta_{\text{экстр}} \cdot (1 - \eta_{\text{экстр}})^{\frac{n-1}{2-n}} \cdot \left(\frac{\rho}{A}\right)^{\frac{1}{2-n}} \quad (30)$$

$$H_{\text{max}} = (1 - \eta_{\text{экстр}})^{\frac{1}{2n-1}} \cdot \left(\frac{\rho}{A}\right)^{\frac{1}{2-n}} \quad (31)$$

Приведенные на рис. 6 экспериментальные зависимости  $q - t$  для различных значений  $V_{\text{заг}}$  хорошо согласуются с результатами аналитических исследований. Так, с увеличением  $V_{\text{заг}}$  минимум  $q$  возрастает, а экстремальная глубина шлифования смещается в область меньших значений  $t$ , что свидетельствует о возможности снижения относительного расхода алмаза в условиях глубокого шлифования с относительно небольшой скоростью заготовки и долевой продольной подачей, близкой к единице.

Таким образом, аналитически установлено и экспериментально подтверждено, что взаимосвязь  $Q$  и  $q$  обусловлена изменением величины  $\eta$ , уменьшение которой, начиная со значения  $\eta = 0,77$  при  $P = \text{const}$  предполагает непрерывный рост  $Q$  и  $q$ . Следовательно, оптимум шлифования достигается при изменении  $\eta$  в диапазоне  $0 \dots 0,88$ . Учитывая, что  $Q$  в точках  $\eta = 0$  и  $\eta = 0,88$  отличается в 6 раз, в качестве критерия оптимизации в первом приближении может быть использован минимум  $q$ . При более углубленном анализе процесса оптимальное значение  $\eta$  следует определять по себестоимости обработки.

Для упрощения оптимизационных расчетов относительный расход СТМ и себестоимость обработки  $c$  (для  $n = 0,75$ ) представлены в безразмерных величинах

$$\alpha = \eta_{\text{экстр}}^3 \left\{ \alpha_1 \left( \frac{3n-2}{2n-1} \right) \alpha_2 \left( \frac{4n-3}{2n-1} \right) \left[ 1 - \alpha_1 \frac{2-n}{2(2n-1)} \alpha_2 \frac{(2-n)}{(2n-1)} (1 - \eta_{\text{экстр}}) \right]^3 \right\} \quad (32)$$

$$\frac{c}{c_{\text{экстр}}} = 0,34 / \left[ \alpha_1^{0,5} (1 - 0,12 \alpha_1^{1,25} \alpha_2^{2,5})^3 \right] + 0,5 / (\alpha_1 \alpha_2) \quad (33)$$

где  $\alpha = \frac{q}{q_{\text{min}}}$ ;  $\alpha_1 = \frac{t}{t_{\text{экстр}}}$ ;  $\alpha_2 = \frac{V_{\text{шт}}}{V_{\text{шт экстр}}}$

Это позволило сложные зависимости, определяющие относительный расход СТМ, глубину шлифования и производительность обработки в экстремальных точках, свести к простому виду:

$$\alpha'_{\text{min}} = \alpha_2; \quad \alpha_1 = 1/\alpha_2^2; \quad \alpha_1 \alpha_2 = 1/\alpha_2$$

Соответственно для экстремальной зависимости себестоимости обработки:  $\alpha_1 = 1,73 \cdot \alpha_2^2$ ;  $c/c_{\text{экстр}} = 0,874 \cdot \alpha_2$ . Таким образом доказано, что экстремальные безразмерные значения себестоимости обработки и глубины шлифования отличаются от аналогичных значений для минимума относительного расхода СТМ лишь постоянными множителями и оптимизация процесса сводится к определению оптимального значения  $\eta$  в соответствии с зависимостью  $\eta = 1 - 0,12 \cdot \alpha_0^{1,25}$ , (где  $\alpha_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2^2$ ) с учетом конкретных значений  $\alpha$  или  $c/c_{\text{экстр}}$ . Зная оптимальное значение  $\eta$ , по соответствующим зависимостям определяются все остальные параметры шлифования.

При этом установлено, что производительность обработки при  $C/C_{\text{экстр}} = \text{const}$  возрастает с увеличением  $\alpha_1$  более интенсивно, чем при  $\alpha = \text{const}$ , а  $\eta_{\text{экстр}} > 0,76$ , т.е. оптимизация с учетом себестоимости обработки позволяет обосновать условия более полного использования режущих возможностей круга из СТМ при глубинном шлифовании.

Полученное теоретическое решение об экстремальности себестоимости обработки использовано для определения максимальной производительности обработки с учетом ограничений по мощности резания  $N$

$$Q = \frac{0,042 \cdot N}{A} \cdot \left(\frac{\rho}{A}\right)^{0,6} \quad (34)$$

Доказано, что  $Q$  в явном виде не зависит от параметров режима шлифования, а определяется лишь параметрами  $N$ ,  $\rho$  и  $A$ ; два первые из которых выводятся за счет установления  $V_{\text{заг}}$  и  $t$  в соответствии с зависимостями

$$V_{\text{заг}} = \frac{7,64 \cdot A \cdot \beta}{N \cdot \rho} \cdot \left(\frac{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot \rho^2}{630 \text{ э} \cdot \bar{X}^3 \cdot A^2}\right) \cdot \left(\frac{\rho}{A}\right)^{0,2} \quad (35)$$

$$t = \frac{0,0055 \cdot N^2 \cdot \rho}{A^2 \cdot \beta^2} \cdot \left(\frac{630 \text{ э} \cdot X^3 \cdot A^2}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot \rho^2}\right) \cdot \left(\frac{\rho}{A}\right)^{0,4} \quad (36)$$

Из зависимости (36) следует важный вывод, связанный с тем, что увеличение прочностных свойств круга с точки зрения повышения производительности обработки менее эффективно, чем увеличение мощности станка. При этом установлено, что максимальные значения

$Q$  изменяются в пределах  $(0,3 \dots 60) \cdot 10^3$  мм<sup>3</sup>/мин с учетом  $N = (1 \dots 10) \cdot 10^3$  Вт,  $\rho = 1 \dots 5$  Н,  $A = (5 \dots 20) \cdot 10^5$  Н/м<sup>1,25</sup>. Этим доказана возможность в 2...5 раз повышения производительности обработки, используя новые соотношения режимных параметров, определяемые зависимостями (35) и (36).

Принимая в качестве независимых параметров скорость заготовки и прочность зерна определена максимально возможная производительность обработки с учетом ограничений по шероховатости  $R_a$  и точности  $\delta$  обработки:

$$Q = \frac{2,16 \cdot V_{\text{кр}} \cdot C_1 \cdot K_{\text{ш}} \cdot \delta}{A} \cdot R_a^{0,62} \cdot t^{0,128} \quad (37)$$

где  $C_1$  - приведенная жесткость технологической системы, Н/м.

Из приведенной зависимости следует, что для обеспечения заданных значений  $R_a$  и  $\delta$  с целью реализации максимально возможной производительности обработки, глубину шлифования следует увеличивать, поддерживая соответствующие соотношения между другими режимными параметрами.

В работе определена максимально возможная производительность и реализующие ее режимы шлифования с учетом ограничений по температуре резания и себестоимости обработки

$$Q = \frac{0,074 \cdot B \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \Theta^2 \cdot (1-\eta)^{1,8}}{A^2 \cdot \bar{\varphi}^2 \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}} \cdot \left(\frac{P_0}{A}\right)^{1,2} \quad (38)$$

$$V_{zar} = \frac{0,074 \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \Theta^2 \cdot (1-\eta)^{1,8}}{A^2 \cdot \bar{\varphi}^2 \cdot t^{1,5} \cdot \rho^{0,5}} \cdot \left(\frac{P_0}{A}\right)^{1,2} \quad (39)$$

$$V_{кр} = \frac{330,6 \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \bar{X}^3 \cdot \Theta^2 \cdot (1-\eta)^{0,2}}{m \cdot A^2 \cdot \bar{\varphi}^2 \cdot t} \cdot \left(\frac{A}{P_0}\right)^{1,2} \quad (40)$$

Как видим, наибольшее влияние на  $Q$  с изменяющихся параметров оказывает параметр  $\eta$ , что указывает на необходимость управления им в процессе шлифования. Это достигается, во-первых, правильным выбором режимных параметров в соответствии с зависимостями (39) и (40), во-вторых, правильным выбором характеристик самозатачивающегося круга из СТМ или условий электрофизикохимической правки круга на высокопрочных металлических связках.

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 круга из СТМ, работающим в режиме периодического затупления.

В заключении работы предложен новый способ глубинного прерывистого шлифования, позволяющий значительно уменьшить температуру резания при сохранении постоянными производительности обработки и износа круга. Эффект обусловлен применением прерывистых кругов, у которых длина впадины  $t_2$  в 2...6 раз меньше длины рабочего выступа  $t_1$  и установлением глубины шлифования и скорости заготовки в соответствии с зависимостями

$$V_{zar} = \frac{V_{zar_0}}{(1 + t_2/t_1)^2}, \quad (41)$$

$$t = t_0 \cdot (1 + t_2/t_1)^2, \quad (42)$$

где  $V_{заг}$ ,  $t_0$  - оптимальные значения скорости заготовки и глубины шлифования для круга со сплошной рабочей поверхностью той же характеристики, что и прерывистый круг.

Для реализации способа  $V_{заг}$  необходимо уменьшать, а  $t$  - увеличивать. Причем, чем больше соотношение  $t_2/t_1$ , тем значительнее должно быть изменение параметров  $V_{заг}$  и  $t$ . Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что высокопроизводительное глубинное шлифование ( $t > H_{max}$ ) наиболее эффективно осуществляется с  $t = 0,1 \dots 1,0$  мм,  $V_{заг} = 0,5 \dots 10,0$  м/мин и долевой продольной подачей близкой к единице. Указанные режимы шлифования могут быть использованы на операциях предварительного круглого и плоского шлифования труднообрабатываемых материалов, заточки твердосплавных и быстрорежущих инструментов.

Для реализации установленных оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ в работе предлагается управление оптимальными значениями параметров  $h$  и  $P$  путем введения в зону резания или автономно дополнительной электрофизикохимической энергии. Сущность данного управления состоит в поддержании в процессе шлифования постоянным /за счет использования электрофизикохимической энергии/ оптимального значения мощности шлифования, установленного по соответствующим расчетным зависимостям, приведенным в работе, с учетом оптимальных значений параметров  $h$  и  $P$ . Такой подход к управлению отличается от известных подходов, не учитывающих и не реализующих оптимальных значений  $h$  и  $P$  и соответствующих им оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ, позволяющих в максимальной степени использовать прочностные свойства поверхности круга с учетом основных технологических ограничений обработки.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Дано теоретическое обобщение и разработан новый теоретический подход к расчету оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ, учитывающий возможности управления режущим рельефом круга за счет использования электрофизикохимической энергии и реализующий максимально возможную производительность обработки, обусловленную прочностными свойствами поверхности круга и технологическими ограничениями обработки.
2. Разработана математическая модель процесса шлифования кругами из СТМ, впервые рассматривающая во взаимосвязи кинематические параметры с параметрами процесса стружкообразования, износа круга, установившегося режущего рельефа круга и вероятностного участия зерен в

резании. Установлена замкнутая система уравнений, с единых позиций описывающая все основные физические и технологические параметры шлифования с учетом параметров режима резания, характеристик круга и заготовки, включая физико-механические свойства зерен и обрабатываемого материала.

3. Теоретически обосновано существование экстремальной зависимости максимально возможной производительности обработки от глубины шлифования и определены условия существенного повышения производительности шлифования кругами из СТМ, состоящие в реализации условий  $t < H_{max}$  и  $t > H_{max}$ , определяющих новые соотношения между глубиной шлифования  $t$  и максимальной /приведенной вероятностной/ толщиной среза  $H_{max}$ . Показано, что кинематическими схемами, реализующими условие  $t < H_{max}$ , являются схемы глубинного и многопроходного шлифования /исключая схему сверхскоростного шлифования/ с относительно высокой скоростью заготовки, а кинематическими схемами, реализующими условие  $t > H_{max}$  - глубинное шлифование с относительно небольшой скоростью заготовки. При этом установлено, что все многообразие существующих схем шлифования кругами из СТМ реализует условие  $t \approx H_{min}$  соответствующее минимуму производительности обработки, чем, собственно, и обусловлена низкая эффективность применяемых в настоящее время способов шлифования кругами из СТМ.

4. Разработаны теоретические основы оптимизации и управления процессом высокопроизводительного глубинного шлифования кругами из СТМ /случай  $t > H_{max}$  /, основанные на реализации оптимальных значений величины линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связи круга и величины нагрузки, действующей на отдельное зерно круга. Установлено, что в установленном процессе шлифования эти величины играют определяющую роль и управление ими позволяет добиться существенного повышения производительности обработки при экономически приемлемом износе круга из СТМ.

5. Доказано существование оптимальных значений величины линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связи без разрушения, обусловленных экстремальностью зависимости относительного расхода СТМ от глубины шлифования. Установлено, что в точках минимума относительного расхода СТМ, независимо от сочетания режимных параметров, величина линейного износа максимально выступающего зерна принимает практически одно и то же значение. Этим доказано существование оптимального /с точки зрения износо-

стойкости круга/ режущего рельефа круга из СТМ, который может быть реализован работой круга из СТМ в режиме самозатачивания или в режиме непрерывной электрофизикохимической пранки.

6. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что в условиях установившегося процесса шлифования кругом из СТМ нагрузка, действующая на максимально выступающее зерно, и параметр, определяющий прочностные свойства обрабатываемого материала, независимо от схемы шлифования и режимов резания остаются практически постоянными величинами. Это позволяет, располагая банком данных этих величин для различных характеристик кругов и обрабатываемых материалов, производить численные расчеты основных параметров шлифования, не прибегая к проведению трудоемких традиционных экспериментальных исследований.
7. Разработаны алгоритмы расчета оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ, в которых в качестве условия оптимизации использована величина нагрузки, действующей на зерно, а в качестве оптимизируемого параметра — величина линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связки без разрушения, что впервые позволило определить максимально возможную производительность обработки и реализующих ее режимов шлифования для различных технических ограничений, включая износ круга из СТМ и себестоимость обработки, силы и температуру резания, шероховатость обработки и другие параметры.
8. На основании теоретических исследований разработаны высокопроизводительные способы шлифования кругами из СТМ труднообрабатываемых материалов, реализующие новые области эффективного сочетания режимов резания и 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  $t < H_{max}$ /. Разработаны научные методики расчета оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ, использованные при проектировании новых станков для сверхскоростного шлифования. Новизна технических решений подтверждена 7 авторскими свидетельствами на изобретения.
9. Внедрение результатов работы на предприятиях пяти отраслей обеспечило фактически годовой экономический эффект свыше 1,0 млн. руб. /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. Завершение исследования, представ-

ленные в работе, создают основы для дальнейшего развития теории шлифования, оптимизации и проектирования высокопроизводительных процессов шлифования кругами из СТМ. Осуществлено теоретическое обобщение и решена крупная научная проблема в области технологии машиностроения и механической и физико-химической обработки, состоящая в оптимизации режимов шлифования кругами из СТМ с использованием дополнительной электрофизикохимической энергии и обосновании и реализации условий существенного повышения производительности обработки при съеме значительных припусков, что имеет важное теоретическое и народнохозяйственное значение.

Основное содержание и результаты диссертации отражены в работах:

1. Повышение эффективности алмазного прерывистого шлифования / соавтор Якимов А.А. / - Вестник машиностроения, 1988, № 7, с. 45-47.
2. Математическое обеспечение САПР ПП шлифования / соавтор Якимов А.А. / - в кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении. Пермь: ППИ, 1987, с. 21-28.
3. Вероятностный расчет максимальной толщины среза и шероховатости обработанной поверхности при круглом продольном шлифовании. - в кн.: Резание и инструмент, вып. 20, Харьков: Вища школа, 1983, с. 73-78.
4. Кинетика образования режущего рельефа алмазного круга в процессе шлифования. - в кн.: Контактные процессы при больших пластических деформациях, Харьков: ХАИ, 1982, с. 37-43.
5. Оптимизация высокопроизводительного глубинного шлифования и вопросы качества алмазной обработки твердого сплава инструментального назначения / соавторы Солнников С.А., Лысенко А.В. / - Редколлегия журнала "Сверхтвердые материалы". Деп. ВНИТИ, 19.04.84, № 2475-84 Деп.
6. Закономерности износа алмазного круга в процессе шлифования. - в кн.: Прогрессивные технологические процессы, оборудование и инструмент. Харьков: ХАИ, 1987, с. 119-126.
7. Механизм износа круга в условиях обычного и управляемого процесса шлифования / соавтор Дубина Н.И. / - Тез. докл. Всесоюз. научно-технич. конференции "Новые конструкции и прогрессивная технология производства инструмента", Харьков, 1984, с. 278-282.
8. 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.

9. 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.
10. Теоретический анализ износа и стабилизации рельефа алмазного круга. - В кн.: Резание и инструмент, вып.36, Харьков: Вища школа, 1986, с.104-110.
11. Повышение эффективности алмазного шлифования /соавтор Якимов А.А./.- Редколлегия журнала "Вестник машиностроения". Дел. во НИИТЭМР 26.11.87, № 250 - Мш.
12. Элементы механики высокопроизводительного прерывистого алмазного шлифования /соавтор Якимов А.А./.- В кн.: Пути повышения эффективности процессов резания материалов, Волгоград, 1988, с. 151-157.
13. Шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании /соавтор Гудаленко Ю.Г./.- В кн.: Совершенствование абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении, Пермь: ПИИ, 1983, с.52-57.
14. Некоторые принципы условной оптимизации алмазного шлифования /соавтор Гудаленко Ю.Г./.- В кн.: Производство и применение сверхтвердых материалов, Киев, 1983, с.154-156.
15. Исследование влияния коэффициента шлифования на режимную способность прерывистых кругов /соавторы Сухоруков Ю.Н., Якимов А.А./ - В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении, Пермь: ПИИ, 1990, с.21-34.
16. Об условиях самозатачивания алмазного круга /соавтор Гудаленко Ю.Г./.- В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении, Пермь: ПИИ, 1984, с. 70-77.
17. Математическая модель стружкообразования при микрорезании /соавторы Малахян В.В., Узунян М.Д./.- В кн.: Резание и инструмент, вып.35, Харьков: Вища школа, 1986, с.102-108.
18. Особенности алмазной разрезки полимерных композиционных материалов крупнозернистыми отрезными кругами /соавтор Солодовник В.Г./.- В кн.: Резание и инструмент, вып.36, Харьков, Вища школа, 1986, с.118-120.
19. Элементы механики прерывистого высокопроизводительного алмазного шлифования /соавтор Якимов А.А./.- В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении, Пермь: ПИИ, 1988, с.64-69.

20. Модель рабочего рельефа алмазно-абразивного инструмента и качество обработанных поверхностей при алмазном высокопроизводительном шлифовании /соавтор Сошников С.А./.- в кн.: Исследование в области инструментального производства и обработки металлов резанием, Тула: ТПИ, 1984, с.128-135.
21. Особенности автоматизированного расчета оптимальных режимов резания с учетом динамических явлений при шлифовании кругами из СТМ /соавтор Серов Б.С./.- Вестник Харьковского политехнического института, № 226. Автоматизация проектирования в технологии машиностроения, вып.1, 1989, с.46-49.
22. Управление процессом шлифовании восстановленных деталей аэрокосмической техники с износостойкими покрытиями /соавторы Якимов А.А., Казимирчик Ю.А., Новиков Г.В./.- в кн.: вопросы совершенствования технологии ремонта воздушных судов. Киев: КНИИГА, 1988, с.9-14.
23. Разработка единой замкнутой системы показателей процессов шлифования /соавторы Сошников С.А., Гуцаленко Ю.Г./.- Тез.докл. научн.-технич.конференции "Повышение эффективности внедрения средств механизации и автоматизации, новых технологических процессов в металлообработке", Курск, 1984, с.31-33.
24. Повышение износостойкости алмазных кругов при глубинном шлифовании твердосплавных и быстрорежущих изделий /соавторы Сошников С.А., Гуцаленко Ю.Г./.- Тез.докл.научн.-технич.конференции "Применение прогрессивных инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущих инструментов", Краснодар, 1983
25. Анализ параметров процесса алмазного шлифования с позиций изменяющегося рельефа круга.- В кн.: Исследования в области технологий механической обработки и обточки машин, Тула: ТПИ, 1986, с. 40-47.
26. Повышение эффективности глубинного алмазного шлифования деталей из труднообрабатываемых материалов с шершавыми поверхностями /соавтор Сошников С.А./.- Тез.докл.Республ.научно-технич.конференции "Прогрессивные технологические процессы и повышение эффективности механической обработки труднообрабатываемых в неметаллических материалов", Днепропетровск, 1983, с.48-49.
27. Вопросы устойчивости и стабилизации режущего рельефа алмазного круга /соавторы Дубина П.И., Сошников С.А./.- Тез.докл.Респуб. научн.-технич.конференции "Прогрессивные технологические

- процессы и повышение эффективности механической обработки трудно-обработываемых и неметаллических материалов", Днепродзержинск, 1983, с.66-67.
28. Определение сил резания при шлифовании с учетом стабилизированного рельефа круга /соавторы Серов В.С., Новиков Г.В./.- Вестник Харьковского политехнического института, № 226, Машиностроение, вып.15, 1985, с.49-54.
  29. Устойчивость зерен в связке и износ шлифовального круга /соавторы Гудаленко Ю.Г., Новиков Г.В./.- В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении, Пермь: ППИ, 1987, с.43-48.
  30. А.С. СССР № 1542782 МК В 24 В 1/00. Способ шлифования цилиндрической детали.- Спубл. в Б.И. 1990, № 6.
  31. А.С. СССР № 1426756 МК В 24 В 1/00. Способ глубинного шлифования цилиндрической детали /соавтор Якимов А.А./.- Спубл. в Б.И. 1988, № 36.
  32. А.С. СССР № 1484607 МК В 24 В 1/00. Способ глубинного шлифования цилиндрической детали /соавторы Суворов Е.И., Жаровский О.Н., Новиков Г.В./.- Спубл. в Б.И. 1989, № 21.
  33. А.С. СССР № 1514588 МК В 24 В 51/00. Способ управления процессом круглого врезного шлифования /соавторы Жаровский О.Н., Гришкевич А.В., Билецкий Ю.С./.- Спубл. в Б.И., 1989, № 38.
  34. А.С. СССР № 1539046 МК В 24 В 1/00. Способ круглого продольного шлифования /соавторы Суворов Е.И., Якимов А.А., Новиков Г.В./.- Спубл. в Б.И. 1990, №4.
  35. А.С. СССР № 1542783 МК В 24 В 1/00. Способ глубинного шлифования /соавторы Суворов Е.И., Якимов А.А./- Спубл. в Б.И. 1990, №6.
  36. А.С. СССР № 1645104 МК В 24 В 1/00. Способ шлифования кругом из синтетических сверхтвердых материалов /соавторы Суворов Е.И., Якимов А.А., Новиков Г.В./.- Спубл. в Б.И. 1991, № 16.

*Новиков*

AB 28.223

**AB 28.223**