

Харьковский государственный политехнический
университет

На правах рукописи

Грабченко Анатолий Иванович

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ
СВЕРХТВЕРДЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.03.01

Процессы механической
обработки; станки и
инструмент

Диссертация
в форме научного доклада
на соискание ученой степени
доктора технической наук

Харьков, 1995

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00754905 (U)

Харьковский государственный политехнический
университет

На правах рукописи

Грабченко Анатолий Иванович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ
СВЕРХТВЕРДЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность 05.03.01. - Процессы механической
обработки; станки и инструмент

Диссертация
в форме научного доклада
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Харьков, 1995

Работа выполнена в Проблемной лаборатории "Физика процессов резания инструментами из сверхтвердых материалов" им. М.Ф. Семко при кафедре "Резание материалов и режущие инструменты" Харьковского государственного политехнического университета.

Официальные оппоненты:

Заслуженный работник высшей школы Украины,
член-корр. НАН Украины, доктор технических
наук, профессор
Родин Петр Родионович

доктор технических наук, профессор
Верезуб Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор
Якубов Февзи Якубович

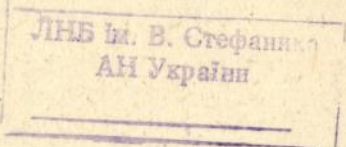
Ведущее предприятие: Полтавский алмазный завод, г. Полтава

Защита состоится "28" мая 1995 г. на заседании специализированного ученого совета Д02.09.01 в Харьковском государственном политехническом университете по адресу: 310002, г. Харьков, 2, МСП, ул.Фрунзе, 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского государственного политехнического университета.

Диссертация разослана "24" мая 1995 г.

Ученый секретарь специализированного совета, доктор технических наук, профессор



Узунян М.Д.

Актуальность. В развитии экономики страны машиностроение призвано играть ключевую роль. В условиях рыночных отношений и все большей интеграции Украины в мировую систему конкурентоспособность машиностроительной продукции можно обеспечить лишь на основе принципиально новых концепций конструирования, использования наукоемких технологий, применения материалов высокой твердости, прочности и износостойкости, обработка которых затруднена. Новые возможности в решении этой задачи открылись с появлением сверхтвердых поликристаллических материалов (СТПМ) на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора, обладающих уникальными свойствами, предопределяющими высокую эффективность использования их в режущем, выглаживающем, волоочильном, буровом, мерительном инструменте. Создание и организация массового производства инструмента и других изделий из СТПМ потребовали изучения их структуры, свойств, изыскания высокопроизводительных методов и современной технологии обработки.

Обладея самой высокой в природе твердостью, жесткостью, износостойкостью, эти материалы составляют особую группу труднообрабатываемых. Поэтому степень реализации уникальных свойств СТПМ в изделиях различных отраслей народного хозяйства во многом определяется решением проблемы их обрабатываемости. Анализ различных по природе разрушающих воздействий на алмаз и другие сверхтвердые материалы позволили сделать вывод о существовании потенциальных возможностей алмазного шлифования, для полного использования которых необходимы комплексные исследования по выявлению сущности и закономерностей высокоскоростного контактного взаимодействия алмазных кругов с шлифуемыми СТПМ и создания на этой основе новых способов шлифования, обеспечивающих их высокоэффективную обработку в процессе формообразования.

Работа выполнялась в соответствии с тематикой Проблемной лаборатории "Физика процессов резания инструментами из сверхтвердых материалов" им. М.Ф.Семко и Отраслевой лаборатории алмазных инструментов Харьковского государственного политехнического университета, в соответствии с целевой программой № 274 от 21.06.78 г., комплексными научно-техническими программами ГКНТ СССР № 472/248 от 12.12.80 г. (задание 016.08. "Создать и освоить в производстве прогрессивные виды режущего, абразивного и алмазного инструмента из новых инструментальных, абразивных и сверхтвердых материалов"; задание 01.01.05 "Разработать и внедрить технологический процесс шлифования двухслойных круглых и многогранных режущих пластин с рабочим слоем из СТМ на основе вюрцитоподобного нитрида бора") и комплексной научно-технической программой ГКНТ СССР № 516 от 29.12.81 г., а также планами социально-экономического развития Украины; дополнительным заданием ГКНТ СССР, с планами

АН Украины по проблеме "Синтез сверхтвердых материалов" и др.

Цель работы - повышение эффективности и расширение областей применения лезвийных режущих инструментов и других изделий из синтетических сверхтвердых поликристаллических материалов, обеспечение конкурентоспособного уровня их функциональных свойств на базе создания научных основ обрабатываемости СТПМ алмазным шлифованием и расширения его технологических возможностей.

Идея работы заключается в том, чтобы путем теоретических и экспериментальных исследований доказать принципиальную возможность создания высокоэффективных способов обработки шлифованием за счет использования резервов работоспособности, кроющихся в управлении рельефом и профилем рабочей поверхности кругов (РПК), в случае, когда не выполняется одно из основных требований теории резания о превышении твердости материала инструмента над твердостью обрабатываемого материала в 1,5 - 2,5 раза.

Методы исследования. В работе на основе фундаментальных положений теории резания материалов предложены новые методические подходы к изучению процесса шлифования. Исследования выполнены в соответствии с методологией системно-структурного анализа процесса с использованием экспериментально-теоретических методов механики твердого деформируемого тела, физики твердого тела, теории теплопроводности, методов математической статистики и планирования многофакторного эксперимента, методов физического и математического моделирования, современных физических методов исследования материалов - электронномикроскопического, рентгеноструктурного, металлографического, микроспектрального, поляризационно-оптического; экспериментальная часть проводилась на модернизированных станках, специально разработанных стендах и установках с использованием современной контрольно-измерительной аппаратуры.

Автор защищает:

1. Разработанные научные основы обрабатываемости сверхтвердых поликристаллических материалов на базе расширения технологических возможностей алмазного шлифования целенаправленным предотвращением структурно-топографической приспособляемости рабочей поверхности кругов и управления ее параметрами в процессе обработки.

2. Положение об алмазном шлифовании как структурно-чувствительном процессе, обеспечивающем сложный комплекс разрушающих воздействий на СТПМ - механических, химических, тепловых.

3. Положение о субмикрорельефе алмазных зерен круга как главном факторе формирования локальных зон микроразрушения при высокоскоростном контактировании с СТПМ и о вспомогательной роли в съеме припуска волновых и термоактивируемых процессов.

4. Экспериментально установленную взаимосвязь аномально быстрого снижения режущих свойств кругов, изменения протекания физических явлений и выходных показателей шлифования (в традиционном исполнении) как результат структурно-топографической приспособляемости РПК, принципиально изменяющей высоту выступления алмазных зерен над связкой, параметры их субмикрорельефа и характер взаимодействия с обрабатываемыми СТПМ.

5. Сформулированное общее условие эффективности алмазного шлифования СТПМ при невыполнении требования о превышении твердости инструментального материала над обрабатываемым.

6. Предложенную методологию стабилизации оптимальных выходных показателей шлифования СТПМ, базирующуюся на принципах непрерывного предотвращения структурно-топографической приспособляемости и комплексного управления рельефом и профилем рабочей поверхности кругов в изменяющихся условиях шлифования.

7. Сформулированное положение о связке круга как главном объекте дозируемого избирательного разрушающего воздействия с целью управления рабочей поверхностью кругов путем удаления ее с интенсивностью, равной интенсивности размерного износа алмазных зерен.

8. Новые методические принципы исследования алмазных кругов и обрабатываемости различных материалов, базирующиеся на исключении контакта связки и особенностях взаимодействия РПК и СТПМ.

9. Разработанные способы шлифования с непрерывным комплексным управлением рельефом, продольным и поперечным профилем рабочей поверхности алмазных кругов, обладающие широкими технологическими возможностями.

10. Практические рекомендации по эффективной обработке материалов алмазным шлифованием с непрерывным управлением рабочей поверхностью кругов.

На защиту выносятся обобщение результатов научно-исследовательских работ, выполненных автором или под его непосредственным руководством, отраженных в опубликованных работах соискателя и в настоящей диссертации, представляющие собой научные основы обрабатываемости сверхтвердых поликристаллических материалов, разработанную концепцию и методологию создания новых процессов алмазного шлифования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается системностью, структурно - логической увязкой выполненных исследований, методологией изучения процесса - от элементарных актов на единичном зерне до суммирования их в пределах всей зоны шлифования и управления, применением апробированных современных и оригинальных методик экспериментального исследования, корректностью

использования фундаментальных законов механики и физики разрушения, теплофизики; применением методов планирования экспериментов и статистической обработкой их результатов.

Научная новизна.

Впервые выполнено комплексное системное исследование обрабатываемости особой группы сверхтвердых поликристаллических материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора алмазным шлифованием, принципиальной отличительной особенностью которого является отсутствие требуемого теорией шлифования превышения твердости материала инструмента над твердостью обрабатываемого материала, что в сочетании с особенностями алмазной структуры СТПМ обуславливает специфику его сущности, не отражаемую закономерностями, установленными для шлифования материалов обычной твердости.

1. Предложен новый подход в теории резания, базирующийся на:

- физическом представлении о том, что основной сьем шлифуемого СТПМ осуществляется не в результате внедрения в него алмазных зерен и их относительного перемещения, а преимущественно вследствие хрупкого микроразрушения в процессе массового высокоскоростного воздействия субмикроромок алмазных зерен круга и создания высоких напряжений в локальных объемах, примыкающих к пятнам упругого контакта, а также вследствие волновых процессов и циклических нагрузок;

- на представлении о специфичности функционирования совокупности элементов "шлифуемый СТПМ - алмазное зерно - связка круга" как единой системы;

- на определении алмазного шлифования как структурночувствительного процесса управляемого взаимного микроразрушения обрабатываемого СТПМ и алмазных зерен круга.

2. Научное положение о решающей роли субмикрорельефа алмазных зерен в формировании зон хрупкого микроразрушения, определяющих основной сьем в процессе высокоскоростного контактного взаимодействия равнотвердых материалов, имеющих алмазную структуру (алмазные зерна круга и обрабатываемый СТПМ). Выступающие элементы субмикрорельефа зерна определяют дискретность действительного контакта и размеры его пятен, которые на несколько порядков меньше размеров отдельных кристаллитов, составляющих поликристалл. Это приводит к высокой сосредоточенности прилагаемой нагрузки, формированию сложного напряженного состояния в локальных объемах кристаллитов, отделению в результате разрушения от поликристалла весьма малых объемов с высокой степенью их дисперсности.

3. Научное положение о вспомогательной роли в сьеме обрабатываемого СТПМ термоактивируемых процессов, суть которого состоит в том, что

под влиянием температуры шлифования может происходить окисление, диссоциация кристаллической решетки алмаза и плотных модификаций нитридов бора, трансформация ее в другие типы решеток с меньшей прочностью межатомных связей, протекания пластической деформации в тончайших слоях, могут возникать межкристаллитные напряжения из-за анизотропии свойств кристаллитов и многофазности поликристаллов, что в совокупности может лишь способствовать интенсификации съема.

4. Научное положение об управляемом алмазном шлифовании как структурночувствительном процессе, который в условиях невыполнения требуемого теорией резания превышения твердости инструмента обеспечивает в процессе обработки сложный комплекс избирательных разрушающих воздействий на структурные составляющие шлифуемого СТПМ и РПК, совокупным результатом которых является экономически целесообразный уровень выходных показателей.

5. Научное положение об аномально высокой скорости изменения физических явлений и выходных показателей шлифования как результате специфического проявления структурно-топографической приспособляемости РПК при высокоскоростном и высоконагруженном контактировании с равнотвердой поверхностью СТПМ. Она состоит в последовательной смене характера и интенсивности износа зерен, трансформации хрупкого микроразрушения в истирание, формировании устойчивой конфигурации и вторичных структур контактирующих поверхностей зерен, включения в работу все большего их числа, перераспределении и уменьшении удельных нагрузок, в итоге - в прекращении съема.

6. Сформулировано общее условие эффективности алмазного шлифования СТПМ: предотвращение проявления структурно-топографической приспособляемости и сохранение в процессе всего периода обработки такого состояния рабочей поверхности круга, когда совокупность ее режущих алмазных элементов способна передавать прилагаемую нагрузку на весьма малые участки обрабатываемой поверхности, обуславливая в окрестностях пятна упругого контакта высокие локальные напряжения, благодаря чему доля энергии, идущей на разрушение, в общих затратах велика и стабильна, что обеспечивает необходимую интенсивность съема.

7. Предложена методология управления режущими свойствами кругов в процессе шлифования СТПМ, базирующаяся на выборе оптимальных характеристик инструмента и режимов обработки, формировании и поддержании в течение всего периода шлифования энергетически неустойчивых состояний алмазных зерен путем дозированного избирательного разрушающего воздействия на связку, направленного на предотвращение структурной и топографической приспособляемости рабочей поверхности кругов и стабилизацию оптимальных выходных показателей шлифования. Стабилизация

режущего рельефа, оптимизированного по какому-либо из выходных показателей, достигается при строгом выполнении принципа равенства интенсивности принудительного удаления связки интенсивности размерного износа алмазных зерен, соответствующей высоте его выступления над связкой. Эта методология явилась основой создания новых способов шлифования.

8. Сформулировано и доказано научное положение о связи алмазных кругов как главным объекте дозируемого избирательного разрушающего воздействия, обеспечивающего сохранение заданного профиля РПК, оптимальной высоты выступления зерен с учетом интенсивности их размерного износа, развитости их субмикрорельефа, стабилизацию физических явлений, протекающих в зоне взаимодействия круга и обрабатываемого СТПМ.

9. Разработаны структурные схемы процессов шлифования с непрерывным управлением режущей поверхностью кругов как единой системы, отражающей взаимосвязи зон шлифования и зон управления с входными параметрами, механо-физико-химическими явлениями в зонах, выходными показателями процесса. В соответствии с этим предложены и исследованы способы управления параметрами поперечного и продольного профиля и рельефа алмазных кругов на металлических связках, обеспечивающие стабильность их геометрических характеристик и режущей способности при изменяющихся условиях шлифования путем регулирования электрических режимов подачи тока в зону управления на изолированные участки рабочей поверхности катода.

10. Установлены физические и технологические закономерности алмазного шлифования СТПМ с непрерывным управлением РПК. Определены уровни предельных значений температуры и давления в контакте круга с СТПМ, исключающие появление таких дефектов, как растрескивание, расслаивание, выкрашивание кромок и др., разработаны научно обоснованные рекомендации по эффективной обработке СТПМ.

11. Установлено, что способы шлифования с непрерывным управлением режущей поверхностью кругов являются универсальными и оказались весьма эффективными при обработке широкой гаммы материалов, имеющих существенные различия химического состава, структуры и физико-механических свойств.

12. Выявлены новые методические принципы исследования обрабатываемости различных материалов и работоспособности кругов различных характеристик, основанные на возможностях и установленных закономерностях алмазного шлифования с непрерывным управлением режущей поверхностью кругов.

Практическая ценность. Основным практическим результатом работы является создание предпосылок, способствующих широкому применению сверхтвердых поликристаллических материалов благодаря реализации

вскрытых резервов их высокопроизводительной обработки, соответствующей требованиям серийного, крупносерийного и массового производства; разработка методологии управления рельефом и профилем рабочей поверхности кругов, на основе которой созданы способы шлифования, обеспечивающие эффективную обработку СТПМ и других труднообрабатываемых материалов, защищенные авторскими свидетельствами; разработаны способы и устройства управления параметрами продольного и поперечного профиля рабочей поверхности кругов; даны научно обоснованные рекомендации по эффективному шлифованию сверхтвердых и др. инструментальных материалов, которые включены в "Общемашиностроительные нормативы режимов резания, норм износа и расхода резцов, сверл и фрез при обработке неметаллических конструкционных материалов" (Москва, 1982) в качестве рекомендаций по заточке и доводке инструментов; разработана техническая документация на модернизацию заточных и шлифовальных станков с целью оснащения их системой управления профилем и рельефом режущей поверхности алмазных кругов в процессе шлифования.

Реализация результатов работы. Экономическая целесообразность расширения выпуска высококачественных инструментов из СТПМ, связанная в первую очередь с разработкой эффективных способов их шлифования, способствовала реализации результатов исследований, что нашло отражение в приказе "Союзалмазинструмент" Минстанкинпрома СССР за № 47 от 20.09.78 г., обязывающем использовать наши рекомендации заводы, изготавливающие инструменты из СТПМ; предложенные способы шлифования реализованы на заводах - Полтавском алмазном; "Инструмент", г. Санкт-Петербург, Россия; п/я Г-4324, г. Пятигорск, Россия; п/я В-8266, г. Харьков; Оргприминструмент, г. Харьков; Чепельском инструментальном заводе, Венгрия, г. Будапешт; Мишкольцком университете, Венгрия, г. Мишкольц; Магдебургском университете, Германия, г. Магдебург и др.

Общий экономический эффект, подтвержденный актами о внедрении, превысил 2 млн. руб. (в ценах 1990г.).

В курсах "Теория резания материалов", "Проектирование и производство режущих инструментов", "Основы научных исследований", читаемых в Харьковском государственном политехническом университете для студентов специальности 7.09.02.02 и 7.09.02.03, введены разделы, в которых излагаются физические и технологические закономерности алмазного шлифования с управлением РПК и применения этих процессов в производстве лезвийных инструментов из СТПМ; с 1984 года организована подготовка инженеров по специализации "Сверхтвердые инструменты и процессы обработки".

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на:

- международных конференциях, симпозиумах и семинарах "Синтетические алмазы - ключ к техническому прогрессу", Киев, 1974; "Сверхтвердые материалы", Киев, 1981; по инструменту и инструментальным материалам, Мишколец, Венгрия, 1982, 1985, 1989, 1993; "Технологические процессы и оборудование для эффективного использования материалов", Албена, Болгария, 1989; "Интертехно-90", Будапешт, Венгрия, 1990; "Проблемы резания материалов в современных технологических процессах", Харьков, 1991; "Высокие технологии в машиностроении", Харьков, 1992, 1993, 1994; конференции по качеству поверхности, Векшлубливице, Польша, 1993; Первом международном симпозиуме украинских инженеров-механиков, Львов, 1993; "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье", Харьков-Мишколец, 1993, 1994, 1995; "Итоги научного сотрудничества политехнических университетов Харькова и Мишкольца", Мишколец, Венгрия, 1994; "МикроКАД-95", Мишколец; научном семинаре Института технологии машиностроения Познанской политехники, Познань, Польша, 1992; научном семинаре Института сверхтвердых инструментов Аньхойского политехнического института, Хефэй, Китай, 1994;

- Всесоюзных и республиканских конференциях и семинарах "Теплофизика технологических процессов", Тольятти, 1976; Волгоград, 1980; Ташкент, 1984; "Пути совершенствования технологии изготовления алмазного инструмента на базе механизации и автоматизации производственных процессов", Полтава, 1976; "Пути повышения производительности, качества и эффективности процессов абразивной, алмазной и эльборной обработки в машиностроении", Москва, 1976; "Проблемы создания и внедрения высокопроизводительного режущего инструмента с пониженным содержанием вольфрама", Тбилиси, 1977; "Новое в теории и практике создания и применения синтетических сверхтвердых материалов в народном хозяйстве", Киев, 1977; "Прогрессивные технологические процессы в инструментальном производстве", Харьков, 1979; "Современные проблемы резания инструментами из сверхтвердых материалов", Харьков, 1981; "Научно-технический прогресс и повышение эффективности использования производственного и научного потенциала в машиностроении", Харьков, 1984; "Новые конструкции и прогрессивная технология производства инструмента", Харьков, 1984; "Шлифование-86", Ереван, 1986; "Роботизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении", Житомир, 1987; "Получение и обработка материалов высоким давлением", Минск, 1987;

- Научно-техническом совете Минвуза СССР, Москва, 1978 г. и научно-технических отраслевых совещаниях Минстанкинпрома СССР, 1980 - 1990 гг.

Публикации. Результаты исследований проблемы отражены в 200 публикациях, в том числе 6 монографиях, трех патентах, 54 авторских свиде-

тельствах на изобретения, 138 статьях, из которых 25 опубликованы в зарубежных научных изданиях.

Объем и структура диссертации. Диссертация выполнена в форме научного доклада по опубликованным работам и включает общую характеристику работы, основное содержание, общие выводы и рекомендации, список публикаций и содержит 58 страниц машинописного текста. Имеются Приложения, содержащие акты внедрения, полный список публикаций и др. документы.

В проведении исследований, в разработке проблемы под руководством автора участвовали аспиранты и соискатели, которым автор выражает искреннюю признательность за продуктивный совместный научный поиск.

Основное содержание работы

К особой группе сверхтвердых относят материалы преимущественно с ковалентными направленными связями и микротвердостью более 20,0 ГПа. Под это определение попадают десятки веществ, но наибольший интерес представляют поликристаллические материалы на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора, существенно превышающие по твердости все остальные.

К настоящему времени различными фирмами США, Японии, стран ЕС и СНГ создано столь большое количество разновидностей СТПМ; что для изыскания соответствующих способов обработки и определения областей рационального применения потребовалась их классификация.

В предложенной нами классификации, в качестве основных признаков приняты вид сверхтвердой основы - алмазная или нитридоборная - и структура продукта синтеза или спекания, так как именно эти признаки определяют эксплуатационные свойства, области применения и обрабатываемость, т.е. являются важнейшими для потребителя.

В соответствии с этим все СТПМ разделены на пять групп:

- сверхтвердые поликристаллические материалы на основе алмаза (АСБ, АСПК, СВ, СКМ - Р - СНГ; Мегадаймонд - США; Новотипс - ФРГ);

- сверхтвердые поликристаллические материалы на основе плотных модификаций нитридов бора (Эльбор-Р, Гексанит-Р, киборит, Белбор, ПТНБ - СНГ; амборит - ЮАР);

- сверхтвердые поликристаллические композиционные материалы (СВАБ - СНГ; компакт - Япония);

- синтетические поликристаллические двухслойные композиционные материалы с рабочим слоем из алмаза (ДАП, АТП, диамет - СНГ; компакс, стратопакс - США; полиблок - ФРГ; синдит - ЮАР);

- синтетические поликристаллические двухслойные композиционные материалы с рабочим слоем из плотных модификаций нитридов бора (сумиборон - Япония; амборит - ЮАР, томал - СНГ).

Путем спекания или синтеза не удастся получить конечный продукт, который был бы по форме, размерам и качеству готовым к употреблению изделием - рабочей частью волок, режущего, выглаживающего, мерительного инструмента, теплостоков и т.д. Все это обуславливает необходимость окончательного формообразования, а значит, разработки основ обрабатываемости СТПМ.

Проблема обрабатываемости сверхтвердых материалов своими истоками уходит в глубокую древность, когда по крупницам накапливался опыт огранки природных алмазных кристаллов в бриллианты. В зависимости от того, какое разрушающее воздействие преобладало в исследованиях, созданы концепции механического, термохимического, химического, диффузионного, адгезионного и др. разрушения алмаза.

Учитывая потребности крупносерийного и массового производства инструмента, базирование технологии инструментального производства на операциях шлифования, а также результаты проведенного сравнения существа и выходных показателей различных методов обработки СТПМ и природных алмазов, в качестве базового процесса для изучения их обрабатываемости и изыскания на этой основе высокоэффективных способов обработки целесообразно принять алмазное шлифование как обладающее наибольшими технологическими возможностями.

Была принята концепция такого подхода к изучению обрабатываемости, который базировался на исследовании структурных аспектов механики и физики микроразрушения СТПМ в процессе алмазного шлифования, динамики его явлений и выходных показателей, связанных с аномальными изменениями режущего рельефа алмазных кругов, определении условий, обеспечивающих стабилизацию процесса шлифования путем управления рельефом, продольным и поперечным профилем РПК. На такой широкой комплексной основе велся поиск основных физических и технологических закономерностей алмазного шлифования СТПМ и создание эффективных способов их обработки (рис.1).

Физические предпосылки эффективности процесса. Наиболее принципиальные положения, отличающие процесс алмазного шлифования СТПМ от процессов шлифования материалов обычной твердости, имеют общую физическую основу: специфическую структуру - алмазная кристаллическая решетка - и уникальные физико-механические свойства алмазов и др. сверхтвердых материалов, определяющие их взаимодействие с алмазным кругом.



Рис.1 Структурно-логическая схема исследования

Аналога данному процессу, в котором обработка осуществляется в результате контактирования равнотвердых тел, имеющих к тому же равные или весьма близкие другие характеристики (модуль упругости, прочность,

теплофизические свойства и др.), в диапазоне меньших значений твердости не существует.

В силу одинаковой кристаллической структуры, равенства твердости, прочности, интенсивность обработки СТПМ низка и не сопоставима с интенсивностью алмазного шлифования конструкционных, инструментальных и др. материалов обычной твердости. Например, в установившихся периодах шлифования интенсивность съема корундовой керамики составляла $18 \text{ мм}^3/\text{с}$. АСПК - $0,001 \text{ мм}^3/\text{с}$, гексанит-Р - $0,88 \text{ мм}^3/\text{с}$, в то время как расход алмазов был на порядок больше.

Плотная упаковка атомов в кристаллической решетке, прочность межатомных ковалентных связей, высокая степень диспергирования снимаемого материала предопределяют высокую энергоемкость алмазного шлифования СТПМ (табл. 1).

Таблица 1

Исходные характеристики обрабатываемости

Обрабатываемый материал	СПА	СПНБ	Жаропрочная сталь	Корундовая керамика
Производительность Q, $\text{мм}^3/\text{с}$	0,001	0,88	14,110	18,300
Удельный расход алмазов q, $\text{мг}/\text{мм}^3$	16,0-18,0	1,7-2,0	0,05	0,01
Энергоемкость В, $\text{Дж}/\text{мм}^3$	6000-10000	900-1200	150-170	130

Микроразрушение объемов, составляющих припуск под обработку, обуславливается главным образом динамическим высокоскоростным воздействием элементарных выступов алмазных зерен на обрабатываемую поверхность СТПМ. Именно элементы субмикрорельефа зерен в сочетании с высоким модулем упругости и равной предельной твердостью алмазных структур могут формировать пятна упругого контакта, площадь которых чрезвычайно мала. Это должно обеспечить высокую сосредоточенность передаваемой нагрузки и формирование больших локальных напряжений, вызывающих микроразрушение алмаза.

При соударении алмазных выступов со скоростями $V > 10 \text{ м/с}$ и малом времени соударения (до десятков наносекунд) в зернах алмазов круга и кристаллитах СТПМ возникают ударные волны. Волновые процессы еще более усложняют картину и, как показали моделирующие эксперименты на специальной установке и аналитические расчеты, способствуют появлению критических напряжений в точках, удаленных от поверхности контакта до 300 мкм. Эти напряжения могут порождать дефекты типа трещин, способст-

вывать накоплению дефектов при циклическом и знакопеременном нагружении, тем самым интенсифицировать микроразрушение.

Свой вклад в интенсификацию съема обрабатываемого материала могут вносить термоактивируемые процессы - окисление, графитизация, анизотропия тепловой деформации кристаллитов составляющих фаз, изменение теплофизических характеристик СТПМ. Нашими исследователями показано, что нагрев до 600-800 К в несколько раз снижает исходную теплопроводность, что способствует концентрации тепла в контактирующих поверхностях. Количественные оценки свидетельствуют о неопределяющей роли термоактивируемых процессов в съеме СТПМ.

Таким образом, алмазное шлифование СТПМ представляет собой комплексное воздействие на удаляемые объемы заготовки совокупности факторов - механических, химических, тепловых, способных при определенном сочетании предопределить технологически приемлемую и экономически целесообразную интенсивность разрушения микрообъемов поликристаллов. Особенность данного процесса в отличие от алмазного шлифования материалов обычной твердости (т.е. не алмазных структур) состоит в том, что эти факторы следует рассматривать в качестве разрушающих и для алмазных зерен шлифовального круга, и для шлифуемого алмазного поликристалла. В случае обработки СТПМ II, III и V групп (на неалмазной основе) разрушающее действие части из них будет избирательным (различное действие агрессивных сред, трения, несколько иная роль соотношения $N_{им} / N_{ом}$ и др.).

Все изложенное указывает на то, что имеется ряд физических предпосылок, реализация которых позволит интенсифицировать управляемое разрушение СТПМ и создать эффективные способы алмазного шлифования этой группы труднообрабатываемых материалов.

Микроразрушение СТПМ и алмазных зерен изучалось при резании единичными алмазными зёрнами в сравнении установленных закономерностей с суммарной работой зерен круга. Основой разделения объемов обрабатываемого материала являются элементарные акты разрушения прочных физико-химических связей между атомами. Алмаз обладает самыми высокими теоретической прочностью, поверхностной энергией и модулем упругости, что делает указанный разрыв связей затрудненным. Однако поверхностные и внутренние дефекты кристаллитов, металлические и другие включения, межкристаллитные границы и поры играют роль концентраторов напряжений и способствуют хрупкому разрушению при напряжениях, существенно ниже теоретических.

Высокоскоростное контактное воздействие зерен круга способно создавать огромное количество поверхностных дефектов в кристаллитах обрабатываемого СТПМ и порождать сложное напряженное состояние.

Произведена оценка влияния геометрических параметров алмазных зерен на величину и характер распределения напряжений. В силу формирования различных по размерам пятен контакта наибольшие касательные напряжения возникают в случае конического индентора - 12,96 МПа, при сферическом - 7,56 МПа, при плоском - 5,4 МПа. Уменьшение угла при вершине конуса от 30° до 10° увеличивает величину контактных давлений более чем в 3 раза, а увеличение линейного размера в 3 раза уменьшает контактные давления в 9 раз, что практически исключает разрушения.

Статистическая оценка элементов субмикпрофиля алмазных зерен по снимкам, полученным с помощью просвечивающего электронного микроскопа, показала, что при разрешении порядка 200 Å режущий профиль зерна представляет собой ломаную линию с исчезающе малыми радиусами у вершины углов. Размеры длин микрокромки колеблются в основном в пределах 0,2-1,00 мкм, а углы выступов и впадин превышают 90°. Моделируя микровыступ параболоидом с условным радиусом округления ρ , определили размеры пятен упругого контакта алмазного параболоида с алмазным полупространством (табл. 2). Они показывают, что даже при значении ρ в несколько микрометров и нагрузке на единичный выступ 20 Н размер пятна упругого контакта на 2-3 порядка меньше характерных размеров кристаллитов, составляющих поликристалл.

Элементами субмикпрофиля, непосредственно создающими нагружение обрабатываемой поверхности в пределах пятна контакта, являются своеобразные продольные клинья и их пересечение-ребра (в сечении - вершина) - могут быть пересечением граней отдельных кристаллитов алмазного зерна; поверхностей роста, образуемых при синтезе; поверхностей скола в процессе облагораживания, улучшения зерен после синтеза; поверхностей скола или отделения кристаллитов алмазного зерна в результате динамических и циклических нагрузок.

Таблица 2

Размеры пятен упругого контакта

Нормальная сила N, Н	Радиус пятна контакта, мкм				
	Радиус округления вершины параболоида, мкм				
	0,05	0,10	0,50	1,00	2,00
0,5	0,000837	0,00118	0,00268	0,00381	0,00602
1,0	0,00118	0,00170	0,00381	0,00539	0,00851
2,0	0,00170	0,00241	0,00539	0,00762	0,0120
4,0	0,00241	0,00341	0,00762	0,0108	0,0170
5,0	0,00068	0,00381	0,00851	0,0120	0,0190
10,0	0,00381	0,00539	0,0120	0,0170	0,0269
20,0	0,00539	0,00762	0,0170	0,0241	0,0381

Рассмотренные элементы субмикрорельефа и статистическая оценка параметров субмикпрофиля алмазных зерен позволяют приблизить физические и расчетные модели и схемы нагружения к реальным условиям работы алмазного зерна.

Сущность этого нового физического представления состоит в том, что выступающие элементы субмикрорельефа номинально контактирующей поверхности зерна определяют дискретность действительного контакта и малые размеры его пятен. Это приводит к высокой сосредоточенности прилагаемой нагрузки, формированию напряженного состояния локальных объемов кристаллитов, прилегающих к пятну контакта, отделению в результате разрушения от поликристалла весьма малых объемов с высокой степенью дисперсности.

С использованием известных решений осесимметричной контактной задачи теории упругости выполнен численный расчет напряжений в алмазном полупространстве под скользящим алмазным сферическим индентором. За единицу напряжения принято максимальное давление в центре пятна упругого контакта $P_a = 3P / 2\pi a^2$, а за единицу длины - радиус пятна контакта. Линии постоянных значений главных напряжений при $f=0,1$ приведены на рис. 2. Установлено, что область растягивающих напряжений σ_1 перед зоной контакта уменьшается по глубине. За зоной контакта глубина области положительных значений σ_1 , примыкающих к поверхности, увеличивается. Ввиду больших значений напряжения σ_1 в этой области можно предположить, что очаги разрушения будут первоначально возникать именно здесь, поскольку, например, при радиусе округления вершины зерна $5 \cdot 10^{-6}$ линия $0,00575 P_a$ соответствует напряжению 1200 МПа, которого уже достаточно для образования трещин в алмазе.

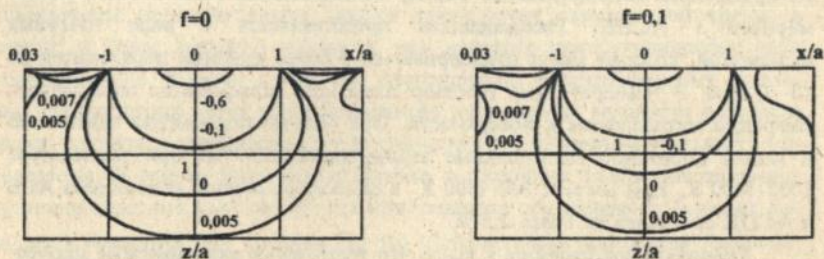


Рис. 2 Оценка напряжений в шлифуемом алмазе

Свойства поликристалла, наличие межзеренных границ, металлических включений способствуют локализации трещин у поверхности, что подтверждается изучением электронно-микроскопических снимков.

При взаимодействии алмазного зерна с СТПМ на основе нитрида бора или с "мягкими" кристаллографическими направлениями алмаза может

иметь место внедрение его микрокромки в обрабатываемую поверхность.

Для анализа разрушения при глубине внедрения h и перемещении алмазного зерна использовали механическую модель взаимодействия, в которой алмазное зерно представлялось в виде четырехгранной пирамиды с углом между гранями 2ϕ . Определив контактные напряжения на передней и боковых гранях и воспользовавшись пятой теорией прочности, получили условия разрушения

для боковой грани:

$$h^4 \leq \frac{P_1^2 \cos^4 \phi}{2\sigma_b^2} \left[\operatorname{ctg}^2 \phi \left(\frac{1}{9} + \frac{3f^2}{32} \right) + \frac{2}{3} \right];$$

для передней грани:

$$h^4 \leq \frac{\cos^4 \phi}{2\sigma_b^2} \left[\frac{(P_1 - 3P_2) \operatorname{ctg}^2 \phi}{9} + 6P_2^2 \right],$$

где P_1, P_2 - нормальное и тангенциальное усилия, f - коэффициент трения. Они свидетельствуют о том, что при внедрении алмазного зерна в обрабатываемую поверхность СТПМ условием интенсивного микроурушения и эффективности процесса шлифования является малая величина углов при вершине зерен (порядка $20-30^\circ$), нормальная нагрузка на зерно должна быть максимально допустимой, обусловленной жесткостью станка, прочностью поликристалла и алмазных зерен.

Оценка роли микроурутуры и термоактивируемых процессов в микроурушении СТПМ была направлена на выявление распределения металлофазы, возможности проявления пластической деформации, окисления, межкристаллитных термонапряжений, термоусталостной прочности. С использованием микроанализатора "Микроскан-5" показана неравномерность распределения металлофазы по объему поликристалла АСБ и более равномерного - АСПК. Распределение представляется в виде точечных включений, которые могут группироваться в более крупные образования до $10-70$ мкм. В температурных условиях алмазного шлифования наблюдалась миграция металлофазы к поверхности. Она больше подвержена окислению и может порождать значительные термонапряжения уже при температуре $1000-1200$ К. При нагреве $800-1000$ К в атмосфере воздуха потеря веса АСБ и АСПК составила не более $2,5\%$.

Общий вывод сводится к тому, что термически активируемые процессы могут способствовать интенсификации микроурушения поликристаллов на основе алмаза и нитридов бора при алмазном шлифовании. Хотя самостоятельный их вклад в удаление припуска следует квалифицировать как незначительный, но, усиливая или подавляя те или иные термически активируемые процессы, можно интенсифицировать микроурушения прежде всего на атомном уровне и тем самым существенно влиять на качество обра-

ботанной поверхности и состояние поверхностного слоя.

Изучение многочисленных электронных снимков следов режущих зерен круга на поверхности алмазных поликристаллов подтвердило сложную картину микроразрушения, определяемую комплексом сопутствующих процессов.

Повышение нагрузки (глубина) приводит к появлению микротрещин, расположенных под углом к вектору скорости движения зерна, а также микротрещин в пределах всей ширины следа. С удалением от поверхности контакта развитие микротрещин затухает, следовательно, не все трещины приводят к отделению тех или иных объектов алмазных кристаллитов. С увеличением нагрузки наблюдается удаление объемов кристаллитов в результате хрупкого разрушения. Края следов становятся чрезвычайно развитыми, имеют неупорядоченные очертания, а поверхность собственно следа чаще всего представляет собой поверхности хрупких изломов отрывом. Понятие толщины среза единичным зерном теряет свой традиционный смысл, т.к. зона хрупкой повреждаемости значительно отличается от теоретического следа алмазного зерна, или от такового в более пластичных материалах (закаленные стали, твердые сплавы и т. д.).

Поверхность поликристалла, обработанного алмазным кругом, характеризуется большой неоднородностью тонкого рельефа, отражающей действие различных механизмов. Значительные по площади участки поверхности напоминают поверхности хрупкого излома и могут рассматриваться как первичные поверхности раздела объемов в результате хрупкого микроразрушения. Другие характерные участки внешне сходны с поверхностями трения, а иногда имеют признаки пластической деформации по краям следа алмазного зерна.

Можно полагать, что алмазные зерна круга, входящие в контакт с шлифуемым поликристаллом, имеют температуру окружающей среды, а значит, и более высокую твердость, чем нагретые приповерхностные слои поликристалла. В связи с этим на благоприятно ориентированных отдельных кристаллитах могут из-за временного превышения твердости режущего зерна появиться организованные риски-следы как типичный результат микрорезания. В основе этого лежит переход в состояние пластичности тонких приповерхностных слоев алмазных кристаллитов под влиянием высоких локальных давлений или температур, что обуславливает протекание микрорезания аналогично установленному при обработке большинства конструктивных и инструментальных материалов.

Резание единичным зерном поликристаллов на основе нитридов бора (II и V группы) в целом подчиняется основным закономерностям, установленным при микрорезании поликристаллов I группы (на основе алмазов), однако характеризуется и рядом особенностей. Они порождаются, по край-

ней мере, тремя причинами: твердость алмазного зерна (индентора) на 2000-3000 единиц микротвердости выше, чем подвергаемый воздействию поликристалл на основе нитрида бора; размера кристаллитов BN_k и BN_b практически на порядок меньше размеров кристаллитов алмазного поликристалла; металлические включения здесь из-за незначительного процентного содержания не играют столь важной роли, как в алмазных поликристаллах.

Алмазное зерно (индентор) при нагружении способно внедряться в поверхность поликристалла вюрцитного или кубического нитрида бора на заметную глубину (1-3,5 мкм) и оставить на ней хорошо различимый отпечаток. След единичного алмазного зерна на поверхности поликристалла представляет собой поверхность, близкую к линейчатой, прерываемой многочисленными мелкими вырывами. Однако размеры участков с поверхностью первичного раздела в случае нитридов бора существенно меньше, чем алмазного поликристалла. Малые размеры кристаллитов BN_k и BN_b являются причиной локализации зоны хрупкой повреждаемости при внедрении алмазного зерна.

Таким образом, резание единичными зёрнами алмаза подтверждает преимущественную роль механизмов хрупкого микроразрушения сверхтвердых поликристаллов на основе алмазов и нитридов бора.

Важной особенностью этого взаимодействия является интенсивное микроразрушение режущих зерен, как и инденторов при измерении микротвердости алмазов.

Рентгенодифрактометрические исследования шлифзерен AC2, AC4, AC6, AC32 в исходном состоянии и после отжига в вакууме при 1000-1500 К в течение часа показали, что после отжига усиливается разориентировка блоков мозаики, дробление кристаллитов на более мелкие. Таким образом, тонкая структура алмазных зерен обладает дефектами, наличие которых в процессе соударения с СТПМ предполагает разрушение их отделением относительно мелких частиц, не приводя к макроразрушению шлифзерен.

Рассмотренный цикл исследований дает основания, достаточные для утверждения того, что микроразрушение сверхтвердых поликристаллических материалов в процессе алмазного шлифования по сравнению с материалами меньшей твердости имеет принципиальные отличия. Физической основой этих отличий являются специфическая структура и свойства СТПП различных групп, сопоставимая или равная по значению твердость, хрупкость, прочность, жесткость обрабатываемого и обрабатывающего материала. Взаимодействие тел с такими примерно равными свойствами не имеет себе аналогов в практике обработки материалов резанием, к нему не применимы многие закономерности шлифования материалов обычной твердости - роль единичного и суммарного среза, роль и вклад пластической деформации

приповерхностных слоев и стружки, понятие и роль радиуса округления вершины алмазного зерна, доля энергии диспергирования.

Интенсивность съема материала припуска всецело определяется полнотой реализации механизмов хрупкого разрушения под действием динамического приложения сосредоточенной нагрузки, в противном случае вводимой энергии оказывается недостаточно для разрушения связей в ковалентных кристаллах алмаза, отличающихся самой большой прочностью. Высокая сосредоточенность нагрузки может обеспечиваться только выступающими элементами субмикрорельефа режущего зерна. Отсюда вытекает важность постоянной развитости субмикрорельефа алмазных зерен круга, сохранение ее в течение всего периода работы зерна вплоть до выпадения из связки. Выполнение этого требования в свою очередь возможно лишь при условии хрупкого микроразрушения зерен в результате соударений с СТПМ; исключения существенного макроразрушения (отламывания значительных объемов) за счет структуры и прочности алмазных зерен; длительного и прочного удержания алмазного зерна в связке круга.

Таким образом, для обеспечения высокоскоростной ударной нагрузки, сконцентрированной в областях, значительно меньших, чем размеры кристаллитов обрабатываемых сверхтвердых материалов, необходимы алмазные круги с хорошо развитой рабочей поверхностью, надежно удерживаемых связкой. Выполнение этих условий обязательно не только при шлифовании СТПМ I и IV групп. Хотя твердость поликристаллов на основе нитридов бора (II и V групп) ниже твердости алмаза, что в некоторой мере облегчает процесс их обработки, однако сформулированные условия эффективности алмазного шлифования справедливы для всех групп СТПМ.

Изменение физических явлений, рельефа круга и выходных показателей шлифования. Используя критерий способности режущей поверхности круга внедряться в обрабатываемый СТПМ, условно поймав под ним скорость ее перемещения в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, экспериментально определили ее удельные значения для исходного рельефа круга 2 А 12 - 45 - 150 × 10 × 3 × 32 АС6 50/40 В1 - 01 - 100 %, которые составили $7,8 \cdot 10^{-3}$ мкм/сН для АСПК, $1,7 \cdot 10^{-1}$ мкм/сН для гексанита - Р, $1,0 \cdot 10$ мкм/сН для режущей керамики ВОК-60, т.е. интенсивность съема АСПК в 1000 раз ниже, чем керамики, но существенно выше известного по литературным данным. Однако в реальном процессе эти потенциальные возможности реализуются лишь в начальном периоде шлифования.

Таблица 3 иллюстрирует существенное отличие начальной интенсивности шлифования и ее изменения для различных марок СТПМ: через 2-3 мин работы она снижается на два порядка при обработке СТПМ на ос-

нове алмаза и на порядок - для СТПМ на основе нитридов бора. В общем, удельная интенсивность шлифования нитридов бора в начальный период выше на порядок, а через 2-3 мин - на два порядка. Являясь общей, эта закономерность количественно не одинаково проявляется для различных марок СТПМ, нормального давления, обрабатываемой площади, частоты вращения и характеристики алмазных кругов.

Таблица 3

Удельная интенсивность шлифования $Q_{уд}$, $\text{мм}^3/\text{мин} \cdot \text{Н} \cdot 10^3$

Марка СТПМ	Продолжительность шлифования τ , с					
	3	30	60	120	180	300
АСПК	75	46	29	11	4	1
АСБ	125	79	51	21	8	1
Эльбор-Р	912	718	506	453	438	311
Гексанит-Р	1102	620	406	292	210	121
ДАП	193	131	88	41	19	3
Диамет	205	152	111	63	34	2
ДПНБ	1163	789	622	409	307	302

Условия: Круг 12 А 2 150 × 10 × 3 × 32 АС6 50/40 В1 - 01 - 100 %

$P_n=2,0$ МПа; $V_{кр}=30$ м/с; $S_{пр}=1$ м/мин

Монотонное снижение интенсивности съема во времени для различных материалов, с учетом уровня установившейся интенсивности, можно аппроксимировать также экспоненциальными зависимостями

$$Q = Q_{уст} + \Delta Q \cdot \exp(\beta_Q \cdot \tau),$$

где Q , $Q_{ис}$, $Q_{уст}$ - текущая, исходная, установившаяся интенсивность шлифования, $\text{мм}^3/\text{с}$; $\Delta Q = Q_{ис} - Q_{уст}$ - амплитуда снижения интенсивности, $\text{мм}^3/\text{с}$; β_Q - эмпирический коэффициент, $1/\text{с}$; τ - продолжительность шлифования, с.

Зависимости относительного расхода от продолжительности шлифования дают представление о существенном изменении его значений в переходный период и большом различии исходного и установившегося расхода алмазов (рис.3). Неодинаковый характер зависимости номинального и фактического расхода подтверждает правильность и необходимость учета особенностей износа алмазов при шлифовании СТПМ. Если зависимость q_n имеет одинаковый характер с интенсивностью съема, которая с течением времени снижается, то фактический расход q_f оказался минимальным для исходного состояния рабочей поверхности круга и растет сначала быстро (переходный режим), а потом этот рост затухает. Значение расхода алмазов при установившемся режиме на порядок больше исходного. Экспериментальная зависимость хорошо аппроксимируется экспоненциальной

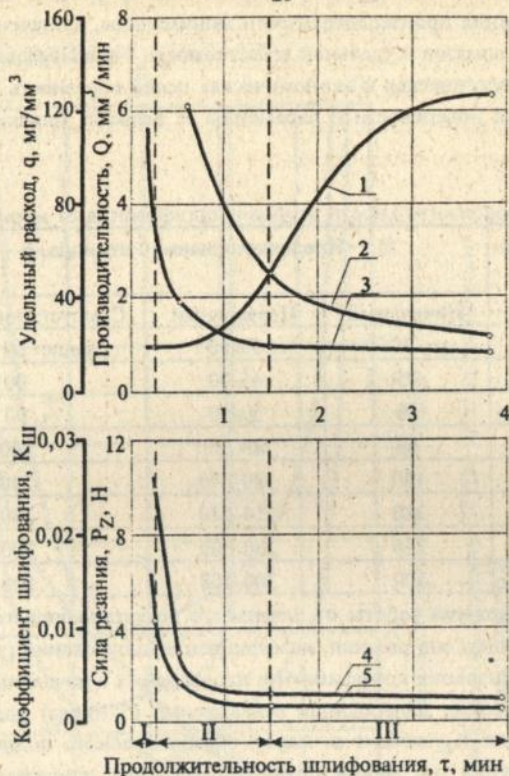


Рис.3 Периоды шлифования СПМ

- 1 - фактический удельный расход q_f 2 - номинальный расход q_n
 3 - производительность Q 4 - сила резания P_z
 5 - коэффициент шлифования $K_{ш}$

зависимостью вида

$$q = q_{уст} - \Delta q \exp(-\beta_q \cdot t),$$

где q , $q_{исх}$, $q_{уст}$ - соответственно текущее, исходное и установившееся значения фактического относительного расхода алмазов; $\Delta q = q_{уст} - q_{исх}$ - амплитуда его снижения, мг/мм³; β_q - эмпирический коэффициент, 1/с; t - продолжительность шлифования, с.

По изменению главных выходных показателей Q , q , S определена длительность периодов шлифования СПМ (табл. 4).

При исходном состоянии рабочей поверхности, когда зерна имеют развитый микрорельеф, большую высоту выступания, диспергирование обрабатываемых СПМ протекает более интенсивно, максимальному съему СПМ в начальный период шлифования соответствует минимальный отно-

сительный расход алмазов круга. В установившемся режиме шлифования абсолютные значения производительности минимальны, а значения относительного расхода алмазов и удельной себестоимости - максимальны. Из этого следует и технологическая и экономическая целесообразность сохранения состояния рабочей поверхности и параметров ее рельефа, близких к исходным.

Таблица 4

Зависимость продолжительности периодов шлифования от марки СТПМ

Обрабатываемый СТПМ	Продолжительность периода, с		
	Начальный	Переходный	Самоустановившийся
АСПК	до 30	30-60	свыше 60
АСБ	45	45-90	90
Диамет	50	50-90	90
ДАП	60	60-100	100
Эльбор-Р	180	180-240	240
Гексанит-Р	210	210-270	270
ДПНБ	250	250-300	300
Композит-05	300	300-500	500

Изменение режима работы от начального до установившегося сопровождается изменением сил резания, коэффициента шлифования (рис.3).

Численные значения коэффициента шлифования в начальный и самоустановившийся период шлифования существенно (5-10 раз) различаются. Скорость изменения $K_{ш}$ зависит от марки обрабатываемого поликристалла, нормального давления p_n , зернистости, концентрации алмазов в круге, а также скорости шлифования. Быстрое падение $K_{ш}$ наблюдается при шлифовании поликристаллов на основе алмаза, а его численные значения на всех этапах шлифования в несколько раз ниже, чем при шлифовании поликристаллов нитридов бора - гексанита и эльбора. При увеличении нормальных давлений p_n длительность начального и переходного периода сокращается, а установившийся уровень значения $K_{ш}$ понижается. Такое же изменение $K_{ш}$ наблюдается при увеличении скорости вращения круга, повышении зернистости алмазов. Круги с малой концентрацией проявляют меньшую тенденцию к снижению P_z и $K_{ш}$, что связано уже с удельными нагрузками на зерна и их разрушаемость. Значение $K_{ш}$ в установившемся периоде шлифования алмазных поликристаллов приближается к значению коэффициента трения алмаза по алмазу. Как известно, такая пара отличается высокой износостойчивостью.

Изменяются все теплофизические характеристики процесса (рис. 4).

В начальный период энергоемкость съема единицы объема

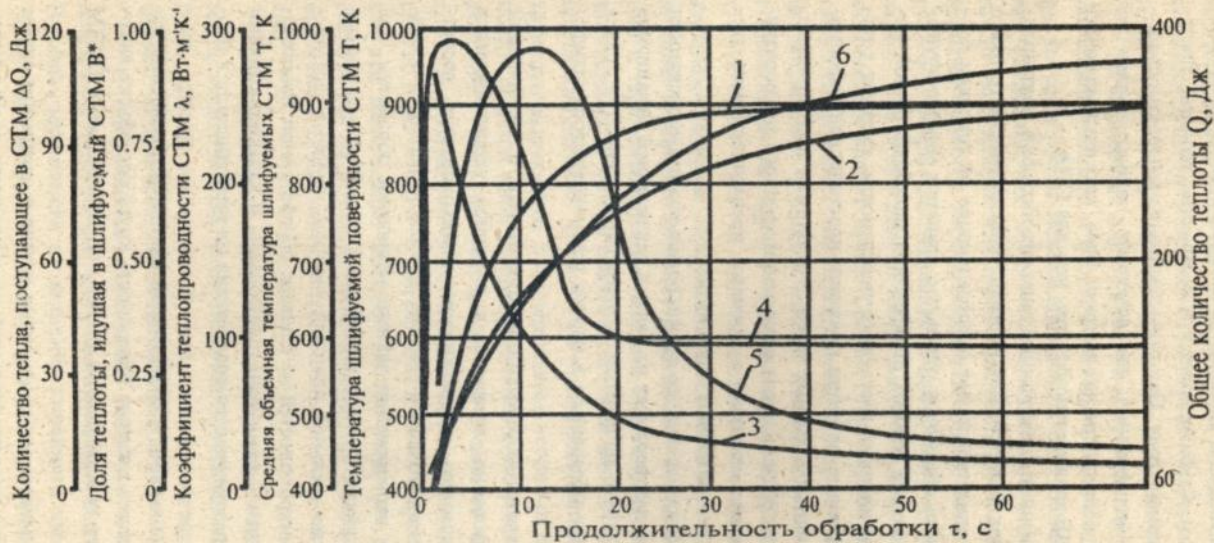


Рис.4 Влияние продолжительности шлифования СПМ на теплофизические характеристики

Условия обработки: круг 12A2-45 AC6 160/125 В1-01 $V=30$ м/с, $S_{sp}=1$ м/мин, $S_{oon}=0,01$ мм/ход

- | | |
|---|---|
| 1 - температура на шлифуемой поверхности алмазного поликристалла, К; | 4 - доля тепла, поступающего в шлифуемый поликристалл; |
| 2 - среднеинтегральная по объему шлифуемого поликристалла температура, К; | 5 - количество тепла, поступающего в поликристалл |
| 3 - коэффициент теплопроводности поликристалла Вт/(мК) | 6 - общее количество тепла, выделяемого в процессе шлифования поликристалла, Дж |

СТПМ в 5-10 раз ниже. Это означает, что исходный профиль обладает наибольшей способностью реализовывать механизм хрупкого микроразрушения СТПМ в объемах, составляющих припуск, с минимальными удельными энергетическими затратами. Стабилизируется и количество теплоты, поступающее в шлифуемый поликристалл. При этом температура поверхности в установленном режиме шлифования для алмазных поликристаллов на 150-200 К выше, чем для поликристаллов нитрида бора, хотя составляющая силы резания P_z для СПНБ значительно больше, чем для СПА.

Изучение большого числа электронных микрофотографий подтвердило, что в начальный период большей частью реализуется механизм хрупкого микроразрушения, о чем свидетельствуют преобладающие по площади первичные поверхности раздела объемов в результате хрупкого микроразрушения. В период установившегося режима шлифования на обработанной поверхности преобладающую площадь составляют поверхности, сходные с поверхностями трения, на которых не редки признаки пластической деформации по краям следа единичных алмазных зерен. Эти снимки подтверждают, что первичные поверхности раздела после реализации хрупкого микроразрушения вторичное воздействие испытали в процессе преимущественно трения об уплощенные вершины алмазных зерен круга.

Количественная оценка параметров субмикрорельефа и шероховатости обработанной поверхности подтверждает их связь с реализацией механизмов хрупкого разрушения СТПМ в начальный и переходный период и трансформацию их в разрушение истиранием в период установившегося шлифования.

Значения шероховатости обработанной поверхности с увеличением продолжительности шлифования снижается и в период установившегося шлифования может происходить растрескивание поликристаллов, вероятность которого выше в установленном режиме. Эта закономерность проявляется себя неизменно при варьировании такими условиями обработки, как нормальное давление, скорость круга, зернистость и т. д. Количественный анализ субмикрорельефа по удельной площади участков хрупкого разрушения и суммарной длине микрополостей на единице обработанной поверхности показал прямую их связь с режимами шлифования и характеристиками кругов, т. е. с условиями разрушающего воздействия на поликристалл в процессе обработки.

Для правильного понимания и объективной оценки установления изменений нужно рассматривать рабочую поверхность круга как объект высокоскоростного контактного воздействия со стороны обрабатываемого СТПМ в процессе шлифования.

Исходной рабочей поверхностью алмазных кругов в идеальном случае следует считать поверхность раздела (разъема) алмазоносного слоя относи-

тельно некоторой плоскости. Такой рельеф после правки или вскрытия может получиться лишь при безабразивных методах с равномерным удалением связки до полного исключения на зернах и связке следов предшествовавшей работы круга, например, электрохимического растворения ее.

В начальный период шлифования, когда круг вступает в работу, имея исходный профиль, с обрабатываемым СТПМ контактируют алмазные зерна, которые имеют наибольшую высоту выступания. Из-за полного отсутствия внедрения или из-за его незначительной величины на это небольшое число контактирующих зерен приходится вся нагрузка. В этих условиях хрупкий характер микроразрушения зерен, имеющих исходный развитый рельеф и острые выступающие микрокромки, приводит к самозатачиванию зерен, что подтверждено снимками поверхности зерен круга, работавших непродолжительное время. Однако этот период краток, после чего интенсивность хрупкого микроразрушения снижается и наблюдается переход к формированию площадок износа. Это вызывается изменением поверхности контактирования зерен с обрабатываемым СТПМ, увеличением числа контактирующих зерен, а значит, снижением нагрузки, воспринимаемой отдельными зернами. При меньшей величине вылета зерна затрудняется реализация механизма хрупкого разрушения. В действие вступает процесс трения и термоактивируемые явления, его сопровождающие. Естественно, что интенсивность потери массы зерна и их высоты выступания становятся существенно меньше, чем в случае преимущественной реализации механизмов хрупкого разрушения. Этот переходный период от самозатачивания к полной потере остроты также непродолжителен и его значение в каждом случае определяется теми же факторами, что и первого периода. На электронных снимках поверхности таких зерен наблюдаются как плоские площадки износа, так и достаточно развитые. Для третьего периода на электронных снимках эти поверхности выглядят весьма гладкими. Скорость потери высоты выступания зерен над связкой существенно приближается к незначительной величине в сравнении с установленными в начальный и переходный периоды.

По убыванию влияния на интенсивность линейного износа алмазных зерен марки СТПМ располагаются в следующем порядке: АСПК, АСБ, ДАП, ДПНБ, гексанит - Р, что вполне согласуется с их структурой и физико-механическими свойствами (табл. 5).

С повышением нормального давления и скорости вращения круга возрастают нагрузки на зерна, поэтому их линейный износ также возрастает. Влияние зернистости на величину линейного износа следует связывать не только со структурой и исходными размерами выступания зерен над связкой, но и с их количеством: при разных концентрациях алмазов в круге количество зерен больше у мелкозернистых. Поэтому и удельные нагрузки,

приходящиеся на отдельное зерно, здесь при прочих равных условиях будут меньше, а, следовательно, абсолютные величины износа в 4 - 5 раз меньше, чем для крупнозернистых 200/160. Аналогичное объяснение можно дать и роли концентрации алмазов.

Таблица 5

Влияние условий шлифования на линейный износ зерен

Условия шлифования	Время шлифования, с				
	30	60	90	120	150
	Линейный износ Δh , мкм				
Скорость круга $V_{кр}$, м/с:					
20	45	65	75	80	85
30	50	75	90	100	105
40	60	80	105	115	120
Зернистость Z, мкм:					
50/40	25	35	45	50	50
125/100	55	75	90	100	100
200/160	120	160	175	190	195
Концентрация %:					
150	40	60	75	78	80
100	35	75	90	100	102
50	65	90	105	110	112
Связки:					
В1-01	35	60	75	90	100
ПМ1	50	75	90	100	102
ПМ12	70	85	100	102	105
Нормальное давление P_n , МПа:					
0,5	15	25	40	45	50
1,0	17	35	50	55	60
1,5	25	50	65	75	78
2,0	35	55	75	80	90
2,5	50	75	95	100	102
Обрабатываемый материал:					
Гексанит-Р	25	45	53	65	70
ДПНБ	35	53	65	75	78
ДАП	50	75	95	100	105
АСБ	60	80	105	110	112
АСПК	75	100	115	120	122

Установлено, что преобладающий вид износа для равных крупностей зерен характерен для вполне определенных значений их выступания над связкой (табл. 6). Это чрезвычайно важная особенность алмазного шлифова-

ния СТПМ, которая указывает на упрочняющую роль связки. При большем выступании зерен в силу блочности их строения легче реализуются механизмы хрупкого разрушения, приводящие к потенциальному уплощению вершины зерен, ее приближению к связке, которая, как обойма, оказывает упрочняющее влияние на зерна. Возрастающее число зерен с площадками, судя по профилограммам, обладает мало отличающейся высотой выступления, что обуславливает резкое возрастание числа контактирующих с СТПМ, возрастает в 5 - 10 раз по сравнению с исходным. Обрабатываемый поликристалл как бы опирается на площадки износа зерен, обеспечивая зазор между ним и связкой.

Таблица 6

Связь преобладающего вида износа с высотой выступления зерен

Преобладающий вид износа	Марка СТПМ	Высота выступления алмазных зерен над уровнем связки для зернистости круга h_z , мкм		
		200/160	125/100	50/40
Хрупкое микроразрушение	АСБ	65 - 20	40 - 15	18 - 8
	ДАП	170 - 120	110 - 90	45 - 30
Хрупкое микроразрушение в сочетании с физико-химическими процессами	АСБ	20 - 15	15 - 10	8 - 6
	ДАП	120 - 100	90 - 60	30 - 15
Истирание и термоактивируемые процессы	АСБ	15 - 12	10 - 8	6 - 5
	ДАП	< 100	< 60	< 15

Таблица 7

Влияние продолжительности шлифования и нормального давления на количество зерен в контакте, шт.

Продолжительность обработки, с	Нормальное давление P_n , МПа		
	3,0	2,0	1,0
0	20	20	20
10	80	65	50
20	125	100	65
30	150	125	30
60	180	155	105
90	200	165	115
120	210	168	118
150	215	165	118

При определенной степени сглаживания рельефа начинается этап из-

носа, в течение которого состояние режущего рельефа круга статистически постоянно, что соответствует процессу установившегося шлифования. С момента начала установившегося шлифования скорость линейного (размерного) износа круга становится величиной незначительной, практически постоянной для конкретных условий шлифования.

Общим для характера изменения параметров режущего рельефа является наличие таких же периодов их различной интенсивности, как это было установлено для производительности и микроразрушения алмазных зерен в переходном и установившемся режиме шлифования.

С учетом установления исходного, переходного и установившегося режима работы при шлифованиях всех исследуемых материалов снижение высоты зерен с продолжительностью обработки также аппроксимировано зависимостью вида

$$h = h_{уст} + \Delta h \exp(-\alpha_h \tau),$$

где $\Delta h = h_{исх} - h_{уст}$ - амплитуда снижения высоты зерен за период сглаживания рабочей поверхности, мкм; α_h - эмпирический коэффициент, характеризующий интенсивность изменения высоты зерен, c^{-1} .

Таким образом установлено, что при алмазном шлифованиях СПММ чрезмерно быстрая потеря режущих свойств кругов обусловлена аномально интенсивным износом зерен, быстрым сглаживанием его рабочей поверхности с образованием на зернах площадок износа, изменением всех исследуемых параметров рельефа (рис. 5).

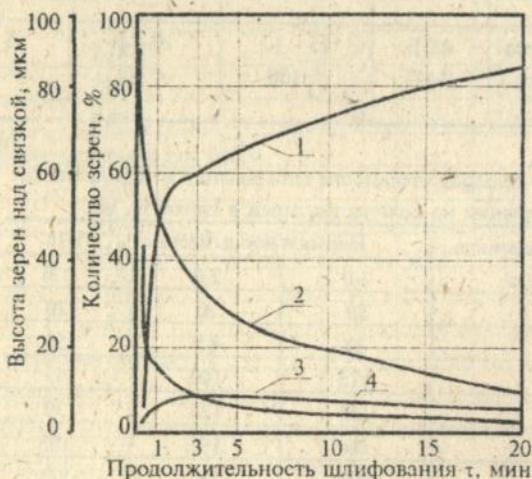


Рис.5 Динамика изменения режущего рельефа алмазных кругов

- 1 - зерна с площадками; 2 - острые зерна;
3 - выпавшие зерна; 4 - высота зерен.

Важно дифференцировать роль основных параметров рельефа с тем, чтобы получить исходные данные для управления процессом шлифования через оптимизацию режущих свойств рабочей поверхности кругов. Распределение зерен в связке и параметры режущего рельефа круга носят случайный характер, поэтому для оценки взаимосвязи их с выходными показателями алмазного шлифования СТПМ применен корреляционный анализ. В роли случайных величин рассмотрены функциональные факторы (y): Q - производительность шлифования, $\text{мм}^3/\text{мин}$; P_z - тангенциальная составляющая силы резания, Н ; $K_{\text{ш}}$ - коэффициент шлифования; v - интенсивность износа инструмента, $\text{мкм}/\text{с}$; R_z - шероховатость обработанной поверхности, мкм ; факторами-аргументами (x) - параметры режущего рельефа; h - максимальная высота выступания зерен над уровнем связки; t_p - относительная опорная длина профиля; $l_{\text{ср}}$ - среднее расстояние между зернами; $c = 1/t_p N$ - коэффициент "остроты" зерен, где N - количество зерен на базовой длине; n_0 - количество острых зерен; $n_{\text{п}}$ - количество зерен с площадками, %; $n_{\text{в}}$ - количество зерен, выпавших из связки, %.

Оценка тесноты корреляционной связи между основными выходными показателями процесса - производительностью обработки, размерным износом круга, коэффициентом шлифования, тангенциальной составляющей силы резания и шероховатостью, с одной стороны, и параметрами режущего рельефа, с другой, позволило выделить из всего комплекса те параметры, изменение которых наиболее существенно отражается на показателях режущей способности круга, оказывает общее влияние на выходные показатели шлифования всех групп обрабатываемых материалов.

Теснота парной корреляционной связи между выходными показателями шлифования и параметрами режущего рельефа определялась по величине эмпирического корреляционного отношения. Объем выборки составлял не менее 100 наблюдений.

В табл. 8 приведены значения эмпирических корреляционных отношений, характеризующих тесноту связи между производительностью обработки Q , тангенциальной составляющей силы резания P_z , шероховатостью R_z и параметрами режущего рельефа круга для алмазного шлифования ДАП кругом 12А2 150 × 10 × 3 × 32 АС6 50/40 В1-01 4 со скоростью $V_{\text{кр}}=30$ м/с, по упругой схеме шлифования с $P_{\text{н}}=2,0$ МПа; $S_{\text{пр}}=1$ м/мин.

Таблица 8

Значения эмпирического корреляционного отношения для ДАП

Эмпирическое корреляционное отношение	Параметры режущего рельефа, x							
	h	t_p	$l_{\text{ср}}$	c	n_0	$n_{\text{п}}$	$n_{\text{в}}$	ψ
$\eta_{Q,x}$	0,96	0,66	0,11	0,75	0,58	0,61	0,13	0,82
$\eta_{P_z,x}$	0,84	0,62	0,34	0,77	0,44	0,73	0,17	0,76
$\eta_{R_z,x}$	0,79	0,6	0,26	0,52	0,39	0,84	0,27	0,84

Проверка влияния выбранных факторов на выходные показатели процесса шлифования различных сверхтвердых материалов методом корреляционного анализа, тесная, близкая к функциональной, связь между этими параметрами и высотой h позволили выдвинуть положение об определяющей роли высоты выступания зерен над связкой (рис.6).

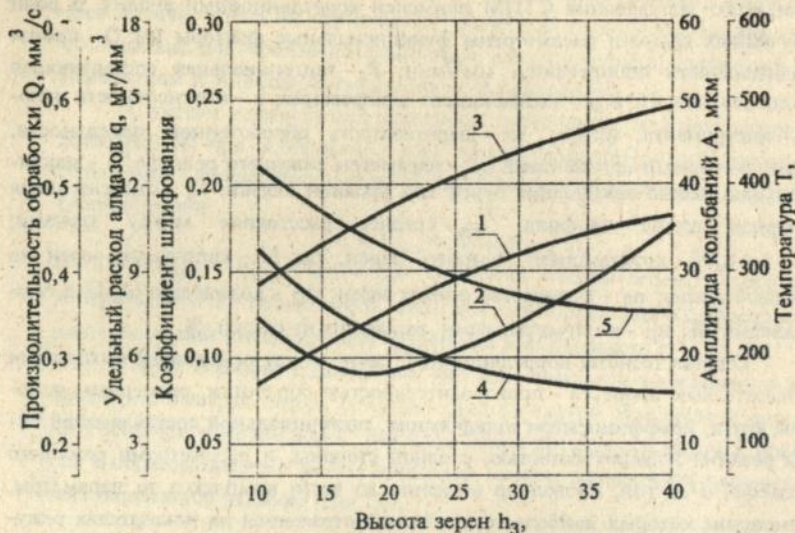


Рис.6 Влияние высоты выступания зерен на показатели процесса

- 1 - производительность обработки; 2 - удельный расход алмазов;
3 - коэффициент шлифования; 4 - амплитуда колебаний;
5 - температура шлифования.

Условия обработки: обрабатываемый материал - СКМ-Р; параметры продольного профиля: $t_b=8$ мм, $l_{np}=1$, $h_b=90...110$ мкм

При неизменных режимах обработки только за счет снижения высоты выступания алмазных зерен над уровнем связки от 35 до 5 мкм в 20-25 раз понижается производительность и в 10-12 раз повышается удельный расход и себестоимость обработки АСПК и АСБ. При шлифовании гексанита-Р и эльбора-Р снижение высоты h вызывает падение производительности в 40-42 раза и повышение удельного расхода и себестоимости обработки в 10-20 раз (табл. 9).

Увеличение исходной высоты выступания зерен за счет уменьшения величины заделки их в связке продлевает период их хрупкого микроразрушения, тем самым обеспечивает более полное использование потенциальных режущих свойств алмазных зерен.

Показатели шлифования при различной высоте выступания зерен

Обрабатываемый материал	Показатель шлифования	Высота выступания зерен h , мкм					
		5	10	15	25	30	35
АСПК	Q	0,30	1,30	3,10	6,30	7,00	7,80
	q	250,00	180,00	120,00	44,00	34,00	23,00
АСБ	Q	0,50	2,00	3,80	6,00	8,50	10,00
	q	192,00	132,00	104,00	38,00	24,00	16,00
Гексанит-Р	Q	2,40	6,20	16,30	43,00	72,00	97,00
	q	118,00	45,00	25,00	19,20	9,30	6,00
Эльбор	Q	4,70	13,60	45,00	100,00	167,00	200,00
	q	70,00	37,60	18,40	8,30	7,00	5,70

Таким образом, из всех исследуемых параметров наиболее ответственной за интенсивность разрушения поверхностного слоя обрабатываемого СТПМ является высота выступания алмазных зерен над уровнем связки. Однако в силу того, что в процессе алмазного шлифования эффективность разрушения поверхностного слоя СТПМ обусловлена не глубиной внедрения алмазного зерна в обрабатываемый материал, а интенсивностью разрушения зерна при соударении с поликристаллом, высота выступания алмазного зерна над уровнем связки, очевидно, не непосредственно, а через изменяющееся число работающих зерен, характер их разрушения и, следовательно, через состояние микрорельефа алмазных зерен определяет эффективность процесса шлифования.

Именно трансформация развитой рабочей поверхности круга и прежде всего вершин алмазных зерен предопределяет изменение физических явлений и основных выходных показателей вследствие изменения характера взаимодействия рабочей поверхности круга с обрабатываемыми материалами.

Минимизация износа, стабильный характер трения и высокая устойчивость всех показателей взаимодействия с СТПМ в период самоустановившегося режима шлифования свидетельствуют о наличии основных признаков структурно-топографической приспособляемости. Именно структурно-топографическая приспособляемость рабочей поверхности алмазных кругов является физической основой аномально быстрого изменения выходных показателей, не наблюдаемого при шлифовании материалов обычной твердости.

Сущность структурно-топографической приспособляемости состоит в том, что топография, структура и свойства дискретной алмазной поверхности круга в процессе высокоскоростного контактирования с СТПМ перестраиваются в направлении, энергетически более выгодном в сравнении с

исходным состоянием. Она протекает в два этапа. На первом, охватывающем начальный и переходный режимы шлифования, доминирует топографическая приспособляемость, содержанием которой является трансформация развитой поверхности зерен в уплощенную с устойчивым субмикрорельефом, снижение высоты выступания зерен над связкой и увеличение числа контактирующих зерен. На втором этапе, охватывающем переходный и самоустановившийся режимы шлифования, топографическая приспособляемость дополняется структурной, когда в тонких слоях, примыкающих к уплощенным поверхностям зерен, формируются энергетически устойчивые структуры, способные сохраняться длительное время. Наступающая стабилизация режущего рельефа в этом случае не обеспечивает требуемых выходных показателей шлифования. Поэтому аномально быструю структурно-топографическую приспособляемость рабочей поверхности кругов следует рассматривать как явление, затрудняющее, а чаще исключаящее реализацию физических предпосылок высокой эффективности алмазного шлифования сверхтвердых материалов.

Суммарную энергию, затрачиваемую на разрушение (износ) зерна и изменения в его поверхностном слое в ходе структурно-топографической приспособляемости, можно представить как

$$E_{\text{из}} = E_p + E_{\text{и}},$$

где $E_p = E_{\text{зт}} + E_{\text{рт}} + C2E_{\text{п}},$

$$E_{\text{и}} = V_1 E_{\text{гп}} + V_2 E_{\text{вс}} + V_3 E_{\text{вн}} + V_4 (E_{\text{д}} + E_{\text{вд}} + E_{\text{тд}}).$$

Здесь E_p - энергия разрушения; $E_{\text{и}}$ - энергия изменений в зерне; $E_{\text{зт}}$, $E_{\text{рт}}$ - энергия зарождения и развития трещины; C - вновь образованная поверхность; $E_{\text{п}}$ - энергия образования новых поверхностей; V_1, V_2, V_3, V_4 - объемы зерна, в которых произошли превращения алмаза в графит $E_{\text{гп}}$, сформировалась вторичная структура $E_{\text{вс}}$ и внутренние напряжения $E_{\text{вн}}$, образовались дислокации $E_{\text{д}}$, взаимодействуют дислокации $E_{\text{вд}}$, возникли точечные дефекты $E_{\text{тд}}$. С учетом поэтапного характера структурно-топографической приспособляемости и установленных закономерностей шлифования СПМ в переходном и установившемся режиме шлифования, представленное выражение показывает, что соотношение энергий, затрачиваемых на топографическую и структурную приспособляемость, по мере износа изменяется. Изменение в ходе структурной приспособляемости сопровождается увеличением доли энергии, затрачиваемой на эти изменения, а энергия, затрачиваемая на объемное разрушение, уменьшается. Поэтому энергетическим условием предотвращения структурно-топографической приспособляемости рабочей поверхности алмазного круга будет $E_p \rightarrow E_{p \text{ max}}, E_{\text{и}} \rightarrow E_{\text{и min}}$.

На основе всестороннего изучения структурно-топографической приспособляемости алмазных кругов предложена методология управления их

режущими свойствами для обеспечения высокой эффективности процесса алмазного шлифования СТПМ.

Высокоэффективные процессы алмазного шлифования СТПМ необходимо базировать на принципе непрерывного формирования энергетически неустойчивого состояния алмазных зерен и их структуры, поддержания этого неустойчивого состояния с целью предотвращения структурно-топографической приспособляемости рабочей поверхности кругов при обеспечении статистически неизменных оптимальных параметров режущего рельефа в течение всего периода шлифования. Это означает, что устойчивость выходных показателей высокопроизводительной обработки СТПМ обеспечивается неустойчивой рабочей поверхностью круга, т.е. алмазные зерна круга могут эффективно шлифовать СТПМ только тогда, когда сами будут разрушаться с оптимальной интенсивностью, сохраняя необходимую развитость субмикрорельефа. Стабилизация же выходных показателей процесса достигается тем, что, оказывая специальное дозирующее воздействие на рабочую поверхность круга, обеспечивается соответствие темпа восстановления ее параметров темпу изменения в зоне шлифования в зависимости от требований обработки СТПМ. Нужно непрерывно сообщать рабочей поверхности круга дополнительную энергию, которая обеспечила бы увеличение составляющей E_p в общем объеме затрат, сделав структуру поверхности энергетически неустойчивой, и обеспечила бы в результате предотвращение структурно-топографической приспособляемости. Поскольку показатели наиболее тесно связаны со значением максимальной высоты выступления зерен над связкой, пришлось уточнить энергетическое условие предотвращения структурно-топографической приспособляемости, изменив $E_p \rightarrow E_{p \max}$ на $E_p \rightarrow E_{p \text{ опт}}$. Это ограничение, несмотря на принципиальную справедливость $E_p \rightarrow E_{p \max}$, ориентирует на оптимизацию величины дополнительной энергии, сообщаемой рабочей поверхности круга, с целью исключения неоправданно большого расхода алмазов.

Отсюда сделан вывод о целесообразности использования способов предотвращения приспособляемости рабочей поверхности кругов, которые основаны на избирательном воздействии на связку круга, а при оптимизации режущей способности рабочей поверхности - на результатах корреляционного анализа связи параметров рельефа с выходными показателями шлифования (рис. 7).

Поскольку между основными выходными показателями шлифования и высотой выступления зерен имеется наиболее тесная связь, получены выражения, характеризующие форму статистической взаимосвязи между выходными показателями Q , v , $K_{ш}$ и высотой зерен h :



Рис.7 Предотвращение структурно-топографической приспособляемости

$$Q = \frac{Q_{ис х} - Q_{ус т}}{(h_{ис х} - h_{ус т})^{\beta_Q / \alpha h}} (h - h_{ус т})^{\beta_Q / \alpha h} + Q_{ус т}$$

$$v = \frac{v_{ис х} - v_{ус т}}{(h_{ис х} - h_{ус т})^{\beta_v / \alpha h}} (h - h_{ус т})^{\beta_v / \alpha h} + v_{ус т}$$

$$K_{ш} = \frac{K_{шис х} - K_{шус т}}{(h_{ис х} - h_{ус т})^{\beta_{Kш} / \alpha h}} (h - h_{ус т})^{\beta_{Kш} / \alpha h} + K_{шус т}$$

$$h_{опт Q} = h_{ис х} e^{-\frac{\beta_2}{\beta_1} (\ln Q_{ис х} - \ln Q_{опт})}$$

Статистическая оценка изменения параметров режущего рельефа круга в динамике, установление законов этих изменений, а также их взаимосвязи с изменением выходных показателей шлифования позволили предложить структурную схему оптимизации процессов шлифования на базе управления

рабочей поверхностью кругов (рис. 8).

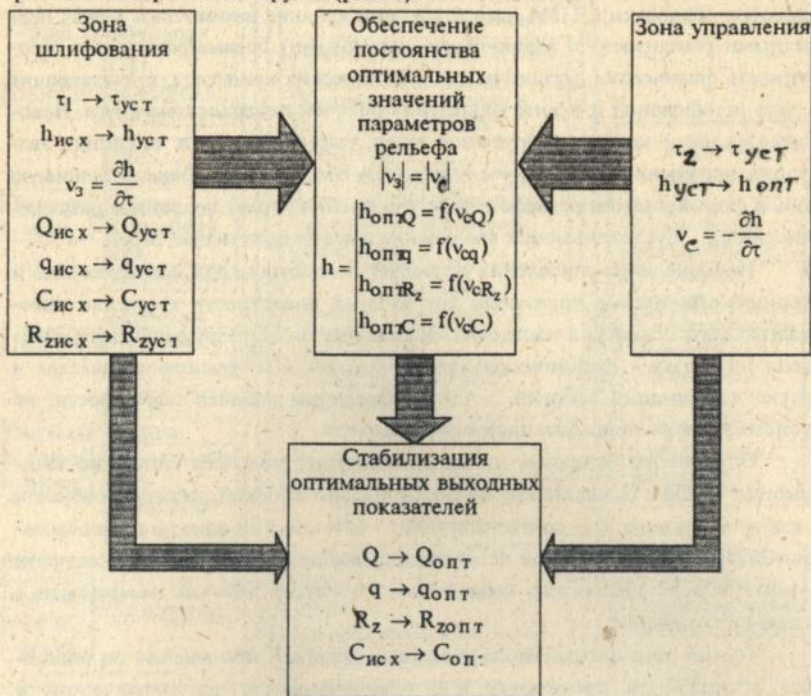


Рис.8 Структурная схема оптимизации в процессе шлифования

Оптимизация процесса шлифования достигается стабилизацией значения высоты выступания контактирующих зерен над связкой, оптимизированного по соответствующему выходному показателю шлифования Q , q , c , R_z - соответственно производительность, удельный расход, себестоимость обработки и шероховатость обработанной поверхности.

Понятие управления рабочей поверхностью, ее рельефом значительно шире понятия правки и предполагает обеспечение постоянства статистических характеристик рельефа, строго отвечающих требованиям оптимизации по тем или иным выходным показателям. Оптимизация процесса шлифования СТПМ предполагает непрерывное автономное управление режущей поверхностью круга, благодаря чему обеспечивается оптимальная высота выступания зерен над связкой, когда предотвращается топографическая и структурная приспособляемость рабочей поверхности, создаются необходимые и достаточные условия для самозатачивания зерен хрупким микроразрушением, размещение продуктов шлифования в межзеренном пространстве и исключение контакта связки с обрабатываемым материалом.

Предложены структурные и принципиальные электрические схемы

способов обработки СТПМ (рис. 9,10), отражающие взаимосвязь между первичными (входными) и вторичными (выходными) параметрами через совокупность физических, механических и химических процессов, происходящих в зоне шлифования и в зоне управления рабочей поверхностью круга. Некоторые из них - хрупкое разрушение зерен, вырывание зерен из связки, эвакуация продуктов износа круга - присущи обоим зонам. Однако основную роль в формировании рельефа в зоне управления играет послойное разрушение связки, обуславливающее увеличение высоты выступания зерен.

Наличие зоны управления позволяет рассмотреть для нее первичные и вторичные выходные показатели для рабочей поверхности круга как самостоятельного объекта, в частности, возможные виды разрушающего воздействия на связку - механическое, электрохимическое, физико-химическое и другие комбинации энергий, а также параметры рабочей поверхности, не свойственные ее приработанному состоянию.

Определены основные этапы оптимизации процесса алмазного шлифования СТПМ: создание кругов потенциально высокой работоспособности и выбор характеристик, соответствующих особенностям алмазного шлифования СТПМ; выбор режимов шлифования; выбор природы и интенсивности дозируемого разрушающего воздействия на связку рабочей поверхности с целью оптимизации.

Третий этап оптимизации является основным, ибо именно он определяет возможность проявления или предотвращения топографической и структурной приспособляемости рабочей поверхности алмазных кругов.

Комплексное управление рабочим рельефом и профилем рабочей поверхности круга.

В соответствии с методологией предотвращения структурно-топографической приспособляемости связка круга рассматривается как самостоятельный главный объект дозируемых избирательных разрушающих воздействий с целью управления его режущей способностью. Это важное положение позволило сформулировать принцип комплексности управления режущим рельефом, поперечным и продольным профилем. Определены требования к методам формообразования поверхности кругов и лежащих в их основе разрушающих воздействий. В результате анализа семи методов формообразования по 18 группам характеристик в качестве базового был принят электрохимический, поскольку близкие к нему по своим достоинствам электрофизические и комбинированные все же уступают ему по чувствительности, широте диапазона интенсивности, температурному режиму, поражению зерен.

Управление режущим рельефом дало возможность стабилизировать его оптимальные параметры соответственно предъявляемым требованиям, достичь новых результатов в расширении диапазона характеристик используемых алмазных кругов, обрабатываемых материалов, улучшить выходные

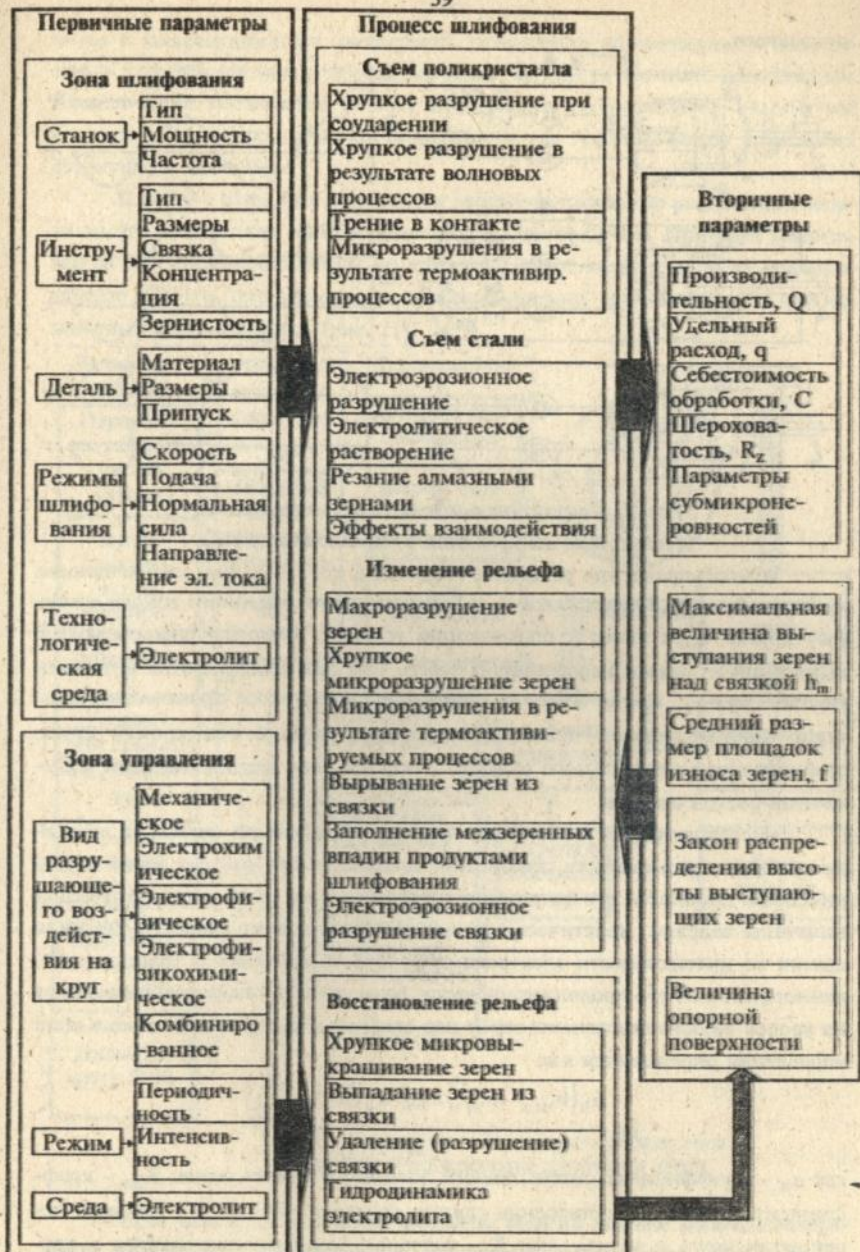


Рис.9 Структурная схема процесса шлифования композиции "СТПМ-сталь" комбинированным методом

показатели.

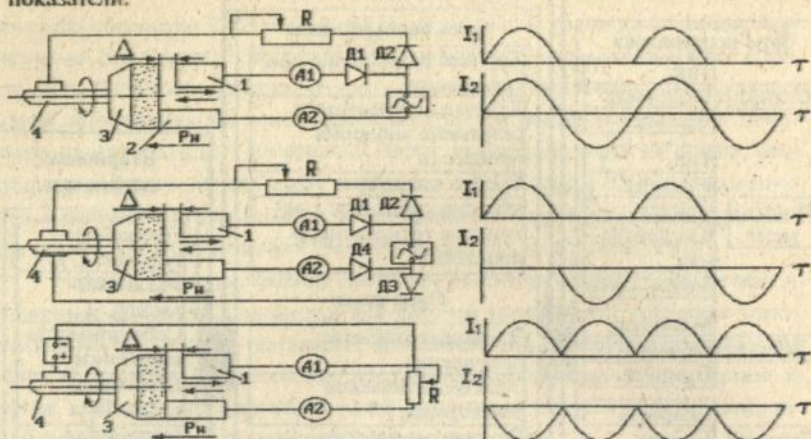


Рис.10 Принципиальные электрические схемы процессов шлифования с управлением РПК

Задача управления рельефом сводится к согласованию интенсивности принудительного съема связки v_c и интенсивности линейного износа алмазных кругов v_3 , а также к определению условий, исключающих обвалы выпадения из связки неработающих зерен. Три соотношения этих интенсивностей - $v_3 > v_c$, $v_3 = v_c$ и $v_3 < v_c$ определяют неизбежное проявление структурно-топографической приспособляемости рабочей поверхности круга, стабилизацию оптимального развитого рельефа или нерациональный избыточный расход алмазов.

Исследованиями установлено постоянство площади связки на поверхности круга, возможность повышения использования ресурса зерна с увеличением прочности его удержания связкой за счет снижения критической величины заделки, практически линейные зависимости скорости удаления связки от интенсивности электрохимического воздействия и толщины удаленного слоя от его продолжительности, возможность стабилизации рельефа на уровне любого выступания зерен над связкой. При этом сила тока в цепи управления определяется как

$$I = \frac{\alpha_h (h_{ис х} - h_{yc т}) \exp(-\alpha_h \tau) F \left(1 - \frac{K}{400}\right)}{K_{дз}}$$

где α_h - коэффициент интенсивности линейного износа зерна; $K_{дз}$ - коэффициент линейного растворения связки, $\text{мкм} \cdot \text{мм}^2 / (\text{А} \cdot \text{с})$; F - площадь перекрытия круга и катода, мм ; K - условная концентрация алмазов в круге, %.

Задача управления поперечным профилем рабочей поверхности сво-

дится к компенсации его отклонений, естественно возникающих в зоне резания под воздействием обрабатываемых СТПМ и условий шлифования. Компенсация достигается за счет дозирования разрушающего воздействия на связку тех участков рабочей поверхности, где эти отклонения превышают допустимые значения.

В связи с этим был выдвинут и реализован принцип раздельного независимого воздействия на отдельные участки поверхности. Принцип реализован за счет разделения катода по ширине и длине на электрически изолированные области, при этом время прохождения тока через каждую из них независимо регулировалось (рис. 11).

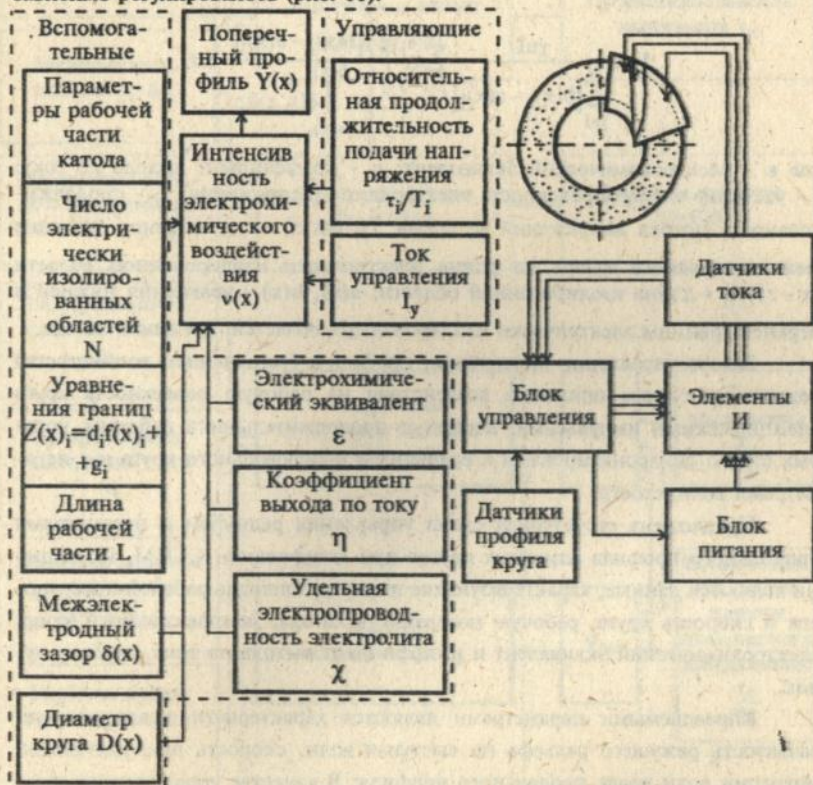


Рис. 11 Параметры и блок-схема управления рельефом и поперечным профилем круга

Тогда уравнение условной плотности тока по ширине рабочей поверхности круга $i(x)$, закономерность управления поперечным профилем рабочей поверхности круга, интенсивность дозируемого съема связки в зоне управления v_c , средняя величина тока I_j , проходящего через все электричес-

ки изолированные области за время $\tau \geq T_{j \max}$, представится в виде

$$i(x) = \frac{\chi u}{\pi D_x} \sum_{j=1}^N \frac{\tau_j [b(x)_j - a(x)_j]^2}{T_j \int_{a(x)_j}^{b(x)_j} \delta(x, z) dz}$$

$$v_c = \frac{\epsilon \eta \chi u}{\pi D(x)} \sum_{j=1}^N \frac{\tau_j [b(x)_j - a(x)_j]^2}{T_j \int_{a(x)_j}^{b(x)_j} \delta(x, z) dz}$$

$$I_j = \frac{\chi u L}{\sum_{j=1}^N [b(x)_j - a(x)_j]} \sum_{j=1}^N \frac{\tau_j}{T_j} \left\{ \int_{a(x)_j}^{b(x)_j} \frac{[b(x)_j - a(x)_j]^2}{\delta(x, z) dz} \right\} dz,$$

где ϵ - электрохимический эквивалент; η - коэффициент выхода по току; f - удельная электропроводность электрода; u - напряжения; τ_j - продолжительность потока напряжений за время T_j ; $\bar{\delta}(x, z)$ - усредненное значение меж-электродного зазора по длине электрически изолированной области $(x - z)$; l_j - длина изолированной области; $a(x)$, $b(x)$ - уравнения нижней и верхней границы электрически изолированных областей; L - длина катода.

Задача управления продольным профилем (устранением волнистости) решена на основе принципа воздействия на рабочую поверхность круга электрическими импульсами, период и продолжительность действия которых строго синхронизированы с вращением шлифовального круга и с параметрами волнистости.

Предложена структурная схема управления рельефом и параметрами продольного профиля алмазных кругов при шлифовании СТПМ. Исходными являются данные, характеризующие диаметр, площадь рабочей поверхности и скорость круга, рабочую поверхность катода, межэлектродный зазор, электрохимический эквивалент и коэффициент выхода по току, глубину лунок.

Управляемыми параметрами являются характеристики волнистости, развитость режущего рельефа на выступах волн, скорость принудительной миграции волн вдоль продольного профиля. В качестве управляющих параметров предложено использовать: ток управления и характеристики его импульсов (частота, продолжительность, форма), относительное время подачи импульсов напряжения и скорость сдвига фазы импульсов (рис. 12).

Установление основных закономерностей формообразования рельефа и профиля рабочей поверхности алмазных кругов, анализ структурных схем обработки СТПМ позволило предложить ряд схем процессов шлифования,

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ

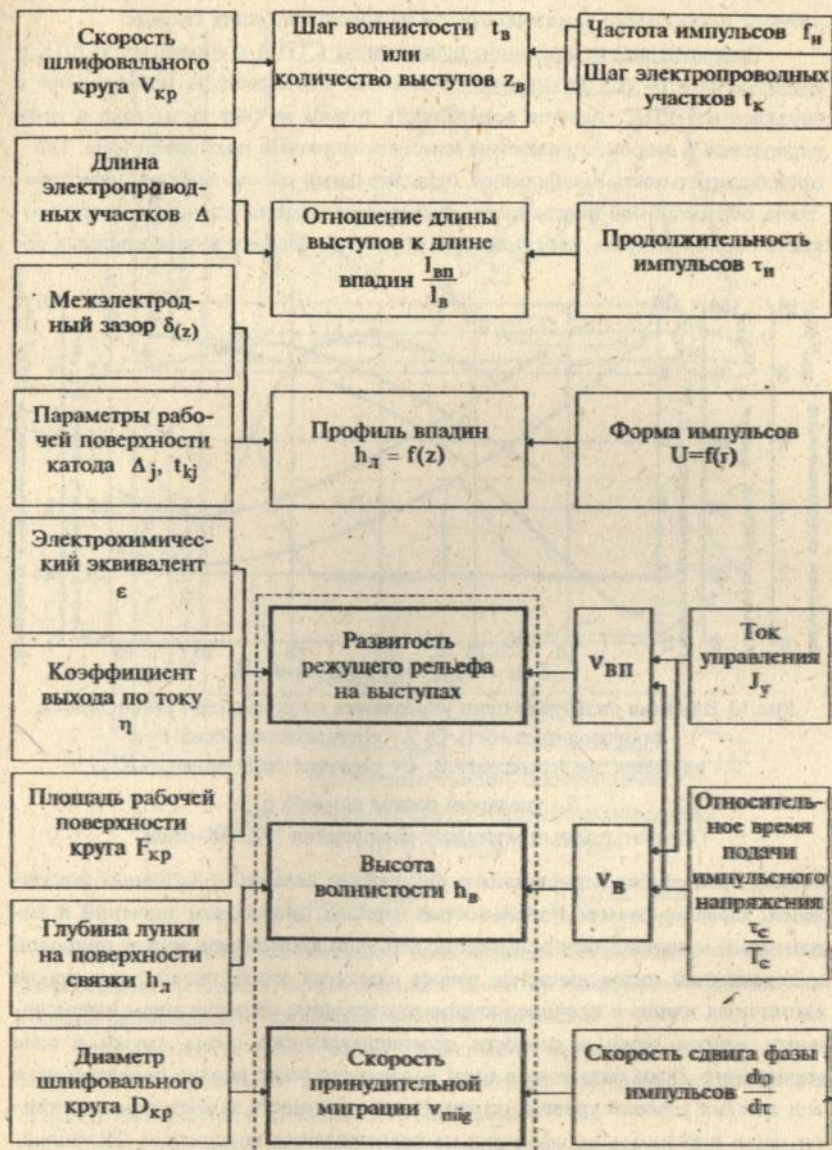


Рис.12 Параметры управления продольным профилем РПК

реализующих принцип непрерывной оптимизации режущих свойств алмазных кругов путем комплексного управления режущим рельефом и профилем рабочей поверхности алмазных кругов на токопроводящих связках.

Закономерности алмазного шлифования СППМ с управлением РПК и универсальность его принципов. Основным достоинством шлифования с управлением РПК является возможность только за счет силы тока в цепи управления в широком диапазоне изменять выходные показатели (рис. 13): производительность шлифования, относительный расход алмазов, шероховатость обработанной поверхности, температуру резания, удельную энергоемкость съема припуска, себестоимость обработки. Однако в определенных ус-

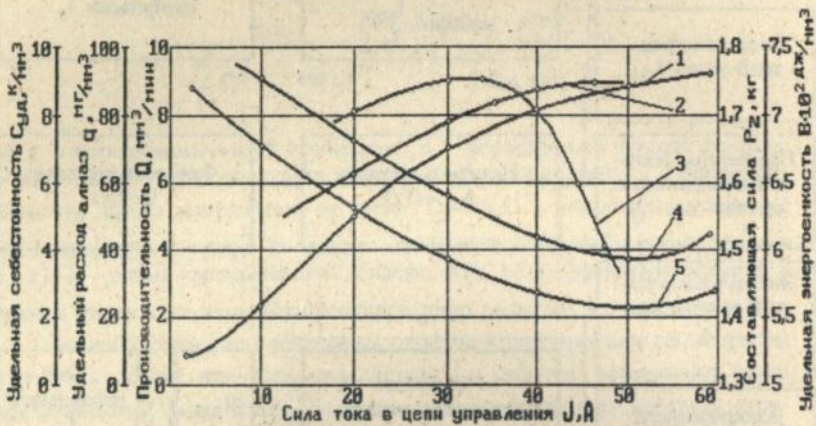


Рис. 13 Влияние силы тока цепи управления на показатели шлифования

- 1 - производительность Q ; 2 - составляющая сила P_z ;
 3 - удельная энергоемкость B ; 4 - удельная себестоимость C_y ;
 5 - удельный расход алмазов q .

Обрабатываемый материал: композиция "АСПК-сталь"

ловиях проявляется периодичность физических явлений и выходных показателей, характеризуемая длительностью периода, диапазоном значений и амплитудой, и являющаяся результатом глубокой взаимосвязи между природой и переменной интенсивностью износа алмазных зерен, силами резания на единичных зернах и прочностью алмазоудержания, соотношением интенсивности износа зерен и скорости целенаправленного съема связки в зоне управления. Если сила тока в цепи управления ниже вполне определенного для данных условий уровня, устранить периодичность за счет характеристики круга и режимов шлифования не представляется возможным. Интенсивность дозируемого разрушающего воздействия на связку кругов является наиболее универсальным инструментом устранения периодичности и обеспечения устойчивости рельефа, его потенциальных режущих свойств, стаби-

лизации выходных показателей шлифования, в частности увеличения производительности в 2 раза, снижения относительного расхода алмазов в 1,5 раза (рис. 14).

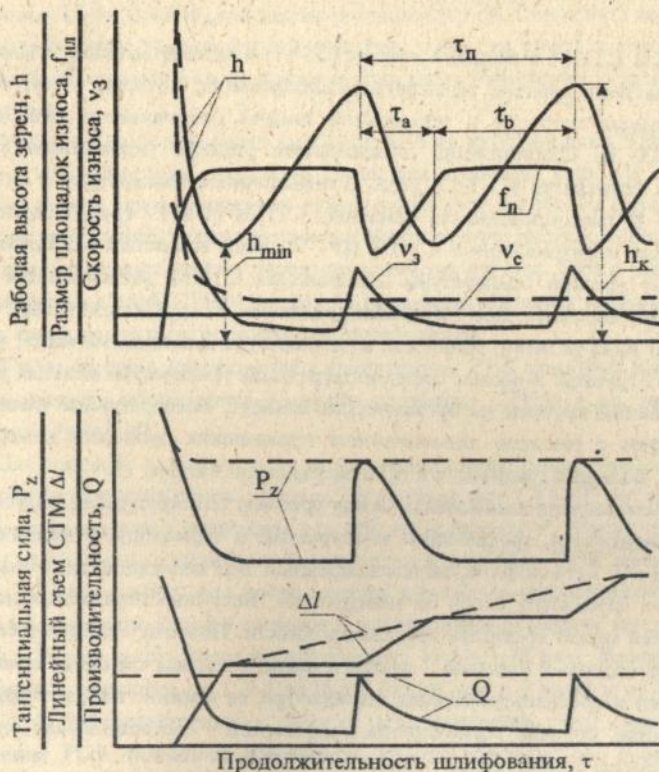


Рис.14 Периодичность процесса шлифования
СТПМ — $J < J_{KP}$; --- $J > J_{KP}$.

$$\tau_a = \frac{h_k - h_{\min}}{v_з - v_с}; \quad \tau_b = \frac{h_k - h_{\min}}{v_с - v_з}.$$

Подтверждено, что алмазное шлифование СТПМ является высокоэнергоемким процессом, превосходящим по этому показателю обработку алмазным шлифованием материалов обычной твердости.

Энергоемкость шлифования существенно снижается с увеличением тока в цепи управления, нормального давления, концентрации алмазов и скорости шлифования, снижением зернистости.

Силы резания возрастают с увеличением твердости СТПМ, с уменьшением зернистости, скорости круга, увеличением нормального давления, ростом концентрации и площади обработки и могут достигать при шлифо-

вании СТПМ I и IV группы - $P_y > 990$ Н, $P_z > 210$ Н; II и V группы - $P_y > 680$ Н, $P_z > 105$ Н; но с увеличением силы тока в цепи управления до 180 А силы стабилизируются на низком уровне ($P_y=100$ Н, $P_z=20$ Н для СКМ).

Для СТПМ с большей твердостью установлены высокие градиенты и максимальные средние температуры шлифования, которые растут также с увеличением скорости и поперечной подачи (нормального давления) до 1000-1100 К. Стабилизация оптимального рельефа управлением снижает уровень температур в 1,3-1,6 раза. С повышением температуры в диапазоне 300-700 К теплопроводность алмазных СТПМ (I и IV групп) снижается в 3-3,5 раза, а нитридных СТПМ (II - V групп) возрастает в 3,5 раза.

По уровню температуры шлифования СТПМ располагаются в ряд: СКМ, АСПК, АСП, ДПГ. Для поликристаллов II группы (на основе нитрида бора) сила резания, мощность и температура существенно ниже, чем для СТПМ I группы. В общем среднеинтегральная температура меньше, чем при шлифовании кругами на органических связках. Температурные поля свидетельствуют о высокой динамичности термических процессов шлифования СТПМ, больших градиентах в приповерхностных слоях.

Установлена взаимосвязь между уровнем температуры на обрабатываемой поверхности, градиентами температуры и термоупругих напряжений с состоянием металлофазы, перемещающейся под действием указанных факторов из глубинных слоев на поверхность. Величина остаточных напряжений в ней может достигать предела прочности. Поэтому всестороннее исследование тепловых явлений - распределение тепловых потоков, температурные поля и среднеинтегральная температура, ее влияние на структуру, фазовый состав, уровень термоупругих напряжений - соответствовало определению условий бездефектной обработки СТПМ.

Исследование поверхности синтетических поликристаллов алмаза и нитрида бора после шлифования позволило установить общие особенности формирования и состояния поверхности, характерные для всех изучаемых типов СТПМ, и частные, обусловленные индивидуальностью структуры и физико-механических свойств поликристаллов каждой группы.

Шероховатость обработанной поверхности непосредственно зависит от того, какие механизмы разрушения СТПМ реализуется в тех или иных условиях шлифования. Следовательно, состояние рабочей поверхности круга является определяющим для получаемой шероховатости обработанной поверхности. Если не предотвращать структурно-топографическую приспособляемость режущей поверхности, то шероховатость обработанной поверхности по критерию R_a в первый период меняется в пределах 0,3-0,15 мкм соответственно. Наибольшему значению нормального давления соответствовала наименьшая шероховатость. Поверхность сверхтвердых ма-

териалов на основе нитрида бора имеет меньшую шероховатость, чем у алмазов. Управляя рабочей поверхностью круга с различной интенсивностью, можно изменять шероховатость всех обрабатываемых СТПМ в пределах, определяемых структурой и свойствами поликристаллов. Снижению шероховатости способствует увеличение зернистости, скорости круга, концентрации алмазов. Рост нормального давления и тока цепи управления ухудшают шероховатость.

Установлена повышенная чувствительность двухслойных СТПМ к силовым и температурным нагрузкам. Подложка проявляет себя как мощный тепловой барьер, препятствующий отводу тепла из шлифуемого слоя СТПМ. Рентгенографические и электронномикроскопические исследования выявили различную протяженность переходных зон, их состава. Развитость зон за счет диффузии в слой СТПМ атомов из подложки усиливает прочность сцепления слоев, уменьшает дефекты при шлифовании.

Таким образом, шлифование с управлением РПК алмазных кругов позволяет надежно обеспечивать качество обработки СТПМ и др. выходные показатели (табл. 10).

Для примера приведем результаты стойкостных испытаний концевых фрез с многокристалльными ножами, оснащенными СКМ-Р, и торцовых фрез с механическим креплением вставок из гексанита-Р. Фрезы после заточки с комплексным управлением профилем и рельефом РПК имели стойкость в 1,52 раза выше, чем после заточки кругом на органической связке. Фрезы из гексанита-Р после заточки с управлением рельефом имели стойкость в 1,76 раза выше, после комплексного - еще в 1,42 раза. Коэффициенты вариации снизились от 1,253 до 0,081 (более чем в 3 раза) и от 0,197 до 0,170 (в 0,79) соответственно. Можно констатировать, что комплексное управление РПК повышает надежность работы инструмента. Повышение качества работы инструмента из СТПМ обеспечивается снижением динамической и температурной напряженности заточки, оказывающим благоприятное влияние на формирование микрогеометрии режущего инструмента.

Для осуществления принципов шлифования с комплексным управлением рельефом и профилем РПК предложен ряд решений: для обеспечения режима течения электролита в межэлектродном зазоре (а.с. № 1009685, а.с. № 1171242); регулирования интенсивности формообразования по ширине круга катодом с рабочей поверхностью, разделенной на электрически изолированные области (а.с. №№ 1239957, 1288003, 3797822, 3864547), регулирования параметров подаваемых на катод электрических импульсов (а.с. №№ 3744324, 1256938), расположением электропроводных участков на поверхности катода и их коммутацией (а.с. № 3724730), выбора концентрации кругов (а.с. № 1148761), регулирования амплитуды колебаний

Таблица 10.

Некоторые показатели алмазного шлифования с комплексным управлением РПК

Обрабатываемый материал		СКМ-Р		Гексанит-Р		ВК 8	
	Схема шлифования	торцом кру-	периферией	торцом кру-	периферией	торцом кру-	периферией
		га	круга	га	круга	га	КРУГА
Тради- ционная	Период стойкости круга, мин	1-3	-	5-10	-	30-40	-
	Производительность, мм ³ /с	0.1-0.2	0.2-0.3	1.2-2.1	1.4-2.4	12-18	9-12
	Расход, мг/мм ³	15-35	20-40	4-8	5-9	(5-8)10 ⁻³	(6-9)10 ⁻³
	Удельная себестоимость, коп/мм ³	2.6-5.4	3.2-6.1	0.6-1.2	0.8-1.4	(3-4)10 ⁻³	(4-5)10 ⁻³
Комплек- сное управле- ние РПК	Период стойкости круга, мин	до полно- го износа	-	до полно- го износа	-	до полно- го износа	-
	Производительность, мм ³ /с	0.4-0.6	0.6-1.2	1.8-3.4	1.8-4.0	20-25	14-20
	Расход, мг/мм ³	6-10	5-8	3-5	5-6	(3-6)10 ⁻³	(4-8)10 ⁻³
	Удельная себестоимость, коп/мм ³	1.0-1.6	0.8-1.2	0.5-0.8	0.6-0.9	2.2 10 ⁻³	2.9 10 ⁻³
Эффек- тивность	Отношение производительности	3-4	3-4	1.5-1.5	1.3-1.7	1.4-1.7	1.5-1.7
	Отношение расхода алмазов	0.3-0.4	0.2-0.3	0.6-0.7	0.7-0.8	0.6-0.8	0.7-0.9
	Отношение себестоимости	0.3-0.4	0.2-0.3	0.7-0.8	0.6-0.7	0.6-0.7	0.6-0.7

и температуры поверхности за счет изменения параметров продольного рельефа (а.с. №1220739) и др. Для обеспечения непрерывной оптимизации РПК рекомендуются характеристики кругов, режимы резания и управления, вошедшие составной частью в "Общемашиностроительные нормативы режимов резания, норм износа и расхода резцов, сверл и фрез при обработке неметаллических конструкционных материалов", М., 1982. С учетом достигаемой стабильности и уровня выходных показателей, качества обработки, диапазона регулирования режущих свойств и РПК кругов разработанный процесс может обеспечивать надежность обработки в гибком автоматизированном производстве.

Соединение положительных эффектов стабилизации оптимального рельефа и профиля РПК и высокой прочности удержания алмазов в связке позволяет расширить технологические возможности алмазного шлифования различных групп труднообрабатываемых материалов. Значения условной удельной скорости внедрения исходного (после предельного вскрытия) рельефа в различные обрабатываемые материалы

$$W_{уд} = a_w P_H^{(b_w - 1)} \exp(-C_w P_H), \text{ мкм/(с} \cdot \text{Н)},$$

приведенные в табл. 11, свидетельствуют о высоких потенциальных возможностях алмазных кругов, которые в существующих процессах далеко не полностью реализуются. Дозируемое разрушающее воздействие на связку одновременно освобождает межзеренное пространство от продуктов

Таблица 11

Условная удельная скорость внедрения РПК

Обрабатываемые материалы	Константы			Оптимальные значения силы $P_{H оп}$, Н	Максимальные значения удельной скорости $W_{уд}$, мкм/(с · Н)
	a_w	b_w	c_w		
АСПК	$5.9 \cdot 10^{-3}$	1.5	$6.46 \cdot 10^{-5}$	300*	$7.8 \cdot 10^{-3}$
Гексанит-Р	$1.9 \cdot 10^{-2}$	1.41	$9.1 \cdot 10^{-4}$	200*	$1.7 \cdot 10^{-1}$
КНТ-16	$2.4 \cdot 10^{-1}$	1.32	$1.96 \cdot 10^{-3}$	175.9	$8.9 \cdot 10^{-1}$
ВК20	$6.2 \cdot 10^{-1}$	1.44	$3.79 \cdot 10^{-3}$	124.8	3.3
ВОК60	1.3	1.58	$4.15 \cdot 10^{-3}$	140.6	1.0 101
ЭИ-765	$7.6 \cdot 10^{-1}$	1.48	$6.75 \cdot 10^{-3}$	70.5	3.6
Медь	1.16	1.96	$2.75 \cdot 10^{-2}$	34.8	1.3 101

*" выбрано из условия сохранения целостности образца.

шлифования, приближая РПК к исходному, создает возможность зернам максимальной высоты выступания повышением алмазоудержания превратить процесс шлифования в независимый от свойств диспергированных частиц обрабатываемого материала, а следовательно, обеспечивает реализацию предпосылок достижения высоких технологических показателей при обработке самых различных материалов (табл.12).

Таблица 12

Характеристика обрабатываемости материалов шлифованием
с управлением РПК

Обрабатываемый материал	Повышение производительности, раз	Снижение относительного расхода алмазов, раз
АСПК	2,0 - 2,8	2,5 - 3,0
Гексанит-Р	2,0 - 2,5	2,5 - 3,0
КНТ-16	1,5 - 2,0	1,8 - 2,2
ВК20	1,3 - 1,5	1,5 - 1,7
ВОК60	1,4 - 1,6	1,3 - 1,5
Корундовая керамика	1,1 - 1,3	1,1 - 1,2
ЭИ-765	1,5 - 2,0	1,5 - 2,0
Медь	2,5 - 3,0	1,5 - 1,8

Эти данные служат доказательством универсальности принципа управления рельефом и профилем рабочей поверхности кругов как важного направления в расширении технологических возможностей алмазного шлифования.

Вместе с тем совершенствование электрофизических методов позволяет прогнозировать расширение возможностей изготовления сложнопрофильного инструмента из токопроводных СТПМ. Нами получены положительные результаты профилирования изделий из СТПМ электроэрозионной обработкой с помощью подвижного проволочного электрода с использованием системы ЧПУ, а также с помощью предварительно спрофилированного графитового электрода. В сочетании с достоинствами лазерного разделения заготовок из СТПМ эти методы уже сегодня достаточно удачно дополняют технологические возможности алмазного шлифования с непрерывным управлением РПК. Можно полагать, что комплексный подход к решению проблемы обрабатываемости способен обеспечить значительный прогресс в создании и реализации наукоемких технологий, в обеспечении принципиально нового уровня функциональных свойств изделий из СТПМ, в значительном расширении областей их эффективного применения.

В результате комплексных экспериментально-теоретических исследований решена крупная научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение, состоящая в создании научных основ обрабатываемости сверхтвердых поликристаллических материалов на базе расширения технологических возможностей алмазного шлифования путем целенаправленного предотвращения структурно-топографической приспособляемости рабочей поверхности кругов, управления ее параметрами в процессе обработки. Решение проблемы обрабатываемости сверхтвердых поликристаллических материалов имеет важное значение, т.к. речь идет о самых твердых в природе материалах.

1. Принципиальной отличительной особенностью процесса алмазного шлифования СТПМ является отсутствие требуемого теорией резания превышения твердости материала инструмента над твердостью обрабатываемого материала, что потребовало выработки новых подходов, базирующихся на физическом представлении о том, что съем шлифуемого СТПМ осуществляется не в результате внедрения в него алмазных зерен и их относительного перемещения, а преимущественно вследствие хрупкого микроразрушения в процессе массового высокоскоростного воздействия субмикроромок алмазных зерен круга, а также важной роли процессов взаимного микроразрушения СТПМ и зерен в единой системе "обрабатываемый материал - алмазное зерно - связка круга".

2. Доказано, что экспериментально установленное аномально быстрое изменение выходных показателей шлифования, трансформация физических явлений в зоне резания и снижение исходных режущих свойств алмазных кругов до уровня экономически не целесообразных являются результатом структурно-топографической приспособляемости РПК, прежде всего изменения высоты выступания и топографии поверхности алмазных зерен. Это позволило предложить методологию управления режущими свойствами кругов в процессе шлифования СТПМ, базирующуюся на выборе оптимальных характеристик инструмента и режимов резания, формировании и поддержании развитости субмикрорельефа алмазных зерен путем дозирования разрушающего воздействия на связку, направленного на предотвращение структурной и топографической приспособляемости РПК и стабилизацию оптимальных выходных показателей.

3. На основании экспериментально-аналитического изучения разрушения элементов системы "СТПМ - алмазное зерно - связка", проведенного корреляционного анализа тесноты связи параметров рельефа алмазного круга с физическими характеристиками, исследования переходного и установившегося периода шлифования выявлено определяющее влияние высоты

выступления зерен на интенсивность их износа (разрушения), на интенсивность съема шлифуемого СПМ, на скорость проявления структурно-топографической приспособляемости.

Для стабилизации оптимальных параметров режущего рельефа и оптимальных выходных показателей необходимо удалять связку со скоростью, равной скорости размерного износа зерен. При неизменных режимах шлифования только увеличением высоты выступления зерен от 5 до 35 мкм можно в 20-25 раз повысить производительность и в 10-12 раз снизить удельный расход обработки АСПК и АСБ.

4. Принудительное удаление связки может осуществляться различными по природе способами - механическим, электрохимическим, электроэрозионным, комбинированным, однако исследования выявили преимущества электрохимического, которые проявляются в избирательности его воздействия (токопроводная связка), широким диапазоном интенсивности, неповреждаемостью алмазных зерен, простотой реализации.

5. Предложенные принципиальные электрические и структурные схемы процессов шлифования с непрерывным управлением режущей поверхностью кругов как единой системы позволяют дифференцировать роль явлений, протекающих в зоне шлифования и управления, и изыскивать возможности усиления или ослабления их роли в снятии шлифуемых СПМ и восстановлении режущего рельефа до исходного или оптимизированного по какому-либо выходному показателю, и на этой основе разрабатывать способы шлифования, соответствующие свойствам, структуре и химическому составу обрабатываемого материала.

6. Предложены способы управления рельефом РПК и ее продольным и поперечным профилем путем обеспечения неодинаковой интенсивности анодных процессов на различных участках связки за счет регулирования электрических режимов подачи тока через электрически изолированные друг от друга участки катода. Изучена податливость металлических связок электрохимическому воздействию. Стабилизация рельефа и профиля РПК позволяют эффективно обрабатывать СПМ и др. материалы алмазными кругами до полного исчерпания их ресурса.

7. В условиях шлифования СПМ с управлением РПК роль режимов шлифования, характеристики кругов, площади обработки др. от продолжительности работы круга не зависят. Повышение производительности обработки достигается уменьшением зернистости, увеличением скорости круга и нормального давления, а при снижении концентрации от 200 до 25 % производительность не уменьшается. Удельный расход увеличивается с ростом зернистости, уменьшением скорости, снижением нормального давления, с ростом концентрации. Снижение шероховатости и обработанной поверхно-

Рекомендуемые режимы обработки СТПМ

Обрабатываемый материал		Оптимизируемый параметр	Скорость шлифования V , м/с	Продольная подача S_p , мм/мин	Нормальное давление P , Н/см ²	Величина тока в цепи управления I, A	Марка алмазных зерен	Круг		
								концентрация, %	зернистость	связка
Группа I	АСПК	Q_{max}	30-35	1,0	2,0-2,5	80-100	АС6	25	80/63	М1-01
		$R_{z min}$	35	1-1,5	3,0	50	АС6	50	50/40	М1-01
		$S_y min$	30-35	1,0	2,0-2,5	50-80	АС6	25	80/63	М1-01
	АСБ	Q_{max}	30-35	1,0	1,5-2,0	60-80	АС6	25	100/80	М1-01
		$R_{z min}$	35	1,5	3,0	50	АС32	50	50/40	М1-01
		$S_y min$	30-35	1,0	1,5-2,0	50-60	АС6	25	100/80	М1-01
Группа II	Эльбор-Р	Q_{max}	35-40	1,0-2,0	1,0-1,5	50	АС6	50	160/125	М1-01
		$R_{z min}$	40	1,0-1,5	2,0	30	АС32	100	50/40	М1-01
		$S_y min$	35-40	1,0-2,0	1,0-1,5	40	АС6	50	160/125	М1-01
	Гексанит-Р	Q_{max}	35-40	1,0-2,0	1,0-1,5	50	АС6	50	125/100	М1-01
		$R_{z min}$	40	1,0-1,5	2,0	30	АС32	100	50/40	М1-01
		$S_y min$	35-40	1,0-2,0	1,0-1,5	40	АС6	50	125/100	М1-01
Группа IV	ДАП Диамет	Q_{max}	35-40	1,0-1,5	1,5-2,0	60-80	АС6	25	125/100	М1-01
		$R_{z min}$	40	1,0-1,5	3,0	50	АС32	50	50/40	М1-01
		$S_y min$	35-40	1,0	1,5-2,0	40	АС6	25	125/100	М1-01
Группа V	ДПНБ	Q_{max}	35-40	1,0-2,0	1,0-1,5	50	АС6	50	125/100	М1-01
		$R_{z min}$	40	0,8-1,0	1,5	20	АС32	100	50/40	М1-01
		$S_y min$	35-40	1,0-2,0	1,0-1,5	40	АС6	50	125/100	М1-01

сти обеспечивается увеличением зернистости, концентрации, скорости круга, нормального давления. Оптимизация РПК по необходимому выходному показателю позволяет повысить производительность шлифования СТПМ в 2 - 3 раза, снизить удельный расход алмазов в 3 - 4 раза, существенно снизить себестоимость обработки с учетом исключения или резкого уменьшения брака. Рекомендации по выбору оптимальных условий шлифования различных СТПМ приведены в табл. 13.

8. Высокая энергоемкость процесса шлифования СТПМ определяет важную роль сил и тепловых явлений, что отражается на выходных показателях и прежде всего качестве и функциональных свойствах. Стабилизация оптимального рельефа РПК управлением на порядок снижает силы резания, в 1,3 - 1,6 раза снижает максимальные средние температуры шлифуемых поверхностей и позволяет надежно обеспечивать условия бездефектной обработки по силовому и температурному критерию.

9. Доказана универсальность принципа управления рельефом и профилем РПК в расширении технологических возможностей алмазного шлифования, т.к. его реализация обеспечивает повышение эффективности обработки материалов, существенно различающихся по химсоставу, структуре, физико-механическим свойствам. При этом назначение и механизмы влияния управления на физическую природу явлений в зоне шлифования не одинаковы, например, для вязких и хрупких, мягких и твердых материалов. Эти достоинства принципа управления РПК усиливаются при повышении прочности алмазоудержания связки. Поэтому способы шлифования с непрерывным комплексным управлением рельефом, продольным и поперечным профилем РПК, разработанные применительно к обработке особой группы СТПМ, могут успешно применяться при шлифовании широкой гаммы материалов - от меди и жаропрочных сталей до керамики и сверхтвердых материалов.

10. Предложенные новые принципы исследования процесса шлифования с управлением РПК позволяют усилить методический арсенал исследователей обрабатываемости различных материалов, работоспособности алмазных кругов, открывают широкие возможности в разработке новых процессов обработки связанным абразивом, в создании инструментов на токопроводных связках с применением нетрадиционных абразивов.

Основные результаты работы отражены в публикациях:

1. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. Х., Вища школа. 1980. 192 с.
2. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. Х.: Вища школа. 1985. 184 с.
3. Лезвийный инструмент из сверхтвердых материалов. Справочник (в

соавт.). К., Техніка. 1988. 118 с.

4. Основы алмазного шлифования / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб и др. К.: Техніка. 1978. 192 с.

5. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М.Ф. Семко, В.А. Залого, А.Ф. Раб, А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков. К., 1979. 232 с.

6. Грабченко А.И., Муковоз Ю.А. Новые виды лезвийного инструмента из сверхтвердых материалов // Общ-во "Знание" УССР. К., 1979. 23 с.

7. Общемашиностроительные нормативы режимов резания, норм износа и расхода резцов, сверл, фрез при обработке неметаллических конструкционных материалов. М., НИИМаш. 1982. 144 с.

8. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование осотвердых синтетических поликристаллов АСБ и АСПК // Резание и инструмент. 1976. Вып. 16. С.13-16.

9. Грабченко А.И., Ходоревский М.Г., Никитюк А.Ф. О металлической фазе в поликристаллах алмазов АСБ и АСПК // Резание и инструмент. 1976. Вып. 16. С.78-79.

10. Грабченко А.И. Некоторые вопросы обрабатываемости синтетических сверхтвердых поликристаллов // Резание и инструмент. 1977. Вып. 17. С.109-113.

11. Оборудование и технология массового производства инструмента из сверхтвердых поликристаллических материалов (СТП) / В.П. Барабан, Л.Д. Гламазда, А.И. Грабченко и др. // Тез. докл. всесоюз. конф.: Инструмент, порошки и пасты из синтетических сверхтвердых материалов. Новое в теории и практике создания и применения синтетических сверхтвердых материалов в народном хозяйстве. К., 1977. С.3-11.

12. Грабченко А.И. Хрупкое микроразрушение синтетических поликристаллов алмаза в процессе шлифования // Резание и инструмент. 1978. Вып. 19. С.134-140.

13. Грабченко А.И. О микроразрушении сверхтвердых поликристаллов в процессе алмазного шлифования // Резание и инструмент. 1978. Вып. 20. С.3-9.

14. Грабченко А.И., Алексеев К.М. Вопросы механики микроразрушения синтетических сверхтвердых поликристаллов при алмазном шлифовании // Сверхтвердые материалы. 1979. № 2. С.20-24.

15. Грабченко А.И. К вопросу технологического обеспечения качества изделий из поликристаллических сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. 1979. № 3. С.50-53.

16. Грабченко А.И. Управление режущей поверхностью алмазных кругов в процессе шлифования с целью повышения эффективности их исполь-

зования // Резание и инструмент. 1980. Вып. 23. С.85-95.

17. Влияние рельефа алмазного круга на процесс шлифования сверхтвердых поликристаллов / А.И. Грабченко, В.В. Русанов, В.А. Федорович, Е.В. Островерх // Сверхтвердые материалы. 1980. Вып. 1. С.52-55.

18. Грабченко А.И. Особенности алмазного шлифования сверхтвердых материалов совместно со сталью // Резание и инструмент. 1980. Вып. 24. С.15-27.

19. Грабченко А.И., Русанов В.В. Стенд и методика комплексного исследования алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Резание и инструмент. 1980. Вып. 24. С.68-74.

20. Грабченко А.И. Динамика явлений в зоне резания и выходных показателей при алмажном шлифовании сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. 1980. 6. С.55-60.

21. Грабченко А.И. О расширении технологических возможностей алмазного шлифования // Резание и инструмент. 1981. Вып. 26. С.36-39.

22. Грабченко А.И., Парсегов С.В., Пыжов И.Н. Выбор рационального метода обработки эльбора-Р в условиях массового производства // Алмазы и сверхтвердые материалы. М. 1981. Вып. 8. С.2-4.

23. Грабченко А.И. Физические и технологические закономерности алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Матер. V Междунар. науч.-техн. конф. по инстр. и инстр. матер. Мишкольц, ВНР. 1982. С. П.18/1-2.18/6 (венгер.).

24. Грабченко А.И., Пыжов И.Н. Повышение эффективности алмазного шлифования СТМ в режиме самозатачивания // Сверхтвердые материалы. 1983. Вып. 5. С.34-38.

25. Грабченко А.И., Федорович В.А., Образков Б.В. Роль концентрации алмазов в круге при шлифовании поликристаллов сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. 1984. Вып. 1. С.49-52.

26. Грабченко А.И., Кононенко В.И., Пупань Л.И. О переходной зоне двухслойных сверхтвердых композиционных материалов // Резание и инструмент. 1987. Вып. 38. С.52-58.

27. Электрохимическое формообразование поперечного профиля рельефа рабочей поверхности алмазных кругов в процессе заточки лезвийного инструмента / А.И. Грабченко, В.Ф. Дрожин, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович // Матер. VI Междунар. науч.-техн. конф. по инстр. и инстр. матер. Мишкольц, ВНР. 1985 (венгер.).

28. Grabtschenko A.I., Zubar W.P., Grej K. Vergleich der Arbeitsfähigkeit von Meißeln aus Bornitriden verschiedener Modifikationen. - Wiss. Zeitschrift der TUM 29 (1985) H.8. S.43-44.

29. Роль тепловых явлений в алмажном шлифовании сверхтвердых по-

ликристаллов / А.И. Грабченко, Л. Фридрих, В.П. Барабан, Е.В. Островерх // Матер. VI Междунар. науч.-техн. конф. по инстр. и инстр. матер. Мишкольц, ВНР. 1985. С.93-100 (венгер.).

30. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов и управление рельефом круга / А.И. Грабченко, В.А. Федорович, Н.Ф. Наконечный, Л. Грибовски, О. Сабо, Ш. Веконь // Опыт сотрудничества кафедр 1964-1986. Мишкольц, ВНР. 1986. С.102-111.

31. Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Доброскок В.Л. Схемы непрерывного управления рельефом кругов в процессе алмазного шлифования // Резание и инструмент. 1986. Вып. 35. С.57-63.

32. Физические явления процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов и стойкость резцов / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, Е.В. Островерх, Л. Фридрих / Опыт сотрудничества кафедр 1964-1986. Мишкольц, ВНР. 1986. С.90-101 (венгер.).

33. Определение теплового состояния сверхтвердых поликристаллов в процессе их обработки / Ю.М. Мацевитый, А.И. Грабченко, С.Ф. Лушпенко, Е.В. Островерх // Пробл. машиностроения. 1987. Вып. 28. С.55-60.

34. Грабченко А.И., Островерх Е.В., Фореро Г. Исследование тепловых явлений при шлифовании сверхтвердых инструментальных материалов. Papers VII-th. International conference and Exhibition on tools, Miskolc, 1989, p.245-251.

35. Грабченко А.И. Прогрессивные технологические процессы в изготовлении сверхтвердого инструмента. - Национальная научно-техническая конференция: Международно участие "Технологичны процессы и оборудоване за ефективно използваване на металните материали". Албена. Болгария. 1989. С.37-41 (болг.).

36. Грабченко А.И. Обеспечение устойчивости процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов и стабилизация его выходных параметров // Проблемы резания материалов в современных технологических процессах: Тез. докл. междунар. науч.-техн. сем. X., 1991. С.80-86.

37. Грабченко А.И. Некоторые аспекты проблемы высоких технологий // Высокие технологии в машиностроении: Тез. докл. междунар. науч.-техн. сем. Интерпартнер-92. X., 1992. С.25-29.

38. Грабченко А.И., Вerezуб Н.В., Островерх Е.В. Прогнозирование качества поверхностного слоя материалов методом имитационного моделирования. Influence of Production Engineering on state of the Surface layer-sl 93 2-th. International Techno-Scientific Conference. Gorzow weklubniewice, 1993. p.409-410.

39. Грабченко А.И. Рабочие процессы высоких технологий и функциональные свойства изделий // Резание и инструмент. Матер. междунар.

науч.-техн. сем.: Высокие технологии в машиностроении - достижение нового уровня. Интерпартнер-93. X., 1993. Вып. 47. С.61-64.

40. Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Магазеев М.Г. Методика проведения расчетов при создании сложнопрофильных инструментов из сверхтвердых материалов на эрозионных станках с ЧПУ // Компьютер: наука, техника, технология, здоровье: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Micro-CAD System-93. Харьков-Мишкольц. 1993. С.61-63.

41. Грабченко А.И., Вerezub Н.В., Хавин В.Л. Устойчивость рабочих процессов в технологических системах при реализации высоких технологий. Borsodi Muszaki gozdasagi elet. Miskolc-Budapest, 1994. p.4-5, 156-164.

42. Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Магазеев М.Г., Горбунов С.Н. Диагностирование обрабатываемости поликристаллов алмаза электроэрозионным методом // Высокие технологии в машиностроении: моделирование, оптимизация, диагностика. Интерпартнер-94: Матер. междунар. науч.-техн. сем. X., с.47-50.

43. Grabchenko A.I., Verezub N.V., Dudas I, Horvath M. High Technologies in manufacture engineering-International conference Results of the Scientific cooperation between the Politechnical University of Kharkov and University of Miskolc. Miskolc. 1994. p.31-36. (англ):

44. Грабченко А.И., Алексеев К.М., Федорович В.А. Физическое и математическое моделирование в исследованиях обрабатываемости сверхтвердых материалов // Резание и инструмент. 1995. Вып. 49. С.18-24.

45. Грабченко А.И., Островерх Е.В. Теплофизические исследования процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов: Micro-CAD-95. International Computer Science Conference, February 23, Miskolc 1995. p.7-11 (венгер.).

46. Авторские свидетельства на способы шлифования: а.с. №№ 1669690, 916211, 1220739, 1187969, 1557818, 1484605, 1309425, 1324826, 1300756, 1284751, 1355460, 1085146, 1347289, 1120582, 1006169.

47. Авторские свидетельства на сверхтвердые инструменты: а.с. №№ 1834104, 1834105, 1764833, 1743830, 1117982, 1148761, 1220441, 60-7673.

46. Авторские свидетельства на способы правки алмазных кругов а.с. №№ 621523, 1171242, 1288003, 1355460, 1352768, 1239957, 1256938, 1484508, 1547980, 1454592, 1103976, 1103975, 1237335, 1009685.

47. Патент Швеции № 8803505-5 от 03.10.88 г.

48. Патент Швейцарии № 677894 от 27.09.88 г.

49. Выложенная заявка ФРГ NDE 3835166A1 от 19.04.90 г.

Грабченко

УДК 621.922.025. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов.- Диссертация в форме научного доклада на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.01 - Процессы механической обработки, станки и инструмент. Грабченко Анатолий Иванович, Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1995 год, 59 с.

Содержит обобщение 200 публикаций по результатам теоретических и экспериментальных исследований, представляющих собой научные основы обрабатываемости сверхтвердых поликристаллических материалов, разработанную концепцию и методологию создания высокоэффективных процессов алмазного шлифования на базе управления рабочей поверхностью кругов. Реализована на машино- и приборостроительных заводах, в учебном процессе вуза.

Ключевые слова: сверхтвердые материалы, алмазное шлифование, управление рельефом, оптимизация.

The scientific basis of diamond grinding of superhard polycrystalline materials. The thesis is submitted in the scientific paper for D. Sc. degree in engineering on speciality 05.03.01 - Processes of mechanical treatment, machines and tool. Grabchenko Anatolij Ivanovich, Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1995, 59 p.

Two hundred papers have been defended and presented. The scientific basis of superhard polycrystalline materials processing, conception and methodology of high effectiveness of this process by means of grinding wheels surface control are the result of theoretical and experimental research. The work has been realized in industry and education.

Подписано к печати 23.05.95 г. Формат 60x84 1/16. Бумага тип. № 2.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,75. Уч.-изд. л. 2,7.
Тираж 120. Зак. 171.

Харьковский государственный политехнический университет.
310002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21

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

448928

AB 32.577