

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Матюха Петр Григорьевич

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АЛМАЗНОГО
ШЛИФОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИИ НА РАБОЧУЮ
ПОВЕРХНОСТЬ КРУГА

Специальность 05.03.01 - Процессы механической обработки,
станки и инструмент

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Харьков - 1996

Диссертация является рукописью.

АВ 35.510

Работа выполнена на кафедре "Металлорежущие станки и инструменты" Донецкого государственного технического университета.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00759947 (+)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Новоселов Юрий Константинович

доктор технических наук, профессор
Грабченко Анатолий Иванович

доктор технических наук, профессор
Кальченко Виталий Иванович

Ведущая организация - государственное предприятие "Завод
им. Малышева", г.Харьков

Защита состоится "24" октября 1996 г. в 1430 на заседании
специализированного ученого совета Д 02.09.01 в Харьковском госу-
дарственном политехническом университете по адресу: 310002,
г.Харьков, МСП, ул. Фрунзе, 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского
государственного политехнического университета.

Автореферат разослан "03" сентября 1996 г.

Ученый секретарь специализированного
ученого совета

Узунян М.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Выпуск конкурентоспособной машиностроительной продукции неразрывно связан с резким подъемом технического уровня выпускаемых машин, увеличением надежности и долговечности в эксплуатации, повышением их точности. Решение этих задач возможно за счет применения материалов повышенной прочности и износостойкости, создания нетрадиционных способов обработки, отвечающих уровню высоких технологий.

В настоящее время проблема высокопроизводительной обработки труднообрабатываемых материалов успешно решается с помощью алмазного шлифования с одновременным электрофизикохимическим воздействием на рабочую поверхность круга (РПК), обеспечивающим высокую режущую способность кругов на металлической связке.

Вместе с тем отсутствие научных основ, базирующихся на универсальном принципе стабилизации выходных технологических показателей процесса с помощью управляющих воздействий на РПК, сдерживает внедрение в производство процесса алмазного шлифования широко используемых в промышленности высоколегированных, быстрорежущих сталей, титановых и твердых сплавов, что придает решаемой проблеме не только научную актуальность, но и важное народнохозяйственное значение.

Исследования проводились автором на кафедре "Металлорежущие станки и инструменты" Донецкого государственного технического университета по госбюджетной тематике Минобразования Украины. Ряд основных разделов выполнялся по Общесоюзным научно-техническим программам ГКНТ СССР: 0.16.05, основание — постановление № 415 от 18.II.76; 05.01.046, основание — постановление 134 от 19.I2.1985 г.

Цель и основные задачи работы

Целью работы является повышение эффективности и расширение технологических возможностей алмазного шлифования труднообрабатываемых

материалов путем стабилизации выходных технологических показателей процесса обработки с помощью управляющих воздействий на РПК.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

1. Разработана структура системы шлифования с управлением параметрами РПК, вскрыты внутренние связи при функционировании ее подсистем - резания и управляющих воздействий.

2. Описаны закономерности эволюции подсистемы резания во времени с целью определения времени формирования критических параметров РПК по заданным техническим ограничениям.

3. Определен объем связки, подлежащий удалению в процессе управляющих воздействий, необходимый и достаточный для перевода закрепленных в связке алмазных зерен из устойчивого состояния в неустойчивое.

4. Определена интенсивность удаления связки в процессе управляющих воздействий, необходимая для поддержания параметров РПК в квазистационарном состоянии.

5. Установлены закономерности влияния режимов электроэрозионных управляющих воздействий на удаляемый объем связки.

6. Разработаны методики поиска оптимальных режимов шлифования труднообрабатываемых материалов с использованием управляющих воздействий на РПК электроэрозионным способом.

Идея работы заключается в выявлении закономерностей формирования критических параметров РПК в результате эволюции подсистемы резания во времени и использовании этих закономерностей для определения необходимой интенсивности удаления связки в процессе управляющих воздействий, что исключает образование критических параметров РПК при функционировании системы в целом и обеспечивает стабильность выходных технологических показателей обработки.

Автор защищает:

1. Разработанные научные основы стабилизации выходных технологических показателей шлифования труднообрабатываемых материалов, базирующиеся на равенстве времени перевода алмазных зерен, закрепленных в связке, из устойчивого состояния в неустойчивое с помощью управляющих воздействий на РПК, и времени формирования критических параметров РПК в результате осуществления зернами процесса резания.

2. Положение о рабочей поверхности круга в процессе обработки как о сложной системе, изменяющей свои параметры в зависимости от условий обработки, и математическую модель РПК в процессе шлифования.

3. Методику учета влияния основной особенности абразивного инструмента - прерывистости режущей кромки - на параметры поперечного сечения единичных срезов.

4. Положение о связи максимума интенсивности электроэрозионного удаления связки с моментом появления импульсов частичного короткого замыкания и новые способы повышения интенсивности удаления алмазоносного слоя.

5. Новый способ поиска оптимальных режимов шлифования со стабилизацией параметров РПК посредством управляющих электроэрозионных воздействий, основанный на идентичности себестоимости обработки, осуществляемой по кинематически аналогичным упругой и жесткой схемам шлифования.

Декларация о личном вкладе автора в разработку научных положений, которые выносятся на защиту

В работе выдвинуты, обоснованы и подтверждены следующие научные положения:

1. Время перевода закрепленных в связке зерен с критическими размерами площадок контакта из устойчивого состояния в неустойчи-

вое в результате управляющих воздействий на РПК зависит от времени формирования критических параметров РПК в процессе функционирования подсистемы резания.

2. Количественные характеристики рабочей поверхности математической модели шлифовального круга в процессе обработки зависят от параметров рабочей поверхности неподвижного круга и режимов шлифования.

3. В условиях прерывистости режущей кромки на РПК размеры единичных срезов, кроме режимов шлифования и параметров рабочей поверхности круга, зависят от параметров шероховатости на поверхности резания.

4. Максимум производительности удаления связки связан с появлением единичных электрических импульсов частичного короткого замыкания (ЧКЗ).

5. Себестоимость обработки одинакова, если аналогичный объем обрабатываемого материала удаляется по кинематически аналогичным упругой и жесткой схемам за идентичное количество проходов.

Все приведенные научные положения выдвинуты, обоснованы и подтверждены лично автором за исключением экспериментальных исследований по 4-ому и 5-ому положениям, которые были выполнены под руководством автора.

Научная новизна работы состоит в том, что на базе выдвинутых научных положений впервые:

- сформулирован основной принцип стабилизации выходных показателей шлифования, базирующийся на равенстве времени принудительного удаления объема связки в процессе управляющих воздействий, необходимого и достаточного для перевода закрепленных в связке зерен с критическими размерами площадок контакта в неустойчивое состояние, и времени формирования критических параметров РПК;

- учтено влияние прерывистости режущей кромки абразивного инструмента на количественные характеристики РПК в процессе шлифования и размеры единичных срезов;
- аналитически описана эволюция подсистемы резания во времени и определено время формирования критических параметров РПК;
- определен объем связки, подлежащий удалению в процессе управляющих воздействий и необходимый для перевода закрепленных в связке зерен в неустойчивое состояние;
- установлена связь максимума интенсивности удаления связки электроэрозионным способом с моментом появления импульсов ЧКЗ;
- разработан экспресс-метод определения оптимальных режимов шлифования со стабилизацией параметров РПК, основанный на идентичности себестоимости обработки, осуществляемой по кинематически аналогичным упругой и жесткой схемам.

Методы исследований. Работа выполнена на основе фундаментальных положений теории резания материалов с использованием теоретических и экспериментальных методов. Ряд исследований (расчет форм и размеров единичных срезов, определение параметров, описывающих рельеф рабочей поверхности круга, сил резания на единичном зерне и шлифовальном круге, прочности закрепления зерна в связке, расчет необходимой интенсивности удаления связки в процессе управляющих воздействий и др.) выполнен теоретически с привлечением современного математического аппарата, положений теории вероятности, механики резания, теории пластичности. Исследование законов распределения разновысотности зерен на РПК, сформированной электроэрозионным способом, и влияние на них условий обработки, изучение связи интенсивности удаления связки с механическими и электрическими режимами взаимодействия электрода-инструмента (ЭИ) с поверхностью круга, а также влияние способов подвода технологического тока на выходные технологические показатели процес-

са шлифования с управляющими воздействиями на РПК и др. выполнены с привлечением эмпирических методов, основанных на положениях теории вероятности и математической статистики. Для исследования форм единичных срезов применяется математическое моделирование процесса шлифования с использованием ЭВМ.

При проведении экспериментальных исследований применялись оригинальные методики и устройства (а.с. 775614, а.с. 1585666), современная аппаратура и приборы, рентгенографические методы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается сопоставлением результатов теоретических расчетов с данными, полученными экспериментально, проведением всестороннего анализа результатов экспериментов с использованием методов математической статистики, выполнением оценок погрешностей, вносимых принятыми упрощениями в теоретических моделях, а также погрешностей измерений применяемых устройств и приборов.

Теоретическая ценность работы
Впервые разработаны научные основы стабилизации выходных технологических показателей алмазного шлифования, базирующиеся на определении времени формирования критических параметров РПК при функционировании подсистемы резания и необходимой интенсивности удаления связки в процессе управляющих воздействий. Определены особенности и закономерности использования электроэрозионного способа воздействий для целей стабилизации выходных технологических показателей шлифования при обработке высоколегированных, быстрорежущих сталей, титановых и твердых сплавов.

Практическое значение исследований состоит в том, что найденные закономерности функционирования подсистем резания и управляющих воздействий позволяют разработать методики расчета механических режимов шлифования и управляющих воздействий, обеспе-

чивающих заданное качество шлифованной поверхности на протяжении всего времени обработки, минимальную себестоимость и повышение производительности шлифования; являются основой для разработки новых высокопроизводительных способов удаления связи при электроэрозионных воздействиях на РПК, а также способов шлифования труднообрабатываемых материалов; составляют банк данных для САПР технологического процесса шлифования со стабилизацией выходных показателей обработки с помощью управляющих воздействий на РПК.

Уровень реализации и внедрения результатов исследований

Результаты исследований использованы при разработке и внедрении на машиностроительных предприятиях технологических процессов бесцентрового алмазного шлифования крепежных деталей из титановых сплавов, глубинного бесцентрового шлифования прутков, твердосплавных и стальных деталей оснастки синтеза СТМ, инструментов, оснащенных твердым сплавом.

Ряд разработок используется в учебном процессе при обучении студентов специальности 7.09.02.03 в лекционных и лабораторных занятиях по курсу "Теория обработки материалов и тепловые процессы в технологических системах", в курсовом и дипломном проектировании.

Полученный по результатам внедрения и подтвержденный документами экономический эффект составляет 230 тыс. руб. в ценах 1985 г.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены, обсуждены и одобрены на: всесоюзной научно-технической конференции "Современные проблемы резания инструментами из сверхтвердых материалов", г. Харьков, 1981 г.; всесоюзной научно-технической конференции "Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических методов обработки", г. Москва, 1988 г.; республиканской научно-технической конференции "Прогрессивные методы обработки труднообрабатываемых материалов", г. Мариуполь, 1989 г.; международном научно-техническом семинаре

"Высокие технологии в машиностроении – достижение нового уровня", г. Харьков, 1993 г.; международной научно-технической конференции "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье", г. Харьков, Мишкольц, 1993 г.; международной научно-технической конференции "Оснастка-94", г. Киев, 1994 г.; международной научно-технической конференции "Применение колебаний в технологиях. Расчет и проектирование машин для реализации технологий", г. Винница, 1994 г.; научно-технической конференции "Новые технологии и системы обработки в машиностроении", г. Севастополь, 1994 г.; международном научно-техническом семинаре "Высокие технологии в машиностроении: моделирование, оптимизация, диагностика", г. Харьков, 1995 г.; международной научно-технической конференции "Прогрессивная техника и технологии машиностроения", г. Севастополь, 1995 г.

Диссертационная работа в целом рассмотрена и одобрена на заседаниях кафедр "Металлорежущие станки и инструменты" ДонГТУ и ЗГТУ, "Резание материалов и инструменты" ХПИУ, расширенном заседании департамента САПР СГТУ.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликована 71 печатная работа, в том числе одна монография и 11 авторских свидетельств.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из двух томов. Первый том содержит введение, 9 глав и общие выводы, второй – приложения. Диссертация изложена на 456 страницах машинописного текста, содержит 143 рисунка, 48 таблиц, список литературы из 297 наименований, 19 приложений на 169 страницах.

Структурно-логическая схема работы представлена на рис.1.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Для повышения эффективности алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов необходимо выполнение двух основных требо-

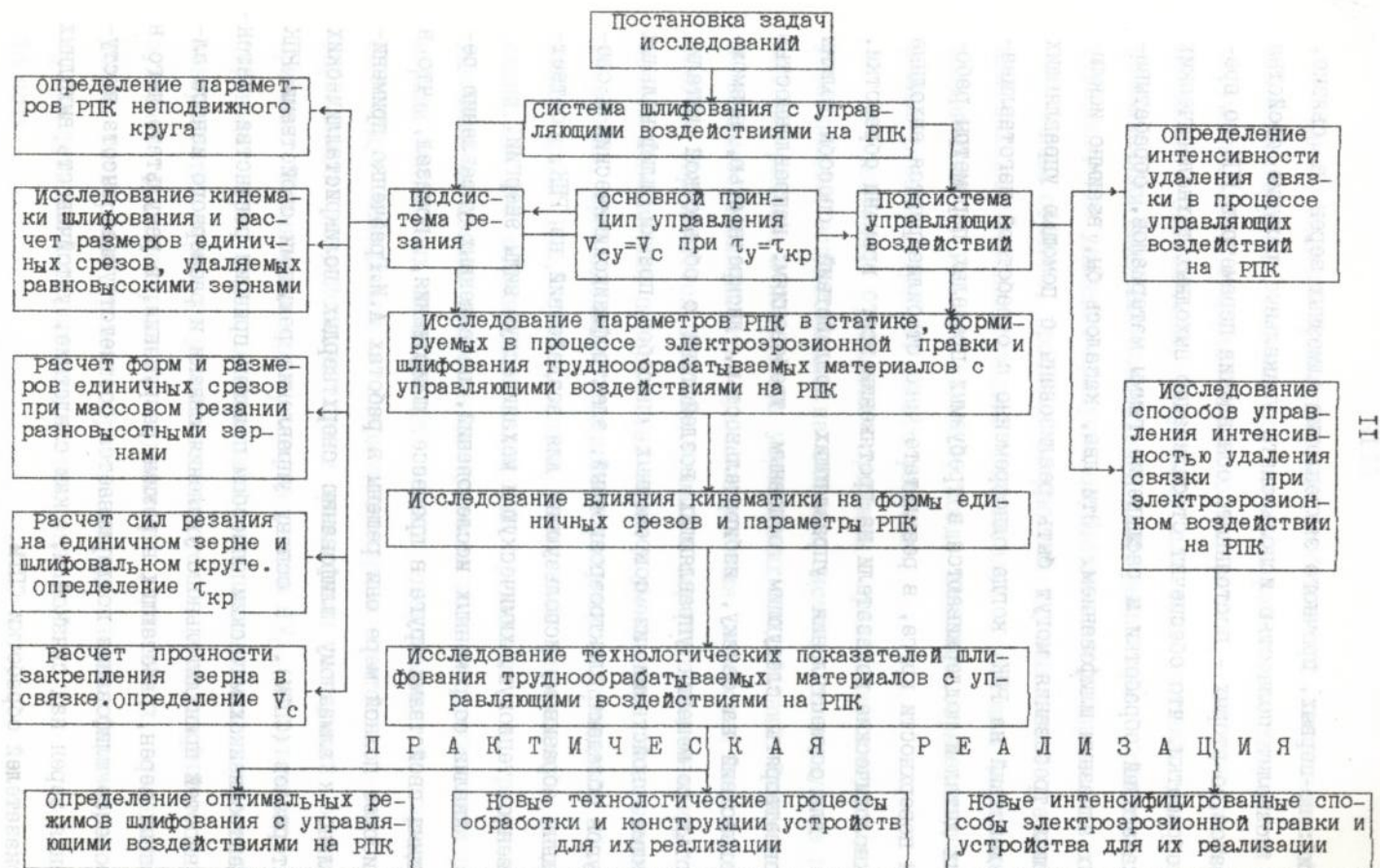


Рис.1 Структурно-логическая схема работы

ваний: во-первых, прочного закрепления алмазных зерен в связке, что позволит полностью использовать уникальные режущие свойства алмазов, во-вторых – постоянного обновления параметров РПК во время обработки, что обеспечит стабилизацию выходных технологических показателей обработки и расширение гаммы материалов, обрабатываемых алмазным шлифованием. Эти два, казалось бы, взаимно исключающих требования могут быть реализованы с помощью управляющих воздействий на РПК, когда одновременно с обработкой изготавливаемых деталей поддерживаются в требуемых пределах параметры рабочей поверхности круга, в результате чего стабилизируются выходные технологические показатели на протяжении всего времени обработки.

Для осуществления управляющих воздействий способы должны удовлетворять следующим основным требованиям: направленностью воздействий на связку, избирательностью, дискретностью, возможностью совмещения управляющих воздействий с обработкой детали. Такими свойствами из современных способов правки шлифовальных кругов обладают электроэрозионный, электрофизикохимический и свободным абразивом, использующие для воздействий на РПК, соответственно, тепловую, химическую и механическую виды энергии.

Анализ современных исследований, посвященных управлению режущими свойствами круга в процессе шлифования, показал, что в наиболее полной мере они решены в работах А.И.Грабченко применительно к алмазному шлифованию сверхтвердых поликристаллических материалов (СПТМ). В основу управления режущими свойствами РПК электрофизикохимическим способом положен принцип равенства интенсивностей принудительного удаления связки и размерного износа алмазных зерен, работающих в режиме разрушения, в результате чего в процессе шлифования поддерживается соответствующая высота выступания зерен над связкой и, как следствие, устойчивость выходных показателей обработки СПТМ.

Однако наличие принципиальных особенностей разрушения СПТМ алмазными зернами, которые обусловлены равенством твердостей инструментального и обрабатываемого материалов, не позволяет использовать зависимости, полученные для этих условий, для целей стабилизации выходных показателей шлифования при обработке материалов, где удаление припуска осуществляется резанием.

Таким образом, проблема разработки научных основ стабилизации выходных технологических показателей с помощью управляющих воздействий на РПК для условий, когда алмазные зерна работают в режиме резания, требует своего решения.

В контексте решаемой проблемы представим шлифование с управляющими воздействиями на РПК как систему, состоящую из подсистемы резания и подсистемы управляющих воздействий. Взаимосвязь и взаимообусловленность функционирования подсистем как единой системы определяется наличием прямых и обратных связей между процессом изнашивания поверхностей зерен и уменьшения разновысотности вершин, принадлежащим подсистеме резания, и процессом образования новой РПК, принадлежащим подсистеме управляющих воздействий. Так как образование новой РПК происходит в результате удаления из связки наиболее выступающих зерен с наибольшими размерами контактных площадок на задних поверхностях, то параметры РПК будут находиться в квазистационарном состоянии, если при управляющих воздействиях будет реализован следующий основной принцип: "Время удаления τ_y объема связки V_c , достаточного для перевода зерен с наибольшими размерами площадок износа на задних поверхностях зерен из устойчивого состояния в неустойчивое в результате функционирования подсистемы управляющих воздействий, должно быть равно времени образования критических параметров РПК τ_k при функционировании подсистемы резания."

То есть

$$V_{cy} = V_c \text{ при } \tau_y = \tau_k, \quad (1)$$

где V_{cy} — объем связки, удаляемый в процессе управляющих воздействий.

Разделив V_c на $\tau_{кр}$, получим требуемую интенсивность удаления связки в процессе управляющих воздействий, при которой параметры РПК будут находиться в квазистационарном состоянии:

$$\Pi = V_c / \tau_{кр}. \quad (2)$$

Время формирования критических параметров РПК $\tau_{кр}$ определим с помощью математических зависимостей, описывающих эволюцию подсистемы резания во время обработки. Для этих целей воспользуемся формулами для расчета составляющих сил резания. Как известно, силы резания зависят от параметров РПК и кинематики процесса, определяющих форму и размеры единичных срезов, физико-механических свойств обрабатываемых материалов и температурно-скоростных условий деформирования, времени обработки.

Для описания рабочей поверхности неподвижного круга будем использовать следующие параметры: размеры шаровых моделей зерен, расстояние между зернами на рабочей поверхности и в активной части РПК, размеры контактных площадок на задней поверхности зерна, функцию распределения разновысотности вершин $F(\Delta R)$ и объем межзеренного пространства рабочей поверхности.

Средний размер эквивалентного шара модели зерна

$$d = 6090 / \sqrt[3]{N_z}, \text{ мкм}, \quad (3)$$

где N_z — число зерен в навеске, равной одному карату.

Расстояние между зернами на рабочей поверхности круга с учетом влияния критической глубины заделки зерна в связке

$$S_{зп} = \frac{20}{3 \sqrt{\frac{N_z \cdot 4,4K}{100}}} \sqrt{\frac{d}{d-h_k}}, \text{ мм}, \quad (4)$$

здесь K — относительная концентрация алмазоносного слоя.

Экспериментальные исследования параметров РПК, формируемых в процессе шлифования труднообрабатываемых материалов и электроэрозионных воздействий, позволили установить, что форма алмазного зерна на рельефе, сформированном электроэрозионными воздействиями, может быть описана шаровой моделью. На расстоянии от вершины до 15 мкм, что соответствует оптимальной глубине шлифования при алмазно-искровом шлифовании (АИШ), отличие расчетной ширины модели от экспериментальной не превышает 20%, что вполне приемлемо для инженерных расчетов. Тем самым подтверждена правомочность использования шаровой модели при описании ряда параметров РПК.

Модель зерна в форме конуса с округленной вершиной предпочтительна для описания режущих выступов на зерне и рекомендуется при расчетах параметров шероховатости шлифованной поверхности.

Установлено, что расстояния между зернами на рабочей поверхности круга, рассчитанные по предложенной формуле (4) для различных состояний РПК, характеризующихся критической величиной заделки зерен в связке, практически совпадают с экспериментальными данными (табл. I).

Таблица I

Расстояние между алмазными зернами на рабочей поверхности шлифовальных кругов

Шлифовальный круг	Расстояние между зернами, мм			
	Рассчитанное по формуле (4)		Рассчитанное по методике А.К. Байкалова	Определенное эксперимен- тально
	$h_k = \frac{1}{2} d$	$h_k = \frac{1}{3} d$		
АС6 100/80-4-М1	0,37	0,32	0,18	0,34±0,038
АС6 160/125-4-М1	0,59	0,51	0,30	0,51±0,045
АС6 250/200-4-М1	0,84	0,73	0,42	0,71±0,065

Распределение размеров контактных площадок на задних поверхностях зерен при алмазном шлифовании высоколегированных, быстро-

режущих сталей, титановых и твердых сплавов описывается распределением Вейбулла, а влияние времени обработки на величину контактной площадки может быть аппроксимировано уравнением

$$l_3 = C_1 \tau^q. \quad (5)$$

После электроэрозионной правки, 15, 30, 45 мин шлифования разноразмерность зерен также описывается распределением Вейбулла. Функция распределения Вейбулла имеет вид

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x^m}{x_0^m}}, \quad x \geq 0,$$

где x_0 и m - параметры закона.

При исследованиях величин контактных площадок аргументом распределения Вейбулла вместо x будет являться l_3 , при исследованиях разноразмерности - ΔR .

С увеличением времени обработки параметры распределения разноразмерности при алмазном шлифовании постоянно изменяются. При алмазно-искровом шлифовании стабилизация параметров в основном наступает после 15 мин обработки. Количественные характеристики разноразмерности зерен при алмазном и алмазно-искровом шлифовании различны - выборочная дисперсия и средняя разноразмерность при АИШ превышают соответствующие характеристики при алмазном шлифовании.

Влияние времени шлифования на значение функции распределения Вейбулла предложено учитывать с помощью коэффициента K_τ

$$F(t_\Phi, \tau) = \left[1 - \exp \left(-\frac{t_\Phi^m}{x_0^m} \right) \right] K_\tau, \quad (6)$$

где x_0 , m - параметры распределения, описывающие разноразмерность зерен после правки;

$$K_\tau = A_1 \tau^{q_1}, \quad (7)$$

где τ - время шлифования;

A_1 , q_1 - эмпирические коэффициент и показатель степени.

Используя параметры закона Вейбулла, описывающего разноразмерное положение вершин зерен, можно определить расстояние между

зернами в активной части РПК

$$S_K = S_{3п} / \sqrt{F(t_\Phi)}, \text{ мм}, \quad (8)$$

где $F(t_\Phi)$ – вероятность попадания вершин зерен в активную часть РПК глубины t_Φ .

При расчете объема межзеренного пространства учет влияния разнорельефности на объем выступающих из связки шаровых сегментов (моделей зерен) был осуществлен с помощью разбивки высоты рельефа на слои толщиной ΔR (рис.2).

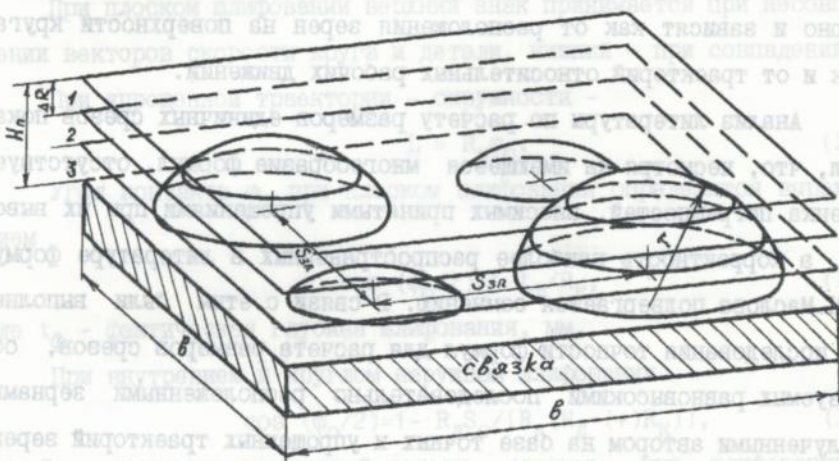


Рис.2. Модель участка рабочей поверхности круга

Тогда объем межзеренного пространства

$$V_{мп} = 10^{-3} f H_n - 10^{-9} \sum_{i=1}^N \frac{F(1\Delta R) f}{S_{3п}^2} \pi [H_n - (1-1)\Delta R]^2 \left(r - \frac{1}{3} [H_n - (1-1)\Delta R] \right). \quad (9)$$

где f – площадь участка рабочей поверхности, мм^2 ; H_n – высота рельефа рабочей поверхности, мкм ; ΔR – толщина слоев, на которые разбивается высота рельефа, мкм ; 1 – номер исследуемого слоя, $1 = 1, 2, 3 \dots N$; N – общее количество слоев; $F(1\Delta R)$ – вероятность попадания вершины зерна в 1-й слой; r – средний радиус шаровой модели зерна, мкм .

Объем межзеренного пространства на РПК при АИШ в 1,3-1,8 ра-

за превышает объем межзеренного пространства, формируемого в процессе алмазного шлифования, и составляет около 97% от общего объема режущего рельефа на кругах со 100%-ной относительной концентрацией, что является резервом повышения производительности обработки.

Зерна на рабочей поверхности круга, перемещаясь в процессе шлифования относительно поверхности детали в соответствии с кинематикой процесса, производят удаление обрабатываемого материала срезами, форма и размеры которых определяют нагрузку на единичное зерно и зависят как от расположения зерен на поверхности круга, так и от траекторий относительных рабочих движений.

Анализ литературы по расчету размеров единичных срезов показал, что, несмотря на имеющееся многообразие формул, отсутствует оценка погрешностей, вносимых принятыми упрощениями при их выводе, а корректность наиболее распространенных в литературе формул Е.Н.Маслова подвергается сомнению. В связи с этим были выполнены исследования точности формул для расчета размеров срезов, образуемых равновысокими последовательно расположенными зернами, полученными автором на базе точных и упрощенных траекторий зерен.

Формулы для расчета длины кривой контакта, полученные на базе точных траекторий относительных рабочих движений, имеют вид:

- при плоском шлифовании (траектория - трохоида)

$$L = R_k \left[\sqrt{1 + \left(\frac{V_d}{60V_k} \right)^2} \varphi_0 \pm \frac{V_d}{60V_k} \frac{\sin \varphi_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{V_d}{60V_k} \right)^2}} \right], \quad (10)$$

- при внутреннем и круглом наружном (траектории - удлиненные эпициклоида и гипоциклоида)

$$L = \sqrt{\left[(R_d - (+) R_k) + \left(\frac{S_{пр}}{2\pi} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{V_d R_k}{60V_k R_d} \right)^2 + R_k^2 \left(1 \pm \frac{V_d R_k}{60V_k R_d} \right)^2 \right] \varphi_0 \pm (\mp)}$$

$$\pm(\mp) \frac{(R_d - (+)R_k) \frac{V_d R_k^2}{60 V_k R_d} \left[1 \pm \frac{V_d R_k}{60 V_k R_d} \right] \sin \varphi_0}{\sqrt{\left[(R_d - (+)R_k) + \left[\frac{S_{пр}}{2\pi} \right]^2 \right] \left[\left(\frac{V_d R_k}{60 V_k R_d} \right)^2 + R_k^2 \left(1 \pm \frac{V_d R_k}{60 V_k R_d} \right)^2 \right]}}. \quad (II)$$

Здесь и далее знаки в скобках относятся к круглому наружному шлифованию. При внутреннем и круглом наружном шлифовании верхние знаки принимаются для случая вращения круга и детали в противоположном направлении, нижние - в одном направлении.

При плоском шлифовании верхний знак принимается при несовпадении векторов скорости круга и детали, нижний - при совпадении.

При упрощенной траектории - окружности -

$$L = R_k \varphi_0. \quad (I2)$$

Угол контакта φ_0 при плоском шлифовании определится выражением

$$\cos(\varphi_0/2) = 1 - t_{\phi}/R_k, \quad (I3)$$

где t_{ϕ} - фактическая глубина шлифования, мм.

При внутреннем и круглом наружном шлифовании

$$\cos(\varphi_0/2) = 1 - R_d S_0 / [R_k (R_d - (+)R_k)], \quad (I4)$$

где S_0 - величина поперечной подачи, мм/ход, при шлифовании с продольной подачей и мм/об при $S_{пр} = 0$.

На базе уравнений удлинненных эллипсы и гипотенузы формулы для расчета толщины запытообразного среза при внутреннем шлифовании имеют вид

$$a_{z \max} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}; \quad (I5)$$

здесь

$$\begin{cases} x_2 = H \cos t_{\phi(2)} + R_k \cos[(1 \pm t) \varphi_{k(2)} - \varepsilon], \\ y_2 = H \sin t_{\phi(2)} + R_k \sin[(1 \pm t) \varphi_{k(2)} - \varepsilon]. \end{cases}$$

Параметр $\varphi_{k(2)}$ находится в диапазоне, определяемом уравнением

$$\cos \varphi_{k(2)} a_2 = \cos \varphi_{k(1)} \cos \varepsilon + \sqrt{\cos^2 \varphi_{k(1)} (\cos^2 \varepsilon - 1) + \sin^2 \varepsilon},$$

и является корнем уравнения

$$x_1 \{ H \sin t \varphi_K + R_K (1 \pm t) \sin [(\varphi_K - \varepsilon) \pm t \varphi_K] \} - y_1 \{ H \cos t \varphi_K + R_K (1 \pm t) \cos [(\varphi_K - \varepsilon) \pm t \varphi_K] \} + H R_K \sin(\varphi_K - \varepsilon) = 0,$$

где $\varepsilon = l_{\Phi} / R_K$ - центральный угол между последовательно контактирующими зернами;

$$H = R_D - R_K + t_{\Phi}.$$

$$\begin{cases} x_1 = H \cos t \varphi_{K(1)} + R_K \cos (1 \pm t) \varphi_{K(1)}, \\ y_1 = H \sin t \varphi_{K(1)} + R_K \sin (1 \pm t) \varphi_{K(1)}. \end{cases}$$

Здесь

$$\cos \varphi_{K(1)} = \frac{2(R_D - R_K)(R_K - t_{\Phi}) - t_{\Phi}^2}{2R_K(R_D - R_K + t_{\Phi})}.$$

Для расчета максимальной толщины запытообразного среза были получены формулы и с использованием упрощенной траектории - окружности, учитывающие переносное движение круга.

При внутреннем и круглом наружном шлифовании

$$a_{z \max} R_K - \sqrt{R_D^2 + H^2 - 2R_D H \cos \left[\arccos \frac{(R_D(+)-R_K)(R_D(+)-t_{\Phi})}{R_D H} - \frac{V_D l_{\Phi} 180^\circ}{60 V_K R_D \pi} \right]}, \quad (16)$$

где $H = R_D(+)-R_K(-)+t_{\Phi}$,

при плоском -

$$a_{z \max} = R_K - \sqrt{\left(\frac{V_D l_{\Phi}}{60 V_K} \right)^2 + R_K^2 - 2 \frac{V_D l_{\Phi} R_K}{60 V_K} \sqrt{\frac{2 t_{\Phi}}{R_K}}}. \quad (17)$$

Как показал выполненный с помощью формул (II), (I5) анализ погрешности, в диапазоне $S_0 = 0,005-0,075$ мм/об, $V_K = 30-90$ м/с, $V_D = 30$ м/мин и $R_K/R_D = 6-24$ предложенные формулы (I2) и (I6), основанные на упрощенной траектории оказались проще, а их максимальная погрешность не превысила 5% для длины и 3% - для толщины среза, что дает право использовать их в дальнейших исследованиях.

В результате разновысотного расположения зерен на РПК, отсутствия сплошной режущей кромки, различных условий контактирова-

ния зерен в плоскостях, перпендикулярных оси круга и вектору скорости резания, параметры, характеризующие РПК в процессе шлифования, будут отличаться от параметров рабочей поверхности неподвижного круга, равно как и размеры единичных срезов, образуемых в условиях массового резания разновысотно расположенными зернами, от размеров срезов, образуемых разновысокими последовательно расположенными зернами.

Для исследования влияния кинематики шлифования на формы единичных срезов разработана специальная методика. Сущность методики состоит в последовательной проверке условий контакта зерен, попавших в сечение РПК плоскостью, перпендикулярной оси, с обрабатываемым материалом и определении формы среза с помощью соответствующих критериев по специально разработанной для ЭВМ программе.

Как показали расчеты, на формы среза, расстояние между контактирующими зернами и количество контактирующих зерен существенное влияние оказывают вид шлифования и режимы обработки, в особенности глубина резания. Из всех зерен, расположенных на рабочей поверхности и попавших в сечение плоскостью, перпендикулярной оси, участвуют в съеме материала 1,5-14,5% (при $t_{\phi}=0,01-0,04$ мм), а в формировании рельефа обработанной поверхности - 0,17-0,18%.

В зависимости от режимов шлифования фактическое окружное расстояние между контактирующими зернами в процессе шлифования $l_{\phi \text{ ок}}$ в 10-50 раз превышает расстояние между зернами, попавшими в активную часть РПК неподвижного круга.

Для расчета $l_{\phi \text{ ок}}$ по расстоянию между зернами в активной части рабочей поверхности неподвижного круга предложено использовать кинематический коэффициент K_d :

$$l_{\phi \text{ ок}} = S_k K_d \quad (18)$$

Как показали исследования, связь кинематического коэффициента с режимами обработки может быть представлена в виде прямоли-

нейной зависимости

$$K_D = \alpha + \beta \frac{60V_K}{V_D}, \quad (19)$$

где α - свободный член регрессии, β - коэффициент регрессии.

Влияние контактирования зерен боковой поверхностью на количество активных зерен и формы срезов с учетом их поперечного перекрытия определяется расчетом на ЭВМ по данным пространственного расположения зерен на РПК.

Расчет форм единичных срезов и количества контактирующих зерен основан на последовательном расчете координат точек пересечения прямых, моделирующих поверхность детали до обработки, с огибающей, образованной при движении поверхности шаровой модели режущего выступа зерна в соответствии с кинематикой шлифования.

Абсцисса точки пересечения огибающей k -го зерна с прямой (1j) определяется по формуле

$$X_K = R_K + \rho - \frac{(C\alpha_K + Y_{1j})^2}{(R_K + \rho)^2 \left[1 + \frac{C}{R_m} \right]^2}, \quad (20)$$

где R_K , α_K - полярные координаты центра сферы режущего выступа k -го зерна; Y_{1j} - ордината прямой 1j; ρ - радиус сечения сферы режущего выступа k -го зерна плоскостью $Z = Z_{1j}$; R_m - радиус шлифовального круга; C - параметр,

$$C = V_D R_m / V_K.$$

Как установлено, количество активных зерен в активной части РПК на работающем круге в 1,5-5 раз меньше, чем в активной части рабочей поверхности неподвижного круга, за счет эффекта "экранирования" при удалении припуска запятообразными срезами.

Количество активных зерен на единице рабочей поверхности работающего круга

$$Z_K(t_\Phi) = S_{зп}^{-2} F(t_\Phi) K_K, \quad (21)$$

где K_k - коэффициент контактирования, представляющий отношение количества активных зерен в процессе шлифования к количеству зерен, попавших в активную часть рабочей поверхности неподвижного круга.

Для выбора базовой формы единичных срезов при теоретических расчетах с учетом конкретных условий обработки предложен критерий, которым является отношение фактической глубины шлифования t_ϕ к высоте неровностей профиля шлифованной поверхности R_z . При $t_\phi/R_z \leq 1$ в основу всех расчетов должен быть положен сегментообразный срез, при $t_\phi/R_z > 1,5$ - запятообразный срез, за исключением расчета параметров шероховатости.

В результате отсутствия в шлифовальном круге сплошной режущей кромки связь подачи на врезание t с фактической глубиной резания неоднозначна. Если максимальная высота неровностей шлифованной поверхности $R_{\max}$ больше t , то

$$t_\phi = n t; \quad (22)$$

$$t_{\phi \text{ ср}} = \sum_{i=1}^n Z_{p(i)} (n-i+1) t / \sum_{i=1}^n Z_{p(i)}, \quad (23)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, R_{\max}/t$; $Z_{p(i)}$ - количество режущих зерен, попавших в i -е интервалы.

После того как рельеф шлифованной поверхности будет сформирован, максимальная глубина резания станет равна

$$t_{\phi \max} = R_{\max} + t \quad (24)$$

и сохранит свое значение при последующих проходах.

Если $t \geq R_{\max}$, окончательное формирование шлифованной поверхности происходит за один проход. В этом случае

$$t_\phi = t. \quad (25)$$

В связи с изложенным представляется правомочным и толщину единичных запятообразных срезов оценивать фактической толщиной среза, поскольку величина врезания зерном меньше максимальной вы-

соты неровностей профиля, сформированных на поверхности резания.

Для расчета высоты неровностей профиля поверхности резания разработана методика в основе которой лежит определение суммарной ширины срезов, образованных зернами, находящимися в малых слоях сечения детали, на которые разбиваются деталь и режущий объем круга. Критерием обработки поперечного сечения на поверхности резания является выполнение неравенства

$$B \cdot 10^3 > \sum_{i=1}^{z_c} b_i \geq 0,9 \cdot B \cdot 10^3, \quad (26)$$

где z_c - количество зерен, участвующих в формировании неровностей в поперечном сечении; b_i - ширина среза зерном, мкм; B - ширина шлифования, мм.

Ширина срезов от режущих зерен, вступивших в работу при перемещении исследуемого сечения из $N-1$ в N ,

$$b'_N = A E_N \sum_{i=1}^{N'} F(1\Delta R) (\sqrt{K_{d-N'+1}} - \sqrt{K_{d-N'}}) b[(N'-1+1)\Delta R], \quad (27)$$

где N' - номер исследуемого интервала, $N' = 1, 2, 3 \dots k_d$; 1 - номер интервалов, входящих в N' , $1=1, 2, 3 \dots N'$; k_d - общее количество интервалов; $F(1\Delta R)$ - вероятность попадания зерна в 1 -тый интервал; $b[(N'-1+1)\Delta R]$ - ширина среза на исследуемом интервале; ΔR - толщина интервала, мкм; $A = 60V_k \sqrt{2R_k \Delta R \cdot 10^{-3}} / (V_d S_{\text{эл}}^2)$ - при плоском шлифовании.

Вероятность появления единичных срезов

$$E_N = 1 - b_{N-1} \cdot 10^{-3}.$$

Суммарная ширина срезов в точке N с учетом обработки в предыдущих точках

$$b_N = b_{N-1} + b'_N. \quad (28)$$

Последовательно определяя по формуле (28) суммарную ширину срезов в точках дуги контакта, можно найти интервал и, соответственно, точку, на которых впервые выполняется неравенство (26).

В этом случае значение максимальной высоты неровностей $R_{\max}$ будет равно

$$R_{\max} = N' \Delta R, \quad (29)$$

где N' – номер исследуемого интервала, на котором произошла обработка исследуемого сечения по всей ширине.

Распределение наибольшей высоты неровностей профиля поверхности резания в различных точках дуги контакта детали со шлифовальным кругом приведена на рис.3.

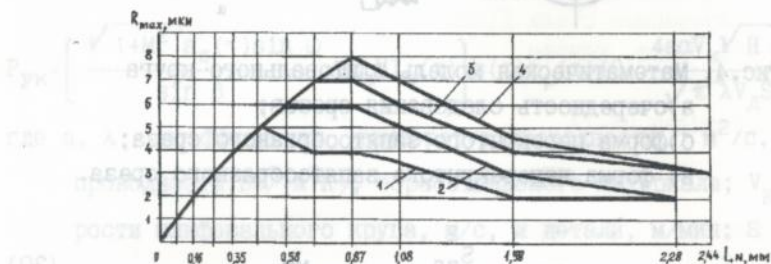


Рис.3. Влияние скорости детали на наибольшую высоту неровностей профиля поверхности резания ($V_K = 35 \text{ м/с}$).

Скорость детали V_d : 1–3 м/мин; 2–6 м/мин; 3–9 м/мин; 4–12 м/мин.

На базе выполненных исследований была разработана математическая модель круга, в которой расстояния между контактирующими зернами и форма среза определяются кинематическими условиями шлифования. Математическая модель шлифовального круга (рис.4) представляет собой совокупность статистически равнозначных сечений шлифовального круга плоскостью, перпендикулярной оси, в которых зерна распределены равномерно, а расстояния между ними равны среднему фактическому расстоянию $l_{\text{фок}}$. Статистически равнозначные сечения смещены вдоль оси на величину

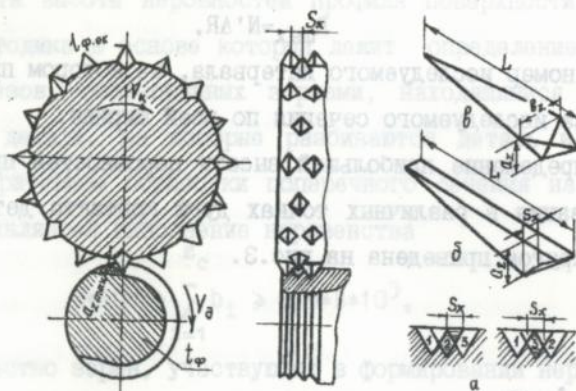


Рис.4. Математическая модель шлифовального круга
 а) очередность следования срезов;
 б) форма перекрытого запятообразного среза;
 в) форма неперекрытого запятообразного среза.

$$S_x = \frac{S_{зп}^2}{l_{ф.ок} F(t_{ф}) K_K}, \text{ мм.} \quad (30)$$

Размеры единичного среза в условиях массового резания разно-высотно расположенными зернами рассчитываются на базе математической модели шлифовального круга.

Длина единичного запятообразного среза рассчитывается по формуле (12), а толщину (в результате наличия на поверхности резания неровностей, превышающих максимальную толщину среза, удаляемого идущими вслед зернами) будем оценивать фактической толщиной среза

$$a_{zmax \phi} = \begin{cases} a_{zmax}, \text{ при } a_{zmax} > R_{max}; \\ a_{zmax} + R_{max}, \text{ при } a_{zmax} \leq R_{max}. \end{cases} \quad (31)$$

Ширина единичных срезов при отсутствии перекрытия в поперечном направлении может быть рассчитана по рекомендациям Е.Н. Маслова, если рабочий выступ состоит из сегментообразного и трапе-

цидального участков. При наличии поперечного перекрытия ширина среза равна S_x и определяется по формуле (30).

Для расчета составляющих сил резания, действующих на шлифовальный круг в момент времени τ , были получены следующие формулы:

$$P_{zk} = \frac{\left[\frac{\sqrt{1+M^2} a_z(\tau) \cos \omega}{\sin \beta} + k_3 M \mu l_z(\tau) \right] z_p(\tau) b(\tau) C}{1 + \left[\frac{\sqrt{1+M^2} a_z(\tau) \cos \omega}{\sin \beta} + k_3 M \mu l_z(\tau) \right] z_p(\tau) b(\tau) \frac{4\alpha a_0 v_k \sqrt{H}}{\lambda v_d S \sqrt{\pi}}}}; \quad (32)$$

$$P_{yk} = \left[\frac{\sqrt{1+M^2} a_z(\tau) \sin \omega}{\sin \beta} + k_3 M l_z(\tau) \right] b(\tau) z_p(\tau) \left(C - \frac{4\alpha a_0 v_k \sqrt{H} \alpha}{\sqrt{\pi} \lambda v_d S} P_{zk} \right), \quad (33)$$

где a , λ - коэффициенты температуропроводности, m^2/c , и теплопроводности, $Вт/(m^{\circ}K)$, обрабатываемого материала; v_k, v_d - скорости шлифовального круга, m/c , и детали, m/min ; S - площадь зоны контакта детали со шлифовальным кругом, mm^2 ; H - безразмерная полуширина источника тепла; $a_z(\tau)$ - максимальная толщина запытообразного среза; $b(\tau)$ - ширина единичного среза, mm ; μ - коэффициент трения алмазного зерна в условиях резания; $l_z(\tau)$ - величина контактной площадки алмазного зерна, mkm ; $z_p(\tau)$ - количество одновременно контактирующих зерен; β, ω - угол сдвига и угол действия, град.; k_3 - коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью; M - коэффициент, определяемый по формуле

$$M = 1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right); \quad (37)$$

C, α - начальная ордината и коэффициент в линейной зависимости, отражающей влияние температурно-скоростных факторов деформирования на величину касательных напряжений.

$$\tau_s = C - \alpha T. \quad (34)$$

Значение C и α для высоколегированных быстрорежущих сталей и титановых сплавов (табл.2) были получены путем обработки значений τ_s , определенных с помощью модификации К.Макгрегора и И.Фишера по данным стандартных испытаний, приведенным в технической литературе.

Таблица 2

Значения C и α для высоколегированных, быстрорежущих сталей и титановых сплавов

Обрабатываемый материал	Состояние	C	α
Быстрорежущие стали P18	Закаленные	1761	0,185
Высоколегированные стали X12F1, X12M, 9X5Ф, X6BФ, X6B34M	Закаленные	1697	0,148
Титановый сплав BT-14	Отожженный	671	0,236
	Термически упрочненный	829	0,317
Титановый сплав BT-3-I	Отожженный	770	0,329
	Термически упрочненный	899	0,357

С помощью формул (32), (33) по данным технических ограничений определяется время формирования критических параметров РПК $\tau_{кр}$ в результате функционирования подсистемы резания.

Так, значение $\tau_{кр}$, при котором достигается температура порога фазово-структурных превращений в поверхностном слое детали, в общем случае определяется путем решения на ЭВМ с пошаговым увеличением τ приведенного ниже неравенства:

$$\frac{T_{кр} \lambda V_d S}{4aV_k} \sqrt{\frac{\pi}{H}} \geq$$

$$\geq \frac{\left[\frac{\sqrt{1+M^2} a_z(\tau) \cos \omega}{\sin \beta} + k_3 M \mu l_s(\tau) \right] z_p(\tau) b(\tau) C}{1 + \left[\frac{\sqrt{1+M^2} a_z(\tau) \cos \omega}{\sin \beta} + k_3 M \mu l_s(\tau) \right] z_p(\tau) b(\tau) \frac{4\alpha a_0 V_k \sqrt{H}}{\lambda V_d S \sqrt{\pi}}}, \quad (35)$$

где $T_{кр}$ - критическая температура, определяющая порог фазово-структурных превращений в поверхностном слое детали.

Если лимитирующим техническим ограничением является точность обработки, то

$$\tau_{кр} = \sqrt{q \frac{\frac{[P_{ук}]}{\sin \beta} - \frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta}}{\left[C - \frac{4\alpha k_{ш} [P_{ук}] V_k a \sqrt{H}}{\lambda V_d S \sqrt{\pi}} \right] b z_p} \frac{1}{K_3 M C_1}}}, \quad (36)$$

где $[P_{ук}]$ - допускаемое значение радиальной составляющей P_y , обеспечивающее заданную точность обработки;

$k_{ш}$ - коэффициент шлифования.

Полагая, что нарушение закрепления алмазного зерна в металлической связке происходит в результате пластической деформации связки, что приводит к нарушению контакта на границе "зерно-связка", величину предельного усилия, приводящего к нарушению закрепления зерна в связке, определим, используя теорию линий скольжения:

$$Q = 2k\pi r^2 [\sin^2 \phi_0 \frac{1 - \sqrt{1-4\mu_1^2}}{2} + (\theta - \phi_a) \sin^2 \phi_a + (1+2\mu_1) \frac{(2\phi_a - \sin 2\phi_a) - (2\phi_0 - \sin 2\phi_0)}{4}] l. \quad (37)$$

где k - пластическая постоянная материала связки, Н/мм²; r - радиус шаровой модели алмазного зерна, мм; ϕ_a - угол внедрения, град; μ_1 - значение коэффициента трения.

Углы ϕ_0 и ϕ_a находятся по формулам

$$\psi_0 = \frac{\pi}{4} - \frac{\text{Arc cos } 2\mu_1}{2},$$

$$\phi_a = \text{Arc cos } \left(1 - \frac{h_3}{T}\right).$$

Здесь h_3 - глубина заделки зерна в связку, мм.

Используя формулу (37) и значение максимальной силы $P_{z\max}$, действующей на наиболее выступающее зерно в момент возникновения критической силы на круге, определяемой по лимитирующему техническому ограничению, найдем значение критической глубины заделки зерна в связку, при которой оно должно потерять устойчивость и выпасть из связки.

$$P_{z1\max} \sqrt{1 + \frac{I}{K_{\text{ш}}^2}} \geq 2k\pi^2 \left[\sin^2 \psi_0 \frac{1 - \sqrt{1 - 4\mu_1^2}}{2} + (\theta - \phi_a) \sin^2 \phi_a + \right. \\ \left. + (1 + 2\mu_1) \frac{(2\phi_a - \sin 2\phi_a) - (2\psi_0 - \sin 2\psi_0)}{4} \right]. \quad (38)$$

Неравенство (38) решается на ЭВМ при пошаговом уменьшении глубины заделки зерна в связку. Величина h_3 , при которой оно выполняется, является критическим значением заглубления зерна в связку $h_{3\text{кр}}$.

Величина начального заглубления наиболее выступающего зерна в связку $h_{3\text{н}}$ определяется из условия исключения заклинивания стружки в зазоре между связкой и поверхностью резания:

$$h_{3\text{н}} = d - (R_{\max} + a_{\max} \phi k_1 + \Delta), \quad (39)$$

где $R_{\max}$ - значение максимальной высоты неровностей на поверхности резания, мкм; $a_{\max} \phi$ - максимальная фактическая толщина среза, мкм; k_1 - коэффициент усадки стружки; d - диаметр шаровой модели зерна, мкм; Δ - величина гарантированного зазора, мкм.

Тогда объем связки, подлежащий удалению в процессе управляющих воздействий с целью перевода зерен с критическими площадками износа из устойчивого состояния закрепления в связке в неустойчивое, будет равен

$$V_c = 10^{-3} (n_{\text{зн}} - n_{\text{экр}}) (1 - P_v K \cdot 10^{-2}) V_K \pi D_K, \quad (40)$$

где V_K - ширина круга, мм; K - относительная концентрация; P_v - объемная доля алмаза в алмазоносном слое; D_K - диаметр круга, мм.

Интенсивность удаления связки в процессе управляющих воздействий определяется по формуле (2) с учетом формул (35), (36), (40).

Определение связи режимов электроэрозионных воздействий с объемом удаляемой связки, а также исследование параметров РПК и технологических показателей шлифования труднообрабатываемых материалов с управляющими воздействиями на рабочую поверхность круга электроэрозионным способом осуществляли экспериментально.

Обработка образцов выполнялась на модернизированных для осуществления электроэрозионных воздействий на РПК плоскошлифовальном и внутришлифовальном станках моделей 3Г71 и 3А227П, причем на плоскошлифовальном станке технологический ток мог вводиться в зону резания либо автономную зону. В качестве источников технологического тока использовали генератор импульсов модели ШГИ-125-100М и источник технологического тока модели ИТТ-35. Рабочая среда - 0,3%-ный водный раствор кальцинированной соды.

Образцы из сталей Х12Ф4М, Р6М5Ф3, титанового сплава ВТ14 и металлокерамических твердых сплавов шлифовали кругами 1А1 250*16*5*76 из алмазов марки АС6 на металлической связке с относительной концентрацией алмазов 50%, 100%, 150% и зернистостью 100/80, 125/100, 160/125, 250/200, а также 1А1 40*10*3*16 из алмазов АС15 на связке М1 и М3, 100%-ной относительной концентрации и зернистости 125/100, 250/200, 400/315. В некоторых исследованиях применяли круги из алмазов АС6С22, АРВ.

Электрические характеристики единичных импульсов электроэрозионных воздействий при использовании генератора импульсов ШГИ-125-100М определяли с использованием электронного осциллографа

типа С8-9А, среднее значение тока - по магнитоэлектрическому амперметру с увеличенной чувствительностью (0-50А).

При использовании источника технологического тока модели ИТТ-35 единичные импульсы регистрировали с помощью осциллографа Н115. Для измерения интегральных характеристик электроэрозионных воздействий - среднего тока и среднего напряжения - использовали дополнительные амперметры (0-25А), (0-5А) и вольтметр (0-12В).

Определение разновысотности зерен, размеров площадок контакта на задних поверхностях зерен, расстояний между зернами на рабочей поверхности круга, глубины РПК осуществляли на оригинальных установках визуальным методом по методике В.Ф.Казакова, методом профилографирования (А.с. № 775614), емкостным методом (А.с. № 1585666).

Статистическое исследование параметров рельефа осуществляли выборочным методом. Было установлено, что метод профилографирования по сравнению с визуальным дает распределение разновысотности более сглаженное. Расхождение средних величин разновысотности для кругов АС6 160/125-4-М1 и АС6 100/80-4-М1 при исследовании методом профилографирования составило 21-63%, а дисперсии - 72-128% в сторону завышения.

Определение объемов алмазоносного слоя, удаленных в процессе электроэрозионных воздействий при электроэрозионной правке либо шлифовании труднообрабатываемых материалов, осуществляли на оригинальной установке, позволяющей найти измеряемые точки на РПК вдоль образующей круга с погрешностью $\pm 0,005\text{мм}$, перпендикулярно образующей круга - $\pm 0,014\text{мм}$.

Составляющие силы резания измеряли при помощи трехкомпонентного динамометра УДМ-100 конструкции ВНИИ, усилителя ТА5 и осциллографа Н115.

Фазовый состав и нарушения кристаллической структуры поверх-

ностного слоя обработанных образцов изучали методами рентгеноструктурного анализа по снимкам, выполненным на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 в излучении железного анода.

Определение остаточных макронапряжений выполняли по методу Н.И. Давиденкова на установке "Пион-2".

Шероховатость обработанной поверхности измеряли на профилометре-профилографе модели 201, а также профилометре модели 283. Обработку профилограмм шлифованной поверхности осуществляли по методике ГОСТ 2789-73.

При осуществлении управляющих воздействий на РПК электроэрозионным способом важнейшей задачей является установление зависимостей, раскрывающих влияние процесса шлифования и параметров РПК на активное электрическое сопротивление межэлектродного промежутка (МЭП), которое определяет вид и электрические характеристики возникающих в МЭП импульсов и в конечном счете интенсивность удаления связки, обеспечивая тем самым то или иное время обновления РПК. При перекрытии МЭП несколькими стружками общее электрическое сопротивление равно

$$R_{\text{МЭП}} = R_{\text{ц}} / n_p, \quad (41)$$

где $R_{\text{ц}}$ - активное электрическое сопротивление цепочки "связка-стружка-деталь"; n_p - число стружек, перекрывающих МЭП.

$$R_{\text{ц}} = \frac{3, I \rho_1 + \rho_2}{4a} + \frac{\rho_1 (1 + \alpha_0 t_0)}{\pi a^2} \left(\frac{h - t_{\Phi}}{\gamma} \right). \quad (42)$$

Здесь ρ_1 , ρ_2 - удельные электрические сопротивления материала детали (ЭИ) и связки; h - высота выступания вершины зерна из связки; t_{Φ} - фактическая глубина резания; γ - передний угол алмазного зерна; α_0 - температурный коэффициент электросопротивления; t_0 - температура поверхности детали в зоне контакта с кругом; a - радиус пятна контакта в месте соединения стружки с деталью.

В зависимости от механических режимов контактирования РПК с

поверхностью ЭИ в процессе электроэрозионных воздействий в МЭП могут возникать следующие виды единичных импульсов: холостые, рабочее, частичного короткого замыкания и короткого замыкания (КЗ).

Установлено, что при изменении условий контактирования с помощью вертикальной подачи S_B или длины ЭИ h_1 с уменьшением активного сопротивления МЭП среди холостых импульсов появляются рабочие, а после того как количество рабочих импульсов достигнет 100% - импульсы ЧКЗ и КЗ. При этом зависимости интенсивностей удаления связки $\Pi = f(S_B)$ и $\Pi = f(h_1)$ носят экстремальный характер. Максимум интенсивности удаления связки совпадает с появлением импульсов КЗ, которому предшествуют импульсы ЧКЗ и равенство приращений интенсивностей удаления связки электрическими разрядами и засаливания РПК материалом ЭИ, которое характеризуется максимальной интенсивностью удаления связки и стабильным качеством РПК. Отмеченная закономерность носит общий характер и справедлива для любых материалов ЭИ (медь М1, сталь 45, ВТ-14, Т15К6).

При использовании источника технологического тока модели ИТТ-35 и ЭИ из меди, стали 45, сплава ВТ14 зависимость удаляемого объема связки единичным импульсом от энергии импульсов может быть аппроксимирована линейной зависимостью

$$V_{\text{си}} = 0,003 W_{\text{и}} \quad (43)$$

Учитывая, что $V_{\text{си}} = \Pi / 60f$, а $W_{\text{и}} = U_{\text{см}} I_{\text{ср}} / f$, из (43) получим формулу для расчета величины среднего тока в процессе управляющих воздействий:

$$I_{\text{ср}} = \Pi / (0,18 U_{\text{см}}), \quad (44)$$

где Π - требуемая интенсивность удаления связки в процессе управляющих воздействий, мм³/мин; $U_{\text{см}}$ - расчетная величина напряжения на эрозионном промежутке, равная значению напряжения

при максимуме тока.

В условиях экспериментов $U_{sm}=2I \text{ В.}$

При использовании генератора импульсов ШГИ I25-100М режимы электророзионных воздействий при алмазно-искровом шлифовании сплава ВК15 находятся по формуле

$$I_{cp} = \frac{\left[\frac{10^6 \Pi}{11,63 f^{0,445}} \right]^{0,555}}{U_{sm}}, \quad (45)$$

где f — частота импульсов, Гц.

Установлено положительное влияние дополнительного механического разрушения алмазных зерен, осуществляемого одновременно с электророзионным воздействием на связку и выполнения электророзионных воздействий в условиях относительных колебаний поверхностей ЭИ и круга на увеличение интенсивности удаления связки, что позволяет повысить производительность удаления алмазосодержащего слоя в 2,5–3 раза.

На базе выполненных исследований разработаны: новый способ поиска режимов электророзионных воздействий, обеспечивающий максимальную интенсивность удаления алмазосодержащего слоя (а.с. I590276); новые способы интенсификации удаления алмазосодержащего слоя (а.с. № I555072, а.с. № I355393, а.с. № I5I4589, а.с. № I827920), а также способ исключения механического износа ЭИ (а.с. № 994117).

Исследования влияния времени шлифования и условий обработки на силы резания при алмазном шлифовании стали Р6М5Ф3 выполнены с использованием формул (33), (34), а также экспериментально. При этом расхождение теоретически рассчитанных и экспериментально определенных величин составляющей P_z в период 30,45 мин алмазного шлифования находится в пределах 16–26%, что вполне допустимо для целей инженерных расчетов. Несколько большее расхождение (до 37%) наблюдается при сопоставлении составляющей P_y для круга зернис-

тостью 100/80, что объясняется влиянием на R_y процесса засаливания, чего не учитывает расчетный метод.

При обработке стали Р6М5Ф3 с помощью электроэрозионных воздействий силы резания могут быть уменьшены в 3,5–4 раза и стабилизированы во времени, при этом увеличение энергии единичного импульса способствует уменьшению сил резания независимо от места электроэрозионного воздействия на РПК. При обработке титанового сплава ВТ14 уменьшение сил резания может быть достигнуто лишь при электроэрозионном воздействии на РПК в автономной зоне. Это объясняется повышенной химической активностью сплава с увеличением мощности теплового источника (что имеет место при электроэрозионном воздействии на РПК в зоне резания), в результате чего образуются более твердые карбиды, нитриды, окислы и др. химические соединения титана.

При шлифовании стали Р6М5Ф3 с электроэрозионным воздействием на РПК в автономной зоне и АЭЭШ в период 15–60 мин обработки происходит стабилизация значений коэффициента шлифования со средним значением $K_{\text{ш}}=0,26$. При алмазном шлифовании с увеличением времени обработки значение $K_{\text{ш}}$ уменьшается. При обработке ВТ14 алмазным шлифованием с электроэрозионным воздействием на РПК в автономной зоне величина $K_{\text{ш}}$ находится в пределах 0,44–0,58, осуществляя колебания относительно определенных для каждой зернистости значений.

Увеличение энергии единичных импульсов электроэрозионных воздействий на РПК способствует повышению коэффициента режущей способности. При этом если при обработке стали Р6М5Ф3 место электроэрозионных воздействий не имеет существенного значения, то при шлифовании ВТ14 электроэрозионное воздействие на РПК предпочтительно осуществлять в автономной зоне, а при шлифовании ВК15 – в зоне резания.

Электроэрозионное воздействие на РПК приводит к увеличению

удельного расхода алмазов, который растет с увеличением энергии единичных импульсов.

Исследование параметров шлифованной поверхности проводили с использованием разработанной методики расчета комплекса параметров, предусмотренных ГОСТом 2789-73 для оценки шероховатости шлифованной поверхности, и экспериментально.

Основным отличием методики расчета является то, что она учитывает зависимость глубины царапины в исследуемом сечении обрабатываемой поверхности как от разновысотности зерна, так и от расстояния между исследуемым сечением и плоскостью, проходящей через центр круга, в момент контакта с зерном.

По этой методике наибольшая высота неровностей профиля

$$R_{\max} = N \Delta R, \quad (46)$$

где ΔR - величина интервала расчета, мкм; N - номер интервала, в котором суммарная ширина срезов равна длине базовой линии.

Условие перекрытия срезов определяется неравенством:

-при врезном шлифовании

$$A \sum_{i=1}^N F(1\Delta R) \sum_{N_1=1}^1 (\sqrt{N_1} - \sqrt{N_1 - 1}) b'(1\Delta R) [(N-1-N_1+2)\Delta R] \geq 10^3, \quad (47)$$

где N - номер исследуемого интервала, $N = 1, 2, \dots, K$; 1 - номера интервалов, входящих в N , $1 = 1, 2, \dots, N$; N_1 - участки поверхности круга, обрабатывающие 1-е интервалы, N_1 изменяется внутри 1 от 1 до $N-1+1$; $K = t_{\Phi} 10^3 / \Delta R$ - общее количество интервалов; $F(1\Delta R)$ - значение функции распределения Вейбулла на 1-м интервале; $b'(1\Delta R)$ - ширина среза на 1-м интервале;

$$A = \frac{120V_K}{V_d S_{\Sigma\Pi}^2} \sqrt{2R_K \Delta R 10^{-3}} \quad \text{— при плоском шлифовании;}$$

$$A = \frac{120V_K}{V_d S_{\Sigma\Pi}^2} \sqrt{\frac{2R_K R_d \Delta R 10^{-3}}{R_d (+) - R_K}} \quad \text{— при внутреннем и круглом шлифовании;}$$

-при шлифовании с поперечной подачей

$$\sum_{i=1}^N b'_{NJ} + A \sum_{i=1}^N F(1\Delta R) (\sqrt{N_1 - i + 1} - \sqrt{N_1 - i}) b'(\Delta R) E_{NJ} \geq 10^3, \quad (48)$$

$$\text{где } E_{NJ} = 1 - \sum_{i=1}^N b'_{NJ} \cdot 10^{-3}, \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N b'_{NJ} = & A \left\{ \sum_{i=1}^N F(1\Delta R) \sum_{N_1=1}^{N-i+1} (\sqrt{N_1} - \sqrt{N_1 - i}) b'[(N-1-N_1+2)\Delta R] * \right. \\ & * \left. \left[1 + \sum_{j=1}^{N_4-1} E_{(1+N_1-i; j)} \right] \right\} + A \left\{ \sum_{i=1}^{N-1} F(1\Delta R) \sum_{N_1=1}^{N-i} (\sqrt{N_1} - \sqrt{N_1 - i}) * \right. \\ & * \left. b'[(N-1-N_1+2)\Delta R] E_{(1+N_1-i; j)} \right\}. \quad (50) \end{aligned}$$

Здесь N изменяется от I до K ; j - изменяется от I до N_4 ,

$$N_4 = B_K / S_n - I,$$

где S_n - величина поперечной подачи.

Кроме $R_{\max}$ методика позволяет рассчитывать высоту неровностей профиля R_z , опорную длину профиля η_p , средний шаг неровностей по вершинам S . Расчет выполняется по разработанным программам на ЭВМ.

Экспериментальная проверка выполненных расчетов полностью подтвердила гипотезу о доминировании геометрического фактора в формировании неровностей шлифованной поверхности при алмазно-электроэрозионном шлифовании сталей.

Влияние энергии единичных импульсов электроэрозионных воздействий на параметр R_a при шлифовании сплава ВТ14 и стали Р6М5Ф3 противоположно: при обработке сплава ВТ14 увеличение энергии единичных импульсов, способствующей разрушению нароста на зернах, приводит к уменьшению R_a , при шлифовании стали Р6М5Ф3 вследствие увеличения разноразмерности зерен - к увеличению.

Использование метода рентгеноструктурного анализа, метода Н.И.Давиденкова позволило установить, что наиболее благоприятные

условия обработки, способствующие сохранению фазово-структурного состояния обработанной поверхности, близкого к исходному, обеспечивает алмазное шлифование с электроэрозионным воздействием на РПК в автономной зоне. С позиции формирования приемлемой величины и знака остаточных напряжений первого рода наиболее предпочтительным способом шлифования сплава ВТ14 и стали Р6М5Ф3 также является шлифование с электроэрозионным воздействием на РПК в автономной зоне.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать аналитический и экспериментальный методы поиска оптимальных режимов шлифования с осуществлением управляющих воздействий на РПК.

Сущность методики аналитического расчета режимов шлифования с управлением параметрами РПК сводится к определению механических режимов шлифования и режимов управляющих электроэрозионных воздействий, удовлетворяющих требуемому качеству обработанной поверхности.

Глубина шлифования задается исходя из условий удаления срезаемого слоя запятообразными срезами и обеспечения малой вероятности контактирования связки круга с неровностями поверхности резания.

Скорость детали рассчитывается исходя из условий обеспечения высоты неровностей профиля шлифованной поверхности, которое обусловлено перекрытием срезов на интервале

$$N = R_{\max} / \Delta R.$$

Тогда из неравенства (47) при плоском врезном шлифовании будем иметь

$$\frac{60V_k}{V_d} = \frac{S_{зп} 10^3}{2\sqrt{2R_k \Delta R 10^{-3}} \sum_{i=1}^N F(1\Delta R) \sum_{N_1=1}^1 (\sqrt{N_1} - \sqrt{N_1 - 1}) b' [(N - 1 - N_1 + 2)\Delta R]}. \quad (51)$$

При внутреннем и круглом наружном шлифовании

$$\frac{60V_K}{V_D} = \frac{S_{\Sigma} 10^3}{2 \sqrt{\frac{2R_K R_D \Delta R 10^{-3}}{R_D(+)-R_K}} \sum_{i=1}^N F(1\Delta R) \sum_{N_1=1}^1 \frac{1}{(\sqrt{N_1}-\sqrt{N_1-1})b'[(N-1-N_1+2)\Delta R]}}, \quad (52)$$

где 1 - изменяется от 1 до N; N_1 - изменяется внутри 1 от 1 до $N-1+1$.

Используя паспортную скорость круга V_K , определяем скорость детали V_D . Поперечная подача назначается из условий достижения максимальной производительности обработки.

Величина тока в процессе управляющих воздействий определяется по формулам (44) или (45) по интенсивности удаления связки, найденной из условия требуемой точности обработки либо отсутствия фазово-структурных превращений в поверхностном слое детали.

Корректность методики расчета оптимальных режимов шлифования с целью стабилизации качества обработанной поверхности была подтверждена экспериментом, при котором обработка образцов из стали Р6М5ФЗ осуществлялась на режимах, определенных по описанной выше методике (табл.3).

Экспериментальный экспресс-метод позволяет решить задачу поиска оптимальных режимов шлифования с управлением параметрами РПК при отсутствии всей информации, требуемой при использовании аналитического метода.

Сущность экспресс-метода (а.с. № 1763148) заключается в том, что поиск оптимума, например, методом крутого восхождения осуществляется с использованием упругой схемы, кинематически аналогичной жесткой, с последующим расчетом подачи на врезание для жесткой схемы обработки по формулам:

$$\text{— для плоского шлифования —} \quad S_B = \frac{V_{Oy}}{T_M S_N 1000 V_D}, \quad (53)$$

Таблица 3

Содержание остаточного аустенита в образцах из стали Р6М5Ф3 в различные периоды обработки на оптимальных режимах: $V_k=35$ м/с, $V_d=6$ м/мин, $t=0,010$ мм, $I_{cp}=5,5$ А

№ п/п	Способ шлифования	Содержание остаточного аустенита $A_{ост}$, %		
		После правки	После 30 мин обработки	После 60 мин обработки
1.	Алмазное шлифование	3	5	5
2.	Алмазное шлифование с электроэрозионным воздейст- вием на РПК в автономной зоне	3	3	3
3.	Алмазное шлифование с электроэрозионным воздейст- вием на РПК в зоне резания	3	5	5
Исходное состояние		3		

- для внутреннего и круглого наружного шлифования -

$$S_p = \frac{V_{ou}}{T_m S_{пр} 1000 V_d} \quad (54)$$

В формулах (53), (54) T_m принимается равным длительности эксперимента при шлифовании по упругой схеме, за которую был удален объем материала V_{ou} .

Остальные режимы упругой схемы (скорость круга V_k , скорость детали V_d , подача S_p или $S_{пр}$) переносятся на жесткую схему шлифования без изменений.

Результаты исследований внедрены в промышленность в новых технологических процессах бесцентрового шлифования крепежных изделий из титановых сплавов, глубинного бесцентрового шлифования прутков (а.с. № 1689031) из ВТ14 (ЗЭМ НПО "Энергия"), АЭШ твердосплавных и стальных деталей оснастки синтеза СТМ (ПЗИА и АИ ВПО "Соксалазинструмент", г.Полтава), инструментов, оснащенных твердым сплавом (Харьковское моторостроительное объединение "Серп и

Молот" НПО "Союзтрактор-двигатель", г. Харьков, п/я А-3621). Экономический эффект, подтвержденный документами, составил 230 тыс. руб в ценах 1985г.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В результате выполненных исследований решена важная научная проблема, состоящая в разработке научных основ стабилизации выходных показателей процесса алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов с помощью управляющих воздействий на РПК, что позволило решить задачу повышения производительности шлифования в 1,4-1,6 раза, улучшить качество и снизить себестоимость обработки высоколегированных, быстрорежущих сталей, титановых и твердых сплавов.

2. Предложен основной принцип стабилизации выходных показателей процесса шлифования, согласно которому время удаления объема связки, достаточного для перевода зерен с критическими размерами контактных площадок из устойчивого состояния в неустойчивое в результате функционирования подсистемы управляющих воздействий, должно быть равно времени образования критических параметров РПК в результате функционирования подсистемы резания.

3. Рабочая поверхность круга в процессе обработки представляет собой сложную систему, изменяющую свои параметры в зависимости от условий обработки. Процесс изменения параметров РПК во времени происходит неравномерно. В начальный период он характеризуется резким уменьшением разнвысотности (за счет удаления из связки слабо закрепленных зерен), после чего разнвысотность стабилизируется. Оптимальная зона эксплуатации алмазного инструмента - период стабилизации, так как он характеризуется минимальным удельным расходом алмазов.

4. Расчету технологических показателей процесса шлифования должно предшествовать определение наиболее вероятной формы среза

при заданных режимах обработки. При этом в качестве критерия предлагается использовать отношение фактической глубины шлифования к высоте неровностей профиля шлифованной поверхности. При $t_{\phi}/R_z < 1$ в основу всех расчетов должен быть положен сегментообразный срез, при $t_{\phi}/R_z > 1,5$ - запятообразный, кроме расчетов параметров шероховатости шлифованной поверхности.

5. При расчете параметров модели РПК в процессе шлифования необходимо учитывать особенность абразивного инструмента - отсутствие на рабочей поверхности сплошной режущей кромки. Именно по этой причине в зависимости от режимов шлифования расстояния между активными зернами работающего круга в 10-50 раз превышают аналогичный параметр неподвижного круга, а количество активных зерен на работающем круге в 1,5-5 раз меньше, чем в активной части рабочей поверхности неподвижного круга, за счет эффекта "экранирования" при удалении припуска запятообразными срезами. Из общего количества зерен, расположенных на РПК, в съеме припуска материала участвуют 1,5-14,5%, а в формировании рельефа поверхности - 0,17-0,68 %.

6. Расчет толщины единичных срезов равновысокими зернами может быть выполнен с погрешностью не более 3-5% по формулам, базирующимся на упрощенной траектории - окружности, при условии, если они учитывают переносное движение центра круга. При массовом резании разновысотными расположенными зернами толщина среза должна оцениваться фактической толщиной, учитывающей высоту сформированных на поверхности резания неровностей, вклад которых в фактическую толщину среза может достигать 70-90%.

7. При описании функционирования подсистемы резания во времени с помощью формул для расчета составляющих силы резания необходимо учитывать изменение во времени разновысотности зерен, величины площадок контакта на задних поверхностях зерен, так как

эти параметры в наибольшей мере оказывают влияние на технологические показатели обработки через параметры единичных срезов и количество одновременно контактирующих зерен.

8. Доказано, что появление импульсов частичного короткого замыкания является сигналом о том, что возможности повышения интенсивности удаления связки электроэрозионным способом при заданном напряжении холостого хода исчерпаны. Это позволяет универсализировать поиск максимума интенсивности удаления связки электроэрозионным способом с помощью информации о появлении импульсов ЧКЗ.

9. Технологические показатели шлифования зависят не только от величины электрического тока в процессе управляющих воздействий, но и от места ввода технологической энергии. Так, при шлифовании сплава ВТ14 с электроэрозионным воздействием на РПК в зоне резания за счет действия дополнительного источника тепла все технологические показатели, за исключением параметров шероховатости шлифованной поверхности, по сравнению с алмазным шлифованием с управляющими воздействиями на РПК в автономной зоне ухудшаются. В связи с этим управление параметрами РПК при обработке ВТ14 предпочтительно осуществлять в автономной зоне.

10. Доказана возможность определения оптимальных режимов шлифования при использовании упругой схемы, кинематически аналогичной жесткой, с последующим переходом на режимы жесткой схемы, что позволяет стабилизировать качественные показатели обработки в процессе оптимизации и выявить влияние режущих свойств круга на производительность шлифования.

II. Разработанные научные основы стабилизации выходных показателей процесса шлифования с помощью управляющих воздействий на РПК, предложенные алгоритмы необходимых расчетов на ЭВМ позволяют оснастить исследователей общим методологическим подходом при использовании для целей управления параметрами РПК других спосо-

бов управляющих воздействий и являются базой для разработки новых способов шлифования труднообрабатываемых материалов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. Матюха П.Г. Стабилизация выходных показателей алмазного шлифования с помощью управляющих воздействий на рабочую поверхность круга: - ДонГТУ, Донецк, 1995. - 172 с.: Деп. в ГНТБ Украины № I44 Ук 96.

2. Кинематика абразивного зерна при внутреннем шлифовании с непрерывными продольной и поперечной подачами / Беззубенко Н.К., Матюха П.Г., Олейников Н.П., Цокур В.П. // Резание и инструмент. 1975. Вып. 13. С.15-24.

3. Анализ длины кривой контакта абразивного зерна с деталью при внутреннем и круглом шлифовании / Беззубенко Н. К., Матюха П.Г., Олейников Н.П., Цокур В.П. // Труды ВНИИАШ. Вопросы теории и прогрессивной технологии процессов абразивной обработки. Л., 1977. С.54-60.

4. Беззубенко Н.К., Матюха П.Г. Аналитические зависимости для определения толщины среза при внутреннем и круглом наружном врезном шлифовании // Резание и инструмент. Вып. 17. С.38-39.

5. Матюха П.Г. Форма среза и расстояние между контактирующими зернами при шлифовании периферией круга // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 1976. Вып. 12. С.163-168.

6. Матюха П.Г. Статистический анализ рельефа рабочей поверхности алмазных шлифовальных кругов // Синтетические алмазы. 1978. № 3, С.22-24.

7. Матюха П.Г. Исследование форм среза при врезном алмазно-искровом шлифовании // Синтетические алмазы. 1979. №1. С.39-41.

8. Матюха П.Г. О погрешности метода профилографирования при исследовании рельефа алмазных кругов // Сверхтвердые материалы.

1980. №2. С.42-44.

9. Матюха П.Г., Беззубенко Н.П., Иванов Н.П. Математическая модель алмазного шлифовального круга // Резание и инструмент. 1981. Вып. 25. С.81-89.

10. Матюха П.Г. Фактическая глубина резания при шлифовании // Сверхтвердые материалы. 1982. №1. С.52-56.

11. Матюха П.Г., Терехова Л.К. Расчет параметров шероховатости шлифованной поверхности // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 1982. Вып. 10. С.101-105.

12. Матюха П.Г., Беззубенко Н.К., Терехова Л.К. Объем межзеренного пространства режущего рельефа круга, сформированного при АИШ // Резание и инструмент. 1985. Вып. 34. С.32-36.

13. Матюха П.Г., Полтавец В.В. Геометрическая форма алмазного зерна при алмазно-искровом шлифовании // Резание и инструмент. 1987. Вып.38. С.23-29.

14. Матюха П.Г., Цокур В.П., Мартынов В.И. Работоспособность алмазного круга при различных способах шлифования титанового сплава // Сверхтвердые материалы. 1988. №1, С.54-58.

15. Исследование качества обработанной поверхности при алмазном шлифовании с электроэрозионной правкой круга/ Матюха П.Г., Цокур В.П., Кононенко В.И., Серова Н.Н. // Резание и инструмент. 1988. Вып.39. С.74-79.

16. Шевелева Г.И., Матюха П.Г., Терехова Л.К. Расчет числа зерен, участвующих в процессе шлифования // Резание и инструмент. 1988. Вып.40. С.7-14.

17. Матюха П.Г., Мартынов В.И., Цокур В.П. Выбор материала и длины электрода-инструмента при электроэрозионной правке шлифовальных кругов // Сверхтвердые материалы. 1989. № 6. С.39-41.

18. Шевелева Г.И., Матюха П.Г. Исследование форм единичных срезов при шлифовании // Резание и инструмент. 1989. Вып.41. С.3-9.

19. Влияние зернистости алмазных кругов на фазово-структурное состояние поверхностного слоя при различных способах шлифования / Матюха П.Г., Цокур В.П., Кононенко В.И., Серова Н.Н. // Резание и инструмент. 1990. Вып.44. С.57-63.

20. Матюха П.Г., Терехова Л.К. Исследование высоты неровностей поверхности резания при шлифовании // Резание и инструмент. 1990. Вып. 44. С.114-121.

21. Матюха П.Г., Мартынов В.И. Расчет прочности закрепления алмазного зерна в металлической связке // Резание и инструмент. 1992. Вып.45. С.14-21.

22. Матюха П.Г. Алмазное шлифование с управлением параметрами рабочей поверхности круга // Резание и инструмент. 1993. Вып.48. С.33-35.

23. Матюха П.Г., Цокур В.П. Влияние способа алмазного шлифования на остаточные напряжения в титановом сплаве ВТ14 // Сверхтвердые материалы. 1993. № 1. С.55-59.

24. А.с. № 1590276. Способ электроэрозионной обработки / Матюха П.Г., Мартынов В.И., Цокур В.П., Габитов В.Р. - Оpubл. 1990. Бюл. № 33.

25. А.с. № 1763148. Способ шлифования / Матюха П.Г., Цокур В.П. - Оpubл. 1992. Бюл. № 35.

Annotation

Matjukha P.G. Scientific principles of out indices stabilization of diamond grinding by means of controlling influences on grinding wheel working surface. Thesis for competition of Doctor of Technics degree for the speciality 05.03.01 "Processes of mechanical treatment, machines and tool". Kharkov State Politechnical University, Kharkov, 1996.

It is set forth the conception and method of out technological indices stabilization of hard-to cut materials diamond grinding by means of controlling influences on grinding wheel working surface by spark erosion. The results were introduced in production and training process in the university.

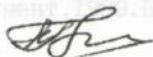
А Н О Т А Ц І Я

Матюха П.Г. Наукові основи стабілізації вихідних показників алмазного шліфування за допомогою керуючих дій на робочу поверхню круга. Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за фахом 05.03.01 - "Процеси механічної обробки, верстати та інструмент." Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1996 р.

Викладені концепція та метод стабілізації вихідних технологічних показників алмазного шліфування важкооброблювальних матеріалів за допомогою керуючих дій на робочу поверхню круга електроерозійним засобом. Розробки впроваджені в промисловість та навчальний процес вузу.

Ключові слова: алмазне шліфування, параметри рельєфу круга, електричні розряди.

Ключевые слова: алмазное шлифование, параметры рельефа круга, электрические разряды.



438887

AB 35.510
AB 35.510

Подп. в печать 30 .05.96г.	Формат 60x84 $\frac{1}{16}$.	Бумага тип. №2 .
Ризографическая печать.	Усл. печ. л. 2,1 .	Усл. кр.-отт. 2,2 .
Уч.-изд. л. 2,0 .	Тираж 120 экз.	Заказ № 59 / 96

МЧП "ЛИК", г. Донецк, 230-й стрелковой дивизии, 16