

АКАДЕМИЯ НАУК УССР
Ордена Трудового Красного Знамени
Институт сверхтвердых материалов

На правах рукописи

Новиков Федор Васильевич

УДК 621.923

**МЕХАНИКА КРУГЛОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ
ИЗДЕЛИЙ С ПРЕРЫВИСТЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ
И ПУТИ ЕЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность: 05.03.01 – Процессы и машины обработки материалов
резанием; автоматические линии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев – 1984

Работа выполнена на кафедре “Резание материалов и режущие инструменты” Харьковского ордена Ленина политехнического института им. В.И. Ленина.

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент РАБ А.Ф.

Официальные оппоненты: – заслуженный деятель науки УССР,
доктор технических наук,
профессор ЯКИМОВ А.В.;

старший научный сотрудник,
кандидат технических наук,
РЫБИЦКИЙ В.А.

Ведущая организация – Полтавский завод искусственных алмазов
и алмазного инструмента им. 50-летия СССР

Защита состоится 1 ноября 1984 года в 13.30 часов на заседании специализированного совета Д 016.10.01 по специальности 05.03.01 (Процессы и машины обработки материалов резанием; автоматические линии) ордена Трудового Красного Знамени Института сверхтвердых материалов АН УССР по адресу: 252153, г. Киев, ул. Автозаводская, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим принять участие в заседании совета или прислать отзыв на автореферат, заверенный печатью.

Автореферат разослан 1 октября 1984 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
канд. техн. наук

В.А. Лукаш

А Н Н О Т А Ц И Я

Диссертационная работа посвящена разработке на основе управления механикой ударного взаимодействия круга с изделием высокопроизводительного процесса круглого алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями, включая твердосплавные многолезвийные инструменты, с целью полной замены существующего абразивного шлифования и повышения качества обработки изделий.

В работе вскрыта физическая сущность ударно-циклического взаимодействия круга с изделием и сформулированы принципы управления процессом шлифования. Разработаны кинематическая (вероятностная) и упрощенная физическая модели алмазного шлифования.

Проведена аналитическая оптимизация процесса шлифования и установлены оптимальные условия шлифования твердосплавных изделий с прерывистыми поверхностями. Комплексно изучены закономерности и особенности круглого алмазного глубинного шлифования с небольшой окружной скоростью изделия, соизмеримой с продольной подачей при плоском шлифовании. Предложена методика расчета оптимальных режимов шлифования. Проведены технико-экономический анализ и внедрение результатов работы в производство.

Автор защищает:

1. Результаты исследований механики ударно-циклического взаимодействия круга с изделием при круглом алмазном шлифовании прерывистых поверхностей и принципы ее оптимального управления.
2. Аналитическую оценку динамической нагруженности режущего зерна в условиях ударного взаимодействия с обрабатываемым материалом.
3. Кинематическую (вероятностную) модель процесса шлифования.
4. Физическую (упрощенную) модель алмазного шлифования.
5. Результаты аналитической и экспериментальной оптимизации круглого алмазного шлифования по основным технологическим показателям: производительности шлифования, относительному расходу алмаза, точности и шероховатости обработки.
6. Методику расчета и оптимизации процессов алмазного шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов на основе допустимой (прочностной) толщины среза и принципа энергетического равновесия системы “круг–изделие”.
7. Высокопроизводительный процесс круглого алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Важнейшей проблемой в инструментальном производстве является полная замена абразивного круглого наружного шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов шлифованием алмазными кругами. Необходимость такой замены продиктована высоким уровнем брака инстру-

мента на шлифовальных операциях, который по данным ряда специализированных инструментальных заводов составляет 15–20 %. Образующиеся в процессе абразивного шлифования дефекты обработки не всегда удается исключить последующей алмазной или эльборной доводкой.

Решить проблему эффективной замены абразивных кругов алмазными традиционными методами шлифования, включая многопроходное и глубинное, чрезвычайно сложно. Ударно-циклический характер взаимодействия обрабатываемого изделия с алмазным кругом приводит к значительному снижению износостойкости последнего и делает экономически нецелесообразным замену абразивного шлифования. Наиболее существенным резервом повышения эффективности алмазного шлифования в таких условиях является правильное управление интенсивностью ударного взаимодействия круга с изделием, однако недостаточная изученность процесса шлифования в условиях преобладающего ударного фактора затрудняет разработку оптимальных рекомендаций. В связи с этим важное и актуальное значение приобретают вопросы исследования механики круглого алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями и выработки на ее основе принципов оптимального управления процессом, установления оптимальной схемы и условий высокопроизводительной бездефектной алмазной обработки твердосплавных инструментов.

Цель работы. Разработка на основе управления механикой ударного взаимодействия круга с изделием высокопроизводительного конкурентоспособного процесса круглого алмазного шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов взамен существующего абразивного шлифования и составление научно обоснованных методик расчета оптимальных режимов шлифования.

Общая методика исследований. Изучение процесса шлифования как сложной системы производилось путем ее декомпозиции на составные части, включающие динамику ударно-циклического взаимодействия круга с изделием и отдельного режущего зерна с обрабатываемым металлом, кинематику вероятностного съема металла и формирования поверхностей идеальным неизнашиваемым шлифовальным кругом, механику износа зерен и стабилизацию режущего рельефа алмазного круга в процессе шлифования. Теоретически исследования проводились на базе основ теории резания металлов с привлечением методов теории колебаний деформируемых систем, теории случайных функций и разделов математического анализа. Для проверки и корректировки аналитических решений, установления ряда физических характеристик шлифования, необходимых для аналитической оптимизации процесса, но не поддающихся расчету, проводились экспериментальные исследования производительности шлифования, параметров износа круга и качества обработанных поверхностей, сил резания и энергоемкости шлифования. Измерительная аппаратура и средства контроля в основном применялись стандартные. Наряду с известными методиками в работе предложен ряд новых методик исследования, заключающихся в расчетно-экспериментальном определении допустимой (прочностной) толщины среза, силы, действующей на максимально выступающее зерно, степени заполнения стружкой межзеренного пространства круга, нового параметра – прочности обрабатываемого материала на срез и других. Все перечисленные расчеты

выполнены на ЭВМ М–222 с помощью разработанных автором алгоритмов и программ.

Научная новизна. Раскрыты закономерности и особенности круглого наружного алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями, уточнен механизм износа алмазного круга в условиях интенсивного ударного взаимодействия с обрабатываемым изделием, установлены пути повышения эффективности такого шлифования.

Получено аналитическое решение задачи об ударном взаимодействии единичного зерна круга с обрабатываемым металлом, обоснована механика возникновения в режущем зерне динамических перегрузок, доказана незначительность влияния переходных колебательных процессов в системе “зерно–связка” на динамическую нагруженность зерна.

На основе вероятностного представления процесса шлифования получено уравнение линии полного съема металла, определяющего положение поверхности резания при шлифовании и являющегося основой для расчета основных физических и технологических параметров шлифования.

Аналитически и экспериментально установлены основные закономерности и преимущества круглого алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями в условиях больших глубин шлифования (0,1–1 мм/ход), небольшой окружной скорости изделий (1–10 м/мин) и долевой продольной подачи, близкой к единице.

Расчетно-экспериментальным путем установлена взаимосвязь параметров установившегося рельефа алмазного круга с его механизмом износа и уровнем относительного расхода алмаза, вскрыта роль объема стружки и условных напряжений шлифования в формировании устойчивого рельефа круга, соответствующего условию оптимального самозатачивания алмазного круга.

Доказано существование минимума относительного расхода алмаза, который соответствует условию равновесия системы “зерно–связка” и определяет границу перехода одного механизма износа круга в другой, а также соответствие точек минимума относительного расхода алмаза, независимо от сочетания режимных параметров, приблизительно одинаковому значению производительности шлифования.

Разработана научная методика расчета и оптимизации процессов алмазного шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов.

Практическая ценность и реализация работы. Впервые сформулированы научно обоснованные принципы управления процессом круглого шлифования твердосплавных изделий с прерывистыми поверхностями и на их базе предложен высокопроизводительный конкурентоспособный процесс алмазного шлифования взамен существующего абразивного. Разработана научная методика расчета оптимальных режимов шлифования и выбора оптимальных характеристик алмазного круга, которая может быть применена для расчета и проектирования технологических процессов шлифования. Результаты исследований внедрены на ряде предприятий с экономическим эффектом свыше 200 тыс. руб. Рекомендации работы положены в основу изготовления крупногабаритных алмазных кругов формы 1А1 диаметром 600 мм, специальных круглошлифоваль-

ных станков на базе мод. 3М151 для глубинного шлифования многолезвийных инструментов и станка-автомата для шлифования плашек.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на Международном семинаре “Сверхтвердые материалы”, г. Киев, 1981; 5-й Международной конференции по режущим инструментам, ВНР, г. Мишколец, 1982; всесоюзной конференции “Алмаз-81”, г. Харьков, 1981; IX-й конференции инструментальщиков Урала “Повышение эффективности инструментального производства”, г. Пермь, 1982; Всесоюзной конференции “Надежность режущего инструмента”, г. Краматорск, 1982; Всесоюзной конференции “Расширение использования алмазов и других сверхтвердых материалов в промышленности и строительстве”, г. Подольск, 1982; конференции “Технологическое обеспечение эффективности и качества продукции”, г. Пенза, 1982; краевой конференции “Применение прогрессивных инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущих инструментов”, г. Краснодар, 1983; республиканской конференции “Прогрессивные технологические процессы и повышение эффективности механической обработки конструкционных труднообрабатываемых и неметаллических материалов”, г. Днепропетровск, 1983; республиканских семинарах, г. Киев, 1981; г. Волжский, 1981; г. Киев, 1982; г. Пенза, 1982; г. Хмельницкий, 1983; г. Харьков, 1982; г. Киев, 1982; г. Курск, 1984; II и VIII Республканских конференциях молодых ученых, г. Киев, 1981; 1982; конференциях профессорско-преподавательского состава Харьковского политехнического института (1980–1988 гг.); заседания кафедры “Динамика и прочность машин” ХПИ, 1983; заседания кафедры “Металлорежущие станки и инструменты” Донецкого политехнического института, 1984; совместном заседании кафедр “Резание металлов и режущий инструмент” и “технологии машиностроения” Одесского политехнического института, 1984; заседании секции “Инструменты из сверхтвердых материалов и твердых сплавов, технология их изготовления и применения” Ученого совета ИСМ АН УССР, 1984.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, общих выводов и рекомендаций, содержит 140 страниц машинописного текста, 70 иллюстраций, 20 таблиц. Список использованной литературы включает 172 источника. В приложениях изложен расчет технико-экономической эффективности внедрений и приложены копии их актов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе приведен обзор литературных данных, посвященных изучению работоспособности алмазных кругов при шлифовании изделий с прерывистыми поверхностями и дан анализ уровня действующих на специализированных инструментальных заводах технологических процессов круглого наружного абразивного шлифования твердосплавных и быстрорежущих многолезвийных инструментов. Отмечается, что абразивные круги, работая в условиях интенсивного износа и самозатачивания, позволяют реализовать режимную производительность обработки порядка 10–20 тыс. мм³/мин. Шлифование ал-

мазными кругами с такой производительностью при тех же режимах резания в силу ударного взаимодействия приводит к значительному износу последних и попытка замены ими абразивных кругов до настоящего времени успеха не имела, хотя применение алмаза в качестве абразива и решает проблему высококачественной обработки.

Для анализа динамического состояния технологической системы рассмотрена расчетная схема в виде одномассовой динамической системы, нагруженной единичным импульсом силы P_0 , возникающим в момент контакта круга с обрабатываемым элементом изделия, и приведено решение дифференциального уравнения:

$$x(\tau) = 2 \cdot x_{cm} \cdot \sin \frac{kT}{2} \cdot \sin k \left(\tau - \frac{T}{2} \right), \quad (1)$$

где $x_{cm} = \frac{P_0}{c}$; c – жесткость технологической системы, Н/мм; T – время контакта круга с обрабатываемым элементом изделия, с; k – собственная частота колебаний, 1/с.

Анализ входящего в (1) слагаемого $\sin k \left(\tau - \frac{T}{2} \right)$ показывает, что в силу инерционности рассматриваемая динамическая система не успевает среагировать на импульс силы P_0 и получить в начальный момент контакта круга с обрабатываемым элементом изделия перемещения, соответствующие статическому значению этой силы. Технологическая система в этом случае приобретает как бы свойства, эквивалентные большей приведенной контактной жесткости. Уменьшение динамических перемещений приводит к более глубокому внедрению элемента изделия в рабочую поверхность круга и интенсивному удалению верхних слоев связки. Обрабатываемое изделие выполняет, по сути, роль правящего инструмента.

Для эффективного ведения процесса в таких условиях следует строго регламентировать глубину внедрения металла в рабочую поверхность круга. Подводимый в зону резания металл должен быть полностью снят на заданном уровне высоты рельефа круга, определяемом устойчивостью зерен в связке. Это позволит распределить энергию удара в основном между режущими зернами и исключить из взаимодействия связку. Для реализации такой схемы управления процессом необходимо знать взаимосвязи параметров управления – максимальной толщины среза – со всеми физическими и технологическими параметрами шлифования, включая силы резания, действующие на зерна и удерживающие их в связке, степень заполнения стружкой межзеренного пространства круга, величину износа зерен и т.д., что позволит правильно определить оптимальные условия обработки. Наиболее полно и физически достоверно такие взаимосвязи могут быть установлены методами математического моделирования шлифования, которые в последние годы благодаря трудам отечественных ученых А.Н. резникова, П.И. Ящерицына, Д.Г. Евсеева, А.В. Якимова, С.Н. Корчака, Э.В. Рыжова, Е.Н. Маслова, С.А. Попова, А.В. Королева, В.И. Островского, Л.Н.

Филимонова, Ю.К. Новоселова, О.Б. Федосеева и других получили широкое развитие в абразивной обработке и открыли новые возможности в решении важных практических задач.

В связи с этим в работе решались следующие задачи:

- аналитически с позиций теории случайных функций описать рабочую поверхность круга, закономерности съема металла в зоне резания и формообразование поверхностей при шлифовании;
- установить аналитическую взаимосвязь производительности шлифования, относительного расхода алмаза, параметров точности и шероховатости обработки с максимальной толщиной среза;
- аналитически описать механику износа зерен, образования установившегося режущего рельефа круга в процессе шлифования и раскрыть физическую сущность оптимального устойчивого равновесия системы “зерно–связка”;
- провести многопараметрическую оптимизацию шлифования на базе кинематического представления о процессе шлифования;
- на основе теоретических и экспериментальных исследований предложить наиболее предпочтительный вариант круглого алмазного шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов;
- разработать научную методику расчета, проектирования и оптимизации процессов шлифования, составить вариант расчетных нормативов режимов шлифования;
- провести промышленную проверку и внедрение результатов работы.

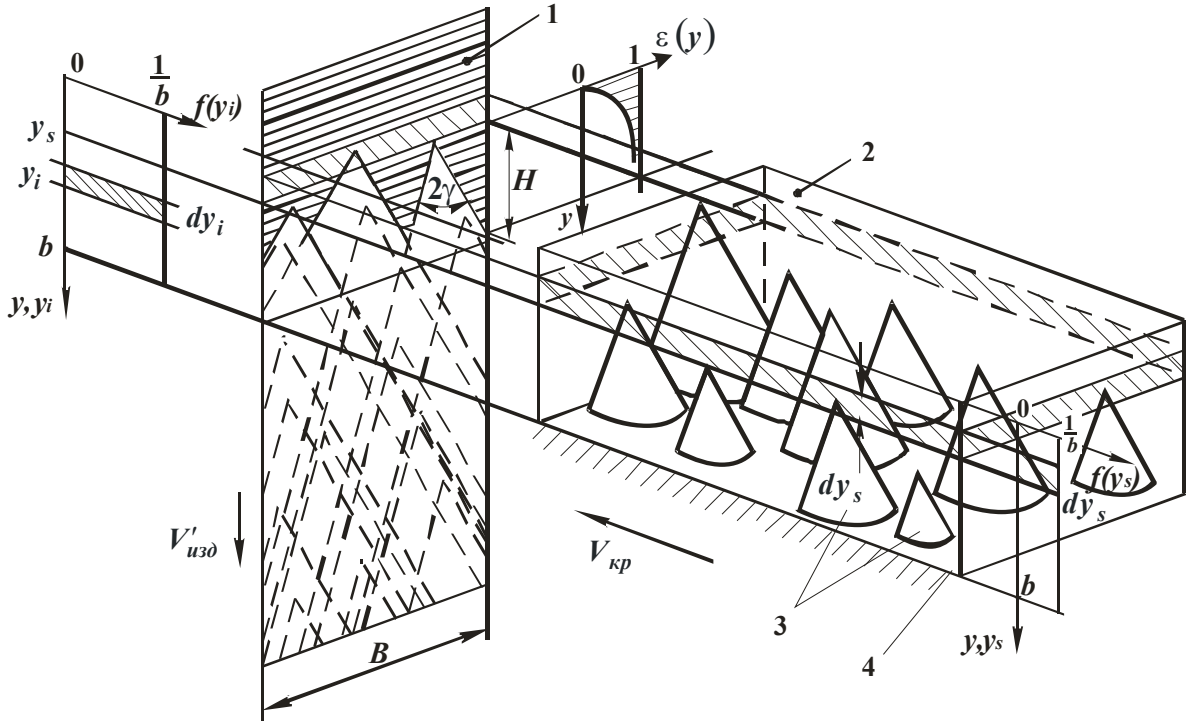
Во втором разделе приведена кинематическая (вероятностная) модель круглого продольного шлифования. Для вероятностного описания участия зерен в резании введена функция – относительная полнота профиля круга $\varepsilon(y)$, которая по структуре построения аналогична “относительной опорной длине микропрофиля обработанной поверхности” и учитывает перекрытие проекции зерен на радиально движущейся плоскости, рис. 1а. Снимаемый припуск в расчетной схеме представлен пакетом бесконечно тонких цилиндрических оболочек, которые под разными углами входят в рабочую поверхность круга, рис. 1б. В результате взаимодействия оболочек с зернами, с каждой оболочки происходит съем металла, описываемый $\varepsilon_n(y)$:

$$\varepsilon_n(y) = 1 - \exp \left\{ - \frac{\sqrt{2} \cdot k \cdot V_{кр}}{3 \cdot b \cdot V_{изд} \cdot \sqrt{\rho}} \cdot \left[\frac{(t_{nT} - y)^3}{2 \cdot \sqrt{t_{nT}}} + \sum_{i=0}^{n-2} t_{iT}^{5/2} \right] \right\}, \quad (2)$$

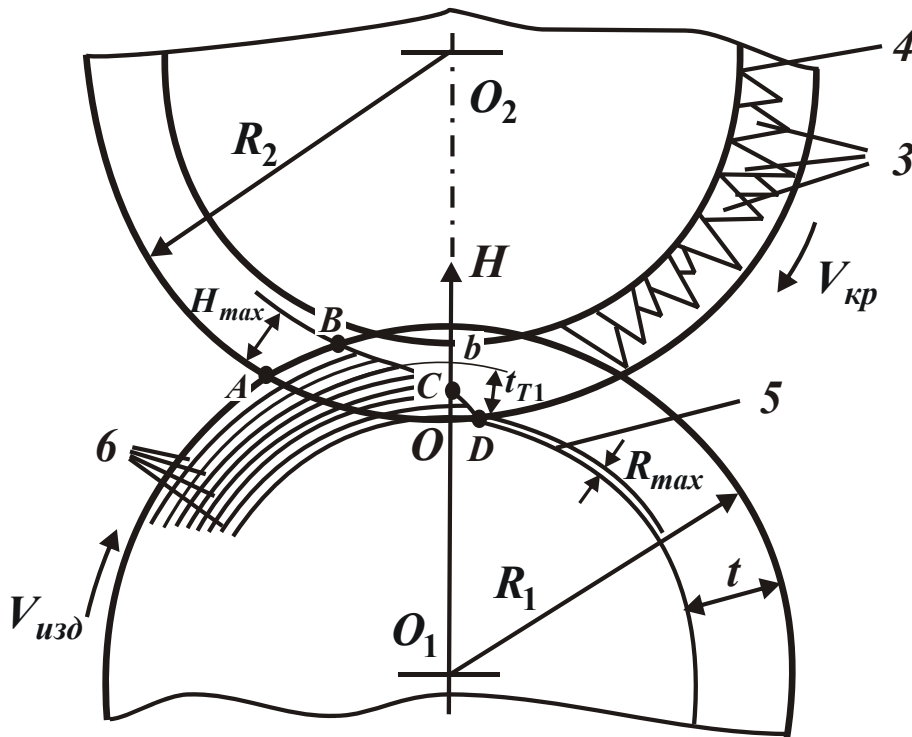
где n – число контактов фиксированного сечения оболочки с рабочей поверхностью круга; k – поверхностная концентрация зерен на круге, шт/мм²; b – максимальное выступание зерен над связкой, мм; $V_{кр}$, $V_{изд}$ – соответственно скорости круга и изделия, мм/с; $\rho = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$; R_1 , R_2 – радиусы изделия и круга, мм; ; t_T – исходная координата фиксированной оболочки, мм; t_{iT} – координата оболочки при i -ом контакте ее с кругом, мм; t_{nT} – координата оболочки

при n -ом контакте ее с кругом, мм; $t_{iT} = t_T + i \cdot t$; $t_{nT} = t_T + (n-1) \cdot t$; t – глубина шлифования, мм.

Рис. 1. Расчетные схемы относительной полноты профиля круга (а) и круглого продольного шлифования (б)



а



б

1 – движущаяся плоскость; 2 – выделенный элементарный объем рабочей поверхности круга; 3 – режущие зерна; 4 – уровень связи; 5 – слой остаточной шероховатости; 6 – элементарные цилиндрические оболочки припуска.

Для описания границы завершения диспергирования режущими зернами металла по всей длине дуги контакта круга с изделием введено понятие линии полного съема металла, определяющей положение поверхности резания при шлифовании и имеющей аналитическое выражение:

$$H = \sqrt[6]{4 \cdot t_{nT}} \cdot \sqrt{2 \cdot \sqrt{t_{nT_{экстр}}} + \sum_{i=0}^{n-2} t_{iT_{экстр}}^{5/2} - \sum_{i=0}^{n-2} t_{iT}^{5/2}}, \quad (3)$$

где H_{max} – максимальная толщина среза, мм; $t_{nT_{экстр}}$ – координата экстремальной оболочки, у которой полный профиль, $\varepsilon(y)=0,95$, образуется на уровне H_{max} , мм; $t_{iT_{экстр}}$ – координата экстремальной оболочки при i -ом контакте ее с кругом, мм.

Используя характерные точки линии полного съема металла А, В, С, D, получены аналитические выражения основных параметров шлифования, которые для случая $t > H_{max}$ значительно упрощаются:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{изд}}{m \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt[6]{2 \cdot S_{\delta} \cdot t \cdot \rho}. \quad (4)$$

$$R_{max} = \sqrt[5]{\frac{H_{max}^6}{4 \cdot S_{\delta} \cdot t}} = \sqrt[5]{\frac{18 \cdot 10^4 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{изд}^2 \cdot \rho}{m^2 \cdot V_{кр}^2}}. \quad (5)$$

$$Q = \frac{m \cdot V_{кр} \cdot H_{max}^3 \cdot B \cdot \sqrt{S_{\delta} \cdot t}}{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho}}, \quad (6)$$

где \bar{X} – зернистость круга, мм; m – объемная концентрация зерен; S_{δ} – долевая продольная подача; R_{max} – максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности, мм; Q – производительность шлифования, мм³/с; B – ширина круга, мм.

Принимая параметр управления процессом шлифования изделий с прерывистыми поверхностями H_{max} постоянным, из (6) видно, что добиться повышения производительности шлифования Q можно путем увеличения t , S_{δ} при соответствующем уменьшении $V_{изд}$. Следуя (5), такое сочетание режимных параметров одновременно способствует снижению R_{max} , рис. 2а. В выражение (6) параметр H_{max} входит с наибольшей степенью, что подтверждает целесообразность выбора его в качестве управляющего параметра.

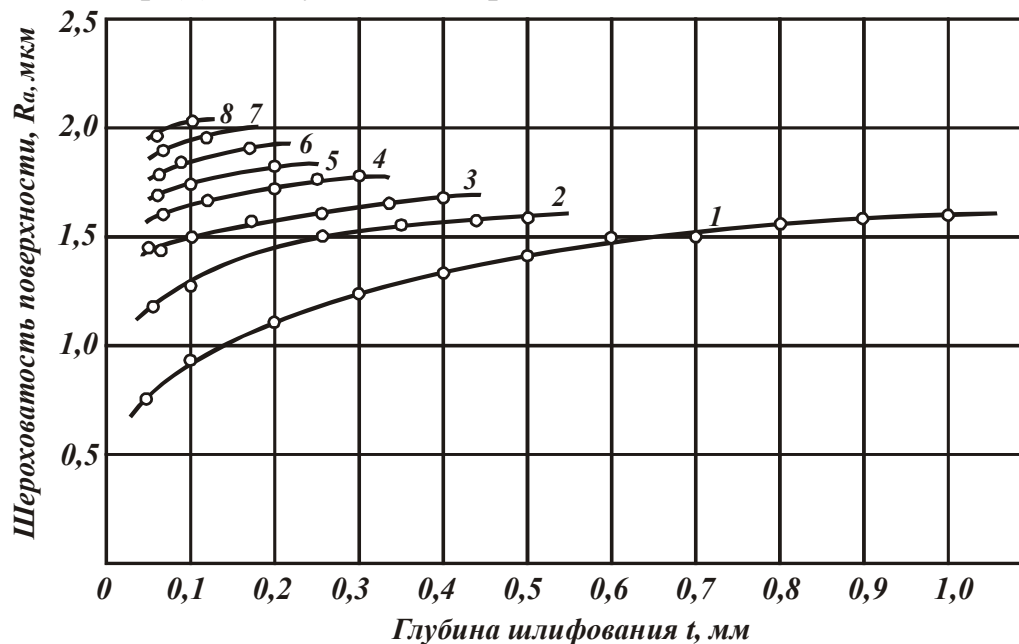
Для оптимизации шлифования по износостойкости алмазного круга относительный расход алмаза представлен эквивалентной функцией

$$\lambda = \frac{H_{max}}{Q} = \frac{\bar{X}}{B} \cdot \sqrt[3]{\frac{600 \cdot \pi}{m \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt[6]{\frac{2 \cdot \rho}{S_{\delta}^5 \cdot t^5 \cdot V_{изд}^4}}. \quad (7)$$

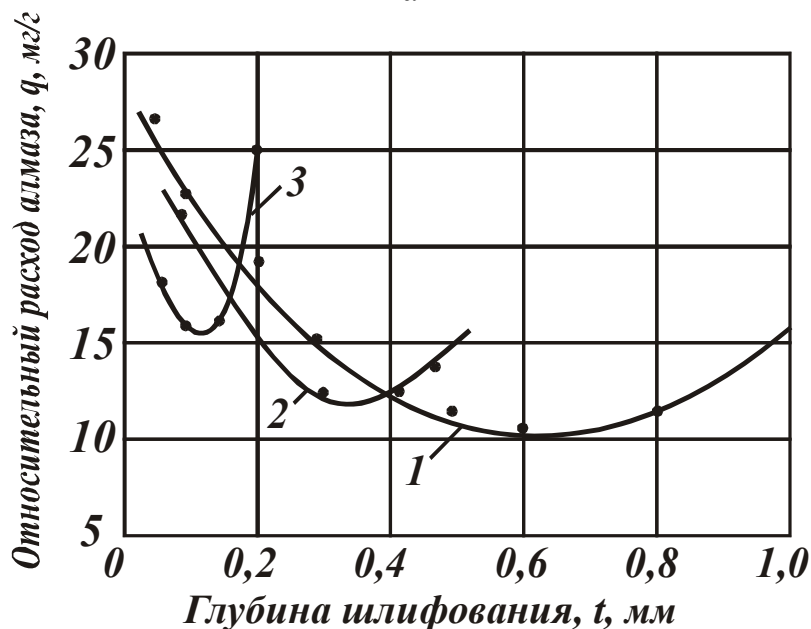
Из (7) следует, что увеличение t при $V_{изд} = const$ приводит к снижению λ . Однако это возможно до определенного значения t_0 , обусловленного до-

стижением допустимой (прочностной) толщины среза H_{max}^{don} . Дальнейшее увеличение t приведет к росту H_{max} , потере устойчивости зерен в связке и интенсивному износу круга.

Рис. 2. Зависимости параметра шероховатости R_a (а) и относительного расхода алмаза q (б) от глубины шлифования t



а



б

а – круг 1А1 300х25 АС6 200/160 – 100% – МВ1; обр. мат. ВК8; $V_{кр}=35$ м/с; $S_d=0,9$; $R_1=80$ мм; скорость изделия: 1, ..., 6 – соответственно, $V_{изд}=1...6$ м/мин, 7 – $V_{изд}=8$ м/мин, 8 – $V_{изд}=10$ м/мин,

б – круг 1А1 300х25 АС6 250/200 – 100% – МВ1; обр. мат. ВК15; $V_{кр}=35$ м/с; $S_d=0,9$; $R_1=80$ мм; 1 – $V_{изд}=1$ м/мин, 2 – $V_{изд}=3$ м/мин, 3 – $V_{изд}=6$ м/мин.

Такая закономерность подтверждена экспериментально, рис. 2,б, т.е. для круга существует допустимая толщина среза H_{max}^{don} , при достижении которой относительный расход алмаза принимает минимальное значение

$$\lambda_{min} = \frac{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot H_{max}^2 \cdot B \cdot \sqrt{S_{\partial}} \cdot t}. \quad (8)$$

Как следует из (8) и рис. 2,б, добиться снижения относительного расхода алмаза можно увеличением t при соответствующем уменьшении $V_{изд}$. Таким образом, аналитически установлена и экспериментально подтверждена целесообразность круглого шлифования изделий с прерывистыми поверхностями по схеме глубинного шлифования с небольшой окружной скоростью изделия и долевой продольной подачей, близкой к единице. Такая схема шлифования одновременно позволяет исключить образование “завалов” режущих кромок обрабатываемых многолезвийных инструментов.

В третьем разделе приведена упрощенная физическая модель алмазного шлифования, в которой система “круг–изделие” представлена как сложная замкнутая механическая система, функционирование которой всецело подчинено принципу энергетического равновесия. Разработке такой модели способствовало решение задачи стабилизации рельефа алмазного круга для различных режимов шлифования, характеристик круга и обрабатываемых металлов, в результате которой составлена замкнутая система основных уравнений для $S_{\partial}=1$:

$$H = \sqrt[3]{\frac{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \rho \cdot V_{изд} \cdot \sqrt{2 \cdot t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot A}}. \quad (9)$$

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot A^2 \cdot V_{изд} \cdot \sqrt{2 \cdot t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot P^2}}. \quad (10)$$

$$\eta = 1 - \frac{A}{P}. \quad (11)$$

$$R_{max} = \sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \cdot \frac{18 \cdot 10^4 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{изд}^2 \cdot \rho}{m^2 \cdot V_{кр}^2}}. \quad (12)$$

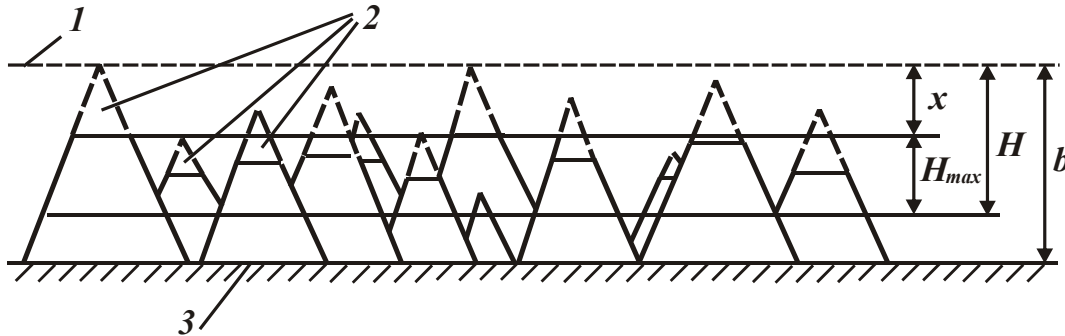
$$\sigma = \sqrt[3]{\frac{m^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot P^4}{600^2 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot A \cdot V_{изд}^2 \cdot 2 \cdot t \cdot \rho}}. \quad (13)$$

$$F_T = B \cdot \sqrt[3]{\frac{m^2 \cdot V_{изд} \cdot t^2 \cdot P^4}{600^2 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot A \cdot V_{кр} \cdot 2 \cdot \rho}}, \quad (14)$$

где H – максимальная глубина внедрения металла в рабочую поверхность круга для исходного (неизношенного) рельефа, мм, рис. 3; P – предельная сила, действующая на максимально выступающее зерно, Н; A – параметр, характеризующий прочностные свойства обрабатываемого металла, Н; $\eta = x/H$ – коэффициент, учитывающий степень износа зерна; x – износ зерна, мм;

σ – условное напряжение шлифования, МПа; F_T – тангенциальная составляющая силы резания, Н.

Рис. 3. Расчетная схема параметров стабилизированного рельефа алмазного круга



1 – уровень вершин максимально выступающих неизношенных зерен над связкой; 2 – изношенные части зерен; 3 – уровень связки.

Полученные зависимости содержат два неизвестных параметра – P и A . Первый из них в зависимости от механизма износа круга может принимать значение, равное прочности зерна на раздавливание или силе, удерживающей зерно в связке. Второй параметр определяется расчетно-экспериментальным путем. Приведенные в табл. 1 и табл. 2 расчетные значения параметра шероховатости $R_a = 0,2 \cdot R_{max}$, условного напряжения шлифования σ и силы резания F_T показывает на достаточную степень сходимости с результатами экспериментов, погрешность расчетов составляет 5 – 25 %.

Таблица 1

Значения параметра шероховатости R_a

(обр. мат. ВК8; круг 1А1 300х25 АС6 250/200 – 100% – МВ1;

$V_{кр} = 30$ м/с; $t = 0,1$ мм/ход; $S_\delta = 0,9$; $R_1 = 100$ мм; $P = 9$ Н; $A = 5,76$ Н)

$V_{изд}$, м/мин	1	2	3	4
$R_{a.эксп}$, мкм	1,10	1,65	2,05	2,17
$R_{a.расч}$, мкм	1,10	1,70	1,91	2,25

Таблица 2

Значения σ и F_T

(обр. мат. Т15К10; круг 1А1 300х25 АС6 200/160 – 100% – М04;

$V_{кр} = 30$ м/с; $t = 0,2$ мм/ход; $S_\delta = 0,9$; $R_1 = 100$ мм; $P = 7,7$ Н; $A = 5,76$ Н)

$V_{изд}$, м/мин	2,5	5	10
$\sigma_{расч}$, МПа	15580	9815	6183
$\sigma_{эксп}$, МПа	20161	12960	7920
$F_{T.расч}$, Н	108,2	136,2	172
$F_{T.эксп}$, Н	140	180	220

Для определения силы P , удерживающей зерно в связке, решена задача устойчивости системы “зерно–связка” при выполнении условия равенства скоростей износа зерен и связки, которая свелась к решению уравнений:

$$a \cdot \frac{\bar{X}}{(P+a)} = \xi \cdot \xi_1 \cdot \Delta \cdot \frac{H_{max}}{H_0}; \quad c \cdot H_{max} = \frac{1}{D \cdot \xi^2}, \quad (15)$$

где a – характеристика, учитывающая прочностные свойства связки, Н; ξ – коэффициент заполнения стружкой объема межзеренного пространства круга; $\Delta = V_{изд} \cdot t / V_{кр}$ – толщина слоя металла (в виде жидкости), равномерно заполнившего ширину круга, мм; H_0 – базовое значение H_{max} ; c – коэффициент, учитывающий прочность зерна; D – параметр, учитывающий износостойкость связки, 1/мм; ξ_1 – коэффициент, характеризующий склонность обрабатываемого металла к стружкообразованию (для твердых сплавов $\xi_1=1$, для сталей $\xi_1=1-2$ и т.д.). Скорость износа зерен в (15) представлена функцией от H_{max} , а скорость износа связки – функцией от давления стружки в межзеренном пространстве круга, определяемого коэффициентом ξ . В результате решения установлена зависимость для определения силы P (в неявном виде):

$$V_{изд} = \frac{V_{кр}}{t} \cdot \left[\frac{c^3 \cdot D^3 \cdot H_0^6 \cdot a^6 \cdot \bar{X}^3 \cdot m \cdot P^2 \cdot t^{0,5}}{\xi_1^6 \cdot (P+a)^6 \cdot 600 \cdot \pi \cdot A^2 \cdot (2 \cdot \rho)^{0,5}} \right]^{0,14}. \quad (16)$$

Полученные зависимости (9) – (14) и (16) позволили уточнить кинематические решения, приведенные во втором разделе, и углубленно раскрыть физическую сущность исследуемого глубинного шлифования. Расчетно-экспериментальным путем доказано, что существование точек минимума относительного расхода алмаза обусловлено трансформацией механизма износа круга – превалирующего объемного разрушения зерен в их преждевременное выпадение из связки без разрушения. В точках минимума сила резания, действующая на максимально выступающее зерно, одновременно равна разрушающей силе и силе, удерживающей зерно в связке. Производительность шлифования практически не зависит от режимов шлифования, а определяется характеристикой круга и обрабатываемым металлом, что связано в первую очередь с условиями размещения стружек в межзеренном пространстве круга.

Выполненные экспериментальные исследования производительности шлифования и других технологических показателей в точках минимума относительного расхода алмаза для различных характеристик кругов и обрабатываемых твердых сплавов показали совпадение теоретических и экспериментальных результатов, что позволяет в первом приближении аналитически прогнозировать оптимальные режимы шлифования и характеристики алмазных кругов, не прибегая к трудоемким экспериментам. Неизвестные параметры A , a , c , D определяются по их базовым значениям, установленным расчетно-экспериментальным путем, для чего необходимо базовые значения увеличить или уменьшить в соответствующее число раз, определяемое соотношением их физико-механических свойств.

Следует отметить, что в зависимости от вида принятых законов изменения различных функций возможны несколько иные функциональные взаимосвязи между параметрами шлифования, однако структура расчета останется прежней, т.к. математическая модель базируется на энергетическом принципе и характеризуется замкнутостью системы уравнений.

В четвертом разделе приведены методики и алгоритмы расчетов и проектирования высокопроизводительных процессов круглого шлифования изделий с прерывистыми поверхностями на основе кинематической и физической моделей шлифования. Отмечается, что физическая модель требует значительно меньшего числа исходных экспериментальных данных, чем кинематическая. Например, при расчете в рамках физической модели достаточно знать параметры A , a , c , D для базовой пары “круг–изделие”. При расчете по кинематической модели необходимо иметь банк данных по допустимым (прочностным) толщинам среза для всех возможных сочетаний характеристик круга и обрабатываемых материалов. Показано, что в рамках кинематической модели все основные параметры шлифования определяются двумя величинами t и H_{max} , из которых t является независимой переменной, а H_{max} выражается через остальные режимные параметры и характеристики круга, изделия. Такое представление существенно упрощает решение оптимизационных задач. Для выбора оптимальных режимов шлифования построены номограммы и даны алгоритмы расчетов в зависимости от технологических требований по производительности и шероховатости обработки, износа круга с учетом величины снимаемого припуска и вида операции (предварительное или окончательное шлифование).

Для расчетов по физической модели определены базовые значения параметров A , a , c , D при шлифовании твердого сплава ВК15 кругом 1А1 300х25х5 АС6 250/200 – МВ1 – 100%, которые составили $A=2,3$ Н; $a=6$ Н; $D=0,31$ 1/мм; $c=0,0044$. Используя соответствующие зависимости, рассчитаны значения $V_{изд}$, Q , q , R_{max} , σ , H_{max} , H , x , ξ , b для различных точек минимума относительного расхода алмаза, которые приняты в качестве оптимальных ($V_{кр}=30$ м/с; $S_d=1$; $R_1=100$ мм; $P=9$ Н), где b – максимальная высота выступающих зерен над связкой, табл. 3.

Как следует из табл. 3, глубинное алмазное шлифование с небольшой скоростью изделия позволяет улучшить основные технологические параметры обработки за исключением σ и, соответственно, F_T , которые возрастают в связи с уменьшением максимальной толщины среза H_{max} . Выполненные экспериментальные исследования такого шлифования кругами зернистостью 250/200 – 200/160 – 100% на связках МО4, МО16 показали возможность достижения производительности 20 – 30 тыс. мм³/мин при относительном расходе алмаза 1 – 3 мг/г, что выше уровня производительности абразивного шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов. Установлено, что предлагаемая схема шлифования не ухудшает качества обработки, в поверхностных слоях твердого сплава образуются благоприятные сжимающие остаточные напряжения. Для сравнения проводились исследования алмазного шлифования быстрорежущих многолезвийных инструментов в режиме непрерывной электрохимиче-

ской правки, которые подтвердили перспективность предлагаемой схемы шлифования.

Таблица 3

Расчетные значения параметров шлифования в зависимости от глубины шлифования t

t , мм/ход	0,02	0,05	0,1	0,3	0,6	1
$V_{изд}$, м/мин	24	10	5,4	1,92	1,0	0,63
Q , мм ³ /мин	12000	12500	13500	14400	15000	15750
q , мг/г	14,6	12,9	11,4	9,1	8,5	7,2
R_{max} , мкм	14,3	10	7,9	5,25	3,91	3,334
σ , МПа	6300	8400	9950	13610	16600	19330
H_{max} , мкм	19,1	16,5	15,25	13	11,4	10,9
H , мкм	75,25	65	60	51,25	45	42,9
x , мкм	56,15	48,5	44,75	38,25	33,6	30
ξ	196	215	223	243	256	266
b , мкм	67,5	66,4	69,1	68,6	65	69

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По характеру контакта круга с изделием круглое наружное шлифование прерывистых поверхностей существенно отличается от прерывистого шлифования и обычного шлифования сплошных поверхностей и характеризуется повышенным износом алмазного круга. Для повышения эффективности такого шлифования необходимо строго соблюдать определенные кинематические соотношения режимных параметров, обеспечивающих полный съем металла и диссипацию энергии удара на заданном уровне рельефа круга, определяемом прочностью зерен и их удержанием в связке.
2. Наиболее эффективно управлять процессом круглого шлифования изделий с прерывистыми поверхностями в условиях глубинного шлифования с небольшой скоростью изделия (1–10 м/мин) и долевым продольным подачей, близкой к единице. Такая схема шлифования отлична от известных схем круглого глубинного и многопроходного шлифования и позволяет до двух раз повысить производительность обработки без увеличения расхода алмаза и снижения качества обработки.
3. Закономерности съема металла и формообразование поверхностей при шлифовании вполне однозначно описываются линией полного съема металла, которая определяет положение вероятностной поверхности резания при шлифовании и позволяет по своим характерным точкам рассчитать основные физические и технологические параметры шлифования.
4. Оптимальному устойчивому равновесию системы “зерно–связка”, независимо от сочетания режимных параметров, в условиях исследуемого процесса всегда соответствует приблизительно одинаковая производительность обработки и минимум относительного расхода алмаза, что обусловлено одновре-

менным равенством единичной силы резания, разрушающей силы и силы, удерживающей зерно в связке. Значения технологических показателей в точках минимума определяются величиной линейного износа зерна до его объемного разрушения и степенью заполнения стружкой межзеренного пространства круга.

5. Разработанные кинематическая и упрощенная физическая модели шлифования позволяют (в первом приближении) производить оптимизацию режимов шлифования и характеристик алмазного круга. Причем, физическая модель располагает значительно большими возможностями, чем кинематическая, т.к. наряду с кинематико-геометрическими параметрами содержит ряд физических: прочность зерна, связки и обрабатываемого материала, условное напряжение шлифования и т.д., что сводит к минимуму объем необходимой исходной экспериментальной информации.
6. На основе проведенных исследований разработаны практические рекомендации и внедрены в производство процессы круглого алмазного шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов взамен абразивного, позволившие при экономически приемлемом расходе алмаза до двух раз повысить производительность шлифования, полностью исключить брак обработки и получить экономический эффект свыше 200 тыс. руб., что подтвердило правильность теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в работе.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Относительная полнота профиля рабочей поверхности круга из СТМ. – Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1980, вып. 24, с. 41-47.
2. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Кинематические соотношения параметров процесса шлифования изделий с прерывистыми поверхностями. – Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1980, вып. 24, с. 99-105.
3. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Динамика переходных процессов взаимодействия режущего клина инструмента с обрабатываемым изделием. – Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1981, вып. 25, с. 18-25.
4. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Предельная кинематическая производительность процесса шлифования. – Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1981, вып. 25, с. 71-78.
5. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Оптимизация процесса круглого продольного шлифования по предельной кинематической производительности. – Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1981, вып. 26, с. 162-166.
6. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Формообразование поверхности при круглом продольном шлифовании. – В кн.: Исслед. в обл. инструм. пр-ва и обраб. металлов резанием. – Тула: ТПИ, 1982, с. 54-61.
7. Раб А.Ф., Новиков Ф.В., Сошников С.А. Шлифование прерывистых поверхностей кругами из сверхтвердых абразивов. – В кн.: Сверхтвердые материалы: Международный семинар (Киев, 17–22 июня 1981): Тез. докл. Т. 2. - Киев: ИСМ АН УССР, 1981, с.73-74.

8. Раб А.Ф., Новиков Ф.В., Сошников С.А. Условные напряжения резания как ограничивающий фактор интенсификации процесса шлифования. – В кн.: Всесоюз. науч.-техн. конф.: Современные проблемы резания инструментами из сверхтвердых материалов (Харьков, 1–2 октября 1981): Тез. докл.: ХПИ им. В.И. Ленина, 1981, т. 2, с.192-194.
9. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Точность формы при круглом продольном шлифовании изделий с прерывистыми поверхностями. – Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1982, вып. 27, с. 38-43.
10. Раб А.Ф., Новиков Ф.В., Дубина Н.И. Алгоритм кинематического расчета оптимальных параметров режима шлифования. – В кн.: Исслед. в обл. инструм. пр-ва и обраб. металлов резанием. – Тула: ТПИ, 1983, с. 80–86.
11. Раб А.Ф., Новиков Ф.В., Сошников С.А. Аналитическая оценка износостойкости алмазных кругов при круглом продольном шлифовании изделий с прерывистыми поверхностями. – Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1982, вып. 28, с. 15-18.
12. Серов Б.С., Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Кинематические и динамические особенности процесса круглого шлифования прерывистых поверхностей. – Вестн. Харьк. политехн. ин-та, 1982, № 194. Машиностроение, вып. 12, с. 36-38.
13. Раб А.Ф., Новиков Ф.В., Сошников С.А., Дубина Н.И. Прогрессивный процесс круглого алмазного шлифования многолезвийных инструментов. – В кн.: Повышение эффективности инструментального производства: XI науч.-техн. конф. инструментальщиков Урала. – Тез. докл. Пермь, 1982, с. 76-77.
14. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Аналитическое описание механизма износа алмазного круга. – Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1983, вып. 29, с.15-23.
15. Раб А.Ф., Новиков Ф.В., Сошников С.А., Дубина Н.И. Новое в кинематике образования шероховатости поверхности при шлифовании. – В кн.: Прогрессивные методы повышения качества, долговечности и надежности деталей машин при алмазно-абразивной обработке: Науч.-техн. семинар. Тез. докл. Волжский, 1981, с. 63-64.
16. Новиков Ф.В. Кинетика образования режущего рельефа алмазного круга в процессе шлифования. – Контактные процессы при больших пластических деформациях. Темат. сб. научн. трудов. Харьков, 1982, с. 37-43.
17. Новиков Ф.В., Раб А.Ф., Сошников С.А., Серов Б.С. Оптимизация алмазного круглого шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов на основе приведенной толщины среза. – В кн.: Материалы 5-й международной конференции по режущим инструментам, ВНР, Мишколец, 1982, с. 11.17/I – 11.17/II.
18. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании. – Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении: Межвуз. сб. научн. тр. Пермский политехн. ин-т, 1983, с. 52-57.

19. Новиков Ф.В. Вероятностный расчет максимальной толщины среза и шероховатости обработанной поверхности при круглом продольном шлифовании. – Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1983, вып. 30, с. 73-78.
20. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Некоторые принципы условной оптимизации алмазного шлифования. – Производство и применение сверхтвердых материалов. Сб. научн. трудов. Киев, 1983, с. 154-156.
21. Новиков Ф.В., Дубина Н.И., Сошников С.А. Вопросы устойчивости и стабилизации режущего рельефа алмазного круга. – В кн.: Прогрессивные технологические процессы и повышение эффективности механической обработки труднообрабатываемых и неметаллических материалов: Республ. науч.-техн. конф. Тез. докл. Днепропетровск, 1983, с. 66-67.
22. Новиков Ф.В., Раб А.Ф., Сошников С.А. Некоторые предпосылки разработки физической модели алмазного шлифования. – Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1984, вып. 31, с. 42-50.
23. Новиков Ф.В. Режущий рельеф алмазного круга и его роль в формировании технологических показателей шлифования. – Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1984, вып. 32, с. 64-70.

Ответственный за выпуск доц. А.И. Грабченко

Подписано в печать 16.07.84 БЦ 08771. Формат бумаги 60x84/16.

Бумага типографская № 2. Офсетная печать. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ 270. Бесплатно.

Ротапринт института “Укроргстанкинпром”

310125, Харьков - 125, Красношкольная набережная, 16