

РЕЧЕНКО Денис Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЗАТАЧИВАНИЯ
ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ С
ПРЕРЫВИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Специальность 05.03.01 – Технологии и оборудование механической и
физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2009

Работа выполнена на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты»
Машиностроительного института Омского государственного технического
университета

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
ПОПОВ Андрей Юрьевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
ЯНЮШКИН Александр Сергеевич
кандидат технических наук, доцент
КОНЫШИН Дмитрий Владимирович

Ведущее предприятие:

ОАО «Омское моторостроительное
конструкторское бюро».

Защита состоится « 23 » декабря 2009 года в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.01 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53-а.

Автореферат разослан «__» _____ 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских
диссертаций Д 212.269.01

Т.Г. Костюченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Получение инструмента с радиусом округления лезвия в пределах одного микрометра открывает возможности применения его на металлорежущих станках способных позиционировать и перемещать инструмент с точностью до 1 микрометра. Традиционные технологии затачивания позволяют получать высокие параметры качества лезвия лишь с помощью трудоемких доводочных операций, при этом не всегда гарантируется отсутствие завалов и прижогов. Одним из перспективных путей к достижению поставленной цели – переход на высокоскоростное затачивание, которое позволяет, используя традиционные схемы формообразования режущей части, получать качественно новый результат за счет изменения механизма износа зерен шлифовального круга и процесса удаления обрабатываемого материала. Однако в литературе отсутствуют результаты исследований по высокоскоростному шлифованию твердых сплавов алмазными кругами и не определена граница высокоскоростного шлифования. Повышение скорости шлифования до нескольких сотен метров в секунду связано с решением сложных технических задач – проблем прочности шлифовального круга, разработки и балансировки привода. Представленная работа выполнена для определения целесообразности повышения скорости резания и исследования основных закономерностей высокоскоростного затачивания и шлифования. Основные исследования проведены по затачиванию твердосплавных пластин, что и определило тему и направление работы.

Цель работы: повышение качества лезвия режущего твердосплавного инструмента при затачивании за счет применения алмазных кругов с прерывистой поверхностью, повышения скорости резания свыше 120 (м/с) и определения рациональных режимов обработки.

Научная новизна: Установлено, что при скорости резания алмазными кругами на бакелитовой связке свыше 120 (м/с) происходят существенные изменения параметров процесса обработки и установлены следующие закономерности:

- изменяется механизм износа алмазных зерен шлифовального круга - зерна становятся острыми;
- силы резания снижаются пропорционально увеличению скорости резания, а радиус округления лезвия обрабатываемого твердосплавного инструмента уменьшается обратно пропорционально;
- с повышением скорости резания до 180 (м/с) при затачивании твердосплавного инструмента контактная температура в зоне шлифования монотонно возрастает, после чего стабилизируется.

Практическая ценность работы заключается в:

- расчете основных параметров и определении требований привода по вибродинамическим характеристикам;
- разработке конструкции и расчете конструктивных параметров сборного шлифовального круга;
- определении рациональных режимов затачивания твердосплавных инструментов.

Реализация результатов работы: с учетом результатов представленной работы спроектирован и изготовлен шлифовально-заточной полуавтомат с ЧПУ мод. ВЗ-700-Ф4, оснащенный шпиндельным узлом, для затачивания твердосплавного инструмента со скоростью резания до 200 (м/с) (стоимость станка 5,5 млн. руб). Подписан протокол о намерениях с ОАО «Завод ВИЗАС» по созданию совместной лаборатории «Инструментальная техника и технология высокоскоростной обработки».

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на VI международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск-2007), Всероссийской научно-технической конференции «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!» (Омск-2008), VI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск-2008), IV Международной научно-технической конференции «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении» (Тюмень-2008), Международной научно-технической конференции «Наука и производство – 2009» (Брянск-2009), а также на заседании кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» машиностроительного института, Омского государственного технического университета.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 22 публикациях, из них 8 в журналах, входящих в перечень ВАК и получен патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы из 140 наименований, изложена на 162 страницах машинописного текста, включая 60 иллюстрации и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность и практическая ценность диссертационной работы, формулируется цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор исследований, посвященных анализу процесса шлифования твердых сплавов. Выполнен анализ литературных данных по рассматриваемому вопросу. Значительный вклад в исследования процессов шлифования и затачивания инструмента внесли: С.Г. Воронов, К. Гьюринг, В.Ф. Казаков, С.Н. Корчак, Г.В. Лурье, Е.Н. Маслов, В.С. Плашников, С.А. Попов, В.К. Старков, И.П. Третьяков, Л.Н. Филимонов, И. Хидео, В. Эрнст, А.С. Янюшкин, П.И. Ящерицын и другие.

Анализ литературы показал, что традиционная технология затачивания твердосплавных инструментов включает операции черновой и чистовой обработки и, при необходимости, доводку. Острота лезвия, при этом, стабильно достигает величин менее 0,01 (мм). Установлено, что алмазные зерна при затачивании на традиционных скоростях резания в процессе работы становятся тупыми и имеют глубокие продольные бороздки на поверхности. Уменьшение зернистости круга не изменяет вида и механизма износа – это истирание и

рекристаллизация алмаза вследствие высокой контактной температуры. Данных по шлифованию алмазными кругами на скоростях свыше 100 (м/с) не обнаружено. Радиус округления лезвия менее 1 (мкм) можно получить несколькими методами:

1. Доводкой – это операция трудоемкая и дорогостоящая. Без завалов лезвия она может выполняться только на гранильном оборудовании чугуном шаржированным притиром, но только для инструментов с прямолинейными формами. Это недостаток доводки и определяется он кинематикой процесса и сложностью регулировки величины контактного давления на лезвие инструмента. Кроме того, попадание одного крупного алмазного зерна на поверхности шлифовального круга или в доводочной пасте приводят к существенным, по размерам, сколам лезвия.

2. Электроалмазным шлифованием – это высокопроизводительный метод обработки, при котором происходит комбинированное воздействие электролита на изделие, усиливается воздействием электрического тока и обработка разупрочненного слоя поверхности изделия алмазными зернами. Алмазные зерна под действием электрических разрядов приобретают острую форму, что позволяет существенно повысить качество обработки. Недостатком этого метода является сложность управления процессом, что бы не допустить разупрочнения лезвия при затачивании. Кроме того, электроалмазная обработка не эффективна при затачивании инструментов из минералокерамики и СМТ.

3. Высокоскоростное шлифование – это метод обработки со скоростями резания свыше 80 (м/с). Из литературных данных и современных проспектов шлифовальных инструментов известно, что ключевым условием получения высококачественного лезвия твердосплавных инструментов является создание условий, при которых алмазные зерна будут острыми. Радиус округления их граней должен быть в несколько раз меньше, чем радиус округления лезвия затачиваемого инструмента. Наиболее эффективный и универсальный способ – это повышение скорости резания, т. е. переход на высокоскоростное затачивание.

Имеются данные о том, что при скоростях 200-1000 (м/с) происходит изменение механизма разрушения обрабатываемого материала и износа инструмента. При этом, вязкие материалы разрушаются хрупко и не образуются заусенцев, а хрупкие – сколов. Данные получены при выстреливании детали из ствола на торце которого устанавливались резцы или обработке свободным абразивом и не касались обработки инструментальных материалов. К затачиванию твердосплавных инструментов это оборудование, методы и круги отношения не имеют.

Анализ литературы, в которой представлены данные по высокоскоростному шлифованию, показал, что современные станки позволяют развивать скорость резания до 143 (м/с), однако данные приведены по шлифованию пазов в стальных деталях высокопористыми кругами (метод ВШГ). При повышении скорости шлифования свыше 120 (м/с) силы резания снижаются, контактная температура не возрастает, что подтверждает гипотезу об изменении состояния и механизма износа режущих зерен.

Для реализации высокоскоростного затачивания твердосплавных инструментов со скоростями резания свыше 120 (м/с) алмазными кругами на бакелитовой связке необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать и разработать конструкцию шлифовального круга для высокоскоростного затачивания твердосплавного инструмента;
2. Исследовать и разработать экспериментальный привод для высокоскоростного затачивания;
3. Исследовать процесс и определить рациональные режимы алмазного высокоскоростного затачивания твердосплавных инструментов.

Вторая глава посвящена исследованию условий работы шлифовальных кругов при затачивании твердосплавного инструмента, разработке принципиальной схемы и методики расчета конструкции алмазного круга для высокоскоростного шлифования, определению пределов скорости его работы.

Шлифовальный круг, установленный на шпиндель станка, всегда имеет биение. При малых припусках на шлифование ($t=0,005-0,01$ мм), например, при окончательном затачивании неизбежно возникает прерывистое резание, т. е. контакт шлифовального круга с заготовкой будет пульсирующий. И, как показывает практика, избавиться от биения его периферийной и торцевой части невозможно даже с применением правки; методы правки шлифовальных кругов обеспечивают биение 0,005-0,03 (мм). Одним из методов уменьшения биения шлифовального круга на станках, широко используемых при затачивании режущего инструмента, является применение более качественных подшипников (биение до 0,1 мкм) на шпинделе. Однако это дает лишь незначительный эффект, т. к. в процессе работы шлифовальный круг приобретает неравномерный износ рабочей поверхности, который объясняется наличием в алмазоносном слое зон различной твердости, а также наличием алмазных зерен, размеры которых, значительно превышают размеры основной фракции, что в свою очередь, приводит к прерывистому резанию.

Процесс прерывистого резания можно представить как периодическое врезание алмазного шлифовального круга в заготовку, что сопровождается ударной нагрузкой в начальный момент врезания. На рисунке 1 показано лезвие твердосплавного инструмента, полученное при затачивании различными кругами, при $V_{кр}=20-25$ (м/с), $S_{прод}=2-4$ (м/мин), $S_{поп}=0,01-0,02$ (мм/дв. ход) и выхаживание.



Рис. 1. Лезвие твердосплавного инструмента, полученное: а) чашечным шлифовальным кругом AC4 100/80; б) шлифовальным кругом с алмазными головками (сегментами) AC4 100/80, $\times 90$

Лезвия имеют микросколы, величиной порядка 15-25 (мкм), независимо от того каким шлифовальным кругом производилось затачивание. Аналогичные данные имеются и в литературе по шлифованию и затачиванию. Использование сегментных кругов позволяет значительно уменьшить и стабилизировать контактную температуру при шлифовании за счет строго ограниченной зоны контакта шлифовальных элементов с поверхностью детали. При работе сплошного круга размеры зоны контакта изменяются не предсказуемо. Ограничить тепловую нагрузку на затачиваемый инструмент можно снижением режимов обработки, в основном скорости резания.

Стандартные шлифовальные круги для скоростного шлифования (ГОСТ 21445-84) обладают прочностью для работы при скорости до 100 (м/с). Для обеспечения более высоких скоростей шлифования необходима новая конструкция шлифовального круга, обладающая значительно большей прочностью. За основу была выбрана разновидность сегментного круга, представляющего собой стальной диск, в торце которого установлены алмазные или абразивные головки. Расчет диска на разрыв производился по формуле:

$$\sigma = \frac{\rho \cdot (R^2 - r^2) \cdot V_{кр}^2}{2 \cdot R^2 \cdot 10^3} \leq [\sigma], \quad (1)$$

где σ , - напряжение растяжения, возникающее в шлифовальном круге при работе центробежных сил, (МПа); $[\sigma]$ - допустимое напряжение растяжения, (МПа); ρ - плотность материала шлифовального круга, (гр/см³); R - рассчитываемый радиус шлифовального круга, (см); r - внутренний радиус шлифовального круга, (см); $V_{кр}$ - линейная скорость шлифовального круга на рассчитываемом радиусе, (м/с).

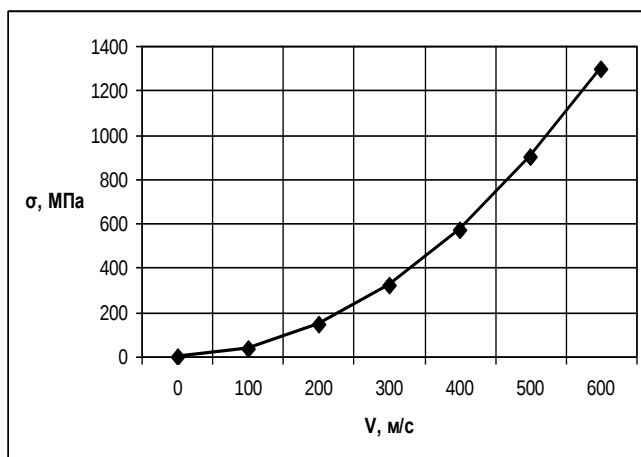


Рис. 2. Зависимость напряжения растяжения от скорости шлифовального круга

Габариты шлифовального круга определяются, исходя из возможностей привода, т. е. мощности и предельной частоты вращения шпинделя. При $\rho=7,8$ (гр/см³), $R=0,125$ (м), $r=0,035$ (м), $V_{кр}=0...400$ (м/с), получается (рис. 2).

Максимально допустимая скорость, которую может выдержать шлифовальный круг, как показали расчеты, 527,5 (м/с) для ст. 3 $\sigma=1000$ (МПа):

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot R^2 \cdot 10^3 \cdot [\sigma]}{\rho \cdot (R^2 - r^2)}}. \quad (2)$$

В качестве сменных сегментов наиболее целесообразно применение цилиндрических шлифовальных головок из-за надежности конструкции крепления и наличия их различных размеров и характеристик. Схемы их закрепления могут быть различны (рис. 3).

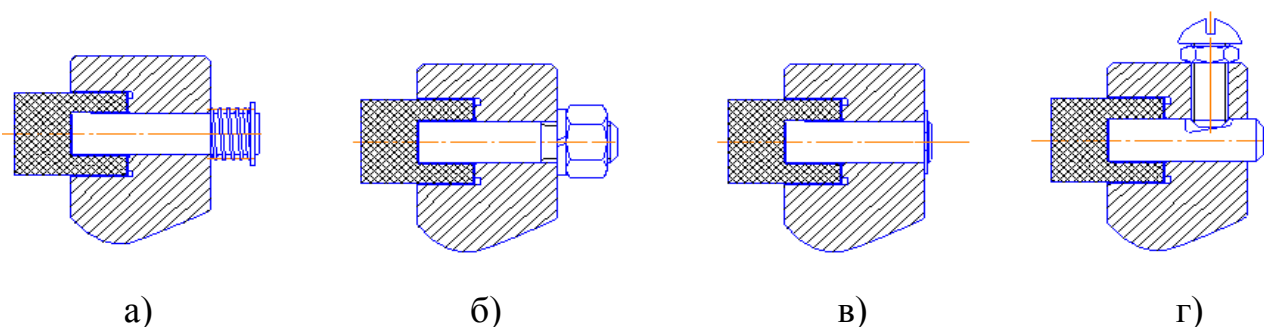


Рис. 3. Конструкции крепления сменных шлифовальных сегментов:
а) крепление пружины и быстросъемной шайбой; б) крепление гайкой;
в) крепление быстросъемной шайбой; г) крепление винтом в замок

Из представленных конструкций закрепления шлифовальных головок наибольшую надежность имеют конструкции представленные на рисунке 3.б и 3.г. Последняя конструкция обеспечивает регулируемый натяг и исключает возможность разрушения алмазоносного слоя при фиксации в корпусе круга, что и определило выбор ее в качестве основной.

Количество шлифовальных головок определяется из условия допустимого теплообразования при шлифовании и условия эффективной мощности. Расчет эффективной мощности проводится в 4 главе для шлифовального круга с шириной рабочей поверхности 20 (мм) и диаметром 250 (мм). При расчете различного количества головок, участвующих в шлифовании необходимо определить рабочую площадь. Площадь рабочих поверхностей алмазных головок в количестве 4 штук, составляет 8% - $S_{\text{гол}} = 1257 \text{ (мм}^2\text{)}$ и $S_{\text{раб}} = 15708 \text{ (мм}^2\text{)}$. Ниже приведены результаты расчетов и измерений в зависимости от количества шлифовальных сегментов (рис. 4).

Приведенные результаты позволяют выбрать количество шлифовальных головок исходя из эффективной мощности и контактной температуры. Для экспериментов количество шлифовальных головок принято в количестве 4 штук, что позволило гарантировать участие в работе и равномерный износ всех элементов, низкую тепловую нагрузку на заготовку и возможность установить удельный расход алмазоносного слоя при ограниченном количестве экспериментов.

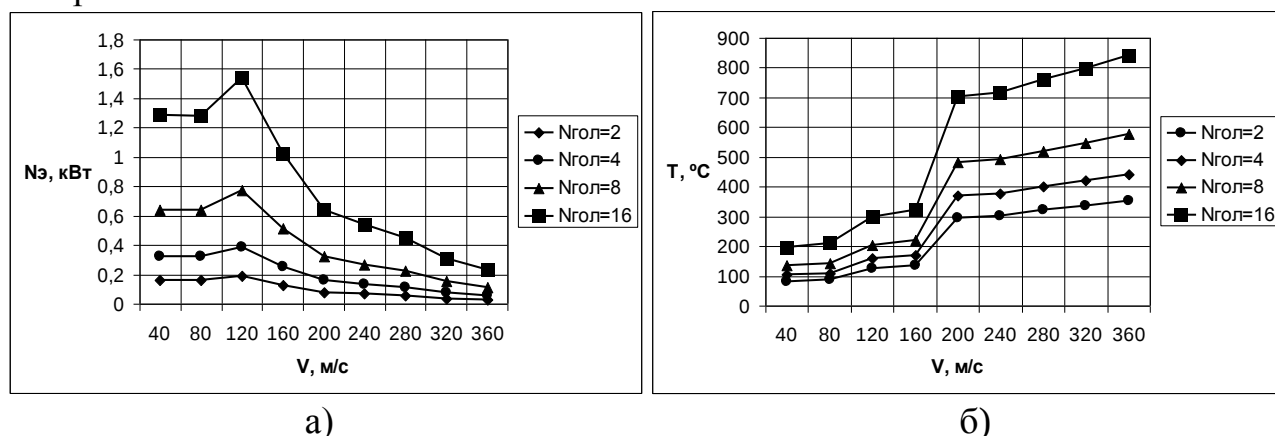


Рис. 4. Зависимость а) эффективной мощности $N_{\text{э}}$ и б) контактной температуры T от количества шлифовальных головок

Применение специально разработанной конструкции шлифовального круга для алмазно-абразивной обработки, подтвержденной авторским свидетельством [10] позволило осуществлять шлифование при окружной скорости до 270 (м/с) (рис. 5), бóльшую скорость не позволил обеспечить привод.

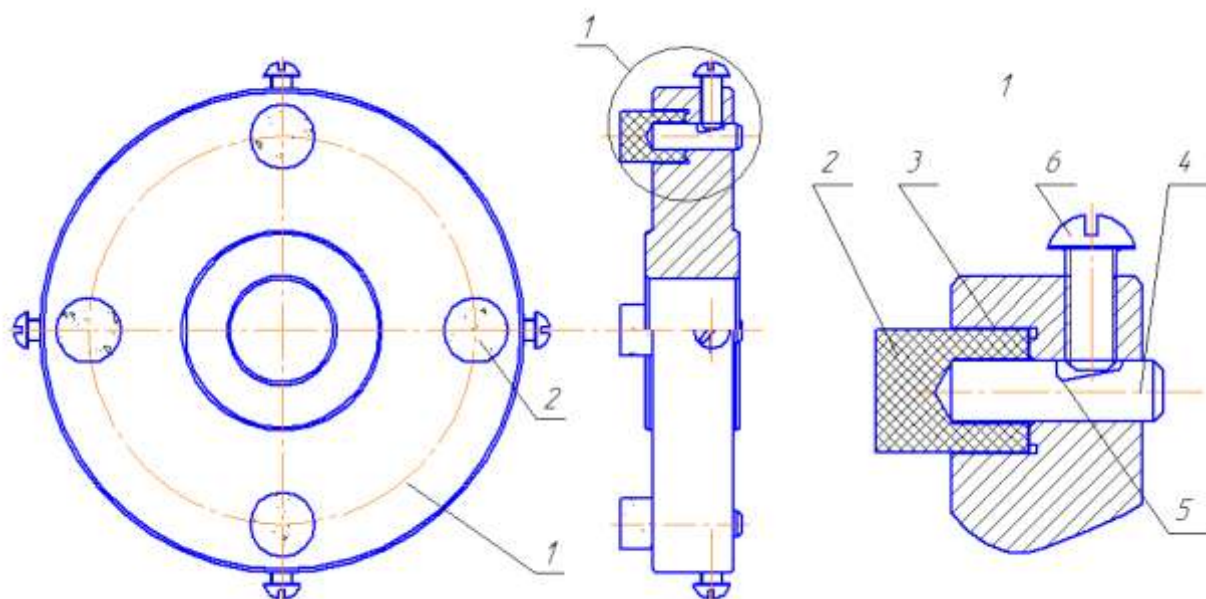


Рис. 5. Конструкция специального шлифовального круга: 1 - корпус; 2 - алмазно-абразивные шлифовальные сегменты; 3 - клеевая прослойка; 4 – штифт с замковым пазом; 5 - конусный паз; 6 - фиксирующий винт

Конструкция шлифовального круга позволяет применять шлифовальные головки из различных абразивных материалов и типоразмеров, выполнив соответствующие по размерам посадочные места, что делает конструкцию универсальной. Корпус шлифовального круга балансируется статически и динамически в сборе с головками. Неуравновешенность масс не должна превышать $\pm 0,001$ (гр).

В третьей главе представлены результаты исследования процесса высокоскоростного затачивания. Проводились исследования силовых и температурных зависимостей, процесса износа шлифовальных элементов, а так же исследовались результаты высокоскоростной обработки: шероховатость обработанной поверхности, радиус округления лезвия, наличие сколов и трещин на лезвии твердосплавного режущего инструмента.

Большое влияние на ресурс круга оказывает контактная температура в зоне шлифования, что может вызвать дефекты в поверхностном слое затачиваемого инструмента (прижеги, трещины и др.), снижающие качество затачивания, в связи с чем, этот фактор приобретает значение одного из основных.

Исследование контактной температуры при высокоскоростном затачивании фиксировалось инфракрасной камерой TR-01400. Тепловизор имеет диапазон измерений $-20^{\circ} \dots +2000^{\circ} \text{C}$, чувствительность $0,10^{\circ} \text{C}$, погрешность измерений $\pm 2^{\circ} \text{C}$. Результаты измерений контактной температуры при затачивании твердосплавных пластин ВК8 на различных режимах шлифования представлены на рисунке 6.

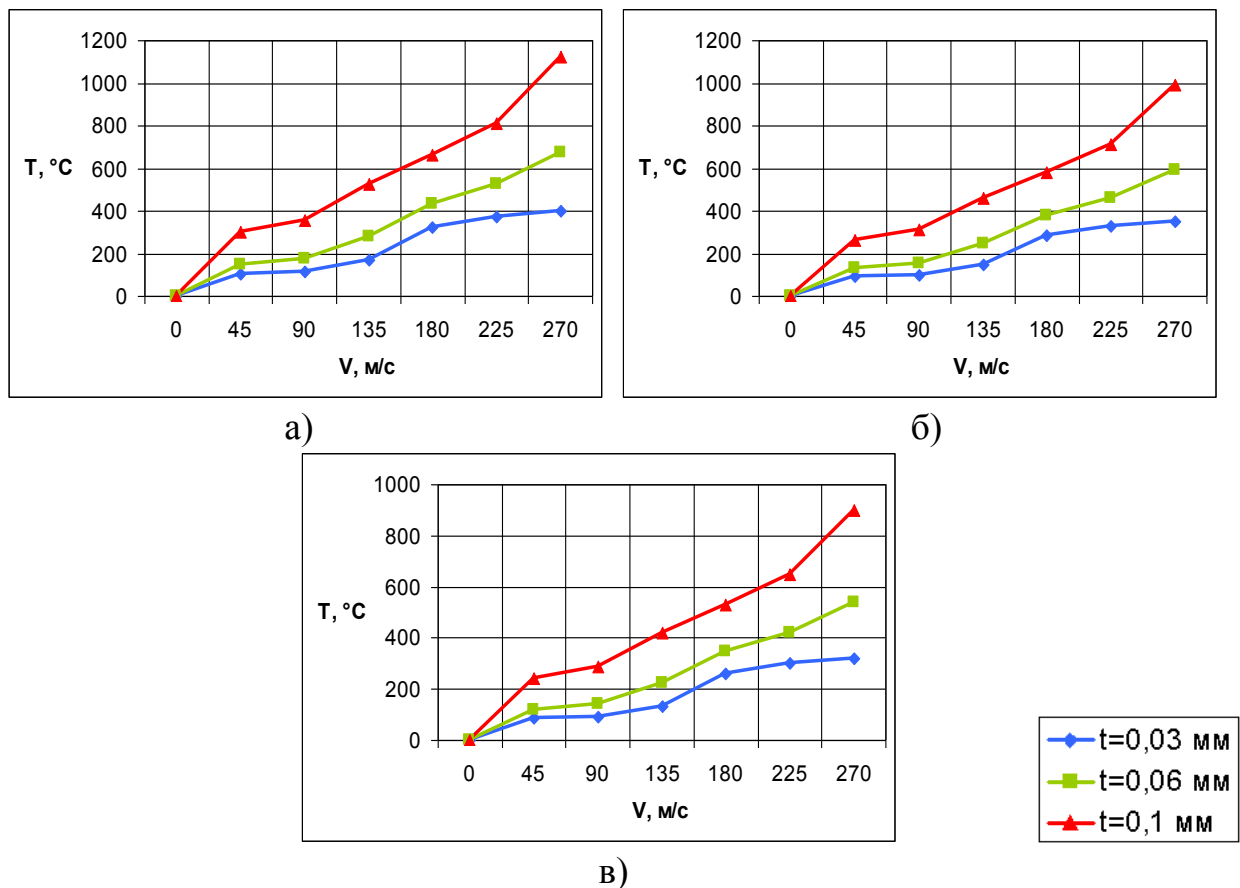


Рис. 6. Зависимости контактной температуры от режимов обработки:
а) при $S_{\text{прод}}=3$ (м/мин); б) при $S_{\text{прод}}=6$ (м/мин); в) $S_{\text{прод}}=9$ (м/мин)

Было зафиксировано резкое падение температуры на 30-45 °С при выходе твердосплавной пластины из зоны шлифования. При $S_{\text{прод}}=3$ (м/мин) температура в зоне шлифования на 20-30% выше, чем при $S_{\text{прод}}=6$ (м/мин). Это связано с большим временем контакта пластины с алмазным кругом.

Низкие значения контактной температуры на поверхности затачиваемой твердосплавной пластины, можно объяснить особенностью конструкции шлифовального круга, имеющего несколько шлифовальных элементов. В процессе затачивания происходит объемное охлаждение обрабатываемой пластины потоками воздуха. При этом, чем выше скорость резания, тем больше интенсивность охлаждения. Из полученных исследований изменения контактной температуры от режимов обработки была получена эмпирическая зависимость:

$$T = 163 \cdot t^{0,86} \cdot S_{\text{прод}}^{-0,20} \cdot V^{0,74} \quad (3)$$

Из полученной зависимости (3) следует, что наибольшее влияние на контактную температуру при шлифовании T оказывает глубина шлифования.

Исследования показали, что с изменением скорости резания при затачивании изменяется и механизм износа алмазных зерен. При затачивании твердосплавных инструментов со скоростями резания в пределах 20-120 (м/с) алмазные зерна истираются и заглаживаются, а также происходит прилипание обрабатываемого материала к алмазным зернам (рис. 7).



а)

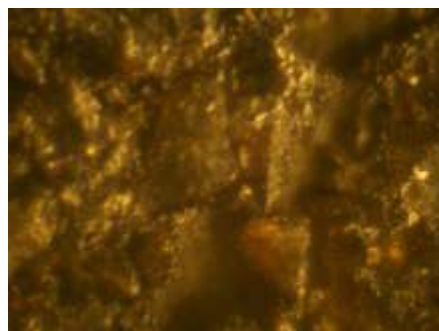


б)

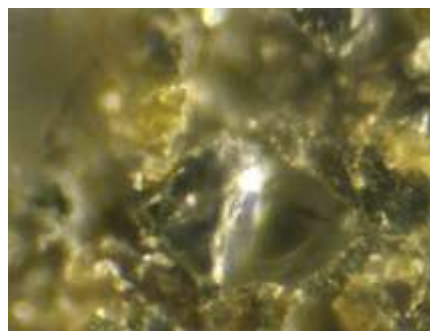
Рис. 7. Износ алмазных зерен при затачивании твердосплавного инструмента со скоростями резания в пределах 20-120 (м/с): а) участок алмазного круга x500; б) алмазное зерно; x1000

В результате истирания и рекристаллизации алмазные зерна имеют площадки износа и продольные бороздки. Результатом такого износа является резкое повышение сил резания и температуры, что приводит к появлению сколов и трещин на лезвии инструмента.

При повышении скорости резания механизм износа алмазных зерен изменяется. При затачивании твердосплавных инструментов со скоростями резания в пределах 120-280 (м/с) алмазные зерна скалываются и выкрашиваются (рис. 8).



а)



б)

Рис. 8. Износ алмазных зерен при затачивании твердосплавного инструмента со скоростями резания в пределах 120-280 (м/с): а) участок алмазного круга, x700; б) алмазное зерно; x2000

Изменение механизма износа алмазных зерен с повышением скорости резания можно объяснить тем, что в момент удара зерна об обрабатываемый материал происходит микросмещение зерна в результате упругого перемещения связки шлифовального круга (рис. 9). Это упругое перемещение ΔZ имеет направление, противоположное направлению скорости движения зерна. Результатом упругого перемещения зерна в момент удара является потеря скорости его движения: $U^2 = V^2 - V_3^2$.

Скорость упругого перемещения зерна зависит от статичности (скорости реакции) связующего элемента и скорости удара. Повышение скорости резания приводит к повышению статичности, то есть уменьшается скорость и величина перемещения зерна в момент удара. Удар характеризуется коэффициентом

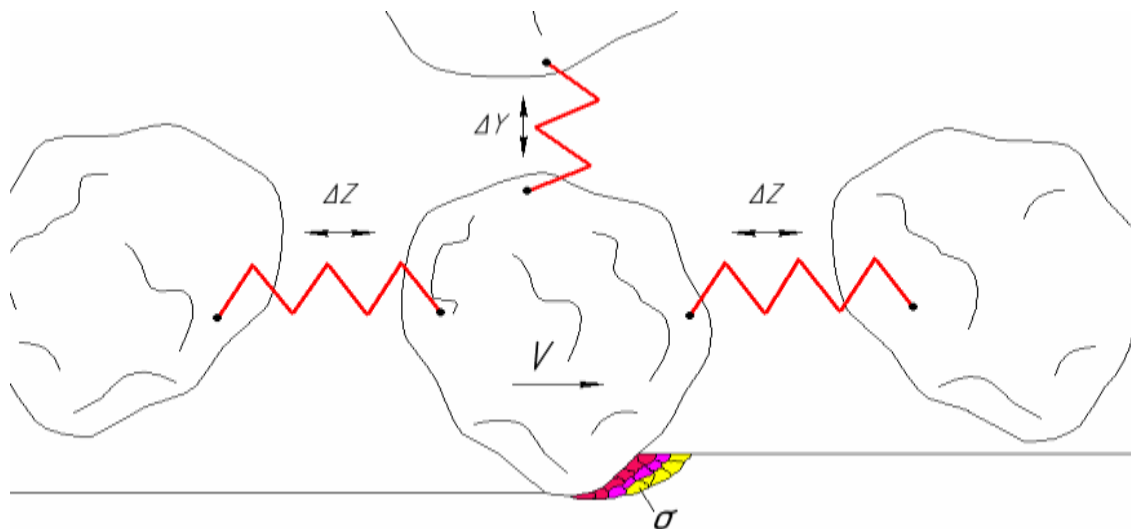


Рис. 9. Схема упругого перемещения шлифовального зерна

восстановления $K=U/V$. Коэффициент восстановления $K=1$ – удар абсолютно упругий и при $K=0$ – абсолютно неупругий.

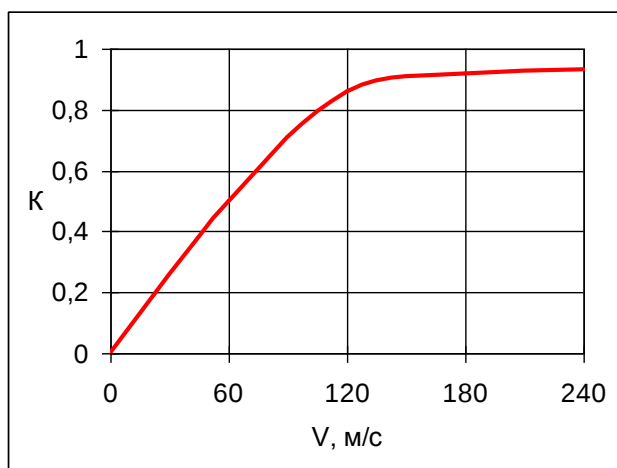


Рис. 10. Зависимость коэффициента восстановления от скорости резания

При очень малых скоростях резания происходит выкрашивание алмазного зерна из круга, это значит $U=0$ (м/с), $V=V_{кр}$ (м/с) удар не упругий.. Коэффициент восстановления изменяется с возрастанием скорости резания (рис. 10). С повышением скорости резания коэффициент восстановления увеличивается, в грубом приближении $U=V$. Это объясняется тем, что удар стремится стать абсолютно упругим. Жесткость закрепления зерна в момент удара повышается, микроперемещение уменьшается.

Общую энергию E , затрачиваемую при затачивании можно представить:

$$E = E_{деф} + E_T, \quad (4)$$

где $E_{деф}$ – энергия, затрачиваемая на деформацию или образование скола материала (энергия разрушения); E_T – энергия, затрачиваемая на теплообразование.

Общую энергию можно представить, так же, как кинетическую энергию шлифовального элемента:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V^2 - V_3^2), \quad (5)$$

где m – масса шлифовального элемента, (гр); V – начальная скорость резания, (м/с); V_3 – скорость шлифовального элемента в момент удара, (м/с).

Тогда кинетическую энергию шлифовального элемента можно представить:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V \cdot K)^2, \quad (6)$$

где K – коэффициент восстановления.

Масса зерна определяется из объема и плотности $m = V_{об} \cdot \rho$. Каждое, отдельно взятое зерно в шлифовальном круге имеет различные размеры и форму, а следовательно, их масса будет различной. Для расчета принимались средние размеры зерна основной фракции, а форма зерна принята эллипсоидная. Тогда объем зерна можно определить по формуле:

$$V_{об} = \frac{4\pi}{3} \cdot a^2 \cdot b. \quad (7)$$

Приняты пропорции шлифовального зерна $a=3/4b$, где b – полуось, равная половине размера основной фракции.

Для алмазного зерна зернистостью 160 получим: $b=0,08$ (мм), $a=0,06$ (мм). Тогда объем зерна будет иметь значение $V_{об}=0,0109$ (мм³). Плотность для алмаза составляет $3,48-3,56 \cdot 10^3$ (кг/м³) ($3,48-3,56 \cdot 10^{-3}$ гр/мм³), тогда масса зерна будет иметь значение $m=0,0000384$ (гр). С учетом вышесказанного можно определить общую энергию зерна (рис. 11).

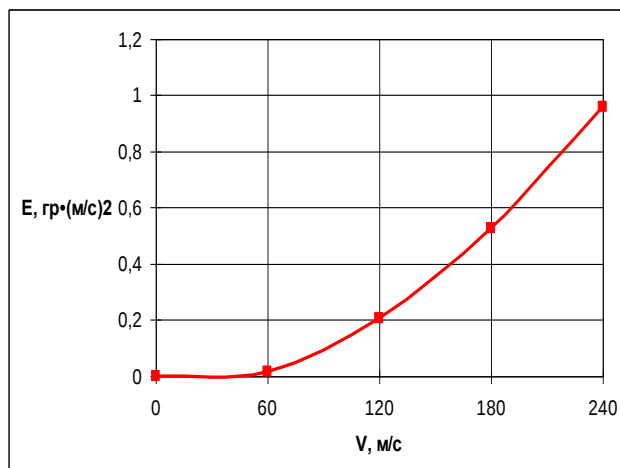


Рис. 11. Зависимость общей энергии зерна от скорости резания

При превышении глубины шлифования 0,1 (мм), при зернистости 100/80, процесс износа алмазных головок интенсифицируется. Температура в зоне шлифования составляет 800-1000 (°C), что приводит к выгоранию связки и разрушению алмазных зерен. Изменения геометрических параметров алмазных головок при изменении режимов затачивания, связаны с их приработкой и действия высоких контактных температур на связку и алмазные зерна при превышении допустимых значений

поперечной подачи, которая имеет доминирующее влияние.

Для измерения сил резания при высокоскоростном затачивании использовались тензодатчики, наклеенные на державке, сигнал с которых поступал на усилитель мод. УТ4-1, а затем на осциллограф мод. С1-68. Затачивание осуществлялось алмазными головками AW AC4 100/80.

Эксперимент состоял из 8 серий опытов. Для получения достоверных результатов каждый опыт повторялся 3 раза, после чего определялось среднеквадратичное значение.

Для наглядности полученных результатов построены зависимости составляющей силы резания и радиуса округления лезвия от режимов обработки (рис. 12 и рис. 13).

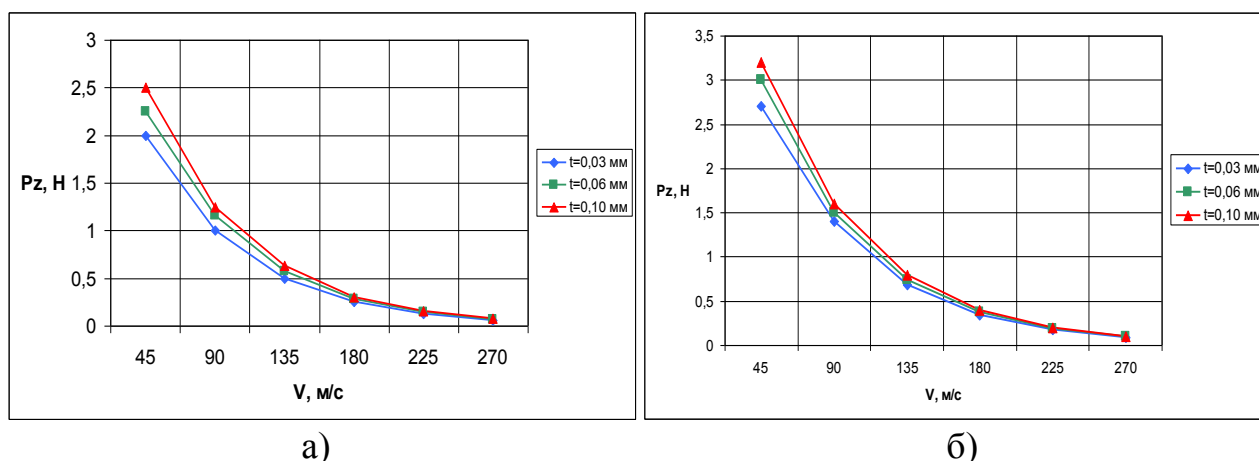


Рис. 12. Зависимости составляющей силы резания от режимов обработки: а) при $S_{\text{прод}}=3$ (м/мин); б) при $S_{\text{прод}}=9$ (м/мин)

Увеличение скорости резания при затачивании вызывает обратно пропорциональное уменьшение составляющей силы резания P_z . Так, например, при затачивании твердосплавной пластины (12x12x3 мм) при $V=45$ (м/с), $S_{\text{прод}}=3$ (м/мин), $t=0,03$ (мм) составляющая силы резания P_z составляет 2 (Н), тогда как при увеличении скорости резания до 270 (м/с) - 0,1 (Н). То есть, при увеличении скорости резания в 5 раз составляющая силы резания снизилась в 15 раз, что близко с данными зарубежных источников.

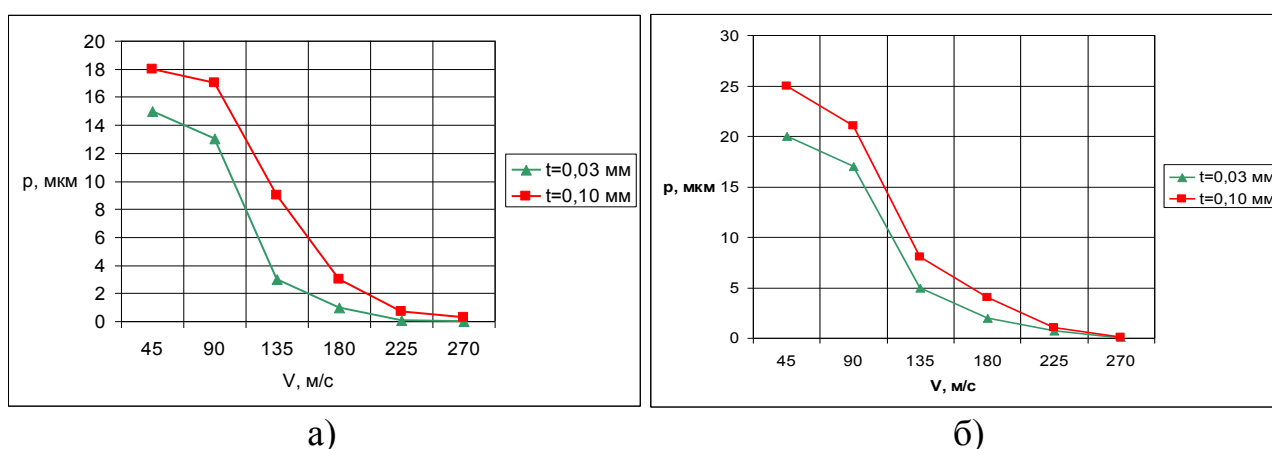


Рис. 13. Зависимости радиуса округления лезвия твердосплавной пластины от режимов обработки: а) при $S_{\text{прод}}=3$ (м/мин); б) при $S_{\text{прод}}=9$ (м/мин)

На рисунке 14 приведены фотографии лезвия твердосплавных пластин Т15К6, заточенных при различных окружных скоростях шлифовального круга.

Увеличение скорости резания приводит к уменьшению радиуса округления лезвия пластины. Из полученных результатов исследований изменения составляющей силы резания и радиуса округления лезвия режущего инструмента от режимов обработки были получены эмпирические зависимости:

$$P_z = 2626 \cdot t^{0,42} \cdot S_{\text{прод}}^{-0,05} \cdot V^{-1,48}; \quad (8)$$

$$\rho = 185455 \cdot t^{0,56} \cdot S_{\text{прод}}^{0,66} \cdot V^{-2,27}. \quad (9)$$

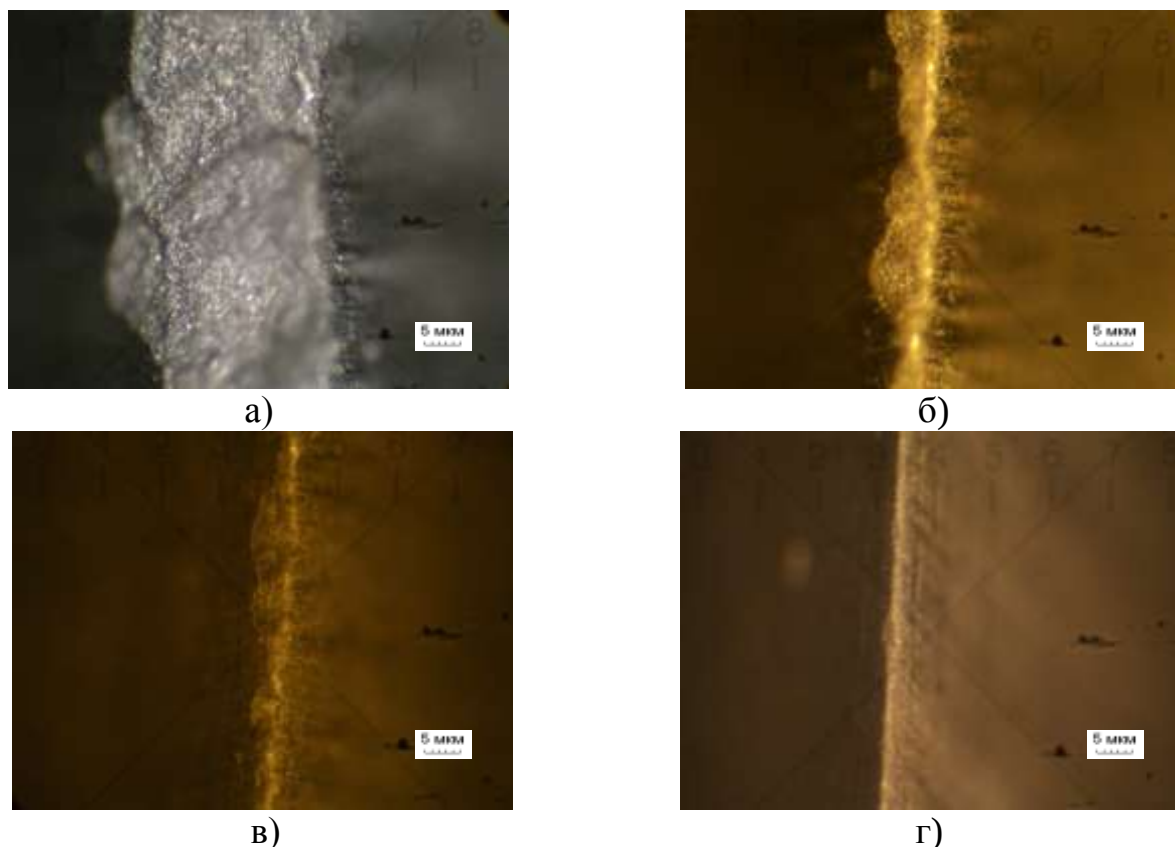


Рис. 14. Лезвия твердосплавного режущего инструмента при:
а) при $V \leq 90$ (м/с); б) при $V = 135$ (м/с); в) при $V = 180$ (м/с); г) при $V = 270$ (м/с);
x1000

Установлено, что наибольшее влияние на составляющую силы резания при затачивании P_z и радиус округления лезвия твердосплавного металлорежущего инструмента ρ оказывает скорость резания.

Сравнительные параметры заточенного лезвия твердосплавного инструмента при различных скоростях резания представлены в таблице 1.

Таблица 1

Скорость резания, V м/с	Радиус округления лезвия, ρ мкм	Размер стружки, h_c мкм	Шероховатость, R_a мкм	Температура в зоне шлифования, T °C	Наличие сколов, трещин и завалов
25-30	Не менее 10	10-15	0,63-0,32	1000	+
270	0,1-1	0,1-0,2	0,32-0,16	500	-

Исследование продуктов шлифования при различных скоростях резания показало, что при окружной скорости круга 20-40 (м/с) размеры частиц твердого сплава в шламе при зернистости алмазов 80/100 составляют 10-15 (мкм), а при окружной скорости круга более 120 (м/с) не более 0,1 (мкм). Это может быть объяснено образованием острых граней алмазных зерен. Сам по себе этот факт для затачивания имеет большое значение, т. к. он определяет возможность съема слоев до 0,1 (мкм) и позволяет значительно уменьшить сколы на лезвии

твердосплавного инструмента, а это - точность размеров и качество лезвия инструмента.

В четвёртой главе представлены исследования привода для высокоскоростного затачивания твердосплавного инструмента и результаты теоретических и экспериментальных исследований конструкций привода.

Привод для высокоскоростного затачивания работает в специфических условиях. Масса круга должна быть большой, чтобы небольшие изменения массы рабочих элементов не вызывали вибраций и гасили все возмущения. Кроме того, момент врезания шлифовальных головок в затачиваемый инструмент – это тоже возмущающее воздействие. Потребляемая на разгон мощность, при этом, значительно выше, чем потребляемая на процесс затачивания.

Полная мощность, рассчитанная для сплошного шлифовального круга (ширина алмазного слоя 16 мм и диаметр круга 250 мм) и следящего контакта, повышается с повышением скорости шлифования (рис. 15). При шлифовании сегментными кругами необходимо учитывать процентное отношение фактически рабочей поверхности к аппроксимированной рабочей поверхности. На составляющую N_T наибольшее влияние оказывает масса круга. На составляющую N_Σ - количество и размер шлифовальных головок. При четырех головках диаметром 16 (мм) работает приблизительно 8 % площади круга.

Повышение скорости резания при затачивании может осуществляться только за счет повышения мощности электродвигателя. Для достижения скорости резания 360 (м/с) (со значительным запасом), мощность электродвигателя должна составлять около 20 (кВт).

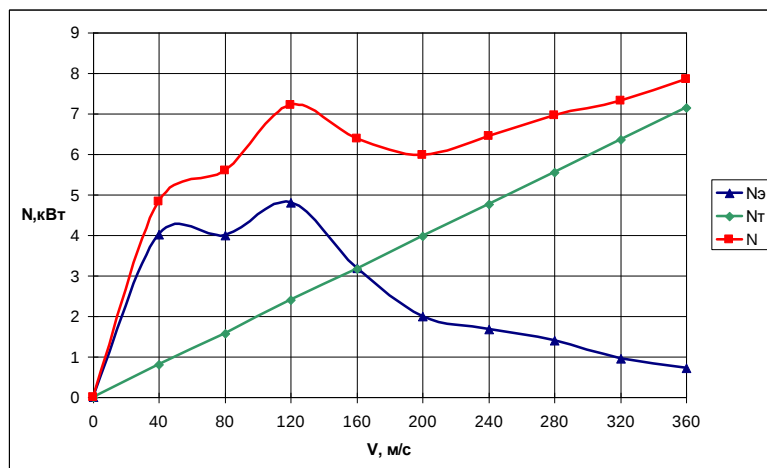


Рис. 15. Изменение эффективной мощности N_Σ , мощности потерь холостого хода N_T и полной мощности N резания

компенсирующих элементов электрошпинделя для специфических условий затачивания и шлифования. В качестве станда был выбран асинхронный электродвигатель мощностью 7,5 (кВт), который использовался в дальнейшем, как часть рабочего привода для высокоскоростного затачивания. Двигатель подвергся модернизации: ротор динамически сбалансирован до частоты 35000

Анализ конструкций приводов, обеспечивающих частоты вращения до 30000 (об/мин) показал, что они рассчитаны на инструмент небольшой массы и диаметра.

При высокоскоростном затачивании масса инструмента и его диаметр значительно больше, чем расчетные для электрошпинделей. Поэтому в главе решается задача разработки схемы расположения основных и

(об/мин), вместо крыльчатки установлен маховик с механизмом балансировки, штатные подшипники заменены на высокоточные.

Двухплоскостная динамическая балансировка произведена по методике, разработанной изготовителем вибродиагностического прибора ДИАНА-2М. Разгон и регулировка частоты вращения осуществлялись с помощью частотного регулятора.

Установлено, что для обеспечения приемлемого уровня вибраций точность взвешивания балансировочных грузов должна составлять $\pm 0,01$ (гр). Балансировка осуществлялась установкой грузов на шкив и маховик. Результаты балансировки приведены на рисунке 16.

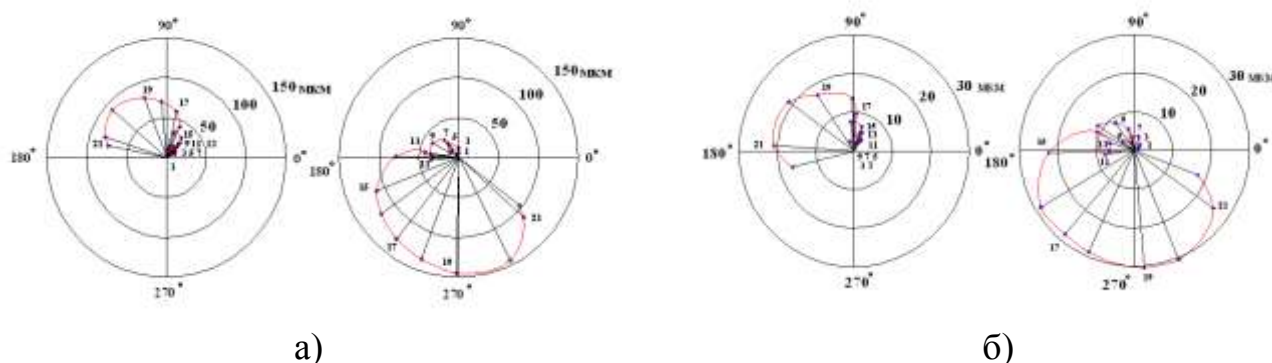


Рис. 16. Результаты разгона-выбега электродвигателя до (а) и после (б) балансировки: перемещения и фазы оси вращения ротора при разгоне-выбеге для 1 опоры и 2 опоры

Пиковые значения находятся на частотах 46, 92, 138 и т. д. кратных 42 (Гц) частоты вращения. При совпадении вынужденных колебаний ротора электродвигателя с данными частотами происходит явление резонанса, отрицательно сказывающееся на процессе обработки детали. Поэтому, рекомендуется осуществлять обработку, в пределах, между пиковыми значениями резонансных частот электродвигателя. А так же, при прохождении ротором электродвигателя пиковых значений резонансных частот, каждое последующее резонансное явление протекает менее интенсивно. Измерялись частоты возбуждающие резонансные явления. Результатом динамической двухплоскостной балансировки является то, что шероховатость, обрабатываемых деталей уменьшилась с $R_a=0,63$ до $0,16$ (мкм).

Получить частоту 25000 (об/мин) на двигателе не удалось в связи с появлением резонансных явлений при частоте более 9000 (об/мин). Это связано с превышением номинальной частоты вращения подшипников. Поэтому для достижения требуемой частоты пришлось установить привод на круглошлифовальный станок с гидродинамическими подшипниками на шпинделе и установить повышающую передачу 3/1 от двигателя к шпинделю с помощью плоского пластикового бесшовного ремня. Это увеличило время разгона шпинделя, но позволило достичь планируемых скоростей. Гидродинамические подшипники показали высокую работоспособность, но не высокую осевую жесткость. Очевидно, необходимо переходить на высокоскоростные керамические подшипники с частотой до 30000 (об/мин).

Для высокоскоростного затачивания и шлифования необходимо разработать электрошпиндель с установленным на заднюю опору маховиком, позволяющий улучшить динамические характеристики системы и устанавливать встроенные балансировочные устройства на инструменте и маховике, позволяющие поддерживать перемещение оси шпинделя в пределах 0,2 (мкм).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сколы и трещины на лезвии твердосплавного инструмента при традиционных режимах затачивания, являются следствием образования на вершинах алмазных зерен площадок износа. Для достижения высококачественной заточки твердосплавного инструмента необходимо что бы алмазные зерна шлифовального круга оставались острыми, что обеспечивается повышением скорости резания свыше 120 (м/с).

2. Установлено, что для высокоскоростной обработки (до 270 м/с) целесообразно использование сегментных кругов. Разработана конструкция и методика расчета сборного шлифовального круга для алмазно-абразивной обработки учитывающие основные факторы процесса.

3. Установлено, что при повышении скорости резания до 135 (м/с) контактная температура монотонно возрастает, а после превышения 180 (м/с) стабилизируется и изменяется мало, при этом прижогов и температурных дефектов на обработанной поверхности не обнаружено.

4. Установлена область рациональных режимов высокоскоростного затачивания. Продольную подачу можно увеличивать прямо пропорционально скорости резания. Наибольшее влияние на стойкость алмазного круга имеет глубина шлифования, которая не должна превышать 0,1 (мм) - при превышении происходит катастрофический износ алмазоносного слоя.

5. Силы резания снижаются прямо пропорционально повышению скорости резания твердых сплавов: при 270 (м/с) составляют 0,1 (Н), а при 45 (м/с) - 2,0 (Н).

6. Установлено, что при затачивании со скоростями резания в диапазоне от 120 до 270 (м/с), радиус округления лезвия твердосплавного инструмента уменьшается пропорционально скорости резания до 1 (мкм) при шлифовании кругами с характеристикой AC4 100/80.

7. Размеры частиц твердого сплава, образующихся при затачивании, со скоростью резания свыше 120 (м/с) не превышают 0,1 (мкм), что позволяет снимать слои таких же размеров при соответствующей точности и жесткости оборудования.

8. Разработана и изготовлена установка для высокоскоростного затачивания и проведены исследования привода, в результате разработаны рекомендации: для высокоскоростного затачивания необходимо устанавливать зоны скоростей резания, на которых отсутствуют резонансные явления; необходимо устанавливать компенсирующий маховик на заднюю опору ротора электрошпинделя; конструктивно предусматривать возможность установки устройства динамической балансировки на компенсирующий маховик и шлифовальный круг.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Гинергард О.Ю., Попов А.Ю., Реченко Д.С. Исследование процесса ленточного шлифования. Научное обозрение. - №3. 2008. – С. 55-58.
2. Реченко Д.С. Исследование методов правки абразивного инструмента при заточке. Омский гос. техн. ун-т.- Омск, 2004.- 5 с.: ил.- Библиогр.: 7 назв.- Рус. – Деп. в ВИНТИ 24.12.2004г. №2052-B2004.
3. Реченко Д.С., Попов А.Ю., Нуртдинов Ю.Р., Васильев Е.В., Ковалевский А.В. Шлифование профиля мелко модульных твердосплавных зуборезных долбяков. ОмГТУ. – Омск, 2006. – 122 с.: ил. – Библиогр.; 7 назв. – Рус. – Деп. В ВИНТИ 23.11.06., № 1456 – В2006.
4. Реченко Д.С., Кольцов А.Г. Динамическая двухплоскостная балансировка электродвигателя круглошлифовального станка модели 3А110. Омский гос. техн. ун-т.- Омск, 2007.- 6 с.: ил.- Рус. – Деп. в ВИНТИ 05.06.2007г. №598-B2007.
5. Реченко Д.С., Кольцов А.Г. Динамическая балансировка. Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VI Междунар. Науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – Кн. 1. – С. 330-335.
6. Реченко Д.С. Высокоскоростное шлифование. Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VI Междунар. Науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – Кн. 2. – С. 397-400.
7. Реченко Д.С., Сергеев В.А. Повышение качества лезвия режущего инструмента высокоскоростного шлифования. Омский научный вестник. – 2007. – №2(56). – С. 109-112.
8. Реченко Д.С., Кольцов А.Г. Динамическая балансировка электродвигателя. Омский научный вестник. - 2007. – №2(56). – С. 122-124.
9. Реченко Д.С., Попов А.Ю., Сергеев В.А., Васильев Е.В. Исследование износа алмазных зерен при шлифовании. Омский гос. техн. ун-т.- Омск, 2008.- 6 с.: ил.- Библиогр.: 1 назв.- Рус. – Деп. в ВИНТИ 05.02.2008г. №81-B2008.
10. Реченко Д.С., Попов А.Ю., Сергеев В.А., Васильев Е.В. Шлифование алмаза. Омский гос. техн. ун-т.- Омск, 2008.- 5 с.: ил.- Библиогр.: 1 назв.- Рус. – Деп. в ВИНТИ 05.02.2008г. №82-B2008.
11. Реченко Д.С., Попов А.Ю., Сергеев В.А., Васильев Е.В. Исследование высокоскоростного шлифования. Научное обозрение. - №1. 2008. – С. 52-54.
12. Реченко Д.С., Попов А.Ю. Высокоскоростная заточка твердосплавного инструмента. СТИН. – №6. 2008. – С. 39-40.
13. Реченко Д.С., Нуртдинов Ю.Р., Попов А.Ю. Шлифовальный круг для алмазно-абразивной обработки. Пат. 55665 РФ, МПК В24D 17/00. - № 2006111080/22; Заявлено 05.04.06; Оpubл. 27.08.06. Бюл. № 24. – 2 с.: ил.
14. Реченко Д.С. Высокоскоростное шлифование инструментальных материалов. Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – Кн. 1. – С. 111-115.
15. Реченко Д.С., Реченко Е.С., Вальтер М.А. Исследование высокоскоростного шлифования. Современные проблемы машиностроения: Матер. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТГТУ, 2008. – С. 518-521.

16.Реченко Д.С. Исследование микроразрушения при шлифовании пластических и хрупких материалов. Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении: Матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Тюмень, 2008. – Кн. 2. – С. 211-216.

17.Реченко Д.С., Попов А.Ю., Ковалевский А.В. Возникновение прерывистого процесса резания при шлифовании алмазными кругами. Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении: Матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Тюмень, 2008. – Кн. 2. – С. 216-219.

18.Реченко Д.С., Попов А.Ю. Правка абразивного инструмента. Омский научный вестник. – 2009. – №4(73). – С. 62-64.

19.Реченко Д.С. Обработка титановых и жаропрочных сплавов высокоскоростным шлифованием. Омский научный вестник. – 2009. – №4(73). – С. 59-61.

20.Реченко Д.С., Попов А.Ю. Обработка природного алмаза при скорости шлифования свыше 160 м/с. Наука и производство – 2009: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Брянск – 2009. – Кн.1. С. 22-24.

21.Реченко Д.С., Попов А.Ю. Исследование контактной температуры в зоне резания при высокоскоростной заточке твердосплавного инструмента. Наука. Промышленность. Оборона: Матер. X Всерос. науч.-техн. конф. для студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новосибирск – 2009. – Кн.1. – С. 324-327.

22.Реченко Д.С. Расчет рациональных режимов резания при шлифовании инструментальных материалов. Вестник академии военных наук. – 2009. №3(28). С. 333-338.