

На правах рукописи

УДК 621.795.2

МОРОЗОВ Алексей Валентинович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКОГО
ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТОВ
И ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО
ДИСКРЕТНОГО РЕЗАНИЯ**

Специальность: 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки



А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2020г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный консультант доктор технических наук, профессор
Гусев Владимир Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ВОЛКОВ Дмитрий Иванович
«Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва», Заведующий кафедрой
«Мехатронные системы и процессы формообразования»

доктор технических наук, профессор
МАКАРОВ Владимир Федорович
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор

доктор технических наук, профессор
КОЗЛОВ Александр Михайлович
«Липецкий государственный университет», Заведующий кафедрой «Технология машиностроения»

Ведущая организация: **«Брянский государственный технический университет»**

Защита состоится « » _____ 2020 года, на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан « »20 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.т.н., доцент



Богданов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Процессы шлифования широко распространены в промышленности и обеспечивают высокую геометрическую точность, низкую шероховатость и волнистость обработанных поверхностей. Вместе с этим шлифование характеризуется значительным тепловыделением в зоне резания, для уменьшения которого в РФ, Англии, Германии, Казахстане, Китае, США, Швеции, Японии и других странах проводятся исследования дискретных (прерывистых), высокопористых, импрегнированных и др. кругов.

Англия и Китай создали международный научный коллектив по исследованию текстурированных (дискретных) шлифовальных и алмазных кругов, которые используют для шлифования металлов и сплавов, высокоточных оптических линз и благородных материалов (платины и др.), что подтверждает особую актуальность этого направления исследований.

Существующие инструменты и процессы дискретного шлифования характеризуются ударными импульсами режущих элементов по заготовке, что приводит к повышению уровня вибрации технологического оборудования, снижению его долговечности и ухудшению геометрических показателей шлифованных поверхностей. Разработка новых способов дискретизации кругов, снижающих динамическую активность процессов шлифования; устройств для подачи СОЖ, интенсифицирующих отвод тепла, представляет важную научную задачу.

Часть работы выполнена при поддержке грантов:

- Российского Фонда Фундаментальных Исследований 2011-2013 (шифр №11-08-97542р_центр_a), тема Р719 «Разработка теории пространственного формирования плоскостей деталей в процессе дискретного шлифования, обеспечивающей шероховатость нано метрического уровня»;

- по фундаментальным исследованиям в области машиностроения (шифр 97-24-9.5-501), тема ГБ-164 «Исследование и разработка способа дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов лазерным лучом и создание на его основе нового класса инструмента».

Степень разработанности темы. Большой вклад в решение проблемы повышения эффективности процессов шлифования внесли учёные Волков Д.И., Козлов А.М., Макаров В.Ф., Старков В.К., Степанов Ю.С., Brown R.H., Kim J.D., Miller M. H., Hao Nan Li, Dragos Axinte и др.

Повышения геометрической точности поверхностей при известном дискретном шлифовании пытаются достичь на основе усложнения конструкций инструментов и процессов обработки, однако это направление либо не приводит к желаемой цели, либо вызывает существенное повышение стоимости инструментов, эксплуатационных затрат и снижение надежности функционирования процессов дискретного шлифования в условиях реального производства.

Повышению эффективности процессов шлифования путем разработки новых способов высокочастотной дискретизации режущей поверхности, конструкций дискретных инструментов и устройств для подачи СОЖ, генерирующих гидродинамические клинья СОЖ, не уделялось должного внимания.

Цель работы: повышение производительности, качества обработанных поверхностей, периода стойкости и ресурса работы абразивного и алмазного правящего инструментов на основе разработки инструментов и процессов высокочастотного дискретного резания.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать способы высокочастотной дискретизации кругов для плоского периферийного и торцевого шлифования, высокоэффективные конструкции инструментов и технологическую оснастку, обеспечивающие генерирование гидродинамических клиньев СОЖ и интенсификацию отвода тепла;

- разработать математические модели и выполнить компьютерное конечно-элементное моделирование напряженного состояния дискретных шлифовальных кругов и температуры обрабатываемой поверхности заготовки, на основании чего разработать высокопрочные инструменты и пути снижения тепловой напряженности процесса обработки;

- определить пути снижения виброактивности высокочастотного процесса плоского дискретного периферийного и торцевого шлифования;

- разработать теорию формирования поверхности, шлифуемой дискретным инструментом, раскрыть механизм образования геометрических погрешностей и определить пути их снижения;

- разработать технологию высокочастотной дискретизации инструментов для плоского периферийного и торцевого шлифования с использованием лазерного луча, гидроабразивной струи высокого давления и традиционного прессования;

- провести комплексные экспериментальные исследования инструментов и процессов высокочастотного дискретного плоского периферийного и торцевого шлифования и разработать многофакторные модели, позволяющие эффективно управлять процессами обработки;

- используя результаты теоретических и экспериментальных исследований разработать методы проектирования дискретного абразивного инструмента и эффективных процессов высокочастотных процессов плоского периферийного и торцевого шлифования.

Научная новизна работы заключается в:

- предложенном новом классе высокоэффективного абразивного инструмента;

- математической модели температуры заготовки в зоне резания, возникающей в процессе высокочастотного дискретного шлифования, определяющей пути снижения тепловой напряженности процесса обработки;

- математических моделях напряженного состояния дискретных шлифовальных кругов, позволяющих создавать конструкции высокопрочных инструментов для реализации эффективных процессов дискретного шлифования;

- математических моделях изменений сил резания, позволяющих снижать величину вынужденных колебаний инструмента вызванных дискретизацией абразивного инструмента;

- предложенной теории формирования рельефа шлифованной поверхности, позволяющей определить пути уменьшения геометрических погрешностей, вызванных дискретизацией инструмента;

- разработанной методологии проектирования дискретных инструментов и эффективных процессов плоского высокочастотного периферийного и торцевого шлифования.

В работе решена **научная проблема**, заключающаяся в обосновании нового класса высокоэффективных шлифовальных инструментов высокочастотного резания; способов дискретизации режущей поверхности высококонцентрированными потоками энергии и прессованием; конструкций кругов и процессов плоского периферийного и торцевого шлифования, обеспечивающих снижение тепловой напряженности в зоне резания, уровня вибрации технологической системы, генерирование мощных аэро- и гидродинамических потоков СОЖ, повышение качества, производительности, периода стойкости и ресурса работы абразивного, алмазного правящего инструментов.

Новизна принятых в работе решений подтверждена также патентами РФ на способы высокочастотной дискретизации кругов высококонцентрированными потоками энергии и прессованием, на конструкции кругов и технологической оснастки для их изготовления, для подачи СОЖ, обеспечивающих интенсивный отвод тепла из зоны резания.

Теоретическая значимость работы. Впервые предложенные критерии оценки схем дискретизации режущей поверхности шлифовальных инструментов позволяют проводить анализ и сравнение способов дискретизации, конструкций инструментов с позиций наиболее важных показателей процесса: уровня вибрации элементов технологической системы, геометрии обработанной поверхности, периода стойкости инструментов, расхода дорогостоящего правящего алмазного инструмента и эффективности действия СОЖ.

Результаты теоретического анализа механической прочности дискретных шлифовальных кругов, моделирования напряженного состояния необходимы для создания высокопрочных инструментов, обеспечивающих реализацию интенсивных режимов резания.

На основе разработанной теории формирования поверхности, шлифованной дискретными инструментами, проводится расчет, прогнозирование и минимизация геометрических погрешностей, что

способствует повышению точности обработанных изделий. Разработанные способы генерирования гидродинамических клиньев СОЖ в зоне плоского периферийного и торцевого шлифования могут использоваться и при реализации других видов механической обработки, что позволит повысить их эффективность. Предложенная методология проектирования средств технологического оснащения обеспечивает качественную разработку высокоэффективных инструментов и процессов плоского дискретного периферийного и торцевого шлифования различных изделий.

Практическая значимость работы заключается в разработанных и предложенных производству:

- способах высокочастотного дискретного плоского периферийного и торцевого шлифования и конструкциях инструментов;
- технологии изготовления дискретных инструментов для плоского периферийного и торцевого шлифования с использованием высококонцентрированных потоков энергии и традиционного прессования;
- устройствах для подачи СОЖ, обеспечивающих формирование гидродинамических клиньев СОЖ и повышение эффективности ее действия;
- режимах шлифования и рекомендациях по назначению характеристик абразивного материала инструментов, применяемых в процессах высокочастотного дискретного плоского шлифования;
- методологии разработки дискретных кругов, построения и реализации высокоэффективных процессов дискретного плоского периферийного и торцевого шлифования.

Методы исследования. В работе использованы научные методы дифференциального и интегрального исчисления, теории колебаний, уравновешивания машин и приборов, теории шлифования материалов, технологии машиностроения, режущего инструмента, математического и компьютерного моделирования, теории формообразования поверхностей, теории планирования многофакторных экспериментов и математической статистики. Применены современные программные продукты Statistika, Advanced Grapher, Creo Parametric, САЕ-комплексы CosmosWorks, SolidWorks, технологический СО₂-лазерный комплекс МКТЛ-1500, установка для гидроабразивной резки Alba 4-1313, а также современные технические средства измерения.

На защиту выносятся теоретическая, экспериментальная, методологическая и проектная база для разработки эффективных инструментов и процессов дискретного высокочастотного плоского периферийного и торцевого шлифования; технологической оснастки, обеспечивающей изготовление кругов и интенсификацию отвода тепла из зоны резания, а именно:

- способы высокочастотной дискретизации режущей поверхности кругов для плоского периферийного и торцевого шлифования высококонцентрированными потоками энергии и прессованием;

- результаты теоретического анализа разработанных способов высокочастотной дискретизации инструментов с позиций предложенных критериев;

- результаты теоретического анализа механической прочности дискретных инструментов и компьютерного моделирования их напряженного состояния;

- результаты компьютерного моделирования температуры обрабатываемой поверхности при плоском высокочастотном дискретном периферийном и торцевом шлифовании;

- технология высокочастотной дискретизации режущей поверхности периферийного и торцевого инструментов;

- теория формирования геометрии поверхностей, шлифованных дискретными инструментами для плоского шлифования;

- конструкции инструментов, реализующих новые способы дискретизации режущей поверхности с использованием высококонцентрированных потоков энергии и традиционного прессования, а также технологической оснастки, обеспечивающей генерирование гидродинамических клиньев СОЖ;

- результаты комплексных экспериментальных исследований разработанных конструкций и процессов высокочастотного дискретного шлифования; многофакторные экспериментальные модели, связывающие выходные параметры дискретного шлифования с элементами режима резания и геометрией дискретной режущей поверхности;

- методология разработки конструкций дискретных кругов и высокочастотных процессов плоского периферийного и торцевого шлифования.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.02.07. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, пункту 2 «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий».

Степень достоверности. Достоверность результатов исследований подтверждается применением современного технологического СО₂-лазерного комплекса МКТЛ-1500 и установки для гидроабразивной резки Alba 4-1313, современных средств измерения температуры в зоне выжигания отверстий и показателей качества деталей, применением современных программных продуктов «CosmosWorks», «Mathcad», «Advanced Grapher», «Statistics», проверкой моделей на адекватность, сходимостью полученных результатов с данными других ученых и внедрением результатов исследований в производство.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты

работы доложены и обсуждены на Всероссийской НТК «Теплофизика технологических процессов» (Рыбинск, 2005 г.); Международной НТК «Повышение качества продукции и эффективности производства» (г. Кострома, 2006 г., 2 доклада); Всероссийском совещании заведующих кафедрами материаловедения и технологии конструкционных материалов «Проблемы качества технологической подготовки» (г. Волжский, Волгоградская обл., 2007 г., 2 доклада); Международной НПК «Молодежь и наука: реальность и будущее» (Невинномысск, 2010 г., 2 доклада); Международной молодежной научной конференции «40-е Гагаринские чтения» (г. Москва, 2014, 2 доклада); IV-й Международной НПК «Инновации качество и сервис в технике и технологиях» (Курск, 2014 г., 2 доклада); Международной НТК, посвященной 85-летию со дня рождения д.т.н., проф. Волчкевича Л. И. (г. Москва, 2015 г.); XII-й Международной НПК «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (Курск, 2015 г., 3 доклада); 2-й Международной молодежной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 2015 г.); Международной НПК «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Курск, 2016 г., 2 доклада); XII-м Международном симпозиуме «Фундаментальные и прикладные проблемы науки» (г. Москва, РАН, 2017 г.); XXXVII-й Всерос. конф. «Наука и технологии», посвященной 70-летию Гос. ракетного центра им. акад. В. П. Макеева (г. Миасс).

Результаты работы доложены на семинаре кафедры «Инструментальная техника и технологии» (МТ2) МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2018г., 2019г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 46 печатных работ, в том числе 3 монографии, 15 научных статей в изданиях, рекомендованных ВАК; 7 статей в журналах, входящих в международную базу Scopus, 6 патентов РФ, 15 публикаций в материалах научно-технических конференций различного ранга и симпозиумах, общим объёмом 19,33 печатных листа.

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 284 страницах машинописного текста, содержит 135 рисунков и 11 таблиц, состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 230 источников, и 13 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность темы, степень ее разработанности, цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследований; положения, выносимые на защиту; степень достоверности, апробация, структура и объём работы.

В первой главе проанализированы процессы шлифования прерывистыми цельными, сборными, высокопористыми, комбинированными, импрегнированными кругами, отмечены их положительные стороны (снижение

температуры в зоне резания и др.). Вместе с этим анализ работ предшественников в области дискретного шлифования металлов и сплавов показал, что существующие процессы характеризуются ударным воздействием режущих элементов на заготовку, ухудшением геометрических показателей качества шлифованных поверхностей, высоким уровнем вибрации технологической системы, а также низкой скоростью и давлением смазочно-охлаждающей жидкости в зоне шлифования, что снижает ее функциональные свойства и эффективность процессов обработки.

За рубежом проводятся исследования текстурированных (дискретных) шлифовальных и алмазных инструментов (Англия, Китай, США, Япония, Швеция, Казахстан и др.). Англия и Китай создали международный научный коллектив по исследованию текстурированных кругов для шлифования черных и благородных металлов, высокоточных оптических линз, что свидетельствует об

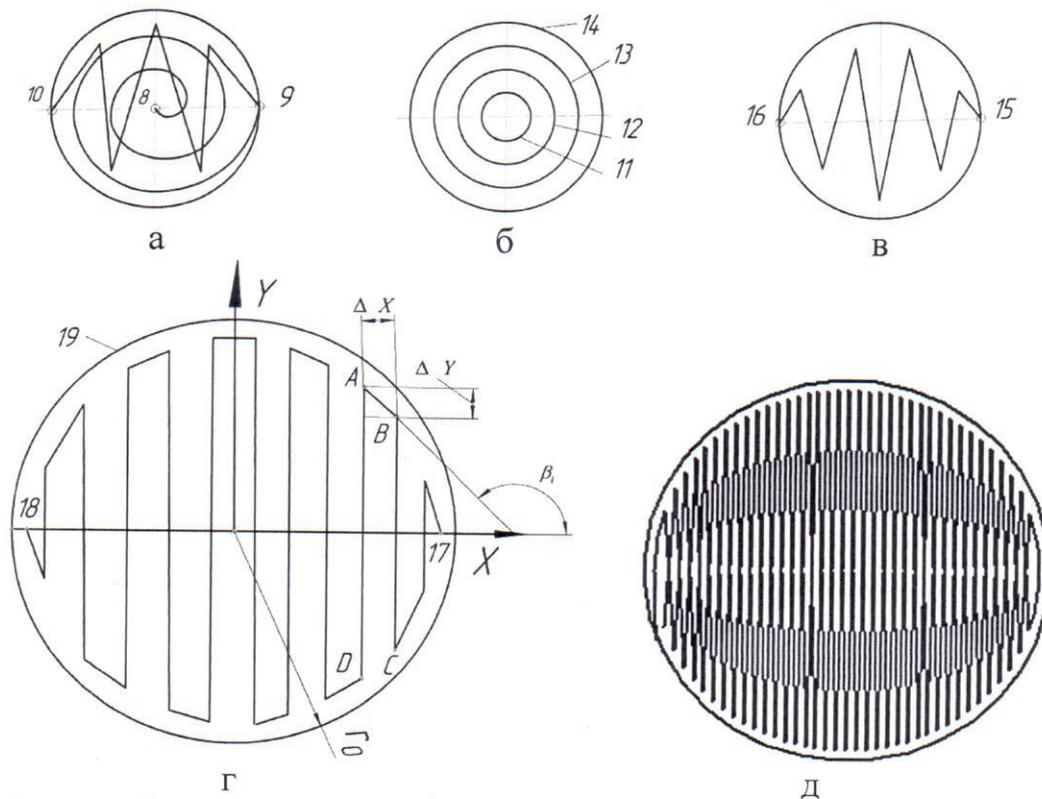


Рис. 1. Траектории движения концентрированного потока энергии в процессе дискретизации режущей поверхности инструмента

особой актуальности этого направления исследований.

В результате анализа научных работ сформулировано направление дальнейших исследований.

Во второй главе изложено научное обоснование схем высокочастотной дискретизации периферийных и торцевых шлифовальных кругов, разработаны новые способы дискретизации, конструкции инструментов и технологической оснастки. Обоснована траектория движения лазерного луча и гидроабразивной

струи при дискретизации периферийного инструмента, для этого проанализированы пять схем (Рис. 1). При первой схеме (траектории) лазерный луч или гидроабразивная струя движется из центра 8 формируемого отверстия в точку 9 по спирали (Рис. 1, а), откуда зигзагообразными движениями – в точку 10. Из точки 10 струя движется по окружности, окончательно формируя профиль отверстия.

При 2-й схеме струя движется по окружности 11 малого диаметра, затем – по окружностям 12, 13 и заканчивает обработку по окружности 14, обеспечивая получение требуемого размера отверстия (Рис. 1, б). При третьей схеме струя перемещается по зигзагообразным отрезкам из точки 15 в точку 16, окончательно она формирует отверстие, двигаясь по окружности (Рис. 1, в). При четвертой схеме струю перемещают из точки 17 в точку 18 (Рис. 1, г), по отрезкам *CB*, *BA*, *AD* и т. д., затем по окружности 19. Пятая схема (Рис. 1, д) содержит все движения струи 4-ой схемы и отличается от последней тем, что после перемещения из точки 17 в точку 18 струя движется по зеркально отраженной траектории отрезков из точки 18 в точку 17. Описанные схемы реализованы на CO_2 -лазерном комплексе МКТЛ-1500 и установке для гидроабразивной резки ALBA 4-1313.

Для оценки каждой из схем выбраны критерии: отсутствие термического повреждения абразивного материала, точность отверстия и производительность процесса вырезания. Первая и пятая траектории движения лазерного луча обеспечивают минимальные геометрические погрешности отверстия, но появлялись цвета побежалости и локальные вспучивания абразивного материала, что свидетельствовало об изменении его структуры под действием высокой температуры.

При выжигании отверстий по 2-й схеме с подачей лазерного луча $V_p = 500$ и 1000 мм/мин также возникали пятна серо-коричневого цвета, которые отчетливо видны у отверстий, приближенных к торцам инструмента. Третья схема не вызывает термического повреждения абразивного материала, но в отверстиях оставался не полностью выжженный абразивный материал, поэтому его удаляли дополнительными проходами, что приводило к снижению производительности процесса. По 4-ой траектории были изготовлены круги на режимах: подача лазерного луча $V_p = 250$ мм/мин, мощность излучения $N = 1$ кВт, при этом установлено, что на точность формы отверстий и температуру влияют режим вырезания, диаметр отверстия и число рабочих проходов.

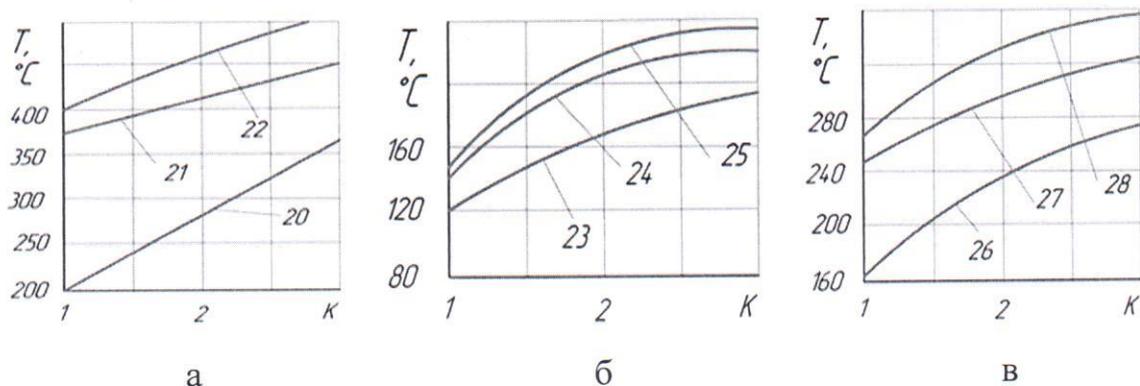


Рис. 2. Зависимость температуры в зоне прожигания отверстия от числа рабочих проходов

При выжигании отверстий радиусом $r = 0,9$ мм поочередно в 1-й, 2-й и 3-й строках и увеличении числа проходов K усредненная температура в зоне обработки возрастает в соответствии с прямыми 20, 21 и 22 (Рис. 2, а), анализ которых приводит к выводу о том, что скорость нарастания температуры по мере увеличения числа рабочих проходов K лазерного луча постепенно уменьшается, однако стабилизации температуры не наблюдается. Для сохранения исходной структуры абразивного материала прожигание отверстий проводили парами смежных параллельных строк.

При вырезании отверстий радиусом $r = 1,6$ мм (Рис. 2, б) температура ниже по сравнению с Рис. 2, а. При прожигании отверстий радиусом $r = 2,65$ мм температура выше (кривые 26, 27 и 28, Рис. 2, в) по сравнению с графиком (Рис. 2, б), что связано с большим объемом удаляемого абразива. В результате прожигания отверстий лазерным лучом установлено, что наиболее полно выбранным критериям отвечает 4-я схема.

Температура в зоне вырезания отверстий гидроабразивной струей, составляла 24°C при исходной температуре круга $22,5^{\circ}\text{C}$, что позволило исключить критерий «Термическое повреждение» и учитывать точность отверстия и производительность процесса дискретизации. При вырезании отверстий на гидроабразивной установке в соответствии с 1-ой и 2-ой траекториями при давлении (384–432) МПа, диаметре сопла 0,25 мм, подаче гидроабразивной струи 120 мм/мин, расходе абразива 150 г/мин возникает значительное отклонение профиля продольного сечения отверстий (до 0,5 мм).

Форма отверстия получается параболической, а в центре отверстия образуется опережающее углубление (Рис. 2, а). В этой связи от 1-ой и 2-ой схем вырезания отверстий отказались.

Сравнительно большие погрешности отверстия обнаружены также при использовании третьей схемы.

Хорошие результаты по точности отверстий (до 0,1 мм) обеспечивают четвертая и пятая схемы (Рис. 3, б, в).

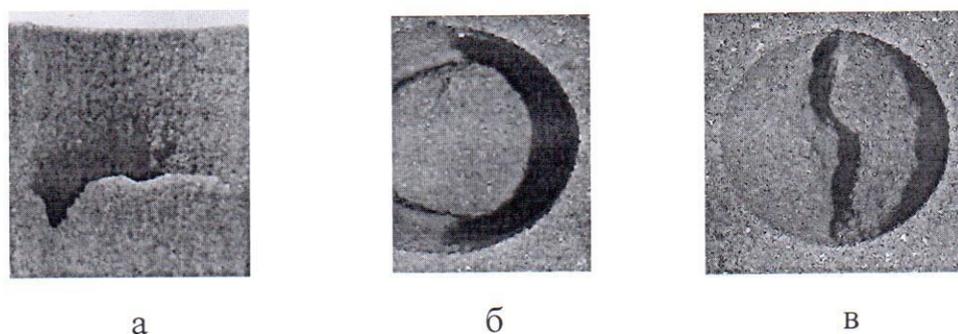


Рис. 3. Форма отверстий, полученных в результате вырезания по 3-й, 4-й и 5-й траекториям струи соответственно

Четвертая уступает 5-й схеме по точности, однако различие в отклонении профиля продольного сечения для обеих схем составляет сотые доли миллиметра, а производительность 4-й схемы значительно выше. Поэтому более предпочтительной является 4-я траектория (схема), в соответствии с которой

разработаны способы дискретизации, защищенные патентами РФ, и изготовлены шлифовальные круги (Рис. 4).

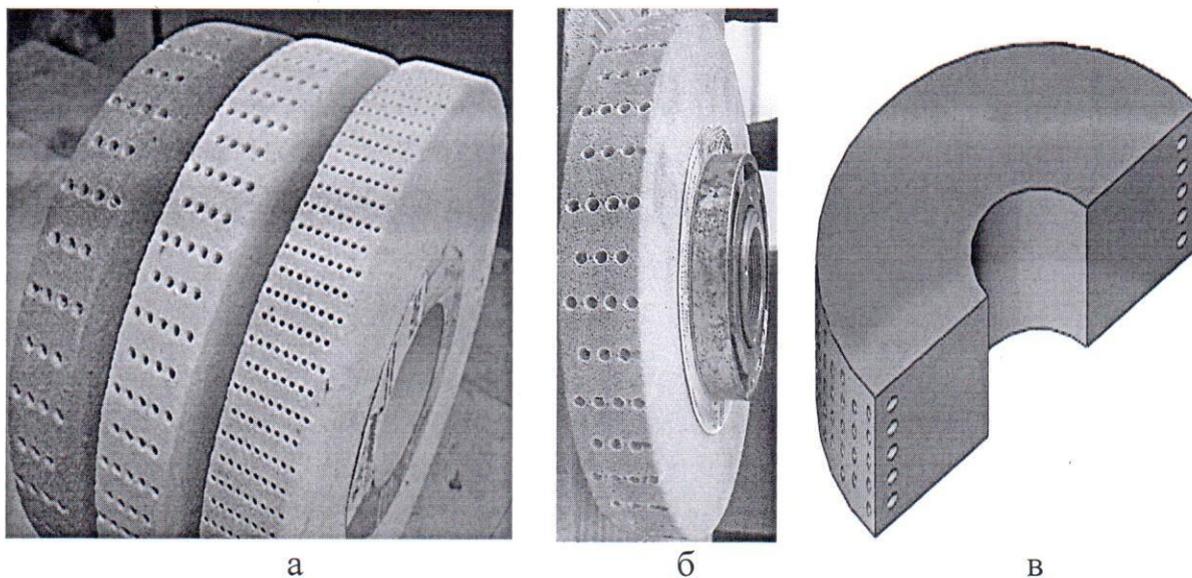
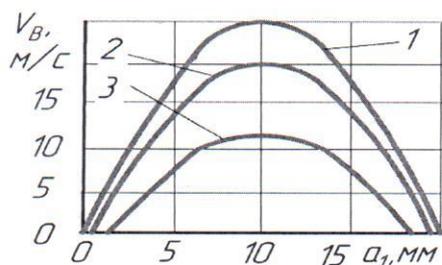


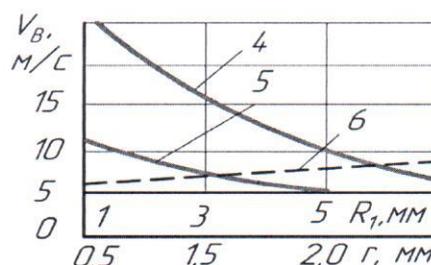
Рис. 4. Дискретные периферийные инструменты, изготовленные: а – лазерным лучом, б – гидроабразивной струей (радиальные отверстия), в - гидроабразивной струей (наклонные отверстия)

Эти круги при работе генерируют мощные аэродинамические потоки (Рис. 5), способствующие отводу тепла из зоны резания. Радиус r вырезанных отверстий оказывает значительно меньшее влияние на скорость воздушного потока, чем факторы a_1 и R_1 .

Максимальная скорость 25,1 м/с возникает в точке с координатами $a_1 = 0,5B$ и $R_1 = 1$ мм (B –высота дискретного круга).



а



б

Рис. 5. Изменение скорости воздушных потоков вдоль образующей a_1 круга (кривые 1–3); в функции расстояния R_1 трубки Пито от режущей поверхности (кривые 4, 5) и радиуса r вырезанных отверстий (прямая 6)

Использование высококонцентрированных потоков энергии для дискретизации участков больших размеров (десятки и сотни мм) нецелесообразно из-за значительных геометрических погрешностей участков,

поэтому разработаны пресс-формы, с помощью которых изготовлены сегменты с каналами 1–3 длиной 143 мм на установочной плоскости сегмента и каналами 4 и 5 длиной 150 мм на периферийной плоскости (Рис. 6, а, б).



Рис. 6. Дискретные сегменты с каналами на установочной (а) и на установочной и периферийной (б) плоскостях, изготовленные с использованием разработанных пресс-форм

Разработаны конструкции инструментов для плоского и торцевого шлифования. Круг 5 для периферийного шлифования содержит крышки 1 и 2 (Рис. 7, а), установленные на фланцах 3 и 4. Круг закреплен во фланцах 3 и 4 и имеет вырезанные отверстия 6.

Крышка 1 имеет лопасти 7 и отверстия 8, а крышка 2 – лопасти 9 и отверстия 10. СОЖ подается по трубопроводам 11 и 12, выполненным в виде

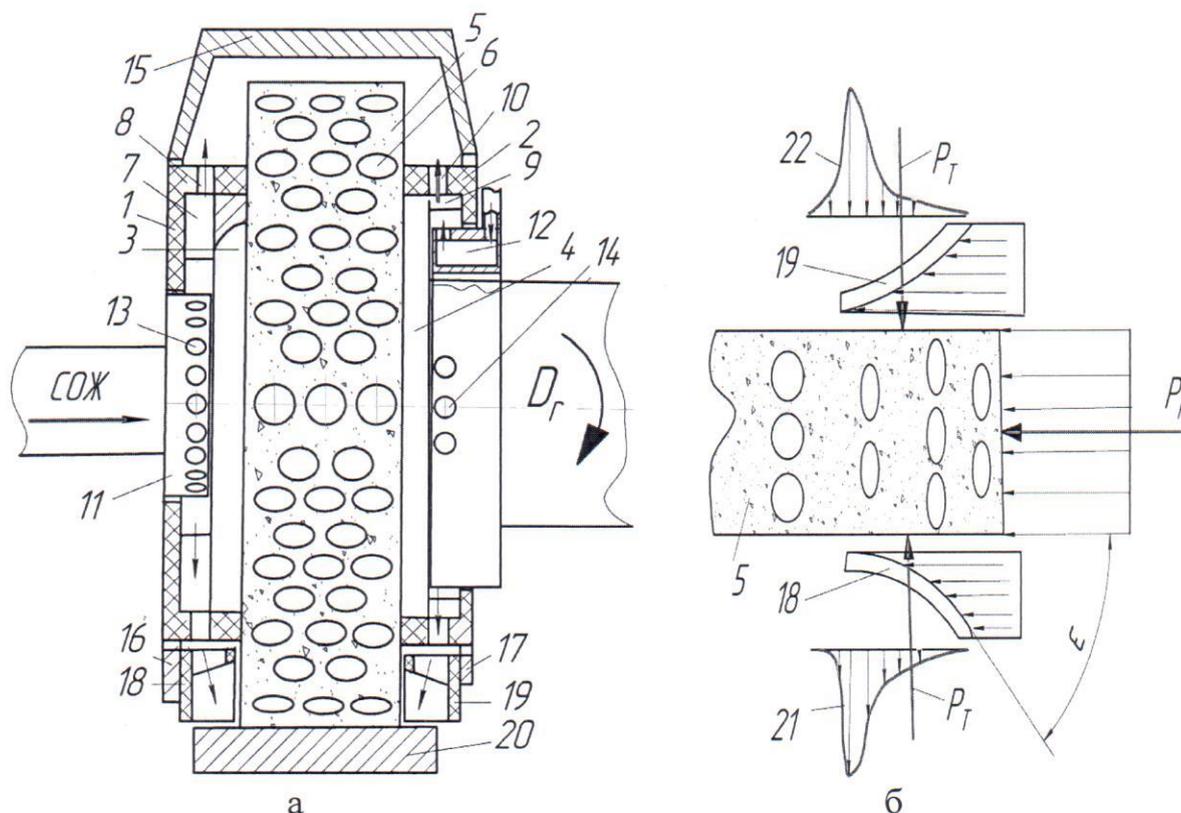


Рис. 7. Дискретный инструмент для плоского периферийного шлифования (а) и гидродинамические клинья (б), генерируемые им при работе

полуцилиндров, в которых просверлены отверстия 13 и 14 для направления СОЖ к лопастям 7 и 9 соответственно. Между кожухом 15 и вращающимися крышками 1 и 2 имеется радиальный зазор во избежание трения между вращающимися и неподвижными частями. К левой стенке 16 и правой стенке 17 защитного кожуха 15 прикреплены профильные пластины 18, 19, образующие малый зазор (0,3...0,5 мм) с торцами шлифовального круга 5 и обрабатываемой заготовкой 20. Лопастями 7 и 9 СОЖ разгоняется примерно до скорости резания и направляется под углом ϵ в клиновые зазоры между кругом 5 и пластинами 18, 19 (Рис. 7, б), поджимающими потоки СОЖ к торцам круга 5. Возникают два торцевых гидродинамических клина (силы $2P_T$, эпюры давления-кривые 21, 22) и один центральный клин (сила P_K). Усредненное давление СОЖ составляет (0,25–0,30) МПа, что способствует отводу тепла из зоны резания.

Круг для торцевого шлифования состоит из корпуса 1 с расточкой 2, в которой установлен распределитель, направляющий СОЖ в каналы 3, поступающей из трубопровода 4. На плоскостях 5 закреплены сегменты 6 с каналами 7, их дно наклонено под углом β (Рис. 8, а, б). Сухарь 8 и болт 9 закрепляют два сегмента. Круг закреплен на шпинделе 10 гайкой 11.

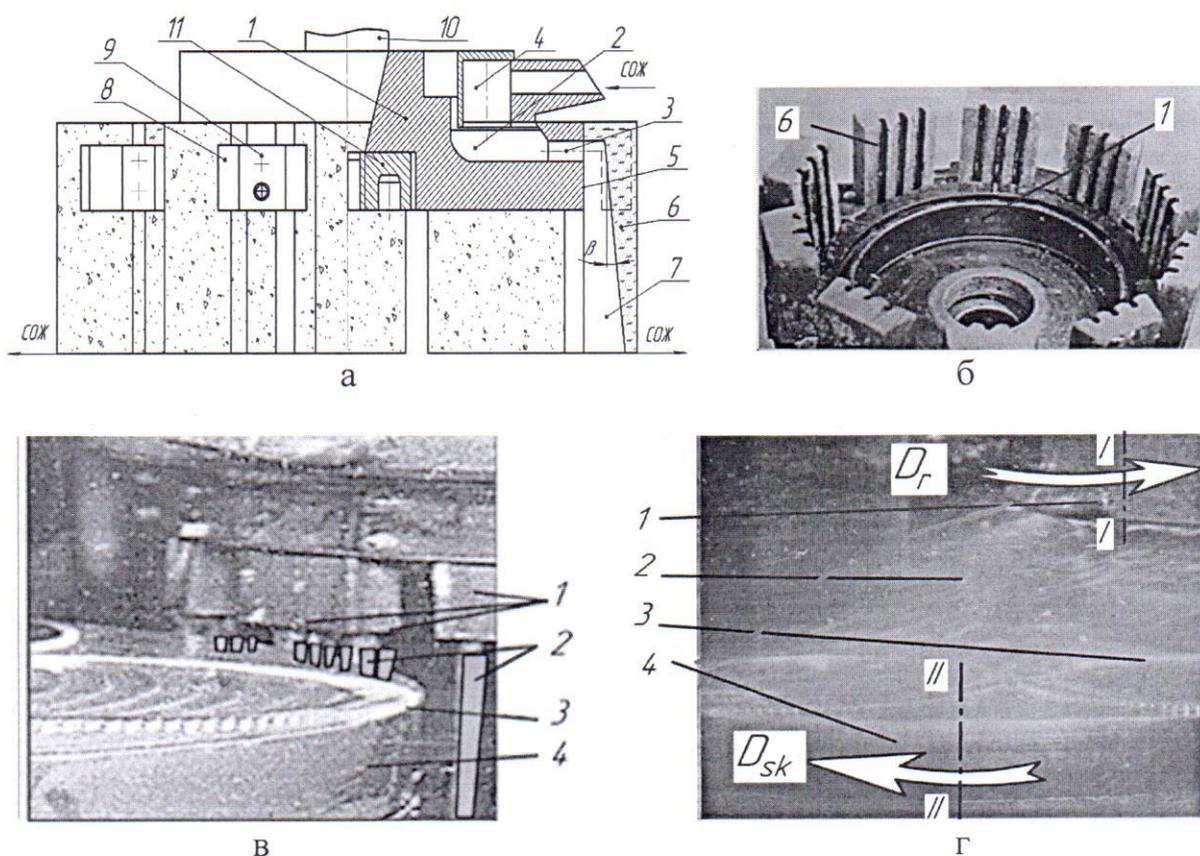


Рис. 8. Дискретный круг для торцевого шлифования: а-схема; б – круг в сборе; в – течение СОЖ в статике (1–сегменты, 2–струи СОЖ, 3–заготовка, 4–стол); г–при вращении круга 1 (2–потоки СОЖ); I–I и II–II – оси вращения круга и стола соответственно

Разработанные способы дискретизации, конструкции инструментов и технологической оснастки защищены патентами РФ [26–31].

В третьей главе проведено моделирование напряженного состояния дискретных инструментов и температуры заготовки. Напряженное состояние

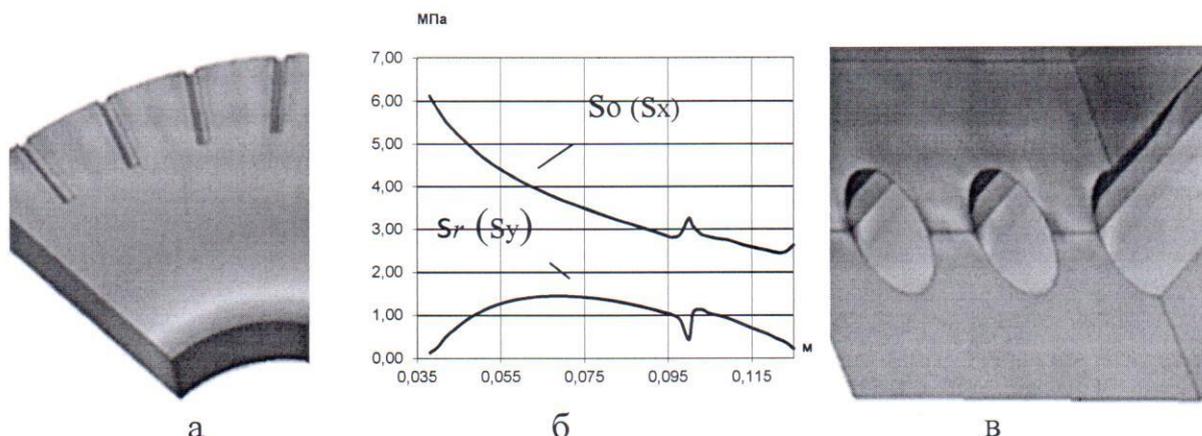


Рис. 9. Напряжения в дискретном круге от действия центробежных сил (а, б) и от силы резания (в) в стенках между отверстиями

круга для периферийного шлифования исследовали с использованием современного САЕ-комплекса CosmosWorks. Радиальные и окружные напряжения в круге от действия центробежных сил меньше допускаемых (Рис. 9, а, б).

Для посадочного отверстия круга запас прочности $n = 2,6$, а для поверхности перехода от сплошной к дискретной части круга – $n = 4,8$. Анализ напряженного состояния инструмента от действия силы резания (напряжения сжатия) показал, что запас прочности составляет $n = 2,8$, что соответствует требованиям ГОСТ. В процессе шлифования возникают также напряжения в стенках между отверстиями (Рис. 9, в), максимальное значение которых составляет 9,38 МПа и меньше допускаемых напряжений.

Круг с наклонными вырезанными отверстиями имеет более высокую

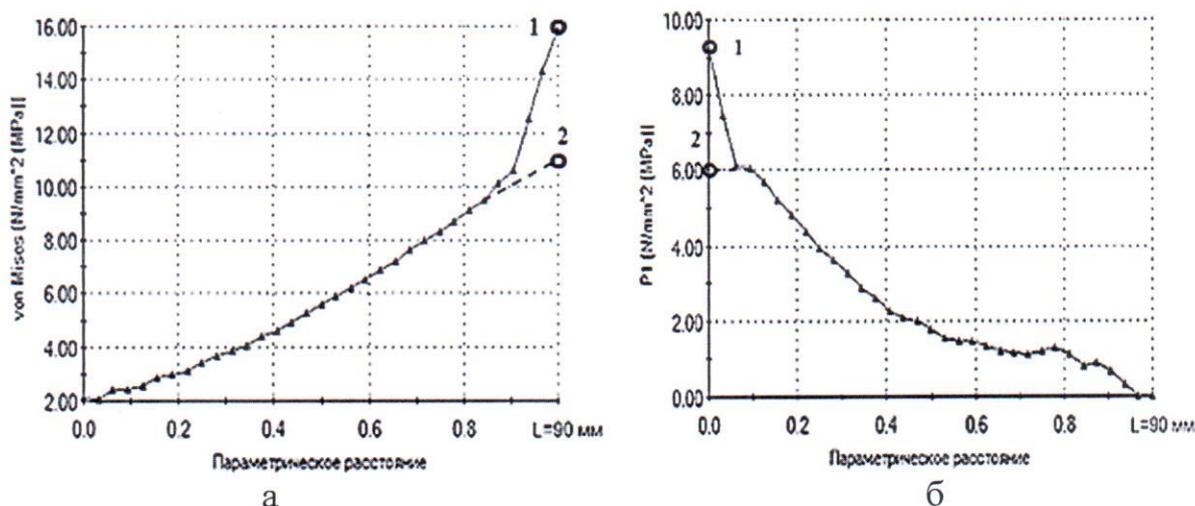


Рис. 10. Изменение напряжений VonMises по длине используемой части сегмента (а) и вдоль вертикального ребра (б)

механическую прочность: разрывные скорости инструмента при радиусе отверстий $r = (1,0-2,5)$ мм выше, чем с радиальными отверстиями на (10–25)%.

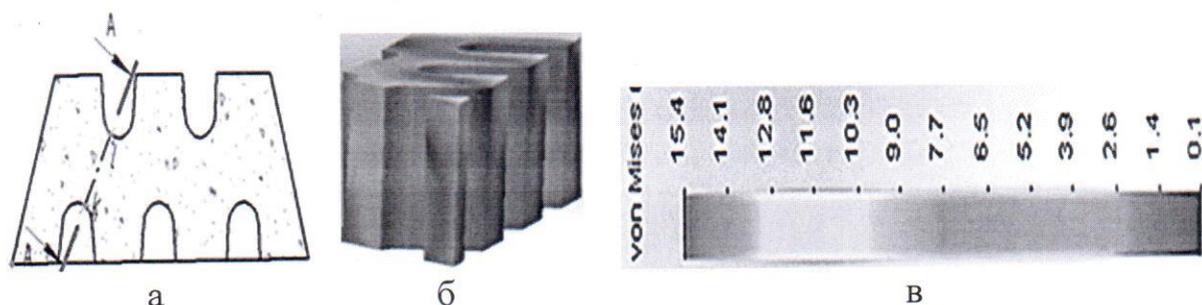


Рис. 11. Опасное сечение А-А (а), 3D-модель сегмента с двухсторонними каналами (б) и поле напряжений (в)

Дискретные круги прочнее, чем сплошные и цельные прерывистые круги, что объясняется уменьшением на (20–30) % массы дискретного круга и действующей на него центробежной силы.

Разработанные модели напряжений и разрывных скоростей периферийного дискретного инструмента позволяют сравнивать механическую прочность кругов с различными схемами дискретизации и на этой основе выбирать наиболее прочный инструмент.

С использованием САЕ-комплекса CosmosWorks исследовано напряжённое состояние дискретного торцевого круга, оснащенного сегментами с каналами на установочной плоскости (Рис. 6, а) и с каналами на обеих сторонах сегмента (Рис. 6, б). Учитывали действие центробежных сил и силы резания. Максимальные напряжения Мизеса 16,9 МПа (Рис. 10, а) находятся в плоскости заделки сегмента, напряжения на поверхности рёбер меньше, чем в заделке (Рис. 10, б). Напряжения Мизеса в точке 1 возрастают из-за граничного условия неподвижности верхней плоскости сегмента. За расчетное напряжение принимаем значение 10,9 МПа в точке 2. В зоне резания напряжения малы, для передней и задней стенок сегмента они примерно одинаковы, небольшое их увеличение наблюдается в местах закругления каналов и крайних рёбер. Это объясняется меньшей площадью контакта дискретного сегмента с заготовкой и уменьшением силы резания.

В сегментах с каналами 1–5 (Рис. 6, б) максимальные напряжения Мизеса 15,4 МПа находятся в плоскости его заделки. Максимальные напряжения растяжения вдоль вертикального ребра составляют 8,8 МПа, а в углах и на рёбрах – 6,0 МПа, что меньше, чем у сегмента с каналами 1–3 (Рис. 6, а). Максимальное напряжение в опасном сечении А-А равно 7 МПа (Рис. 11, а-в), оно в 2 раза меньше допустимого, что подтверждает высокую механическую прочность сечения А-А. Таким образом, сегменты с каналами 1–3 и 1–5 (Рис. 6, а, б) можно использовать при интенсивных режимах шлифования.

Температура по глубине δ поверхностного слоя заготовки (Рис. 12) уменьшается в последовательности: \blacklozenge –круг со сплошной режущей поверхностью; \blacksquare –круг с сегментами со сплошной режущей поверхностью; \blacktriangle –круг с сегментами с каналами 1–3 на одной стороне; \bullet –круг с сегментами с

каналами 1–5 на обеих его сторонах.

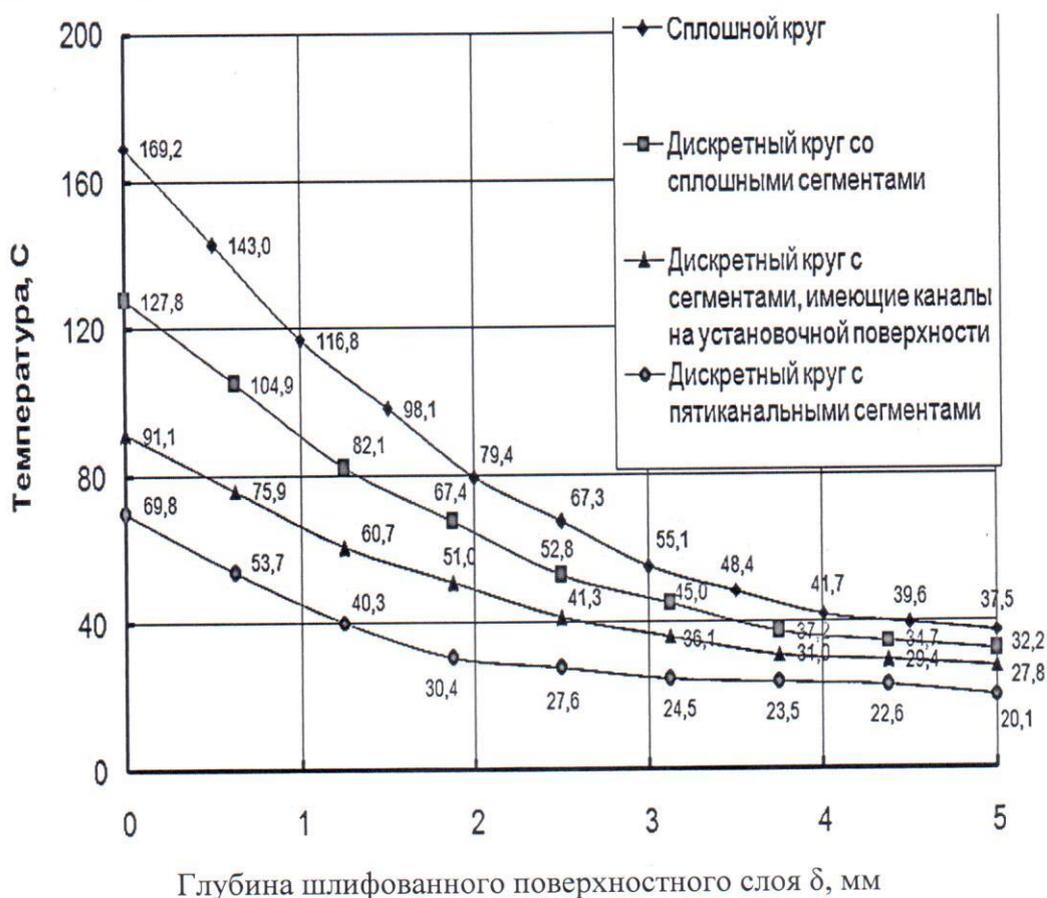


Рис. 12. Изменение температуры по глубине поверхностного слоя, обработанного различными торцевыми шлифовальными кругами

Максимальная температура в центре обрабатываемой поверхности заготовки составила: $T_1 = 169,2$; $T_2 = 127,8$; $T_3 = 91,1$; $T_4 = 69,8$ °C. Низкие значения температуры заготовки, полученные в результате моделирования, объясняются малым промежутком времени шлифования (0,1÷0,5) секунды, лимитированным ресурсом программного обеспечения.

По сравнению с кругом со сплошной режущей поверхностью рассмотренные инструменты обеспечивают снижение значений температуры соответственно на 24,5; 46,2; 58,7 %. Наибольшее снижение температуры в зоне шлифования обеспечивает инструмент, оснащенный абразивными сегментами с каналами на установочной и периферийной плоскостях (на 2-х сторонах). Снижение температуры при шлифовании дискретными сегментами и подаче СОЖ в плоскость резания позволяет повысить режимы резания.

Четвертая глава посвящена разработке теории формирования поверхностей, шлифуемых дискретным периферийным и торцевым инструментами, для чего исследованы факторы, оказывающие доминирующее влияние на уровень вибрации шпиндельного узла с кругом.

Раскрыта статика и динамика формирования геометрических погрешностей. Радиальная составляющая силы резания равна:

$$P_y = P_{y1} - P_{y2}, \quad (1)$$

где P_{y1} , P_{y2} – соответственно радиальная составляющая силы резания, вызванная обработкой сплошным кругом и прерывистостью процесса.

Дифференциальное уравнение движения дискретного круга под действием главного вектора дисбалансов $D_{ст}$ и радиальной составляющей P_y силы резания имеет вид:

$$m \frac{d^2 y}{d\tau^2} + \mu \frac{dy}{d\tau} + cy = Q \sin(\omega\tau + \varphi_0) + P_y, \quad (2)$$

где m – приведенная колеблющаяся масса; y – упругие перемещения круга в направлении, перпендикулярном обработанной поверхности; μ , c – соответственно коэффициент демпфирования и жесткость шпиндельного узла; $Q = D_{ст}\omega^2$ – неуравновешенная центробежная сила, обусловленная действием главного вектора дисбалансов $D_{ст}$ круга; ω – угловая скорость круга; φ_0 – угол главного вектора дисбалансов; τ – текущее время.

Частное решение уравнения (2) имеет вид:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{h}{\sqrt{(k_1^2 - p_1^2)^2 - 4n_1^2 p_1^2}} \sin(\omega t + \varphi_0) + \frac{P_y}{\sqrt{(c - m\omega^2 n_{T0}^2)^2 + \mu^2 \omega^2 n_{T0}^2}} \sin(\omega t + \varphi_0 - \alpha) n_{T0}, \quad (3)$$

где y_1, y_2 – соответственно упругие перемещения оси дискретного круга под действием вектора $D_{ст}$ и силы P_y ; $h = Q/m$ – относительная амплитуда центробежной силы; k_1 – частота собственных колебаний шпинделя; p_1 – частота центробежной силы; $n_1 = \mu/m$ – коэффициент затухания; n_{T0} – число строк отверстий, уместяющихся по окружности круга; α – угол запаздывания перемещений y от силы P_y .

Из (3) следует, что вибрация круга описывается синусоидой (Рис. 13, а, б), состоящей из низкочастотной и высокочастотной синусоид, при этом, чем больше число строк n_{T0} вырезанных отверстий и число абразивных сегментов n_c в известном дискретном круге, тем короче время упругого восстановления шпинделя и меньше амплитуда вынужденных колебаний (Рис. 13, в). С уменьшением радиуса r вырезанных отверстий и припуска на

проход t уровень высокочастотной вибрации шлифовального круга снижается. Уровень вибрации при высокочастотном дискретном шлифовании (Рис. 13, в, кривые 1–3) значительно меньше по сравнению с обработкой известными дискретными кругами (пунктирная кривая 4). При $r < 0,5$ мм отверстия засоряются.

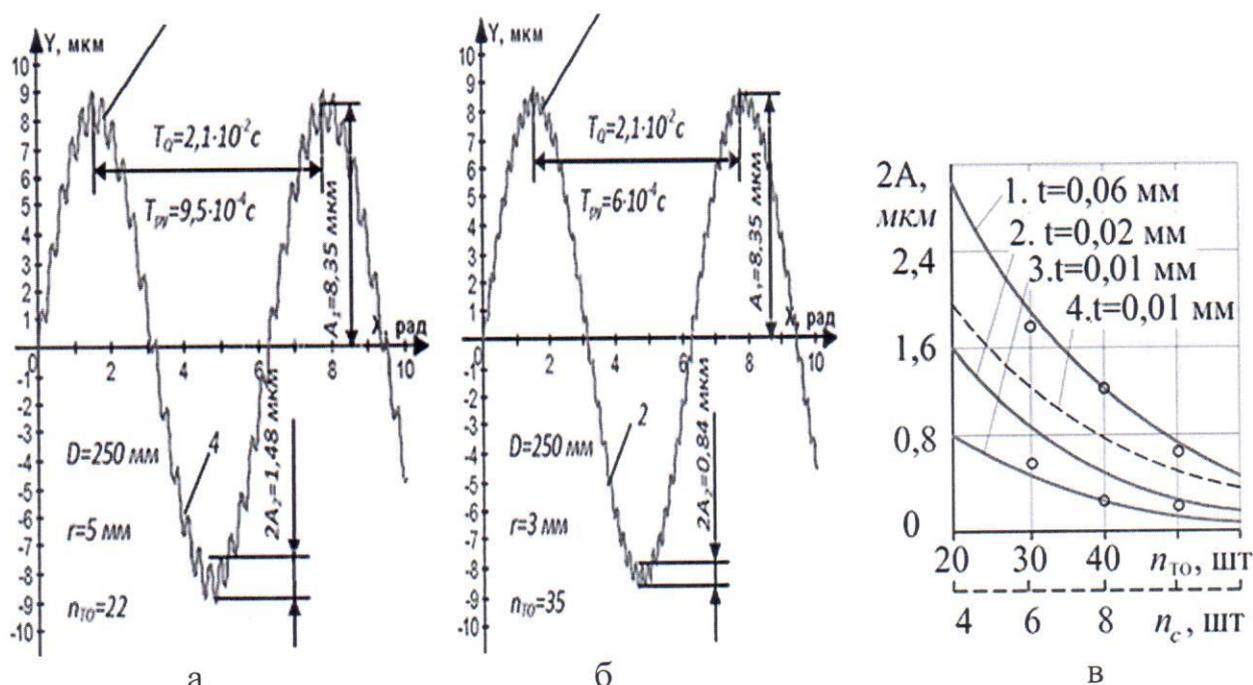


Рис. 13. Колебания дискретного круга от действия вектора D_{cm} и силы P_y : а – $n_{TO} = 22$; б – $n_{TO} = 35$; в – $n_{TO} = 20 - 60$ шт.; о – эксперимент

Разработана математическая модель и графическая интерпретация механизма формирования обработанной поверхности и ее геометрических погрешностей (Рис. 14, а, б). При фазовом сдвиге $0,3(3)\pi$ синусоид обработанная поверхность описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}
 Y &= 4,2 \sin(x) + 0,5 \sin(22x), \text{ при } 0 \leq x \leq (\pi/3)k, \\
 Y &= 4,2 \sin(x + \pi/3) + 0,5 \sin(22x), \text{ при } (\pi/3)k \leq x \leq (x + 2\pi/3)k, \\
 Y &= 4,2 \sin(x + 2\pi/3) + 0,5 \sin(22x), \text{ при } (x + 2\pi/3)k \leq x \leq (x + \pi)k, \\
 Y &= 4,2 \sin(x + \pi) + 0,5 \sin(22x), \text{ при } (x + \pi)k \leq x \leq (4\pi/3)k, \\
 Y &= 4,2 \sin(x + 4\pi/3) + 0,5 \sin(22x), \text{ при } (4\pi/3)k \leq x \leq (5\pi/3)k, \\
 Y &= 4,2 \sin(x + 5\pi/3) + 0,5 \sin(22x), \text{ при } (5\pi/3) \cdot k \leq x \leq 2\pi k,
 \end{aligned} \tag{4}$$

где k – целое положительное число; $A_1 = 4,2$ мкм, $A_2 = 0,5$ мкм – амплитуды низко- и высокочастотной синусоиды, вызванные дисбалансами и

дискретностью инструмента соответственно.

С увеличением числа рабочих проходов круга погрешность уменьшается от Δ_1 до Δ_2 (Рис. 14, а) и от Δ_1 до Δ_5 (Рис. 14, б).

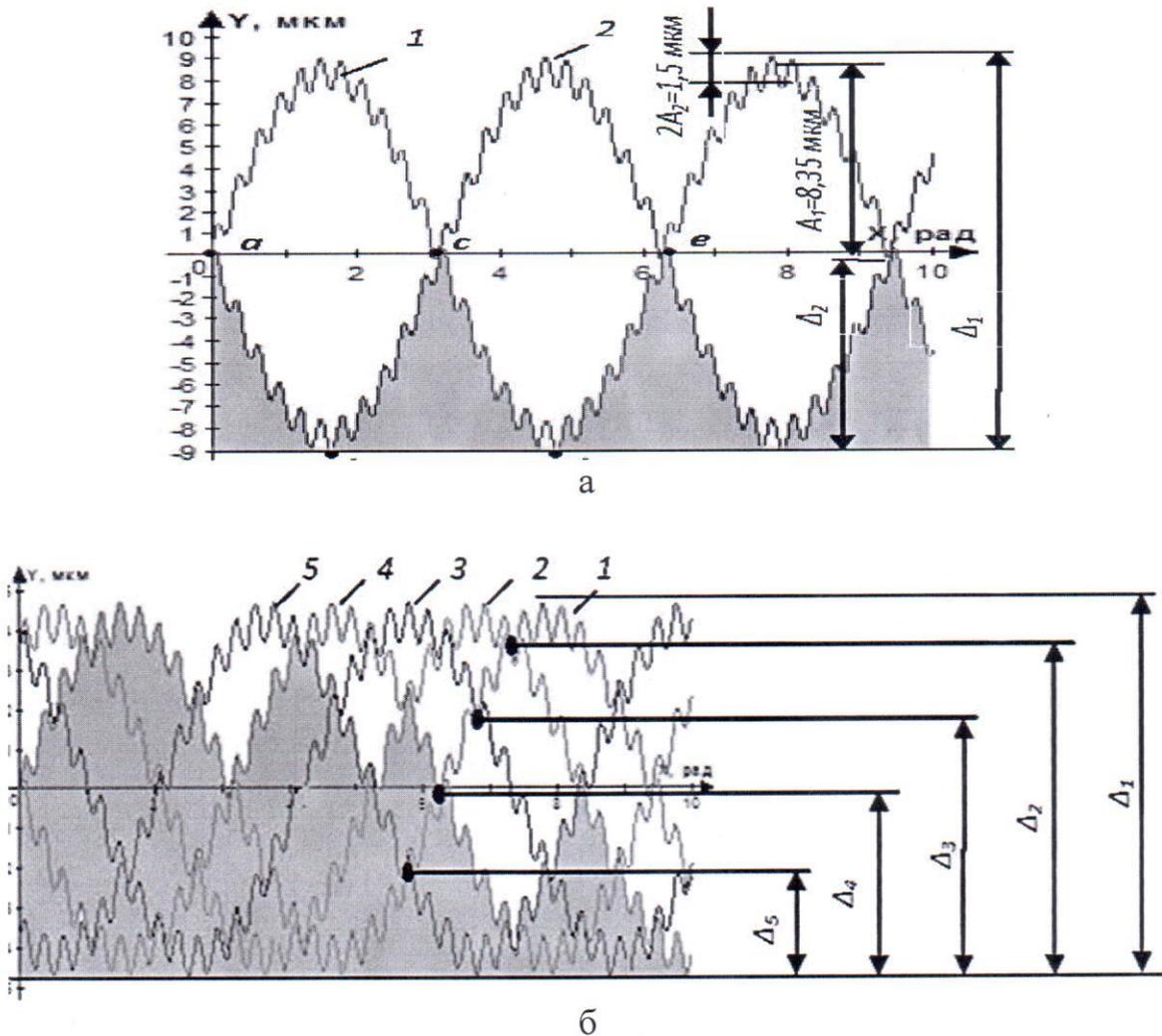


Рис. 14. Формирование поверхности при сдвиге фаз π синусоид (а), при 2-х проходах круга и сдвиге фаз $\pi/3$ (б) при 5-ти проходах

Минимальные значения Δ возникают при сдвиге фаз $(0,05-0,12)\pi$ радиан (Рис. 15). На основании (3), (4) и графиков влияния фазового сдвига синусоид на погрешность обработанной поверхности выбирается режим шлифования, обеспечивающий выполнение требований к геометрической точности обработанной поверхности и максимально возможную производительность технологической операции. Под действием дисбалансов торцевого круга абразивные зерна сегментов осциллируют в плоскости резания с амплитудой:

$$A_{\Gamma} = \frac{P_z + m_n \omega^2 \rho \cos(\varphi_0 + \omega\tau)}{J_{\text{и}}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{СК}}} P_{zi} + m_n \omega^2 \rho \cos(\varphi_0 + \omega\tau)}{J_{\text{и}}}, \quad (5)$$

где $P_z = \sum_{i=1}^{n_{\text{ск}}} P_{zi}$ — главная составляющая силы резания, равная векторной сумме элементарных сил P_{zi} , создаваемых сегментами; $n_{\text{ск}}$ — число сегментов, контактирующих с заготовкой; m_n, ρ — соответственно неуравновешенная масса и радиус ее центра тяжести; ω — угловая скорость круга; φ_0 — угол главного вектора дисбалансов; τ — время шлифования; $J_{\text{ш}}$ — изгибная жесткость шпиндельного узла.

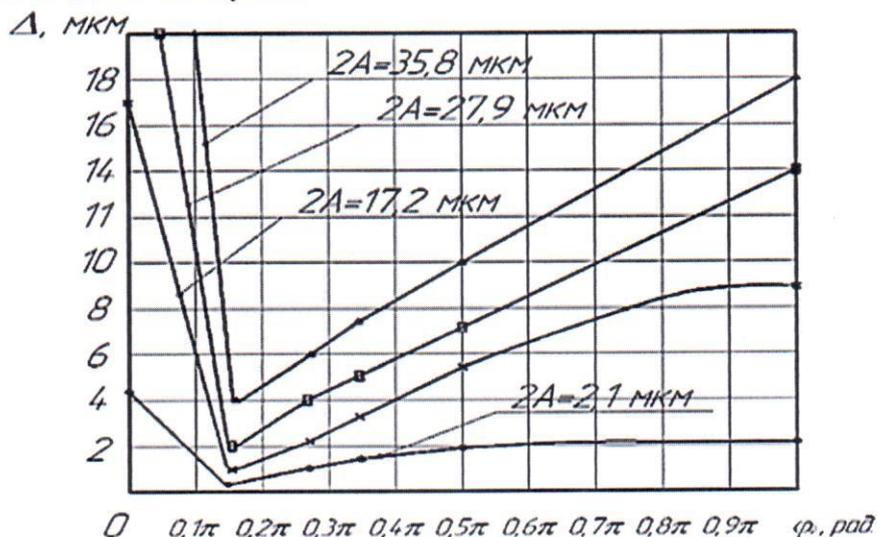


Рис. 15. Влияние сдвига фаз синусоид на погрешность обработанной поверхности

Амплитуда колебаний периферийных абразивных зерен сегментов в вертикальной плоскости описывается выражением:

$$A_B = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{ск}}} P_{yi}}{j_B} + 0,5R_i(\sin\delta_1 + \sin\delta_2), \quad (6)$$

где j_B — жесткость шпиндельного узла в вертикальном направлении; δ_1, δ_2 — угол наклона оси круга при векторе $D_{\text{ст}}$, направленном к столу с заготовками и от него соответственно.

Формирование обработанной поверхности происходит путем массового врезания абразивных зерен в материал заготовки при прохождении элементарных режущих профилей и режущих контуров сегментов относительно заготовки. Разработанная теория формирования обработанной поверхности позволяет оценивать и выбирать входные факторы процесса, обеспечивающие требуемые её геометрические показатели. Погрешности, вызванные высокочастотной дискретизацией инструментов, примерно на два порядка меньше погрешностей, обусловленных дисбалансами шлифовальных кругов и на порядок меньше по сравнению с известными способами дискретизации, что является одним из основных достоинств разработанных дискретных инструментов.

Пятая глава посвящена экспериментальным исследованиям кругов и

процессов высокочастотного дискретного резания. Шлифовали на станках 3Г71М, 3Е756-Л1 заготовки из инструментальной легированной закаленной стали 9ХС, HRC 54...59, инструментальной штамповой стали Х12Ф1, HRC 61...63 и легированной стали 30ХГСА, HRC 32...36.

Использовали дискретные шлифовальные круги ПП 250*76*32 25AF46L6V2A2 ГОСТ Р52381-2005, ГОСТ Р52587-2006. Для круга с радиусом отверстий $r = 1,6$ мм, число строк отверстий $n_{ТО} = 62$; для радиуса $r = 2,65$ мм: $n_{ТО} = 42$. Диаметр торцевого круга 450 мм со сплошными сегментами 5С100-40-150 мм, 95AF46(М-Н)3В и дискретными сегментами 95AF46О3В, 95AF60Р3В и 94AF46Н3В.

Режимы периферийного шлифования: частота вращения круга $n_k = 2880$ мин⁻¹, продольная подача $S_{pr} = (4-18)$ м/мин, поперечная подача $S_{п} = (2-10)$ мм/2.ход, припуск на проход $t = (0,005-0,060)$ мм. Режим торцевого шлифования: частота вращения $n_k = 980$ мин⁻¹, вертикальная подача $S_{в} = (0,1-1,0)$ мм/мин, частота вращения стола $n_{ст} = (7-28)$ мин⁻¹.

Шероховатость (параметр R_a) измеряли на профилометре SJ-201Р (Япония), температуру заготовки – термопарой, уровень вибрации шпиндельного узла – прибором АГАТ-М. Определяли отклонение от плоскостности, шероховатость, микротвердость, прижоги, износ абразивного и алмазного правящего инструмента, период стойкости, ресурс работы дискретных кругов и производительность обработки.

После шлифования сплошным кругом в течение 45 минут в поверхностном слое появились прижоги, поэтому процесс был остановлен. При шлифовании дискретным кругом высокочастотного резания прижоги не обнаружены в течение всего времени работы (160–165 минут), что объясняется несколькими факторами. Во-первых, СОЖ течет по кожуху 15 (Рис. 16) с высокой скоростью и направляется в клиновую зазор между обработанной поверхностью 29 заготовки 20 и режущей поверхностью 28 дискретного круга 5.

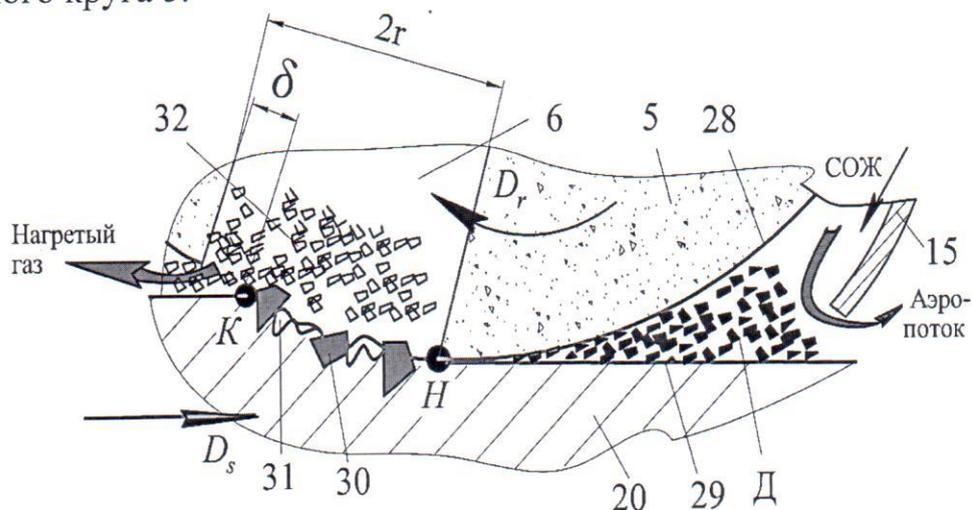


Рис. 16. Движение СОЖ в зоне высокочастотного шлифования

Образуется гидродинамический клин Д, способствующий проникновению СОЖ на площадку KH непосредственного контакта абразивных зерен 30 с заготовкой, движущейся по стрелке D_s . Кроме этого, при вращении круга по

стрелке D_r отверстия δ захватывают и транспортируют СОЖ к дуге KH . Во-вторых, режущая поверхность круга и обрабатываемая поверхность заготовки имеют неровности, поэтому при их контакте образуются малые емкости δ , заполненные молекулами СОЖ.

В процессе пластической деформации обрабатываемого материала некоторые емкости δ захлопываются с образованием давления, достаточного для отрыва надрезанной стружки, т. е. СОЖ способствует снятию припуска. В-третьих, диаметр $2r$ вырезанных отверстий δ выполнен больше дуги KH , поэтому газ, образующийся при испарении СОЖ, выходит через зазор δ , не нагревая заготовку.

В таких условиях снижается коэффициент трения, интенсифицируется отвод тепла, прижоги в поверхностном слое не возникают и значительно повышается период стойкости дискретного инструмента.

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a поверхности, подвергнутой высокочастотному дискретному шлифованию, зависит от припуска t на проход стола, радиуса r вырезанных отверстий и описывается уравнением:

$$R_a = 0,042 + 4,6t + 0,07r, \quad (7)$$

Наибольшее влияние на параметр R_a оказывает радиус r , вторым по значимости фактором является припуск t на проход (Рис. 17, а, б).

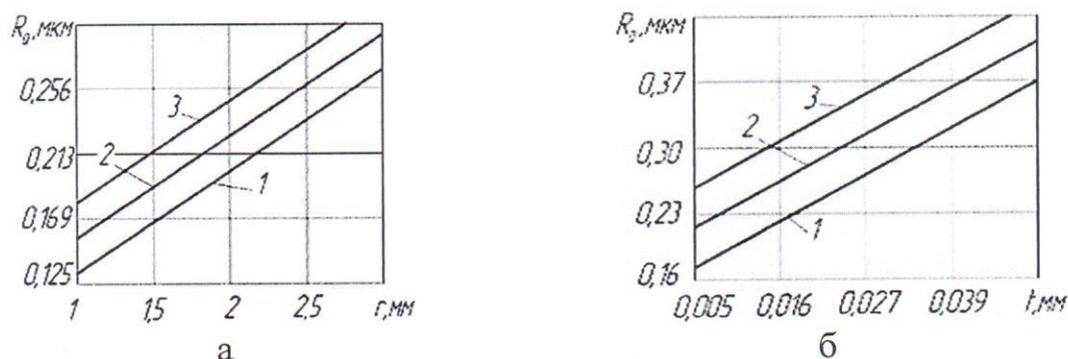


Рис. 17. Влияние радиуса r , припуска t на параметр R_a при периферийном шлифовании: 1—нижний, 2—основной, 3—верхний уровень факторов r и t

Шероховатость поверхности, шлифованной без СОЖ кругом с лазерной дискретизацией, меньше на (14–17) % по сравнению с кругом с выступами и впадинами.

При торцевом шлифовании минимальные значения параметра R_a характерны для сплошного круга (Рис. 18, прямая 1), но после работы круга в течение 1,2 часа появились прижоги в обработанном слое. Параметр R_a уменьшается при обработке сегментами с каналами и подводом СОЖ в плоскость резания (Рис. 18, кривые 2 и 4), она ниже по сравнению с сегментами без каналов.

Периоды обновления режущей поверхности сегментов соотносятся:

$\tau_2 > \tau_4 > \tau_3$, что объясняется повышением эффективности действия СОЖ. При шлифовании без СОЖ дискретным периферийным кругом температура поверхности на (15–20) % ниже, чем сплошным, а дискретным кругом с гидродинамическими клиньями СОЖ она ниже на (55–60) %.

Интерактивное влияние толщины t припуска, снимаемого за двойной

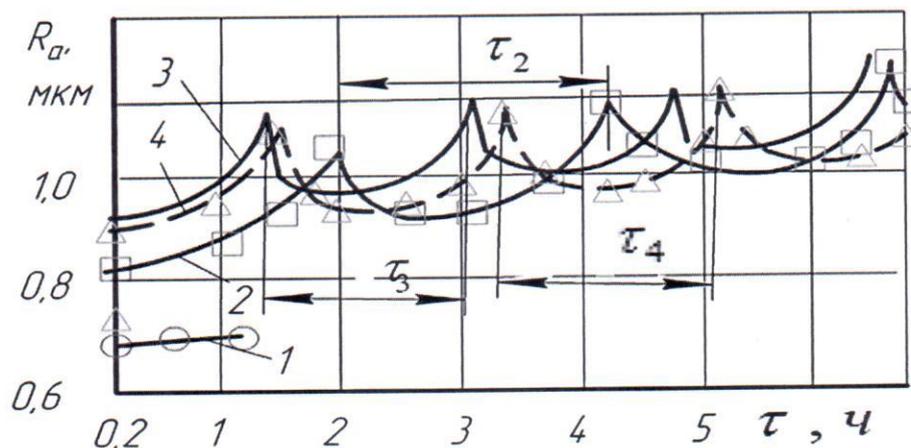


Рис. 18. Влияние времени τ торцевого шлифования на параметр R_a : 1—сплошной круг, 2—сегменты с каналами на одной стороне сегмента; 3—сегменты без каналов; 4—сегменты с каналами на обеих сторонах

ход стола, радиуса вырезанных отверстий r , продольной S_{pr} , поперечной подачи S_p на отклонение от плоскостности Δ_{pl} описывается уравнением:

$$\Delta_{pl} = -0,105 + 305t + 2,10r + 0,37S_{pr} + 0,167S_p. \quad (8)$$

Из (8) следует, что параметр Δ_{pl} возрастает при увеличении факторов t , S_{pr} , r , S_p и ими можно управлять для обеспечения требуемого значения Δ_{pl} . Отклонение от плоскостности поверхностей после высокочастотного шлифования разработанным инструментом при режиме резания: $S_{pr}=12$ м/мин, поперечная подача $S_p=4$ мм/ход, припуск на проход $t=0,03$ мм, $r=0,9$ мм, скорость резания $v=35$ м/с находится в пределах $\Delta_{pl}=(11,1-16,2)$ мкм, что характерно также для сплошного шлифования, и ниже значений после обработки известными дискретными кругами на (19–24) %. Такой результат объясняется меньшим уровнем вибрации элементов технологической системы и высокой эффективностью действия СОЖ.

Износ алмазных зерен карандаша типа С при правке дискретного круга на (15–20) % меньше, чем сплошного круга, что объясняется меньшей площадью правки, аэродинамическими потоками, снижающими температуру правящего инструмента. За 180 минут шлифования дискретный круг изнашивался на (20–25) мкм, и через определенные периоды времени его

профиль становится идентичным профилю, сформированному правкой (факт саморегулирования профиля), что уменьшает число правок и расход алмазного инструмента.

Технологическая производительность (шт/ч) высокочастотного периферийного шлифования определяется по формуле:

$$Q_T = \frac{60v_{спр}t_xv_{сп}}{(l_1+l_2+l_3)ZB_3}, \quad (9)$$

где $v_{спр}$, $v_{сп}$ – продольная и поперечная подача заготовки; t_x – припуск, на двойной ход стола; l_1, l_2, l_3 – длина врезания, обрабатываемой поверхности и перебега, соответственно; Z – припуск на обработку; B_3 – ширина заготовки.

Цикловая производительность (шт/ч) равна:

$$Q_{ц} = \frac{60(v_{пр1}v_{пр2}(l_1+l_2+l_3)ZB_3+v_{спр}t_xv_{сп}(n_1v_{пр2}+n_2v_{пр1})(l'_1+B+l'_2))}{v_{спр}t_xv_{сп}v_{пр1}v_{пр2}}, \quad (10)$$

где $v_{пр1}, v_{пр2}$ – подача алмазного карандаша при черновом и чистовом проходе правки; n_1, n_2 – число черновых и чистовых проходов правки; l'_1, l'_2 – длина врезания и перебега карандаша при правке; B – высота круга.

В производстве используют сплошные сегменты 94AF46(M-N)3B, которые мягче на 2-3 степени дискретных сегментов с каналами: для черного шлифования – 94AF46(N-O)3B; чистового – 94AF60(O-P)3B.

Использование сегментов с каналами и подача СОЖ в плоскость резания приводят к повышению коэффициента шлифования на порядок; технологической – в 2,4, цикловой производительности – в 2,1 раза. Число деталей, обработанных за смену, больше в 1,9 раза (Рис. 19), а расход сегментов в 4-5 раз меньше, по сравнению с заводской технологией.

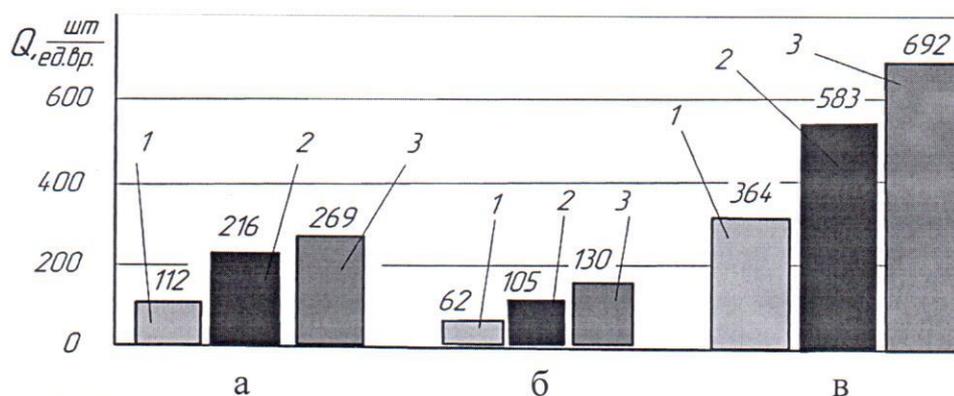


Рис. 19. Технологическая (а), цикловая (б) (шт/ч) производительности и число деталей (в), обработанных за смену сегментами: 1–сплошными, 2– с каналами на одной стороне, 3 – на обеих сторонах сегмента

Достигнутые результаты объясняются высокочастотным дискретным резанием, более высокой твердостью сегментов с каналами, повышением

режима резания, подводом СОЖ к площадкам контакта сегментов с заготовкой, снятием припуска более крупными стружками, повышением периода стойкости и ресурса работы инструментов.

Шестая глава содержит методологию разработки инструментов и процессов высокочастотного дискретного плоского периферийного и торцевого шлифования, использование результатов работы и расчет экономического эффекта. Для повышения эффективности плоского периферийного и торцевого шлифования необходимо:

- назначать твердость дискретных инструментов на 2–3 степени выше по сравнению со сплошными шлифовальными кругами;
- использовать разработанные способы и технологическую оснастку для высокочастотной дискретизации инструментов лазерным лучом, гидроабразивной струи высокого давления и традиционным прессованием;
- разгонять СОЖ примерно до скорости резания и направлять ее в искусственно созданные в зоне шлифования клиновые зазоры, для чего использовать вращательное движение дискретных кругов;
- для гарантированной доставки СОЖ в зону резания предусмотреть специальные транспортные каналы в устройствах для подачи СОЖ и дискретных абразивных сегментах;
- строки отверстий, вырезанных в теле инструмента, смещать на половину осевого их шага, а диаметр отверстий назначать больше дуги контакта инструмента с заготовкой;
- каналы на установочной плоскости дискретных сегментов выполнять открытыми глухими, а на периферийной плоскости – открытыми на всей длине сегмента;
- увеличивать режимы резания и назначать фазовые сдвиги смежных рабочих проходов заготовки, обеспечивающие формирование минимальных геометрических погрешностей.

Результаты исследований используются в учебном процессе, научных исследованиях и в производстве с экономическим эффектом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решена научная проблема, имеющая хозяйственное значение и заключающаяся в научном обосновании нового класса высокоэффективных шлифовальных инструментов высокочастотного резания; способов дискретизации режущей поверхности высококонцентрированными потоками энергии и прессованием; конструкций кругов и процессов плоского периферийного и торцевого шлифования, обеспечивающих снижение тепловой напряженности в зоне резания, уровня вибрации технологической системы, генерирование мощных аэро- и гидродинамических потоков СОЖ, повышение качества, производительности и ресурса абразивного, алмазного правящего инструментов.

2. На основе анализа механизма контактного взаимодействия дискретных шлифовальных инструментов и заготовки определены пути стабилизации силы резания и разработаны способы высокочастотной дискретизации режущей поверхности инструментов для плоского периферийного и торцевого шлифования с использованием высококонцентрированных потоков энергии и прессования, а также конструкции дискретных инструментов, защищенные патентами РФ. Предложены критерии оценки схем дискретизации, позволяющие анализировать, сравнивать и обоснованно выбирать схему для практической реализации.

3. Исследованы альтернативные траектории движения лазерного луча и гидроабразивной струи высокого давления в процессе высокочастотной дискретизации инструментов путем вырезания в их теле системы отверстий, в результате чего выбрана траектория, обеспечивающая высокую производительность дискретизации, геометрическую точность отверстий и отсутствие термического повреждения абразивного материала. Обоснована дискретизация абразивных сегментов для плоского торцевого шлифования методом прессования.

4. На основе выполненного теоретического анализа и компьютерного моделирования напряженного состояния сплошных и высокочастотных дискретных кругов для плоского периферийного и торцевого шлифования методом конечно-элементного анализа в современном САЕ-комплексе CosmosWorks созданы прочные дискретные шлифовальные круги, выдерживающие нагрузки при интенсивных режимах резания.

5. Моделированием в SolidWorks температуры поверхности, обрабатываемой высокочастотными дискретными кругами, установлено ее уменьшение на 20 % и 58,7 % соответственно в сравнении со сплошными периферийными и торцевыми кругами. Снижение тепловой напряженности объясняется высокочастотным прерыванием процесса резания, разгоном СОЖ примерно до скорости резания, направлением ее в искусственно созданные клиновые зазоры и площадки непосредственного контакта абразивного материала и заготовки.

6. Разработаны математические модели силы резания и вынужденных колебаний дискретных шлифовальных кругов, которые позволяют управлять уровнем вибрации инструмента с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности и необходимы при теоретическом исследовании геометрии обработанных поверхностей. Для снижения уровня вибрации шпиндельного узла с установленным дискретным кругом необходимо уменьшать время упругого восстановления шпинделя, смещать на половину осевого шага смежные строки вырезанных отверстий, увеличивать число строк в окружном направлении и повышать частоту элементарных резов, наносимых на обрабатываемую поверхность.

7. Разработана технология высокочастотной дискретизации режущей поверхности периферийных шлифовальных кругов на CO₂-лазерном комплексе МКТЛ-1500 и установке для гидроабразивной резки ALBA 4-1313, а также абразивных сегментов способом прессования, обеспечивающая качественное изготовление новых дискретных инструментов. Для исключения термического повреждения лазерным лучом абразивного материала, выжигание отверстий в теле шлифовального круга следует проводить парами параллельных строк с перманентным позиционированием лазерного луча с одной строки на другую, а для исключения в процессе прессования отрывов ребер у абразивных сегментов не допускать смещений пуансона относительно прессуемой абразивной массы.

8. Впервые разработана теория формирования шлифованной поверхности и геометрических погрешностей, вызванных высокочастотной дискретизацией режущей поверхности и главным вектором дисбалансов круга, определены математические модели обработанной поверхности, на основе которых осуществляется управление ее геометрической точностью. Для минимизации геометрических погрешностей рекомендуется уменьшать радиус вырезанных отверстий, назначать сдвиг фаз смежных синусоид, описывающих колебания инструмента, в интервале $(0,05-0,12) \pi$ радиан.

9. Установлены экспериментальные модели, которые связывают входные факторы высокочастотного дискретного плоского периферийного и торцевого шлифования с выходными параметрами. Модели подтвердили основные теоретические положения работы. Достигнуто снижение уровня вибрации шпиндельного узла в 2,0–2,3 раза, повышение периода стойкости периферийного дискретного круга в 4,0–4,5 раза, ресурса работы дискретного торцевого круга в 4–5 раз, микротвёрдости – на (8–12) % по сравнению с известными кругами. Шероховатость, отклонение от плоскостности поверхности, шлифованной кругами с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности, не выше по сравнению со сплошными кругами. Шероховатость ниже по сравнению с известными дискретными кругами на (15–17) %, а отклонение от плоскостности – на (19–24) %, что объясняется уменьшением на порядок и более времени упругого восстановления шпиндельного узла с инструментом и эффективностью действия СОЖ.

10. Время обработки заготовок при дискретном шлифовании периферийным кругом в 1,7 раза, торцевым кругом в 1,9 раза меньше, чем при шлифовании сплошными кругами, что объясняется использованием кругов с более высокой твердостью (на 2–3 степени), увеличением режимов резания и уменьшением вспомогательного времени на выполнение операции. Износ дорогостоящего алмазного инструмента при правке дискретного круга меньше на (15–20) % по сравнению с правкой сплошного круга, что обусловлено меньшей площадью, подлежащей правке, уменьшением числа правок, воздушными потоками, снижающими температуру правящего инструмента.

11. Создан новый класс эффективного дискретного инструмента с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности для периферийного и торцевого шлифования, позволяющего существенно повысить технический и технологический уровень известных процессов дискретного шлифования и снизить себестоимость изделий.

12. Результаты работы используются в учебном процессе, научных исследованиях и внедрены в производство с экономическим эффектом.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Монографии

1. Гусев В. Г., Морозов А. В. Плоское периферийное шлифование дискретными кругами (монография, текст). Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2012. 222 с. (12,7 п.л. / 6,35 п.л.).

2. Прогрессивные шлифовальные инструменты с дискретной режущей поверхностью: (коллективная монография); А. В. Морозов [и др.] М.: Издательский дом «Спектр», 2013. Раздел 2, 71 с. (4,08 п.л. / 2 п.л.).

3. Морозов А. В., Гусев В. Г. Дискретное плоское торцевое шлифование (монография, текст). М.: Изд-во «Перо», 2016. 124 с. (7,13 п.л. / 4 п.л.).

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК

4. Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С. Разрывные и рабочие скорости шлифовальных кругов с лазерной дискретизацией режущей поверхности // Известия ТулГУ. Серия «Инструментальные и метрологические системы». 2004. Вып. 2. Ч.2. С. 79–83. (0,23 п.л. / 0,1 п.л.)

5. Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С. Изменение силы резания, обусловленное лазерной дискретизацией режущей поверхности шлифовального круга // Известия ТулГУ. Серия «Инструментальные и метрологические системы». 2008. С. 31 – 34. (0,23 п.л. / 0,1 п.л.).

6. Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С. Моделирование пространственных виброперемещений шлифовального круга с лазерной дискретизацией режущей поверхности // Известия ТулГУ. Серия «Инструментальные и метрологические системы». 2008. С. 34–38. (0,23 п.л. / 0,1 п.л.)

7. Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С. Критерии оценки дискретных кругов и их влияние на динамику процесса шлифования // СТИН. 2009. № 5. С. 16–20. (0,23 п.л. / 0,1 п.л.).

8. Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С. Выбор схемы дискретизации режущей поверхности шлифовального круга // СТИН. 2009. № 6. С. 15–19. (0,23 п.л. / 0,1 п.л.).

9. Морозов А. В. Методика расчета износа алмазного инструмента при правке дискретных шлифовальных кругов // Вестник ПНИПУ. 2015. № 4. С. 60–75. (0,29 п.л. / 0,29 п.л.).

10. Гусев В.Г., Морозов А.В. Моделирование распределения тепловых полей в заготовке при торцевом шлифовании сегментами с пазами на базовой и периферийной поверхностях // Вестник машиностроения. 2015. №12. С.10–14. (0,23 п.л. / 0,15 п.л.).

11. Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С. Формование дискретных абразивных сегментов для плоского торцевого шлифования // Вестник машиностроения. 2016. №1. С. 13–17. (0,23 п.л. / 0,1 п.л.).

12. Морозов А.В. Износ алмазного инструмента при правке дискретных шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. 2016. № 3. С.59–64. (0,29 п.л. / 0,29 п.л.).

13. Морозов А.В. Обоснование дискретизации шлифовальных кругов высококонцентрированными потоками энергии // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2016. №12. С.14–19. (0,29 п.л. / 0,29 п.л.)

14. Гусев В.Г., Морозов А.В. Технология дискретизации рабочих поверхностей шлифовальных кругов лазером и гидроабразивной струей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2017. №9. С. 20–27. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

15. Морозов А.В., Гусев В.Г. Моделирование напряженного состояния режущей поверхности дискретного шлифовального круга // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2017. №10. С. 18–23. (0,23 п.л. / 0,13 п.л.).

16. Морозов А.В., Гусев В.Г. Моделирование температуры заготовки, шлифуемой торцевым сплошным и сегментным кругом, в САЕ-комплексе Solid Works // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2017. №11. С. 23–30. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

17. Морозов А.В. Влияние параметров режущих и прерывающих участков дискретных абразивных сегментов на температуру в зоне плоского торцевого шлифования // Вестник машиностроения. 2018. №7. С. 19–22. (0,17 п.л. / 0,17 п.л.).

18. Морозов А.В. Микрогеометрия поверхностей, подвергнутых одновременно предварительному и окончательному шлифованию // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2019 № 3. С. 21–27. (0,35 п.л. / 0,35 п.л.).

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в международную базу SKOPUS

19. Gusev V. G., Morozov A. V., Shvagirev P. S. Discrete structure of the cutting surface of a grinding wheel. Russian Engineering Research. 2009. 29(9). pp. 940–943. (0,17 п.л. / 0,07 п.л.)

20. Gusev V. G. Morozov A. V. Shvagirev P. S. Evaluating discrete wheels and their influence on grinding dynamics. Russian Engineering Research. 2009. 29(8). pp. 835–837. (0,17 п.л. / 0,07 п.л.)
21. Gusev V. G., Morozov A.V. Distribution of Thermal Fields in Face Grinding by Slotted Abrasive Segments. Russian Engineering Research. 2016. 36 (3). pp. 169–173. (0,23 п.л. / 0,15 п.л.)
22. Gusev V. G., Morozov A. V., Shvagirev P. S. Shaping of Discrete Abrasive Segments for Plane Face Grinding. Russian Engineering Research. 2016. 36 (4). pp. 258–261. (0,17 п.л. / 0,07 п.л.)
23. Gusev V. G., Morozov A. V. Deviation from flatness of surfaces after combined peripheral grinding. MATEC Web of Conferences 224. 2018. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).
24. Morozov A.V., Gusev V.G. The method of the combined flat peripheral grinding. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. 2019. pp 875-883. (0,46 п.л. / 0,23 п.л.).
25. Morozov A.V., Gusev V.G. Mechanical Strength of Abrasive Segment Formed by the High-Frequency Discretization of Grinding Wheel. Volume 973. pp 134-138. (0,23 п.л. / 0,11 п.л.).

Патенты

26. Дискретный шлифовальный инструмент: пат. №2385216 РФ // Гусев В. Г., Морозов А. В., Швагирев П. С.; заявл. 27.02.2008; опубл. 27.03.2010, Бюл. № 9. 17с. (0,98 п.л. / 0,4 п.л.).
27. Способ дискретизации абразивного инструмента: пат. №2520169 РФ // Гусев В. Г., Морозов А. В., Метелкин О. Ю.; заявл. 02.11.2012; опубл. 2014, Бюл. №9. 9с. (0,52 п.л. / 0,2 п.л.).
28. Устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости при плоском периферийном шлифовании: пат. №2579325 РФ // Гусев В. Г., Морозов А. В.; заявл. 20.11.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. №10. 10с. (0,58 п.л. / 0,2 п.л.).
29. Шлифовальный инструмент с дискретной режущей поверхностью: пат. №2582841 РФ // Морозов А. В., Гусев В. Г., Швагирев П. С.; заявл. 12.05.2014; опубл. 27.04.2016, Бюл. №12. 14с. (0,81 п.л. / 0,3 п.л.).
30. Способ дискретизации режущей поверхности шлифовального инструмента: пат. №2589993 РФ // Морозов А. В., Гусев В. Г.; заявл. 05.12.2019; опубл. 10.07.2016, Бюл. №23. 14с. (0,81 п.л. / 0,3 п.л.).
31. Способ шлифования: пат. №2606143 РФ // Морозов А. В., Гусев В. Г.; заявл. 29.09.2015; опубл. 01.10.2017, Бюл. № 1. 14с. (0,81 п.л. / 0,3 п.л.).

Публикации в других изданиях

32. Гусев В. Г., Морозов А. В., Швагирев П. С. Температура поверхностей, шлифуемых дискретными и сплошными абразивными кругами // Рыбинск: РГАТА. Теплофизика технологических процессов. 2005. С. 24–26. (0,12 п.л. / 0,05 п.л.).
33. Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С. Дискретизация режущей поверхности шлифовальных кругов, работающих периферией // Вестник КГУ. 2006. №1. С. 143–145. (0,12 п.л. / 0,05 п.л.).
34. Гусев В. Г., Морозов А. В., Швагирев П. С. Формирование поверхности в процессе плоского шлифования кругом с лазерной дискретизацией режущей поверхности // Вестник КГУ. 2006. №1. С. 32–34. (0,12 п.л. / 0,05 п.л.).
35. Гусев В. Г., Морозов А. В. Анализ схем дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов // Волгоград: Волжский, 2007. С. 91–94. (0,17 п.л. / 0,06 п.л.).
36. Гусев В. Г., Морозов А. В. Критерии сравнительной оценки дискретных шлифовальных кругов // Волгоград: Волжский, 2007. С. 88–91. (0,17 п.л. / 0,06 п.л.).
37. Морозов А. В., Климов А. А. Формирование заборной режущей поверхности шлифовального круга с лазерной дискретизацией // Изд-во Невинномысского института экономики, управления и права. 2010. Т.5. С. 567–568. (0,12 п.л. / 0,08 п.л.).
38. Гусев В. Г., Селиванов А. М., Морозов А. В. Анализ механической прочности абразивных кругов с различными схемами дискретизации режущей поверхности // Изд-во Невинномысского института экономики, управления и права. 2010. Т.5. С. 449–450. (0,12 п.л. / 0,05 п.л.).
39. Морозов А. В., Алешин М. П. Лазерное излучение – прогрессивный способ дискретизации режущей поверхности шлифовального инструмента // Сб. науч. ст. Межд. молод. науч. конф. «40-е Гагаринские чтения». МАТИ. 2014. (0,12 п.л. / 0,09 п.л.).
40. Морозов А. В., Алешин М. П. Новое направление применения гидроабразивной струи высокого давления // Сб. науч. статей Междунар. молодёжной науч. конф. «40-е Гагаринские чтения» МАТИ. 2014. (0,12 п.л. / 0,1 п.л.).
41. Морозов А. В., Швагирев П. С. Методика расчета дискретных абразивных сегментов для плоского торцового шлифования // Курск: ЮЗГУ 2014. С. 417–421. (0,23 п.л. / 0,15 п.л.).
42. Морозов А. В., Синюгин С. И. Моделирование остаточных напряжений в поверхностном слое шлифованных деталей в программной среде SOLID WORKS // Курск: ЮЗГУ. 2014. С. 421–425. (0,23 п.л. / 0,15 п.л.).
43. Морозов А. В. Аэродинамические потоки, генерируемые дискретными периферийными шлифовальными кругами // Мат-лы XXXVIII-й Всерос. конф. «Наука и технологии». РАН. 2017. Т.1. С. 169–180. (0,12 п.л. / 0,12 п.л.).

44. Морозов А. В. Прессование абразивных сегментов с каналами для подачи смазочно-охлаждающей жидкости // Курск: ЮЗГУ. 2016. С. 56 – 61. (0,29 п.л. / 0,29 п.л.).

45. Морозов А. В. Технологическая характеристика дискретных шлифовальных кругов и области их применения // Курск: ЮЗГУ. 2016. С. 62 – 64. (0,29 п.л. / 0,29 п.л.).

46. Морозов А. В. Дискретизация режущей поверхности шлифовальных кругов высококонцентрированными потоками энергии // Мат-лы XII-го Международного симпозиума «Фундаментальные и прикладные проблемы науки». РАН. 2017. (0,12 п.л. / 0,12 п.л.).