

На правах рукописи

Нефедкин Анатолий Игоревич

**Повышение эффективности ремонта цилиндров ДВС в процессе их  
хонингования**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для  
агропромышленного комплекса.

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре «Детали машин и теория механизмов» в ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)».

Научный руководитель: **Одинокова Ирина Вячеславовна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Детали машин и теория механизмов» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)».

Официальные оппоненты: **Коломейченко Александр Викторович**, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом перспективных технологий Управления перспективных технологий Центра сельскохозяйственного машиностроения ГНЦ РФ ФГУП «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»

**Катаев Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории технического обслуживания, ремонта и рециклинга сельскохозяйственной техники ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО СПбГАУ)**

Защита состоится «29» июня 2023 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел/факс: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета [www.timacad.ru](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета \_\_\_\_\_ / Н.Н. Пуляев/

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

Государственная программа развития сельского хозяйства на 2013–2020 годы предусматривает ускоренный переход к использованию высокопроизводительных и ресурсосберегающих технологий (постановление Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. № 717). В ходе выполнения программы должны существенно улучшиться социально-экономические показатели сельского хозяйства. К 2024 г. планируется увеличить производство продукции сельскохозяйственного хозяйства на 25%. При этом очевиден факт того, что количество техники, сельскохозяйственного назначения, поставляемой в аграрные организации, явно недостаточны на сегодняшний день. Мировой показатель, в этой области, говорит, что для обработки 100 га посевных площадей технологически необходимо 300 л.с., но вышеуказанной государственной программой предусмотрено только 168 л.с. Низкая надежность машин и агрегатов стала серьезным фактором, определяющим низкие экономические показатели в этой отрасли. Это обуславливается прежде всего тем, что реальные сроки эксплуатации оборудования и сельскохозяйственной техники превышает показатели, установленные нормативами в 2-3 раза.

Все это приводит к тому, что затраты сельскохозяйственных организаций на ремонт техники составляют почти 60 млрд руб., или, говоря языком цифр, около 10% от всей выручки за полученную сельскохозяйственную продукцию. Для наиболее эффективной организации производства продукции сельскохозяйственные предприятия заинтересованы в приобретении машин и оборудования с улучшенными эргономическими характеристиками. Развитие на предприятиях участков технического сервиса, на которых внедряются инновационные технологии ремонта, разрабатывается рабочая конструкторская документация на различные, типы сложных машин, позволяет существенно снизить затраты на ремонт сельскохозяйственной техники.

### **Степень разработанности темы исследования**

В современных экономических условиях большое значение имеет повышение качества ремонта машин и увеличение их ресурса. А снижение себестоимости и повышение качества ремонта является основной задачей ремонтного производства.

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) представляет собой энергетическую основу современных мобильных сельскохозяйственных процессов. На его долю приходится до 36% от общего количества отказов. По данным работ М.Н. Ерохина, В.Я. Лимарева, Е.А. Пучина и др., которые провели анализ отказов машин в гарантийный период, количество отказов двигателей комбайнов, тракторов и автомобилей варьируется от 16,9% у трактора Т-4А до 80% у трактора ВТ-100, при среднем значении 43,25%. Поэтому особого внимания требует увеличение ресурса ДВС, так как большинство машин в хозяйствах укомплектовано двигателями после капитального ремонта.

Проблемам надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания посвящены работы М.Н. Ерохина, С.М. Гайдара, Б.Б. Генбома, М.А. Григорьева,

И.Б. Гурвича, Н.С. Ждановского, Д.Н. Гаркунова, Г.И. Суранова, И.А. Мишина, Б.М. Асташкевича и др.

За весь срок службы тракторов, комбайнов и автомобилей двигатели ремонтируют до пяти раз. По данным МИИСП, после ремонта ресурс двигателей составляет 40% от ресурса новых. Основными причинами снижения ресурса двигателей после ремонта являются: невысокая культура ремонтного производства; недостаточная специализация производства на ремонтных предприятиях; низкое качество обработки поверхностей деталей и плохая приработка деталей после ремонта.

Хонингование успешно применяется в сельскохозяйственной, автомобильной, нефтяной, авиационной и других отраслях машиностроения при обработке деталей из чугуна, стали, цветных металлов, керамики и пластмасс. Однако процесс хонингования не позволяет в полной мере использовать режущие свойства отдельно взятого абразивного зерна. Из-за этого возникают такие проблемы, как недостаточно высокое качество обрабатываемой поверхности и повышенный износ абразивного инструмента.

Вопросам совершенствования операции хонингования посвящены работы Ю.Н. Полянчикова, В.М. Оробинского, И.Е. Фрагина.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности восстановления гильз цилиндров ДВС сельскохозяйственной техники путем совершенствования операции хонингования с применением хонинговальных брусков с прерывистой рабочей поверхностью.

#### **Основные задачи исследования:**

1. Исследовать технологический процесс хонингования чугунных гильз ДВС алмазным инструментом с прерывистой рабочей поверхностью. Выявить наиболее значимые технологические факторы, оказывающие влияние на параметры качества обрабатываемой поверхности при хонинговании с применением алмазного инструмента.
2. Разработать математическое описание микрогеометрии режущей поверхности абразивного инструмента с использованием непрерывной и дискретной моделей.
3. Разработать алгоритм расчета технологических условий процесса хонингования с применением алмазного инструмента с прерывистой рабочей поверхностью.

#### **Научная новизна работы заключается в:**

- разработке алгоритма расчета параметров микрогеометрии абразивного инструмента, изменяющихся в процессе хонингования и позволяющих регулировать технологические параметры обработки с целью получения заданной микрогеометрии поверхности детали.

#### **Теоретическая и практическая значимость**

Полученные расчеты геометрических параметров режущей поверхности хонинговальных брусков могут быть использованы для анализа процесса хонингования и оценки режущих свойств хонинговальных брусков. По сравнению с типовым абразивным хонингованием разработаны рекомендации по усовершенствованию операции путем применения инструмента с прерывистой

рабочей поверхностью, что позволяет повысить производительность операции, уменьшить износ инструмента и снизить возврат на доработку.

### **Методы исследования**

Теоретические исследования выполнены с использованием математического описания микрогеометрии абразивного инструмента и экспериментально-расчётной методики её исследования. С использованием методов планирования эксперимента проводились экспериментальные исследования на специальных стендах. Обработка результатов экспериментов проводилась с помощью методов математической статистики.

### **Положения, выносимые на защиту**

- математическая модель микрогеометрии поверхности абразивного инструмента, закономерности формирования микрорельефа детали при хонинговании;
- результаты моделирования и аналитических расчетов для различных условий хонингования, влияние отдельных факторов на процесс резания и микрогеометрию детали;
- результаты исследований процесса алмазного хонингования чугуновых гильз ДВС с использованием инструмента с прерывистой рабочей поверхностью;
- алгоритм расчёта условий процесса хонингования с применением алмазного инструмента с прерывистой рабочей поверхностью, позволяющий регулировать технологические факторы обработки с целью получения заданной точности и производительности обработки.

### **Степень достоверности и апробация работы**

Контроль достоверности полученных результатов осуществляется путем сопоставления теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными при проведении испытаний опытных образцов.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах, выставках:

- XXVI Международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов «МИКМУС-2014» / Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (2015);
- 73-я научно-методическая и научно-исследовательская конференция Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (2015);
- 8-я международная научно-техническая конференция «Научноёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения (ТМ-2016)» / Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) (2016).
- Международная научно-практическая конференция «Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства» / Сибирский федеральный университет (2016);

- 74-я научно-методическая и научно-исследовательская конференция Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (2016);

- 75-я научно-методическая и научно-исследовательская конференция Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (2017).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 23 научных работ, из них 2 работ опубликовано в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доктора наук». По результатам работы получен Патент на полезную модель (№182190, «Хонинговальная головка», от 07.08.2018г.). В печатных работах подробно изложено содержание всех основных разделов диссертации, выводы и результаты работы.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы из 91 наименований, в том числе 9 на иностранном языке. Работа содержит 158 страницы основного текста, включающего 29 таблиц, 39 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснованы актуальные проблемы, цель, материалы и методы исследований. Представлены научная новизна, практическая ценность и апробация работы, реализация результатов исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены основные вопросы и задачи исследования. Изучены условия работы и причины износа гильз цилиндров ДВС, представлен анализ существующих способов ремонта и возможные способы повышения долговечности гильз цилиндров.

Что нашло свое отображение в работах таких ученых, как М.Н. Ерохин, Н.С. Ждановский, С.В. Всацль, И.Л. Мишин, Н.Н. Пономарев, Б.М. Асташкевич, В.Г. Занребин, В.В. Стрельцов, Е.А. Пучин, В.Ф. Карпенкэв, В.К. Ильин и др., посвященных надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания.

Исходя из анализа литературных источников можно сделать вывод, что первоначальными причинами малого ресурса гильз цилиндров ДВС после ремонта являются: плохая приработка деталей после ремонта, низкое качество обработки поверхностей деталей, не обеспечивающее в должной степени условия смазки, уменьшение твердости поверхности.

Проведен анализ современных научных представлений о восстановлении и повышении долговечности гильз ДВС. Одной из наиболее актуальных задач является исследование процесса воздействия хонинговальных брусков на поверхность обрабатываемой детали, а также исследование влияния обратных связей по усилию прижима брусков на технологические показатели хонингования.

**Во второй главе** дано математическое описание микрогеометрии алмазного хонинговального инструмента с использованием дискретной и непрерывной моделей рабочей поверхности. Характеристики дискретной модели сводятся к геометрии вершин абразивных зёрен, распределению по высоте и площади инструмента. В качестве модели рабочей вершины зёрен предлагались различные геометрические тела: конус; усечённый конус; усечённый конус, сопряжённый с полусферой и другие.

Закон распределения зёрен по площади инструмента находится из простых физических предпосылок методами теории вероятностей. Распределение вершин зёрен по высоте нельзя найти из столь простых физических предпосылок, так как на него влияет большое число факторов. Поэтому для аппроксимации распределения используют различные зависимости, представляющие удобство для исследования. Большой распространённостью пользуется нормальный закон, а хорошее приближение начального участка кривой распределения можно получить с помощью степенной зависимости.

Непрерывная модель описывает поверхности абразивного инструмента в виде некоторого непрерывного случайного поля, позволяет привлечь к его описанию хорошо разработанные математические методы теории случайных функций. Закон распределения ординат профиля инструмента принимает нормальный вид:

$$g(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \delta_z} e^{-\frac{(z-M_z)^2}{2 \cdot \delta_z^2}}, \quad (1)$$

где  $g(z)$  – плотность распределения;  $\delta_z^2$ ,  $M_z$  – дисперсия и математическое ожидание.

Моделирование макро- поверхности инструмента происходит набором элементарных поверхностей второго или третьего порядка, сопряженных между собой по границам. В этом случае получается не статистическое описание случайного поля, а набор аналитических выражений для кусочной аппроксимации одной из реализаций. Поэтому применение такого метода ограничивается узким кругом задач.

При использовании дискретно-непрерывной модели абразивный инструмент представлен совокупностью элементарных режущих профилей (ЭРП), отстоящих друг от друга на расстояние, равное или большее среднего размера зерна, и считающихся статистически независимыми. Закономерности работы абразивных инструментов во многом определяются такими геометрическими параметрами, как суммарные площади  $S_0$  и  $S_p$  передних поверхностей зёрен на основной плоскости (0) и плоскости резания (P). Указанные величины зависят как от формы вершин зёрен, так и от закона распределения их по высоте.

Выразим  $S_0(H)$ ,  $S_p(H)$  через характеристики дискретной модели инструмента, которые заданы функцией  $z(x)$ , описывающей усреднённый профиль вершин зёрен,

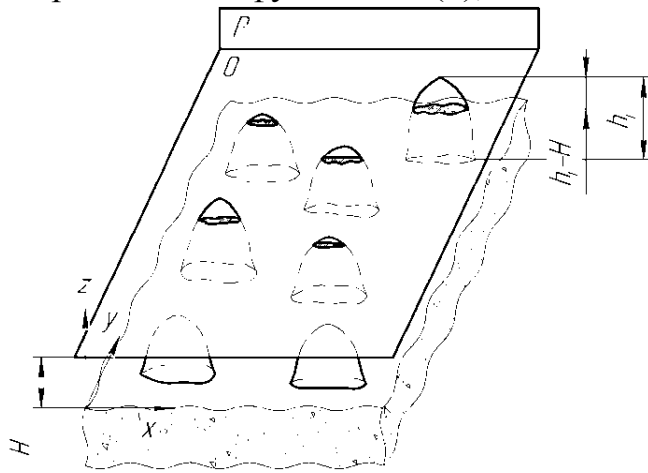


Рисунок 1. Схема режущего слоя абразивного инструмента  $H$ - высота режущего слоя;  $h_i$ - высота вершины алмазно-абразивного зерна

и объёмной плотностью  $n(h)$ , распределения вершин по высоте  $h$  режущего слоя, равной числу вершин в единице объёма на заданном уровне. На рисунке 1 показан участок поверхности инструмента единичной площади, причём основная плоскость проведена на высоте  $H$ .

Площади проекций можно вычислить исходя из радиуса  $r(h)$  зерна в сечении  $h$ , являющегося случайной функцией полярного угла  $\varphi$ .

Поскольку диаметральный размер сечения измерить значительно легче, чем радиус, заменим радиальные характеристики на соответствующие диаметральные, а для удобства введем коэффициент вариации размера зерна  $k_v$ . Как показывают исследования, коэффициент вариации  $k_v$  определяется в основном зернистостью и может считаться постоянным на всех уровнях. Используя дискретную модель, можно найти важнейшие характеристики непрерывной модели – закон распределения высоты неровностей  $E(H)$  и среднее число выступов  $\lambda(H)$  на единицу длины профиля, имеющие высоту больше  $H$ .



Для практического использования полученных зависимостей необходимо задать конкретный вид функций  $D(h)$ - диаметрального радиуса сечения зерна и  $n(h)$  – объёмной плотности распределения вершин по высоте  $h$ .

Тогда, взяв за начало отсчёта вершину наиболее высокого зерна и направив ось в тело инструмента, получим:

Площадь зерен на основной плоскости

$$S_o(H) = \frac{\pi \cdot (1 + k_v^2) \cdot k \cdot \Gamma(\beta + 1) \cdot \Gamma(2m + 1)}{2 \cdot C^{2m} \cdot \Gamma(\beta + 2m + 2)} \cdot H^{\beta + 2m + 1}, \quad (2)$$

Площадь плоскости резания

$$S_p(H) = \frac{2 \cdot k \cdot \Gamma(\beta + 1) \cdot \Gamma(m + 1)}{C^m \cdot \Gamma(\beta + m + 3)} \cdot H^{\beta + m + 2}, \quad (3)$$

Среднее значение переднего угла зёрен

$$\gamma(H) = -\text{arctg} \left[ \frac{\pi \cdot (1 + k_v^2) \cdot \Gamma(2m + 1) \cdot \Gamma(\beta + m + 3)}{4 \cdot C^m \cdot \Gamma(\beta + 2m + 2) \cdot \Gamma(m + 1)} \cdot H^{m-1} \right], \quad (4)$$

Среднее число выступов

$$\lambda(H) = \frac{2 \cdot k \cdot \Gamma(m + 1) \cdot \Gamma(\beta + 1)}{C^m \cdot \Gamma(\beta + m + 2)} \cdot H^{\beta + 2m + 1}, \quad (5)$$

Высоты неровностей

$$E(H) = \frac{\pi \cdot (1 + k_v^2) \cdot k \cdot \Gamma(\beta + 1) \cdot \Gamma(2m + 1)}{C^{2m} \cdot \Gamma(\beta + 2m + 2)} \cdot H^{\beta + 2m + 1}, \quad (6)$$

где  $k_v$  - коэффициент вариации среднего размера абразивных зерен, полученный нами в процессе исследования;  $\beta$  – показатель степени распределения зерен по высоте;  $k$  - число зёрен на единице площади;  $m$  – параметр формы зерна;  $\Gamma(x+1)$  – табличное значение гамма-функции.

Формулы (2)...(6) позволяют установить взаимосвязь между дискретной и непрерывной моделями абразивного инструмента, рассчитать количественные характеристики, такие как глубина внедрения  $H$  с увеличением которой возрастает площадь контакта  $S_o$  бруска с деталью, и площадь среза  $S_p$ . Уменьшение отрицательного переднего угла  $\gamma$  облегчает процесс резания и уменьшает долю пластических деформаций. При конической форме зёрен ( $m=1$ ) угол  $\gamma$  не зависит от глубины внедрения.

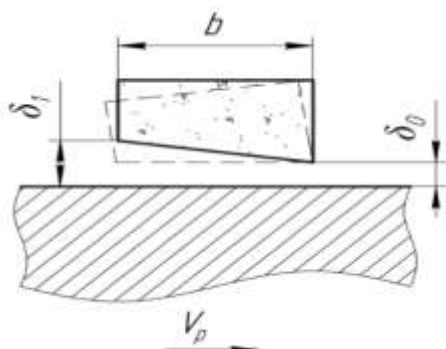


Рисунок 2. Схема гидродинамического клина

Рассмотрено влияние повышенного давления шлама и СОЖ в зоне резания и уменьшение силы внедрения абразивных зёрен в металл. При этом общая сила, действующее на деталь и вызывающее её деформацию, не снижается. Вследствие этого происходит уменьшение производительности и ухудшение точности обработки.

Найдено, что давление шлама увеличивается с ростом скорости резания, интенсивностью съёма, вязкости шлама, зависящей от вязкости СОЖ, и ширины брусков. Увеличение зазора между связкой и поверхностью детали уменьшает давление шлама.

С увеличением давления в подбрусковом пространстве абразивные зёрна внедряются в металл на меньшую глубину, что увеличивает зазор  $\delta_0$  и тем самым ограничивает рост давления СОЖ (рисунок 2). Переменные температуры и вязкость в потоке СОЖ приводят к повышению гидродинамического давления.

Снижение давления шлама и СОЖ в подбрусковом пространстве является значительным резервом для повышения эффективности хонингования. Этого можно достичь путем уменьшения площади сплошного контакта брусков с обрабатываемой деталью, например, за счет снижения ширины брусков или нанесения канавок на их рабочую поверхность (рисунок 3).

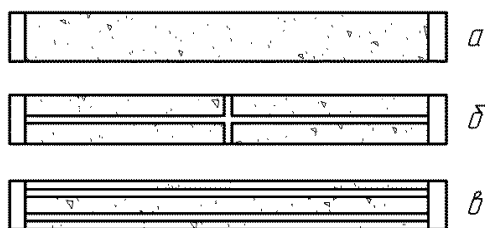


Рисунок 3. Алмазные хонинговальные бруски (ГОСТ 25594-83) с канавками (б, в) и без канавок а.

Оценивая, с учетом положения о повышении давления в подбрусковом пространстве, потенциальную эффективность брусков с прерывистой рабочей поверхностью, получаем соотношение интенсивности съема при сплошных и прерывистых брусках (таблица 1):

$$k_{эф} = \left( \frac{b^*}{b} \right) = \left( \frac{Q - Q_{II}^*}{Q - Q_{II}} \right)^t, \quad (7)$$

где значком (\*) отмечены параметры для прерывистых брусков; Q – давление на бруски, b –

интенсивность съема.

Таблица 1.

Коэффициент эффективности для хонинговальных брусков с прерывистой рабочей поверхностью

$k_{эф}$	Количество сплошных участков	% прироста $k_{эф}$
1,05	2	5
1,11	3	6
1,12	4	1
-	-	-
1,15	10	1

При анализе работы брусков с прерывистой рабочей поверхностью, имеющих участки с соизмеримой длиной и шириной, можно применить результаты расчета давления в смазочном слое при скольжении прямоугольной подушки по плоскости.

Проведённые исследования дают теоретическое обоснование применения хонинговальных брусков с прерывистой поверхностью и наряду с имеющимися экспериментальными данными позволяют рекомендовать их к внедрению в промышленное производство.

**В третьей главе** представлен алгоритм (рисунок 4) процесса хонингования, который позволяет выявить влияние отдельных факторов на микрогеометрию детали и процесс резания при хонинговании, а также сравнить результаты моделирования с аналитической теорией.

Используя принцип последовательного варьирования каждого из рассматриваемых факторов, алгоритм дает возможность изучить их влияние. Экспериментальным путём это сделать, фактически, невозможно, поскольку

происходит изменение сразу нескольких величин: увеличив скорость вращательного движения  $m$  одновременно изменим абсолютную скорость резания и угол скрещивания, а изменяя марку хонинговальных брусков мы сразу варьируем как форму зерен, так и законы распределения по высоте.

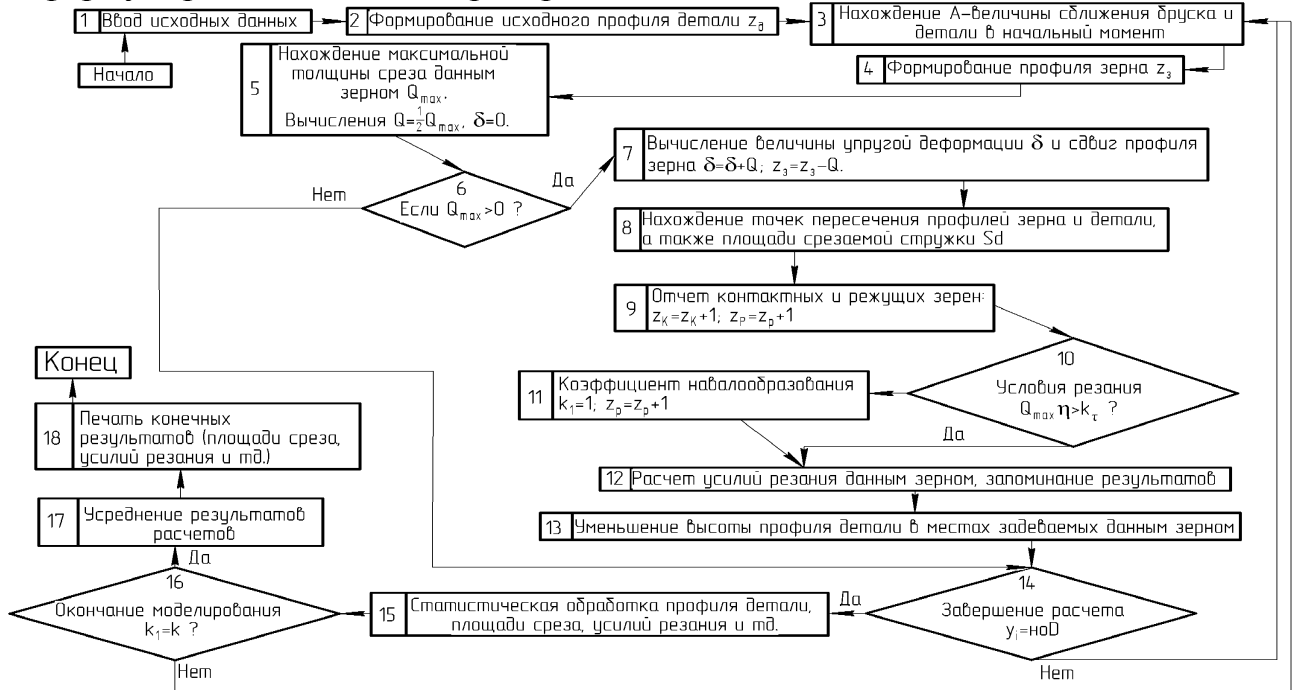


Рисунок 4. Алгоритм моделирования процесса хонингования.

Пропорциональное изменение количества зёрен  $z_0$  на единицу площади бруска на всех уровнях режущего слоя оказывает противоположное влияние, по сравнению с интенсивность съёма (рисунок 5(a)).

Показатель степени  $\beta$  закона распределения зёрен по высоте  $n(h)$  во многом характеризует режущие свойства брусков. Изменение показателя степени  $\beta$  влечёт одновременное изменение коэффициента  $k$  или, что то же самое,  $z_0$ . Поэтому в эксперименте невозможно выявить отдельно влияние  $\beta$  и  $z_0$ , однако моделирование с помощью Монте-Карло позволяет сделать это. На рисунке 5 (б) показано как при возрастании процента режущих  $z_p$  и контактных зерен  $z_k$ , уменьшается нагрузка на одно зерно и снижается шероховатость поверхности детали.

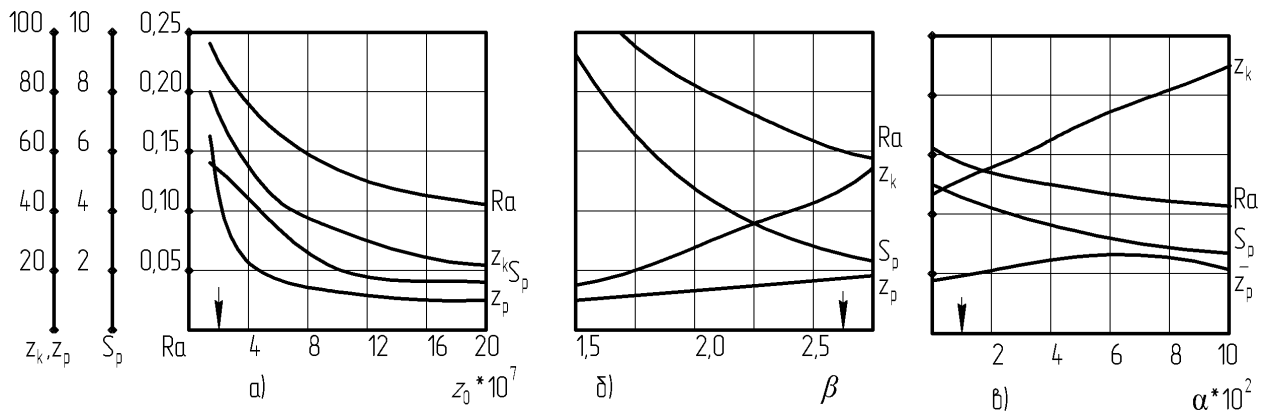


Рисунок 5. Влияние факторов на параметры процесса хонингования (размерности

$z_k, z_p - \%$ ;  $S_p - \text{мкм}^2$ ;  $h_{ck} - \text{мкм}$ )

Роль упругих деформаций в процессе хонингования иллюстрируется графиками рисунок 5(в). При повышении коэффициента деформирования  $d$  средняя площадь среза  $S_p$  на одно зерно и шероховатость  $Ra$  падают, одновременно увеличивается количество контактных зёрен. Однако ход зависимости числа режущих зёрен более сложен. Вначале возрастает, а затем начинает падать. Это связано с тем, что при жёсткой связке режущее действие производит лишь малая часть наиболее выступающих зёрен, а остальные давят металл.

Определено, что коэффициент  $d$  у алмазных брусков на металлической связке колеблется от 0,0047 (для АС6 200/160), до 0,0085 (для АС6 100/80). Такие значения  $d$  почти не отражаются на результатах хонингования (рисунок 5 (в)), поэтому бруски на металлической связке при обработке чугуна можно рассматривать как жёсткие.

**В четвертой главе** исследовалось влияние характеристик хонинговальных брусков, скоростей вращательного и возвратно-поступательного движения, а также усилия прижима брусков к детали на производительность, шероховатость поверхности и точность обработки. Проведены испытания алмазных брусков с прерывистой рабочей поверхностью.

Для нахождения параметров линейных моделей процесса хонингования использована методика полного факторного эксперимента ПФЭ 2<sup>n</sup>.

Фиксируемые выходные параметры процесса: величина съёма металла ( $\Delta$ ) мкм; скорость съёма ( $q$ ) мкм/мин; интенсивность съёма ( $b$ ); среднеарифметическая высота микронеровностей поверхности детали ( $Ra$ ) мкм; овальность деталей ( $\bar{e}$ ) мкм.

Математическое планирование эксперимента применялось для исследования процессов абразивной обработки. Варьируемые факторы:  $X_1$  – давление на бруски ( $Q$ );  $X_2$  – окружная скорость ( $V_{ок}$ );  $X_3$  – осевая скорость ( $V_{ос}$ );  $X_4$  – зернистость, которую можно охарактеризовать одним параметром – среднекубическим размером зёрен ( $D$ ). (таблица 2.)

Таблица 2

Уровни варьирования факторов в основных опытах				
Факторы	Q, кгс/см <sup>2</sup> , (МПа)	V <sub>ок</sub> , м/мин	V <sub>ос</sub> , м/мин	D, мкм
Уровни	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
Верхний +1	13,6 (1,36 МПа)	83,1	18,3	112
Нижний -1	6,6 (0,66 МПа)	48,2	5,6	89
Промежуточный	10,1 (1,1 МПа)	54,2	11,9	-
Q – давление на бруски; V <sub>ок</sub> – окружная скорость; V <sub>ос</sub> – осевая скорость; D – среднекубический размер зёрен				

Результаты эксперимента представлены на рисунках 6, 7 и в таблице 3.

Увеличение давления на бруски ведёт к повышению скорости и интенсивности съёма металла, а также возрастанию шероховатости и овальности деталей.

Окружная скорость повышает скорость съёма металла, однако интенсивность съёма при этом снижается, исходя из положения о возникновении повышенного давления в зоне резания. Чем больше скорость резания, тем меньше сила, внедряющая зёрна в металл, и меньше интенсивность съёма. Снижению

интенсивности съёма способствует также то, что с увеличением  $V_{ок}$  уменьшается угол скрещивания ризок и ухудшаются условия срезания стружки. Скорость съёма пропорциональна интенсивности съёма и скорости резания, поэтому с увеличением последней она возрастает. На шероховатость и погрешность формы деталей окружная скорость большого влияния не оказывает.

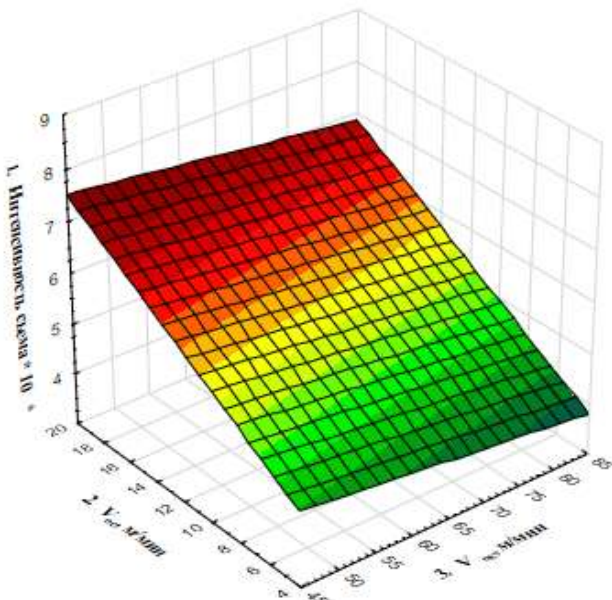


Рисунок 6. Результаты эксперимента процесса хонингования при  $Q = 1,36$  МПа (параметры: 1. интенсивности съёма ( $I$ ), 2.  $V_{oc}$ , 3.  $V_{ок}$ )

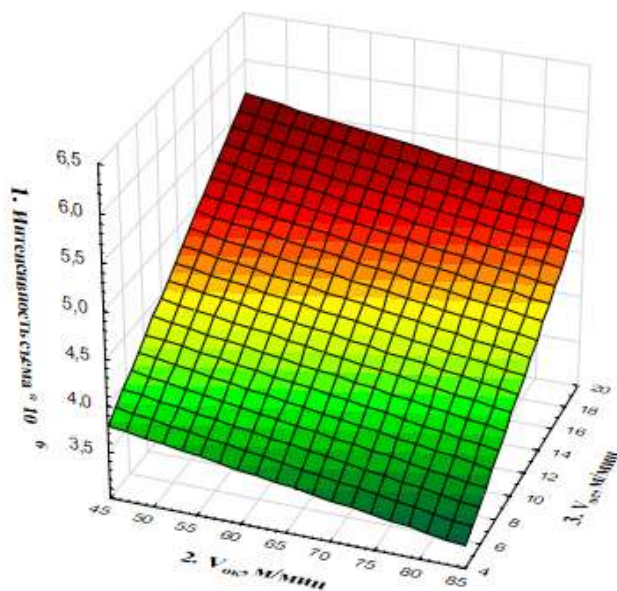


Рисунок 7. Результаты эксперимента процесса хонингования при  $Q = 0,66$  МПа (параметры: 1. интенсивности съёма ( $I$ ), 2.  $V_{ок}$ , 3.  $V_{oc}$ )

С ростом осевой скорости хонголовки  $V_{oc}$  интенсивность и скорость съёма увеличиваются, а также повышается и шероховатость детали. Такой характер влияния  $V_{oc}$  на процесс хонингования связан со значительными изменениями угла скрещивания, так как абсолютная величина скорости резания мало зависит от  $V_{oc}$ . Чем выше  $V_{oc}$ , тем больше угол скрещивания, следовательно, улучшаются условия абразивного резания, стружка становится мельче и легче выходит из-под бруска, это способствует росту производительности обработки.

Таблица 3

Матрица планирования, (min, max)

п/п	Варьируемые факторы				Выходные параметры			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	Скорость съема $\bar{q}$ , мкм/мин	Интенсивность съема $\bar{b}$	Шероховатость $R_a$ , мкм	Овальность $\bar{e}$ , мкм
5 (min)	-1	-1	+1	-1	126	$5,18 \cdot 10^{-6}$	0,095	7.4
16 (max)	+1	+1	+1	+1	366	$8,45 \cdot 10^{-6}$	0,118	14.4

Установлено что, при большом давлении на бруски и высокой окружной скорости возрастает давление в подбрусковом пространстве. Поэтому повышение осевой скорости движения и связанное с этим улучшение выхода шлама из-под бруска должно в гораздо большей степени повышать скорость съёма, чем при малых значениях окружной скорости и давления.

Проведённые эксперименты подтверждают наличие значительного резерва повышения эффективности хонингования за счёт уменьшения вредного давления в подбрусковом пространстве. Теоретически проанализирована возможность

снижения давления шлама и СОЖ в зоне резания путём нанесения канавок на рабочую поверхность хонинговальных брусков.

Скорость съёма металла брусками с прерывистой рабочей поверхностью оказалась выше, чем сплошными. Наибольший эффект наблюдался при черновом хонинговании гильз из незакалённого серого чугуна алмазными брусками АС6 I25/100 M2-01 100%.

Одновременно с увеличением производительности (скорости съёма) обработки значительно возросла точность формы деталей, особенно при черновом алмазном хонинговании. У брусков с прерывистой рабочей поверхностью колебание давления, приложенного к бруску, в большей степени изменяет скорость съёма, за счёт чего происходит более интенсивное исправление погрешности формы деталей. Бруски с прерывистой рабочей поверхностью имеют лучшее охлаждение, кроме того, уменьшается тепловыделение, возникающее при трении шлама о деталь и связку бруска, поэтому тепловые деформации также уменьшаются.

Упругие деформации при хонинговании чугуна алмазными брусками на металлических связках невелики. Действительно, если взять отношение расчётной средней деформации  $d \cdot \bar{S}_p$  к средней глубине внедрения  $\bar{h}$  зёрен в мягкий материал, то эта величина находится в пределах 10–18%.

В результате эксперимента установлено, что скорость съёма нелинейно зависит от скорости резания и ширины брусков. Поэтому существуют некоторые предельные значения скорости резания ( $V_{р.л}$ ) и ширины сплошных брусков ( $b_{л}$ ), превышение которых ведет к уменьшению производительности обработки:

Увеличение вязкости СОЖ повышает давление в подбрусковом пространстве, снижает интенсивность и скорость съёма металла, при этом улучшается шероховатость обработанной поверхности, так как абразивные зёрна внедряются на меньшую глубину. Увеличение вязкости также должно снижать предельную скорость резания.

Из проведенных расчетов следует, что при вязких СОЖ, например, керосино-масляных смесях, гидродинамические явления оказывают большое влияние и значительно ограничивают допустимую скорость резания и ширину брусков, что необходимо учитывать при назначении режимов обработки.

Согласно акту испытания, при хонинговании алмазным инструментом с прерывистой рабочей поверхностью достигаются следующие показатели:

- повышается производительность обработки за счет снижения машинного времени при черновом хонинговании на 25,9%, при чистовом – на 11,7%.
- уменьшается брак деталей в 1,84 раза и связанные с этим затраты.

Таким образом, алмазные хонинговальные бруски с прерывистой поверхностью экономически эффективны, и их можно рекомендовать к промышленному внедрению.

**В пятой главе** приведен расчет экономической эффективности алмазных хонинговальных брусков с прерывистой рабочей поверхностью, что позволяет получить экономический эффект на каждом станке.

В диссертации был применен анализ рисков согласно методу Монте-Карло. В основу данного метода, в том числе и статистической имитации, заложен синтез, а также методы анализа чувствительности и сценариев. Применение метода Монте-Карло в экономической сфере представляет собой комплекс численных экспериментов, которые призваны получить эмпирическую оценку степени влияния на результат ряда факторов в виде цены, объема выпуска или переменных расходов. Была построена гистограмма зависимости экономической эффективности, изменяемой от роста или снижения статей затрат, где количество рассчитываемых итераций составило  $n=5000$ .

В результате расчета были получены следующие данные: с вероятностью 50% экономия на 50 000 деталей при реализации проекта будет составлять от 5 529 000,00 до 8 492 000,00 рублей, при этом минимальный экономический эффект, полученный при реализации проекта, составит 3 486 500,00 руб. Это позволяет сделать вывод, что даже при неблагоприятной конъюнктуре рынка, а именно росте: цен на материалы и услуги, проект останется эффективным.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ**

1. Разработан алгоритм расчета микрогеометрии алмазных хонинговальных брусков и обрабатываемой поверхности, позволяющий регулировать технологические параметры обработки с целью получения заданной микрогеометрии поверхности детали.

2. Разработана технология хонингования чугуновых гильз ДВС алмазным инструментом с прерывистой рабочей поверхностью, позволившая повысить производительность обработки до 60%. Практическими исследованиями показана эффективность разработанной технологии за счет снижения машинного времени при черновом хонинговании на 25,9% и при чистовом - на 11,7%, а также за счет снижения брака в 1,84 раза.

3. Разработано математическое описание процесса хонингования алмазным инструментом с использованием непрерывной и дискретной моделей.

4. Внедрена технология с использованием алмазных хонинговальных брусков марки АС6 125/100 М2-01 100% с прерывистой рабочей поверхностью при черновом хонинговании и брусков АСМ 40/28 М2-01 100% при чистовом хонинговании корпусных деталей внедрена на

- ООО «ДУКС» (АКТ внедрения №ОД/348 от 14.02.2017г. Экономический эффект 1 398 400,00 руб);
- ООО ЗУМ «ТРАНВЕРСИНДУСТРИ» (АКТ внедрения от 27.03.2018г. Экономический эффект 1 105 800,00 руб).

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК:**

1. Нефедкин, А.И. Исследование влияния геометрических параметров абразивных зерен хонинговальных брусков на микрогеометрию поверхности деталей / Одинокова И.В., Гаевский В.В. // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24. – № 3. – С. 56-63.
2. Нефедкин, А.И. Исследование закономерностей воздействия абразивных зерен хонинговальных брусков на поверхность обрабатываемой детали / А.И. Нефедкин,

И.В. Одинокова // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина". – 2018. – Вып. 2(84). С. 37-43.

### **Патенты:**

3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022661974, 28.06.2022. Программное средство для расчета обратной задачи кинематики рабочего оборудования экскаватора / Мохаммад Жалаль Мохаммад, Карелина Мария Юрьевна, Одинокова Ирина Вячеславовна, Гаевский Виталий Валентинович, Нефедкин Анатолий Игоревич, Суходоля Александр Валерьевич, Филатов Владимир Викторович - Заявка № 2022661757 от 28.06.2022.

4. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022661975, 28.06.2022. Программное средство для расчета прямой задачи кинематики рабочего оборудования экскаватора / Мохаммад Жалаль Мохаммад, Карелина Мария Юрьевна, Одинокова Ирина Вячеславовна, Гаевский Виталий Валентинович, Джафул Ахлам Мохаммад, Нефедкин Анатолий Игоревич, Талдыкин Дмитрий Сергеевич - Заявка № 2022661758 от 28.06.2022.

5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022667751, 26.09.2022. Программное средство для определения параметров устойчивости компактных транспортных средств (ктс) при равномерном круговом движении для пяти вариантов крена / Сатер Гайс, Гаевский Виталий Валентинович, Одинокова Ирина Вячеславовна, Карелина Мария Юрьевна, Нефедкин Анатолий Игоревич, Акулов Алексей Андреевич, Филатов Владимир Викторович - Заявка № 2022667299 от 26.09.2022.

6. Патент на полезную модель RU 173824 U1, Российская Федерация, Устройство для оценки ударной прочности лакокрасочных покрытий / А.В. Суходоля, Е.В. Быкова, И.В. Одинокова; - заявка № 2017118035 от 24.05.2017; опуб. 13.09.2017;

7. Пат. 182190 Российская Федерация, МПК В24В 33/08, Хонинговальная головка / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова, А.В. Суходоля; – № 2017128435; заявл. 09.08.2017; опубл. 07.08.2018, Бюл. № 22. – 2 с.

### **В материалах международных, всероссийских конференций и других изданиях РИНЦ:**

8. Нефедкин, А.И. Динамическая модель рабочего оборудования гидравлического экскаватора в процессе копания / Мохаммад Ж.М., Одинокова И.В., Нефедкин А.И., Джафул А.М. // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 4. – С. 17-21.

9. Нефедкин, А.И. Создание компактного шлема для мотоцикла / Андреев Е.Ю., Гаевский В.В., Одинокова И.В. // В сборнике: Информационные технологии и инновации на транспорте. Материалы VII Международной научно-практической конференции. – В 2-х томах. – Орел, 2021. – С. 214-229.

10. Нефедкин, А.И. Влияние абразивных зерен хонинговальных брусков на микрогеометрию поверхности детали / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова, К. Н. Смирнов // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – 2019. – № 3 (50). – С. 26-28.



11. Нефедкин, А.И. Влияние геометрических параметров абразивного зерна хонинговального бруска на взаимодействие инструмента и поверхности детали / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова, К. Н. Смирнов // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – 2019. – № 4 (51). – С. 27-29.
12. Нефедкин, А.И. Оптимизация процесса хонингования алмазными брусками с использованием методики полного факторного эксперимента / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова, А.А. Томилина, Т.А. Сидоренко // Механизация строительства. – 2017. – Т. 78. – № 1. – С. 55-58.
13. Нефедкин, А.И. Исследование закономерностей повышения давления шлама и СОЖ в подбрусковом пространстве на процесс хонингования / А.И. Нефедкин // Механизация строительства. – 2016. – Т. 77. – № 12. – С. 24-27.
14. Нефедкин, А.И. Результаты испытаний хонинговальных брусков с прерывистой поверхностью / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова, А.Г. Савельев // Механизация строительства. – 2016. – Т. 77. – № 3. – С. 45-47.
15. Нефедкин, А.И. Оптимизация процесса хонингования алмазными брусками с использованием методики полного факторного эксперимента / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова, А.Г. Савельев // Качество и жизнь. – 2016. – № 4 (12). – С. 357-361.
16. Нефедкин, А.И. Экспериментальное исследование уменьшения погрешностей формы при алмазном хонинговании / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова, С.А. Асриян // Строительные и дорожные машины. – 2015. – № 12. – С. 37-39.
17. Нефедкин, А.И. Влияние прочности алмазных зёрен на удельный расход материала и скорость съёма металла / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова // Строительные и дорожные машины. – 2015. – № 8. – С. 38-39.
18. Нефедкин, А.И. Технологии алмазного хонингования, применяемые в ремонтном производстве транспортных машин и транспортно-технологических комплексов / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 11. – С. 36-40.
19. Нефедкин, А.И. Влияние давления в подбрусковом пространстве на процесс хонингования. Хонингование с брусками с прерывистой рабочей поверхностью / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова // 8-я международная научно-техническая конференция «Наукоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения (ТМ-2016)»; МАДИ. – М., 2016.
20. Нефедкин, А.И. Исследование закономерностей повышения давления шлама и СОЖ в подбрусковом пространстве на процесс хонингования / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства: междунар. науч.-практ. конф. / ред. В. В. Минин; Сибирский федеральный университет, 2016. – С. 437-439.
21. Нефедкин, А. И. Исследование влияние давления в подбрусковом пространстве на процесс хонингования с последующим переходом на хонингование брусками с прерывистой поверхностью / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова // 74-я научно-методическая и научно-исследовательская конференция Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета: сб. материалов. – М., 2016. – С. 65–67.
22. Нефедкин, А. И., Экспериментальное исследование процесса хонингования чугунных гильз сплошными брусками / А. И. Нефедкин, А. А. Дубинин, Д. Ю.

Кружалин // МИКМУС-2014: труды XXVI Международной инновационно-ориентированной конференции молодых учёных и студентов. – Российская академия наук; РФФИ; Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – М., 2015. – С. 159–163.

23. Нефедкин, А. И. Методы изготовления алмазного инструмента с повышенной режущей способностью / А. И. Нефедкин, Д. А. Птицын, И. В. Одинокова // Детали машин и теория механизмов: сб. ст. 73-й научно-методической и научно-исследовательской конференции Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета / отв. ред. М. Ю. Карелина. – М., 2015. – С. 37-43.