

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»

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.

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Одиноква Ирина Вячеславовна

Москва - 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Анализ состояния вопроса, цели и задачи исследования.....	11
Преимущества блоков цилиндров из серого чугуна:	15
Блоки цилиндров из алюминия.....	16
1.1. Структурная схема хонингования	20
Выводы к главе 1	23
Глава 2. Теоретические положения	25
2.1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ.....	25
<i>а. Дискретная модель</i>	<i>26</i>
<i>б. Непрерывная модель</i>	<i>28</i>
<i>в. Дискретно-непрерывная модель.....</i>	<i>28</i>
2.2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ МИКРОРЕЗАНИЯ ЕДИНИЧНЫМИ АБРАЗИВНЫМИ ЗЁРНАМИ	29
2.3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МАССОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ЗЁРЕН НА ДЕТАЛЬ	33
2.4. МИКРОЯВЛЕНИЯ ПРИ ХОНИНГОВАНИИ	34
2.4.1. Скорость съёма металла.....	36
2.4.2. Силовые явления.....	38
2.4.3. Тепловые явления	39
2.4.5. Качество обработки деталей.....	41
2.5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ	42
2.6. РАСЧЕТ ДЛЯ СТЕПЕННОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМЫ ЗЕРЕН.....	46
2.6.1. Микрогеометрия поверхности детали	46
2.6.2. Геометрические параметры взаимодействия брусков и детали.....	49
2.7. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ШЛАМА И СОЖ.....	55

2.7.1.	Движение шлама	55
2.7.2.	Движение СОЖ	57
а.	<i>Гидродинамический клин</i>	58
б.	<i>Вязкостный клин</i>	61
2.8.	ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ШЛАМА И СОЖ В ПОДБРУСКОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА ПРОЦЕСС ХОНИНГОВАНИЯ	63
2.9.	ХОНИНГОВАНИЕ БРУСКАМИ С ПРЕРЫВИСТОЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	66
2.10.	ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОГЕОМЕТРИИ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ	68
	Выводы к главе 2	72
	Глава 3. Методика экспериментальных исследований микрогеометрии алмазно-абразивного хонинговального инструмента	74
3.1.	МИКРОГЕОМЕТРИЯ РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТА	74
3.2.	МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО	76
3.2.1.	Некоторые результаты моделирования	83
3.2.2.	Сравнение моделирования с аналитической теорией	88
3.3.	МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ИНСТРУМЕНТА	91
3.4.	ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ	92
	Выводы к главе 3	94
	Глава 4. Экспериментальные исследования алмазных хонинговальных брусков	96
4.1.	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ	96
4.2.	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОРМЫ ЗЁРЕН И ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ПО ВЫСОТЕ	100
4.3.	Экспериментальные исследования процесса хонингования чугуновых гильз ДВС хонинговальными брусками с прерывистой рабочей поверхностью	110
4.3.1.	Условия проведения и обоснование плана экспериментов	111

4.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АЛМАЗНОГО ХОНИНГОВАНИЯ ПО ПЛАНУ ПФЭ 2 ⁴	115
4.5. СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ	120
4.6. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ХОНИНГОВАЛЬНЫХ БРУСКОВ С ПРЕРЫВИСТОЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.....	126
Выводы к главе 4.....	132
Глава 5. Экономическая эффективность хонингования брусками с прерывистой поверхностью	133
Выводы к главе 5.....	141
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Основной задачей в современном машиностроении является повышение качества изделий. В настоящее время широко распространены абразивные методы повышения качества поверхностей деталей, среди которых одно из ведущих мест занимает хонингование.

Хонингование позволяет решить ряд технологических задач, к числу которых относятся получение малой шероховатости обрабатываемой поверхности ($Ra = 1,25-0,16$ мкм) и исправление погрешностей формы.

Хонингование широко применяют при финишной обработке пневмо- и гидроцилиндров, гильз цилиндров, зубчатых колёс как при производстве, так и при ремонте транспортной техники. Рассматриваемый способ обработки является одной из окончательных операций технологического процесса и обеспечивает качество поверхности готовой детали, которое в значительной мере влияет на долговечность изделий.

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) представляет собой энергетическую основу современных мобильных процессов. Поэтому особого внимания требует увеличение ресурса ДВС, так как большинство машин укомплектовано двигателями после капитального ремонта. Основными причинами снижения ресурса двигателей после ремонта являются: низкое качество обработки поверхностей деталей и плохая приработка деталей после ремонта.

Разработка предложений по конструктивному исполнению алмазных брусков для хонингования с прерывистой рабочей поверхностью, определение оптимальных режимов для таких инструментов является актуальной задачей, которая в том числе, решает проблемы импортозамещения.

Совершенствование технологического процесса хонингования осуществляется различными способами: подбором материала и формы

абразивных брусков, оптимизацией режимов обработки, комбинированием с электрохимикофизическими методами и др. Одним из направлений повышения эффективности хонингования является совершенствование формы и конструкции абразивных брусков, в частности, использования брусков с прерывистой поверхностью. Вместе с тем, этот конструктивный прием недостаточно исследован, не определены оптимальные предложения по форме и размерам проточек на алмазных брусках, отсутствует технология их исполнения.

Несмотря на имеющиеся достижения, закономерности процесса резания при хонинговании исследованы не полностью: не все наблюдаемые на практике явления получили удовлетворительное теоретическое объяснение. Поэтому проблема теоретического исследования закономерностей и повышения эффективности хонингования является весьма актуальной.

До последнего времени процесс хонингования не позволял в полной мере использовать режущие свойства каждого абразивного зерна. Из-за этого возникают такие проблемы, как интенсивный износ абразивного инструмента и недостаточно высокое качество обрабатываемой поверхности.

Таким образом, диссертационная работа, посвящена совершенствованию технологического процесса хонингования с использованием алмазного инструмента с прерывистой рабочей поверхностью, что является актуальным для предприятий по производству, обслуживанию и ремонту автомобильного транспорта, поскольку позволяет обеспечить повышение производительности обработки, качества обрабатываемой поверхности.

Целью 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. Построить математическое описание микрогеометрии абразивного инструмента с использованием непрерывной и дискретной модели.
3. Разработать алгоритм 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.

Объектом исследования выступает процесс хонингования гильз цилиндров ДВС алмазным хонинговальным инструментом с прерывистой рабочей поверхностью.

Предметом исследования являются закономерности рабочего процесса хонингования алмазным инструментом и образования микрорельефа поверхности, а также снижение вредного давления в подбрусковом пространстве.

Методы исследования

Теоретическое исследование выполнено с использованием математического описания микрогеометрии алмазно-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.

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

Практическая значимость работы:

1. Разработана технология хонингования алмазным инструментом с прерывистой рабочей поверхностью, позволившая повысить производительность обработки чугуновых гильз ДВС до 60%.

2. Получена полезная модель № 182190 от 07.08.2018. Преимущество полезной модели заключается: в использовании хонинговальных брусков, выполненных по ГОСТ 25594-83, что экономит ресурсы и позволяет решить задачи импортозамещения; не требует внесения дополнительных изменений в конструкцию хонинговального станка; не требует повышения квалификации персонала.

3. 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. Технологический процесс с использованием алмазных хонинговальных брусков с прерывистой рабочей поверхностью при черновом и при чистовом хонинговании корпусных деталей внедрен на:

- ООО «ДУКС» (АКТ внедрения №ОД\348 от 14.02.2017г.).
- ООО ЗУМ «ТРАНВЕРСИНДУСТРИ» (АКТ внедрения от 27.03.2018 г.).

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.

Апробации результатов диссертационной работы

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах, выставках: XXVI Международной инновационно-ориентированной конференции молодых учёных и студентов МИКМУС-2014. Российская академия наук; РФФИ; Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. 2015; 73, 74, 75 научно-методических и научно-исследовательских конференциях Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2015, 2016, 2017; Международной научно-практической конференции «Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства». Сибирский федеральный университет. 2016.

Достоверность полученных в работе результатов и выводов обеспечивается использованием современных методов исследования, современного технологического оборудования и подтверждается многократными экспериментами и расчетами с применением методов математической статистики.

Личный вклад автора состоит в формулировке проблемы, определении цели и задач диссертации, анализе полученных результатов и их интерпретации, а также участии в разработке многофакторной структурной схемы, математической модели, алгоритма и технологии процесса

хонингования конструкционных материалов алмазным инструментом с непрерывной и прерывистой рабочей поверхностью.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, в том числе 12 работ в журналах, 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.

Глава 1. Анализ состояния вопроса, цели и задачи исследования

Международная практика заверяет, как часть восстанавливаемых деталей в общем объеме потребления запасных частей достигает в развитых зарубежных государствах 30-35%. Все-таки в России данный показатель за последние годы резко уменьшился (таблица.1.1).

Таблица 1.1

Динамика изменения объемов восстановления деталей для
сельскохозяйственной техники, %

Показатели	1985 г.	1986 г.	1989 г.	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2007 г.
Отношение объема к объему восстановления в 1985г.	100	103	81,3	72,2	45,0	52,0	48,0
Доля восстановленных деталей в общем объеме постановки запасных частей	17,8	19,6	15,1	14,1	6,9	8,0	7,2

Снижение объемов восстановления деталей связано с развалом сети специализированных ремонтных предприятий в регионах. Главные ремонтные работы сельскохозяйственные предприятия проводят собственными силами в своих мастерских. Хозяйства реализовывают до 70% общего объема ремонта сельскохозяйственной техники области. Большие сельскохозяйственные предприятия, имеющие типовые ремонтные мастерские, сами полностью ремонтируют и обслуживают всю свою технику. Раньше в системе «Сельхозтехника» в области действовали большие специализированные ремонтные предприятия по капитальному ремонту полнокомплектных гусеничных тракторов типа ДТ-75. В наше время они перепрофилированы на изготовление разнообразных почвообрабатывающих и посевных машин, прицепов и разбрасывателей для транспортирования и

внесения в грунт удобрений, а также на изготовление оснастки для переработки аграрной продукции.

По прогнозам специалистов ГОСНИТИ, к 2023 г. объемы восстановления необходимо увеличить до 6-7 млрд руб., что составит 25-30% от поставки новых запасных частей (таблица. 1.2, рисунок. 1.1).

Таблица 1.2

Перспективы восстановления деталей машин в АПК

Показатели	1998 г.	2000 г.	2006 г.	2012 г.	2022г.
Объем восстановленных деталей на предприятиях АПК, млн. руб.	213	639	650	2500	6500
Экономия металла, тыс. т	425	1270	1300	2500	8500
Себестоимость восстановленных деталей, %	25-45 от себестоимости новых деталей				
Ресурс деталей, %					
Восстановленных	85-95				
Восстановленных с использованием упрочняющих технологий, %	120-160				
Удельный вес восстановленных деталей, %	7	8	8	12	25

Для повышения технологического уровня и увеличения объемов восстановления деталей в России необходимо развивать два приоритетных направления:

- первое – модернизация специализированных мастерских и заводов по ремонту машин, где должны получить развитие методы восстановления, в первую очередь, корпусных деталей, опорных поверхностей под подшипники.

- второе – создание специализированных центров по сбору и восстановлению изношенных деталей, обеспеченных всеми современными технологиями восстановления и упрочнения деталей.

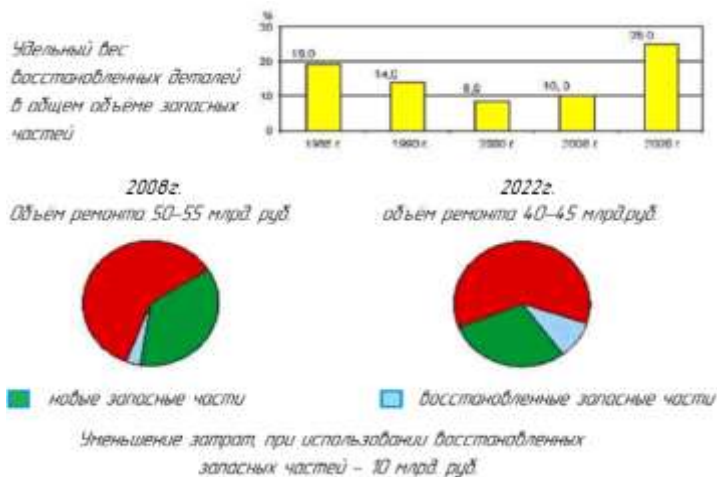


Рисунок 1.1. Уменьшения затрат на ремонт и объемы восстановления деталей при их использовании

При развитии производств по восстановлению деталей случится некоторое перераспределение объемов работ между существующими методами восстановления, и более интенсивно развиваться экологически чистые методы восстановления и внедряться в ремонтное производство.

Таблица 1.3

Уровни производства по восстановлению деталей

Уровень специализации	Вид производства	Объект восстановления	Доля в общем объеме восстановления, %
Первый (край / республика)	ЦВИДы обеспечивают потребность нескольких областей	Детали на основе технологий восстановления и упрочнения	10
Второй (межобластной)	Специализированные цехи и участки при ремонтных предприятиях и высокотехнологичные агрегаторемонтные предприятия	Детали двигателя и шасси, сельхозмашин и высокотехнологичных агрегатов	35
Третий (районный)	Участки, посты и рабочие места в мастерских общего назначения, РТП и	Детали тракторов, комбайнов, сельхозмашин	55

Уровень специализации	Вид производства	Объект восстановления	Доля в общем объеме восстановления, %
	мастерские хозяйства		

На базе ОАО «Севертрансэкскавация» Республики Коми на намеренно оборудованном для данных целей участке восстановления деталей ходовой части гусеничной техники восстанавливают ведущие колеса тракторов «Komatsu» наплавкой под слоем флюса с применением неподвижного (лежащего) электрода. Себестоимость восстановленной детали в несколько раз ниже цены новой.

Предприятие «Рематтра» (Тамбовская область) проводит полный цикл капитального восстановительного ремонта трубоукладчиков и бульдозеров D355 марки «Komatsu», экскаваторов «Komatsu», «Caterpillar»; капитальный ремонт узлов и агрегатов отечественной и импортной техники, в том числе: МАЗ, КамАЗ, КрАЗ, «Урал», «Ikarus», «Claas», «Libherr». На предприятии изучен полный ремонт ходовой части и двигателей фирмы «Komatsu».

Производственная база предприятия позволяет не только ремонтировать, все-таки и изготавливать отдельные детали на дорогостоящую импортную технику, какие-нибудь в несколько раз дешевле, чем сходные импортные запасные части, что позволяет заказчику значительно сократить расходы при ремонте и сервисе техники.

1.1. Анализ конструкций блоков цилиндров современных двигателей внутреннего сгорания

Блок цилиндров двигателя внутреннего сгорания (блок) представляет собой литую конструкцию сложной конфигурации, внутри и снаружи которой в заданном положении располагаются детали и сборочные единицы двигателя. Блок воспринимает нагрузки от вращающихся и поступательно движущихся деталей.

В зависимости от рабочего объема и других технических и эксплуатационных характеристик, назначения, существует несколько

вариантов компоновки (расположения цилиндров двигателя), а также несколько материалов для изготовления блока и цилиндра.

Так как в цилиндре возникают условия переменных давлений в надпоршневой полости, внутренняя поверхность стенок цилиндров соприкасается с пламенем и горячими газами (температура которых составляет от 1500—2500 °С), такая деталь должна изготавливаться из высокопрочных материалов с большой механической прочностью. Скорость скольжения поршневых колец по стенкам цилиндров достаточно большая от 12 до 15 м/сек, поэтому внутренние стенки цилиндра должны иметь повышенную жесткость. В этом случае увеличится срок службы цилиндра (гильзы цилиндра) и деталь будет более устойчива к разным видам износа (абразивным, коррозионным и эрозийным). Если поверхность блока цилиндров изнашивается выше допустимых пределов (что определится методом дефектации блока цилиндров), необходимо провести ремонт блока цилиндров.

Если нет ограничений по массе двигателя, например тракторный двигатель, то блок цилиндров изготавливается из перлитного чугуна.

На транспортных двигателях, где есть ограничения по массе, применяют более легкие алюминиевые и магниевые сплавы для изготовления блока цилиндров.

Преимущества блоков цилиндров из серого чугуна:

- низкая стоимость;
- высокая технологичность литья;
- стабильность свойств материала;
- возможность ремонта трещин блока (запайкой, заваркой, эпоксидным клеем);
- высокая твердость и жесткость поверхностей, устойчивость к перегреву;

Недостатки чугунов

Главный недостаток чугуна большая масса (плотность выше в 2,7 раза), и меньшая теплопроводность.

Блоки цилиндров из алюминия

Алюминиевые сплавы более дорогие, но алюминиевые блок цилиндров имеют гораздо меньшую массу. Алюминиевые сплавы имеют ряд особенностей, которые следует учитывать при изготовлении и эксплуатации блоков цилиндров.

Обладает такими положительными свойствами, как оптимальное охлаждение двигателя и незначительный вес. Он находится на втором месте по количеству выпускаемых блоков цилиндров. Особенность конструкции из алюминия – установка гильз.

Сегодня для выполнения этой операции, в основном, применяют две технологии Locasil и Nicasil.

В первом случае запрессовываются гильзы из алюминий-кремниевого сплава во втором – наносится никелевое покрытие.

Вторая технология имеет существенный недостаток – если, к примеру, прогорает поршень, обрывается шатун или выходит из строя никелевое покрытие, то изделие отремонтировать не получится.

Также никосиловая технология не предусматривает расточку, приходится менять весь узел в сборе. Понятно, что в таком случае владельцу автомобиля приходится раскошелиться на солидную сумму.

1.2 Анализ причин отказов цилиндропоршневой группы и повреждений деталей

При эксплуатации ДВС происходит изнашивание их составных частей и при достижении предельных значений параметров технического состояния двигателя выходят из строя. Исследованиями причин отказов ДВС и повреждений деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) занимались: И.М. Алексаньян, Н.М. Вагабов, И.Б. Гурвич, А.С. Денисов, Д.В. Кузнецов, А.Д.

Назаров, В.В. Чепелевский и многие другие ученые. По данным [2; 10; 18; 19; 23; 40; 48; 49; 84; 85] от 30 до 50 % всех отказов ДВС приходится на отказы ЦПГ. Отказы ЦПГ связаны с износом и повреждениями цилиндров, поршней и поршневых колец. В работах [2; 10; 18; 19; 23; 40; 49; 84;] преимущественно отражена информация о характере повреждений гильз цилиндров «мокрого» типа и цилиндров чугунных блоков. Информация о характере повреждений цилиндров блоков из алюминиевых сплавов в литературе практически отсутствует.

Рабочая поверхность цилиндра изнашивается неравномерно. В верхней части цилиндра из-за действия высоких температур и давления газов масляная пленка теряет свои смазочные свойства и в некоторых случаях может быть полностью разрушена. В результате худших условий смазки в этой зоне происходит интенсивное изнашивание цилиндра.

Интенсивность изнашивания цилиндров в значительной мере зависит от условий эксплуатации и технического обслуживания двигателя. Так, при попадании в зону трения абразива с воздухом или маслом, происходит интенсивное изнашивание ЦПГ. В результате на рабочей поверхности цилиндра образуется большое количество мелких царапин (рисок). При этом цилиндр приобретает бочкообразную форму [54; 81; 101].

Задиры на рабочей поверхности цилиндра появляются в результате общего или местного перегрева двигателя. При чрезмерно высоких температурах в зоне трения масло теряет свои смазочные свойства, и масляная пленка легко разрывается. Возникает режим полусухого трения с непосредственным контактом поршня и цилиндра. При дальнейшей работе двигателя, из-за дополнительного нагрева в местах истирания, возникает режим сухого трения, в результате чего образуются задиры [54; 81; 101].

Перегрев двигателя может возникать из-за перегрузки двигателя, нарушения процесса сгорания, неисправностей системы охлаждения [54; 81; 101]. Если цилиндры двигателя оснащены «сухими» гильзами, имеющаяся

неоднородность стенки цилиндра и локальные неприлегания гильзы к блоку могут приводить к перегреву цилиндра и образованию задиров.

Деформация цилиндра может быть следствием перегрева двигателя, релаксации остаточных напряжений в материале блока, неравномерной или неправильной затяжки резьбовых соединений крепления ГБЦ, отклонений от плоскостности поверхностей прилегания ГБЦ и блока цилиндров.

При эксплуатации ДВС происходят также и аварийные повреждения деталей ЦПГ. К ним можно отнести: образование трещин и пробоин в цилиндрах, разрушение и прогорание поршней, разрушение и поломка поршневых колец.

1.3 Анализ способов восстановления цилиндров двигателей внутреннего сгорания

Разработке и совершенствованию способов восстановления цилиндров ДВС посвящены работы Е.Л. Воловика, А.А. Зуева, И.М. Зейналова, А.Ю. Костюкова, А.Э. Хрулева, В.И. Черноиванова, Р.У. Шахмаметова, О.Г. Ширая, М.И. Юдина и многих других авторов. Известные способы восстановления изношенных цилиндров ДВС можно условно подразделить на три группы (рис. 1.5):

- способы, в основе которых лежит использование конструктивного запаса прочности деталей;
- способы, основанные на применении дополнительных ремонтных деталей;
- способы, предусматривающие нанесение на поверхность цилиндров металлопокрытий.



Рис. 1.5. Способы восстановления цилиндров ДВС

Вследствие конструктивных особенностей блоков цилиндров ДВС эти способы разрабатывались преимущественно для восстановления гильз цилиндров «мокрого» типа. Тем не менее, некоторые из способов, ввиду своих технологических возможностей могут применяться и, как показывает практика, применяются при восстановлении монолитных блоков цилиндров. Рассмотрим технологические особенности, преимущества и недостатки наиболее распространенных способов восстановления изношенных цилиндров ДВС.

Иногда цилиндр изношен настолько глубоко, что растачиванием до ремонтного размера поршня устранить неисправность не удастся. Это может произойти, если поршневой палец сместится со своего места, и окажется на краю поршня, что приведет к истиранию поверхности цилиндра.

Блоки цилиндров с глубокими выбоинами может быть «спасен» установкой втулки в цилиндр, в обиходе – гильзовкой цилиндра. Прежде всего, необходимо измерить толщину стенки поврежденного цилиндра, чтобы определить, какого наружного размера потребуется сменяемая гильза цилиндра. Гильзовка цилиндра осуществляется путем расточки

поврежденного цилиндра до размера, который практически совпадает с внешним диаметром вставляемой в цилиндр втулки.

Затем втулку вдавливают (запрессовывают) в расточенное отверстие, и растачивают вставленную втулку до размера поршня, который будет установлен в этом цилиндре.

Диаметр втулки можно измерять только после запрессовки гильзы в цилиндр двигателя. Как правило, целесообразно проводить одновременную гильзовку всех цилиндров двигателя, поскольку сменные гильзы цилиндров поставляются производителем под стандартный ремонтный размер.

1.1. Структурная схема хонингования

При хонинговании наблюдается сложная система взаимосвязанных процессов и явлений. Определяющим является процесс массового микрорезания поверхности детали с множеством мельчайших резцов – абразивных зёрен.

Закономерности микропроцессов резания во многом общие для различных видов абразивной обработки, поэтому при анализе современных представлений о сущности хонингования мы будем опираться также на работы, посвященные другим видам абразивной обработки.

Для детального рассмотрения совокупности явлений, наблюдаемых при хонинговании, и обоснования задач данного исследования автором составлена структурная схема процесса хонингования (рисунок 1.8) [73]. Как видно из структурной схемы, в основе процесса хонингования лежит воздействие (1) режущей поверхности алмазно- абразивного инструмента (2) на поверхность обрабатываемой детали (3). В то же время деталь, действуя на инструмент, формирует рельеф его режущей поверхности.

Управляющими, или входными факторами являются: характеристики хонинговальных брусков (4) и специальные воздействия на их поверхность (5), такие как пропитка, особенности формы брусков и т.д.; кинематика процесса (6); смазочно-охлаждающая жидкость (7); специальные воздействия

на процесс (8), например наложение вибраций, подведение электрического напряжения и т.д.; материал (9) и исходное состояние обрабатываемой детали (10, 11); усилие на разжимном штоке хонголки, создаваемое механизмом нагружения станка (12).

К выходным относятся: скорость съёма металла (13); износ инструмента (14); тепловые явления (15); усилия резания (16); микрогеометрия поверхности (17) и погрешность формы (18) обрабатываемой детали; движение шлама и СОЖ (19).

Большое влияние на хонингование оказывают обратные связи между выходными и входными факторами. Основные причины этого следующие:

- а) повышение давления шлама и СОЖ при их движении в подбрусковом пространстве,
- б) наличие трения в механизме разжима брусков, величина которого зависит от усилий резания и усилий деформирования детали, вызванных погрешностью её формы.

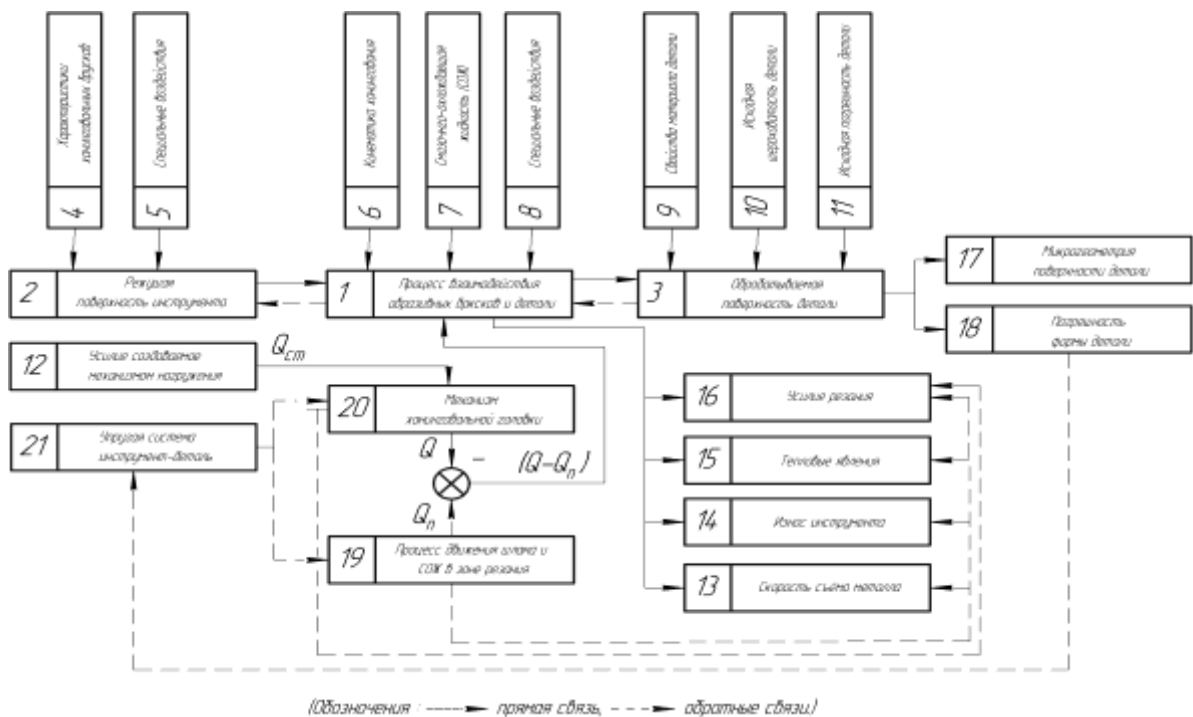


Рисунок 1.8. Структурная схема процесса хонингования

Различные явления при хонинговании исследованы не одинаково подробно: отдельные вопросы разработаны достаточно глубоко, а некоторые оказались вне поля зрения специалистов.

Обзор литературы и определение вопросов, подлежащих исследованию, целесообразно провести в той последовательности, которая соответствует взаимосвязи физических явлений, и которая отражена на структурной схеме процесса хонингования. Поэтому вначале рассмотрим общие закономерности алмазно-абразивной обработки:

а) микрогеометрию режущей поверхности инструмента, методы её исследования;

б) процесс воздействия единичного зерна на металл;

в) массовое резание совокупностью зёрен инструмента.

Затем проанализируем специфические закономерности хонингования, т.е. влияние различных факторов на съём металла, усилия резания, тепловые явления, качество обработки детали и т.д.

Выводы к главе 1

1. В настоящий момент нет единого мнения, несмотря на многочисленные исследования, о преобладающем виде изнашивания внутренней рабочей поверхности гильзы цилиндра. Ресурс капитально отремонтированного двигателя составляет 30–40% от ресурса нового двигателя. Интенсивность изнашивания гильз цилиндров после капитального ремонта в 3 раза выше, чем у новых гильз.

2. Для повышения ресурса гильз цилиндров ДВС при изготовлении и ремонте увеличивают твердость рабочей поверхности и ее маслостойкость, а также наносят антифрикционное покрытие. Для увеличения твердости применяют различные методы термообработки и нанесения твердых материалов. Высокая твердость поверхности вызывает некоторые трудности при последующей обработке.

3. Проведен анализ современных научных представлений о хонинговании. Составлена структурная схема процесса, отражающая взаимосвязь основных явлений и технологических параметров хонингования. На представленной схеме показано наличие обратных связей между выходными параметрами и усилием прижима брусков к детали, что влияет на эффективность и качество обработки.

4. Обзор литературы показал, одной из 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.

5. Исходя из этого в диссертации поставлена цель решить вышеуказанную задачу применительно к хонингованию малопластичных материалов, для чего рассматриваются следующие вопросы:

- а) Разработка методики исследования микрогеометрии режущей поверхности и упругие деформации алмазных инструментов.

- б) Измерение с помощью разработанных методик характеристик алмазных хонинговальных брусков.
- в) Анализ на основе теории вероятности процесса формирования микрогеометрии детали и съёма металла при хонинговании малопластичных материалов брусками на жесткой связке.
- г) Исследование влияния обратных связей по усилию прижима брусков, возникающих за счет движения шлама и СОЖ в зоне резания и трения в механизме хонголовки, на технологические показатели хонингования.
- д) Разработка на основе теоретических положений рекомендаций по повышению эффективности и качества процесса хонингования.
- е) Экспериментальная проверка теоретических положений и практических рекомендаций по повышению эффективности и качества обработки на примере алмазного хонингования чугунных гильз ДВС.

Глава 2. Теоретические положения

2.1. Математическое описание режущей поверхности алмазно-абразивных инструментов

В научных исследованиях применяются различные математические модели алмазно- абразивных инструментов, которые мы предлагаем условно разделить на дискретные, непрерывные и дискретно-непрерывные.

Поскольку инструмент содержит связку и абразивные зёрна, его рабочий слой состоит из участков с резко различными физическими свойствами, в силу чего представляет собой существенно дискретную структуру. С этой точки зрения режущая поверхность инструмента должна представляться дискретной моделью, математическое описание которой сводится к заданию трёх характеристик: формы профиля рабочих вершин зёрен, закона распределения их по высоте, а также закона распределения по площади инструмента.

Существует также другой подход, при котором поверхность инструмента рассматривается как некоторое однородное случайное поле, т.е. принимается непрерывная модель инструмента.

Дискретная модель более реалистично отражает строение абразивного инструмента, но имеющиеся методы экспериментального определения её характеристик значительно сложнее.

Ряд авторов [53, 73] представляют рабочую поверхность инструмента в виде набора непрерывных режущих «элементарных профилей», отстоящих друг от друга на некотором расстоянии. В этом случае инструмент считается непрерывным в одном направлении и дискретным в другом, поэтому можно говорить о дискретно-непрерывной модели.

Рассмотрим данные по этим вопросам, представленные в литературе, с тем чтобы выбрать наиболее приемлемое математическое описание инструмента.

а. Дискретная модель

Характеристики 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;
- однополостной гиперболоид;
- параболоид и другие.

Закон распределения зёрен по площади инструмента находится из довольно простых физических предпосылок методами теории вероятностей. Нетрудно доказать, что если среднее расстояние между зёрнами в несколько раз превышает их средний диаметр и они расположены независимо друг от друга, то распределение по площади близко к закону Пуассона [73]:

$$P(n) = \frac{(z_0 \cdot S)^n}{n!} \cdot e^{-z_0 \cdot S}, \quad (2.1)$$

где $P(n)$ – вероятность того, что на участке площадью S окажется n вершин, зерен; z_0 – среднее число вершин на единице площади инструмента.

Распределение вершин зёрен по высоте нельзя найти из столь простых физических предпосылок, так как на него влияет большое число факторов. Среднее число вершин, содержащихся в единице объёма инструмента, является постоянным в глубине и плавно убывает вблизи поверхности, обращаясь далее в ноль (рисунок 2.1, кривая *а*). Истирание зёрен в процессе работы может привести к некоторому увеличению числа вершин на определённых уровнях, так что закон распределения приобретает горбообразную форму (рисунок 2.2, кривая *б*) [71]. Таким образом, форма кривой распределения зависит от соотношения доли истирания,

выкрашивания и выламывания зёрен в процессе правки и износа инструмента и может иметь вид, показанный на рисунке 2.1 (а, б).

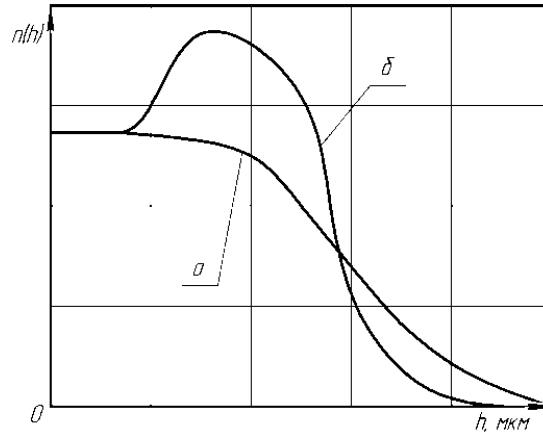


Рисунок 2.1. Плотность распределения зёрен по высоте
а- среднее число вершин, содержащихся в единице объёма инструмента; б- истирание зёрен в процессе работы

Аналитическое описание фактической кривой распределения весьма сложно, что затрудняет теоретические построения. Поэтому для аппроксимации распределения используют различные зависимости, представляющие удобство для исследования. Большой распространённостью пользуется нормальный закон, хотя физических предпосылок для появления такого симметричного распределения нет [73]. Хорошее приближение начального участка кривой распределения можно получить с помощью степенной зависимости [73]:

$$n(h) = \begin{cases} k \cdot h^\beta & \text{при } h > 0 \\ 0 & \text{при } h \leq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

где $n(h)$ – плотность распределения, т.е. число вершин зёрен, находящихся в единице объема режущего слоя инструмента на глубине h .

При $\beta=0$ формула (2.2) даёт равномерное распределение. Наши исследования подтверждают возможность степенной аппроксимации, поэтому в теоретических расчётах, основанных на дискретной модели, мы будем пользоваться зависимостью (2.2).

б. Непрерывная модель

Представление поверхности абразивного инструмента в виде некоторого непрерывного случайного поля позволяет привлечь к его описанию хорошо разработанные математические методы теории случайных функций. Для задания случайной функции необходимо знать её статистические характеристики, в частности закон распределения, автокорреляционную функцию и т.п. В некоторых [53, 73] работах закон распределения ординат профиля инструмента принимает нормальный вид:

$$g(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \delta_z}} e^{-\frac{(z-M_z)^2}{2 \cdot \delta_z^2}}, \quad (2.3)$$

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

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

в. Дискретно-непрерывная модель

Представляем абразивный инструмент, используя модель Ж. Пекленик [63], как совокупность элементарных режущих профилей (ЭРП), отстоящих друг от друга на расстояние, равное или большее среднего размера зерна, и считающихся статистически независимыми.

Некоторые определяют ЭРП как проекцию всех зёрен, заключённых между соседними секущими плоскостями, на одну из них, или в качестве ЭРП принимают само сечение – профилограмму инструмента. В расчёты, основанные на дискретно-непрерывной модели, заведомо вносится

погрешность, так как при первом из указанных определений ЭРП теряется статистическая независимость между отдельными ЭРП, а при втором определении ЭРП не отражают наиболее выступающие кромки зёрен, потому что они по большей части не попадают в плоскость ЭРП.

2.2. Закономерности микрорезания единичными абразивными зёрнами

Для построения математической теории процесса хонингования необходимо знать механизм образования царапин при взаимодействии единичного зерна и поверхности металла.

Глубина резания абразивным зерном соизмерима с радиусом округления его вершины, поэтому процесс царапания происходит в весьма неблагоприятных условиях при больших отрицательных передних углах, высокой степени пластической деформации и значительном трении.

В зависимости от соотношения глубины внедрения h и радиуса ρ_z вершины зерна возможны упругие и пластические деформации, а также хрупкое разрушение материала. Критические значения отношения h/ρ_z , определяющие переход от одного вида деформирования к другому, зависят от физико-химических свойств металла и абразива, от скорости царапания, смазочной среды, характера предыдущих деформаций, испытанных материалом, и др.

Пластические деформации при скольжении сферы по плоскости начинаются, если

$$\frac{h}{\rho_z} > C_{пл} = 2.4 \cdot \left[\frac{C_1 \cdot \delta_s \cdot (1 - \mu^2)}{E} \right]^2, \quad (2.4)$$

где $C_{пл}$ – критерий перехода при пластической деформации; δ_s , E , μ – предел текучести, модуль упругости и коэффициент Пуассона для металла, C_1 –

коэффициент, учитывающий сложность напряженного состояния и изменяющийся от 1 и 10.

Упругие деформации имеют место лишь в очень малом диапазоне глубины внедрения, поэтому при разработке математической модели процессов абразивной обработки их не учитывают.

Увеличение глубины резания вызывает пластическое деформирование: металл вытесняется по бокам царапины и образуются навалы, суммарная площадь которых равна площади канавки. Перед движущимся зерном возникает также выпучивание металла и волна деформации, бегущая впереди него.

Переход к резанию начинается, когда скалывающие напряжения становятся больше истинного сопротивления материала срезу, а это достигается при

$$\frac{\sigma}{\rho_3} > C_{рез}. \quad (2.5)$$

Для случая скольжения сферы по пластическому полупространству:

$$C_{рез} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \tau}{\delta_s}\right), \quad (2.6)$$

где $C_{рез}$ – критерий перехода при резании; τ – прочность на срез адгезионной связи.

Наличие у зерна, развитого субмиктропофиля может значительно снизить критическую глубину резания. На критические точки влияют также и другие факторы, такие как окисные плёнки, смазка, скорость и т.п., поэтому надёжнее пользоваться экспериментальными, а не расчётными данными о величинах $C_{пл}$ и $C_{рез}$.

Усилия, возникающие в процессе царапания, зависят от площадей проекций поверхности контакта зерна с металлом S_y , S_z и условных напряжений среза δ_y , δ_z :

$$P_y = \delta_y \cdot S_y; P_z = \delta_z \cdot S_z. \quad (2.7)$$

Условное тангенциальное напряжение среза δ_y зависит как от свойств металла, так и от глубины резания h , причём в точке перехода от

пластической деформации к резанию, δ_y имеет максимум. Для аналитической кусочной аппроксимации ветвей этой зависимости предлагается политропический закон [73]:

$$\delta_y = \begin{cases} \delta_{1y} \cdot \sigma^{\lambda_1} & \text{при } \sigma < C_{рез} \cdot \rho_3 \\ \delta_{2y} \cdot \sigma^{\lambda_2} & \text{при } \sigma > C_{рез} \cdot \rho_3 \end{cases} \quad (2.8)$$

где $\delta_{1y}, \delta_{2y}, \lambda_1, \lambda_2$ – постоянные, определяемые опытным путём.

Нормальное усилие P_z определяется аналогично, с ростом глубины внедрения оно увеличивается быстрее, чем P_y , так что всегда $P_z / P_y > 1$. В предположении идеальной пластичности металла и сферической формы зерна

$$P_z = C_3 \cdot \pi \cdot \rho_3 \cdot \delta_s \cdot \sigma, \quad (2.9)$$

где C_3 – коэффициент формы ($C_3 \approx 2,8$), а остальные обозначения прежние.

Принимаем, что условные напряжения являются постоянными, при этом усилия P_y, P_z будут прямо пропорциональными площадям соответствующих проекций поверхности контакта зерна с металлом. Такой подход часто наиболее приемлем для практических расчетов, особенно если учесть сложность получения экспериментальных данных о зависимости условных напряжений от размеров срезаемого слоя и других факторов.

За счёт пластических деформаций часть металла отесняется, и образуются навалы по краям царапин. Соотношение объёмов срезанного и пластически вытесненного металла характеризуется коэффициентами стружкообразования k_c и навалообразования k_n :

$$k_c = 1 - k_n = \frac{V_c}{V_u}, \quad (2.10)$$

где V_c – объём стружки, V_u – объём металла, вытесненного из царапины.

В зоне пластических деформаций $k_c = 0$ с увеличением глубины внедрения он быстро повышается до некоторого значения и далее почти не меняется. На рисунке 2.2 показана зависимость k_c от глубины h при царапании чугуна алмазным конусом с углом при вершине 120° , из которой видно, что для серого чугуна значение k_n не превышает 0,2-0,3 в большом

диапазоне глубины [73]. Навалообразование снижается с уменьшением пластичности обрабатываемого материала, с увеличением остроты зёрен, с повышением скорости резания. В условиях процесса хонингования навалообразование ещё меньше, чем при царапании гладкой поверхности, поскольку зёрна пересекают гребешки металла, имеющие высокую степень наклёпа и, следовательно, низкую пластичность. Поэтому в первом приближении для материалов низкой пластичности, как, например, серый чугун, выдавливание металла по краям царапин можно не учитывать.

В определённом диапазоне скоростей резания, например для стали 20 от 0,02 до 5 м/с, на поверхности абразивного зерна возникает нарост. Наростообразование, с одной стороны, улучшает геометрию режущей части зерна, но с другой стороны, приводит к увеличению значения R_a за счёт периодических срывов нароста, а также к усилению загрязнения инструмента.

Появление нароста ведет к изменению усилий резания и коэффициента стружкообразования, но профиль царапины остаётся неизменным, так как нарост не выходит за его пределы. При резании хрупких, малопластичных материалов, например, чугуна, наростообразование незначительно, и им можно пренебречь.

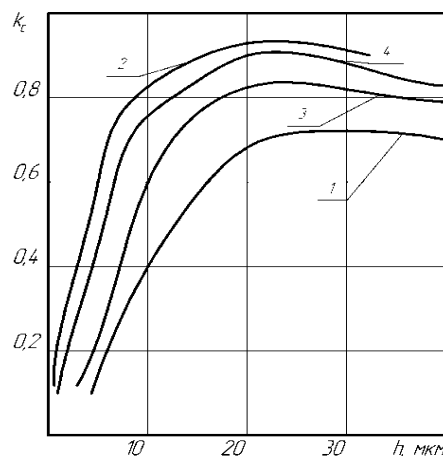


Рисунок 2.2. Зависимость коэффициента стружкообразования от глубины царапания чугуна (1 – высокопрочного, 2 – белого, 3 – серого, 4 – закаленного)

Рассмотренные закономерности резания единичными алмазно-абразивными зёрнами дают возможность перейти к анализу процесса массового воздействия зёрен на поверхность детали, происходящего при алмазно-абразивной обработке.

2.3. Статистические закономерности массового воздействия алмазно-абразивных зёрен на деталь

Изучение закономерностей массового воздействия абразивных зёрен на поверхность обрабатываемой детали является одной из важных и наиболее трудных проблем в теории абразивной обработки.

Первая попытка создания математической теории абразивного резания была предпринята в 1914 году Элденом [63], который рассмотрел наибольшую толщину стружки при круглом наружном шлифовании, уподобив круг фрезе. Начиная с 1914 года и приблизительно до 1960 года, теория развивалась на основе представлений об абразивном инструменте как твёрдом теле с упорядоченным расположением режущих кромок (детерминированная модель) [63].

Большой интерес представляют исследования микрогеометрии обработанной поверхности при шлифовании. С. Ориока [29] вывел формулу для расчёта среднеквадратической высоты $H_{ск}$ неровностей при круглом шлифовании, причём профиль зёрен был принят конический, а распределение зёрен по высоте описывалось параболой второго порядка. Сходные зависимости были, но при несколько иных исходных предпосылках.

Для степенного распределения по высоте и параболической формы зёрен определили [73] среднюю высоту неровностей шлифованной поверхности:

$$H_{cp} = \frac{1}{1,5 + \beta^{1,5}} \cdot H_0^{\frac{\beta}{\beta + m + 0,5}} \cdot \left[\frac{(1,5 \cdot C)^m \cdot (1,5 \cdot m + \beta^{1,5} \cdot m)}{2 \cdot z_0 \cdot \left(1 + \frac{V_u}{V_d}\right) \cdot \sqrt{D}} \right]^{\frac{1}{\beta + m + 0,5}}, \quad (2.11)$$

где D – диаметр круга; V_d , V_u – скорость детали и круга; C , m – параметры, описывающие параболическую форму зерна (2.1); z_0 – число абразивных зёрен на единицу площади круга, H_0 – глубина режущего слоя на круге; β – показатель степени распределения зерен по высоте.

Важной характеристикой микрогеометрии обработанной поверхности является закон распределения неровностей по высоте $P(h)$. Знание этой функции позволяет не только определить числовые параметры высоты микронеровности R_a , H_{ck} , R_z и др., но и рассчитать число контактных и режущих зёрен, площади среза, усилия и т.д.

$$P(\square) = z_0 \cdot \left(\frac{\square}{H_0}\right)^\beta. \quad (2.12)$$

Ж. Пекленик [63] в своём анализе использовал взаимную корреляцию профилей инструмента и обработанной детали, что позволило подойти к шлифованию как к процессу в динамической системе. Им же было введено понятие об элементарном режущем профиле (ЭРП). Л.Н. Филимонов [63] строит теорию абразивного резания исходя из дискретно-непрерывных моделей, при этом используется понятие приведённого режущего профиля (ПРП), определяемого как максимум из наложения нескольких независимых ЭРП. З.И. Кремень [29] учёл, что при шлифовании профиль детали формируется путем наложения ряда ЭРП, имеющих последовательно меняющуюся глубину внедрения.

2.4. Микроявления при хонинговании

Массовое микрорезание металла абразивными зёрнами при хонинговании вызывает ряд макропроцессов, выражающихся в съёме металла и износе инструмента, нагреве инструмента и детали, возникновении усилий и деформаций, формировании поверхностного слоя детали и т.д.

И.Е. Фрагин [73] так представляет сущность явлений в контакте хонинговального бруска и обрабатываемой детали. В начале цикла обработки за счёт высокой шероховатости поверхности и погрешности формы детали развиваются большие удельные давления, и множество абразивных зёрен, прорывая мономолекулярный слой смазки, внедряется в металл. При этом контактируют ювенильные поверхности инструмента и детали, возможно образование мостиков сварки. За счёт этих явлений резко возрастает тангенциальная составляющая силы резания, скорость съёма металла и износа брусков.

Через 15-30 с наступает второй этап: шероховатость детали и погрешность формы гораздо меньше, увеличивается количество контактных зёрен, снижается удельное давление, контакт происходит в основном через буферный слой смазки. Снижаются тангенциальные усилия, скорость съёма металла и износ брусков.

Последний этап характеризуется постоянными значениями и небольшой величиной силы резания, съёма и износа. Этот этап близок к суперфинишу и полированию, он обеспечивает повышенное качество поверхности за счёт пластических деформаций при умеренном развитии физико-химических явлений.

Цикличность хонингования проявляется гораздо больше при использовании абразивных брусков, чем алмазных. Это вызвано невысокой прочностью зёрен и связки абразивных брусков, из-за чего в начальный момент происходит сильное самозатачивание, а затем постепенное затупление брусков [73].

Рассмотрим экспериментальные данные о влиянии различных факторов на отдельные параметры процесса хонингования.

2.4.1. Скорость съёма металла

С увеличением радиального давления скорость съёма возрастает, однако для абразивных брусков в меньшей степени, чем для алмазных. Это объясняется тем, что при высоких удельных давлениях зёрна абразивных брусков осыпаются и хуже режут металл.

Рост абсолютной скорости резания $V_{абс.р}$ при постоянном значении скрещивания приводит к повышению скорости съёма, но не в прямой пропорциональной зависимости. Из рисунка 2.3 [73] видно, что чем больше $V_{абс.р}$, тем меньше прирост скорости съёма, или даже он становится отрицательным. Причины этого явления полностью не выяснены, но известно, что при очень высоких скоростях масляная плёнка разрывается, и частицы снятого металла засаливают инструмент, поэтому съём уменьшается.

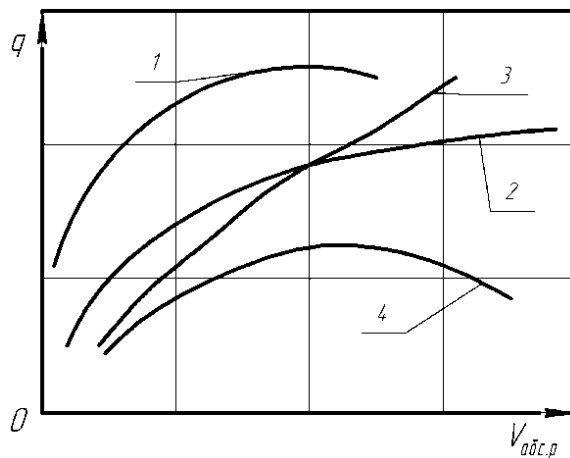


Рисунок 2.3. Влияние абсолютной скорости на съём металла в зависимости от обрабатываемого материала и вида хонинговальных брусков (1, 2 – чугун, абразивные бруски [72]; 3 – чугун, алмазные бруски [54, 72]; 4 – закаленная сталь, алмазные бруски [54])

Угол скрещивания ($\text{tg}\alpha = V_{ок}/V_{ос}$, где $V_{ок}$ – окружная скорость, $V_{ос}$ – осевая скорость) влияет на условия срезания металла, размещение стружки в подбрусковом пространстве и отвод её из зоны резания, самозатачивание

брусков и др. При уменьшении α и приближении его к единице улучшаются условия срезания стружки, которая становится мельче и лучше удаляется из-под бруска, поэтому съём металла увеличивается. Однако наряду с этим значение R_a увеличивается, возрастают инерционные усилия на хонголке.

Зернистость хонинговальных брусков в зависимости от условий обработки оказывает различное влияние на скорость съёма. Так, при алмазном хонинговании уменьшение размеров зерна алмазного бруска с АС6 200/160 до АС6 160/125 привело к увеличению скорости съёма, в то время как бруски зернистостью АС6 50/40 показали значительно меньшую скорость съёма по сравнению с брусками АС6 200/160. При 50%-ной концентрации алмазов крупность зёрен почти не оказывает влияния на скорость съёма [73].

Экспериментально обнаружена значительная зависимость съёма от вязкости, или растекаемости СОЖ по обрабатываемому материалу: чем больше вязкость, тем меньше скорость съёма. Удовлетворительное объяснение этой закономерности и нелинейной зависимости съёма от скорости резания, отсутствует [63, 73].

Считаем, что большую роль при этом играют обратные связи по усилию прижима брусков, обусловленные движением шлама и СОЖ в подбрусковом пространстве, за счёт чего возникает повышенное давление в зоне резания [63]. Высказанное предположение позволяет не только объяснить ряд закономерностей процесса хонингования, но и обосновать некоторые пути повышения его эффективности.

На скорость съёма оказывают также влияние свойства связки, обрабатываемый материал, исходная шероховатость и погрешность формы детали и др.

2.4.2. Силовые явления

Усилия резания возникают в результате суммарного снятия микростружек абразивными зёрнами, пластического деформирования металла, трения зёрен и связки о поверхность детали и стружку.

При хонинговании с заданным усилием прижима брусков радиальное давление относится к элементам режима резания, его среднее значение считается постоянным. Однако за счёт усилий резания, погрешностей формы деталей и трения в механизме хонинговальной головки возникают обратные связи по усилию прижима брусков, поэтому фактическое давление претерпевает значительные колебания. Эти явления недостаточно изучены, в литературе приводятся упрощенные и даже противоречивые формулы для расчёта радиального давления Q в зависимости от усилия P на разжимном штоке хонголовки (таблица 2.1).

Таблица 2.1

Зависимости для расчета давления (по данным литературы)

Источник	Формула	Замечания
[73]	$Q = \frac{P}{n_{\delta}} \cdot ctg \omega$	Трение не учитывается
[63]	$Q = \frac{P}{n_{\delta}} \cdot ctg(\omega + \rho)$	Учтено только трение в клиновой паре конус – колодка
[7]	$Q = \frac{P}{n_{\delta}} \cdot ctg(\omega + 2\rho)$	Ошибочна
[73]	$Q = \frac{P}{n_{\delta}} \cdot ctg(\omega \pm \rho) \pm \left(\frac{P}{n_{\delta}} \pm F_{oc} \right) \cdot \sin \rho$	Не учитывается трение боковых поверхностей колодок о корпус хонголовки

Примечания: n_{δ} – число брусков в хонголовке, ω – угол наклона образующей конического валика, ρ – угол трения, F_{oc} – осевая составляющая силы резания, приходящаяся на один брусок, Q – давление, P – усилия на разжимном штоке хонголовки.

В связи с этим возникла необходимость исследовать влияние трения в хонголовке и обратных связей по усилию прижима брусков на процесс хонингования. Для анализа усилий резания при хонинговании удобно использовать коэффициент трения-царапания:

$$\mu = \frac{F_p}{Q}, \mu_{ок} = \frac{F_{ок}}{Q}, \mu_{ос} = \frac{F_{ос}}{Q}, \quad (2.13)$$

где F_p , $F_{ос}$, $F_{ок}$ – сила резания, осевая и окружная составляющая; Q – радиальное усилие прижима брусков.

Увеличение зернистости абразивных брусков ведёт к повышению коэффициента μ , а увеличение зернистости алмазных брусков – к его снижению. Концентрация алмазов в связке может по-разному отражаться на усилиях резания. Так, для брусков с зернистостью АС6 200/160 М2-01 100% с ростом концентрации коэффициент трения-царапания увеличивается, а при хонинговании стали 40Х брусками АС6 100/80 М2-01 100% – уменьшается.

Соотношение между осевой и окружной составляющими силы резания определяется, главным образом, углом скрещивания α . В первом приближении можно записать, что [58]

$$\frac{F_{ос}}{F_{ок}} = \frac{\mu_{ос}}{\mu_{ок}} = \frac{V_{ос}}{V_{ок}} = tg\alpha. \quad (2.14)$$

Большое влияние на усилия оказывают механические свойства обрабатываемого материала. С ростом прочности силы резания возрастают, а коэффициент трения-царапания уменьшается. Объясняется это тем, что при неизменном радиальном давлении повышение прочности металла уменьшает глубину внедрения зёрен и площадь поперечного сечения стружек; кроме того, бруски притупляются, что также снижает тангенциальное усилие F_p .

2.4.3. Тепловые явления

Тепловые явления играют существенную роль в процессе хонингования, поскольку от них зависят температурные деформации детали

и, следовательно, точность обработки, физико-химическое состояние СОЖ, обрабатываемого материала и брусков.

Интенсификация режимов хонингования во всех случаях повышает общее тепловыделение и температуру, которая не превышает 150–200°С. При хонинговании закалённой стали и чугуна нагрев деталей примерно одинаков, но при обработке незакалённой стали температура значительно выше за счёт большей глубины внедрения и интенсивного трения металла о связку [73].

Алмазные бруски на металлической связке создают гораздо меньшую температуру, чем абразивные бруски. Это связано с более высокой теплопроводностью алмаза и металлической связки, а также с более низким коэффициентом трения алмазных зёрен.

С повышением зернистости наблюдается уменьшение тепловыделения, так как при этом снижается степень диспергирования и пластического деформирования металла. Аналогичное влияние оказывает понижение концентрации алмазов в брусках.

2.4.4. Износ брусков и наростообразование

Износ абразивно-алмазных инструментов можно разделить на два, до некоторой степени самостоятельных, процесса: износ зёрен и износ связки, в результате которого зёрна выпадают без разрушения.

Износ зёрен абразива в процессе резания может происходить за счёт: развития трещин (хрупкое разрушение), пластических деформаций, адгезии, диффузии, абразивного действия твёрдых включений.

Анализ условий работы алмазно-абразивных зёрен при хонинговании и данные экспериментов свидетельствуют о том, что преобладающими являются хрупкое разрушение и адгезионный износ зёрен. Металлическая связка алмазных брусков подвержена, главным образом, абразивному действию стружки и адгезионному износу. Связка истирается быстрее алмазных зёрен, которые выпадают без разрушения. Это подтверждается

ситовым анализом размеров алмазных зёрен, извлечённых из шлама после хонингования [73].

Повышение удельного давления на бруски и скорости резания увеличивает износ. Правильным подбором состава и количества СОЖ, подаваемой в зону резания, можно уменьшить износ в 3–8 раз.

Образование наростов при хонинговании может происходить на вершинах алмазно-абразивных зёрен, что уже было рассмотрено, а также на связке, как результат внедрения и спрессования стружки. Причинами возникновения наростов на связке выступают:

- а) недостаточный объем зазора между связкой и деталью;
- б) нарушение условий скольжения стружки по связке.

Необходимое условие отсутствия наростов – нормальное поступление СОЖ на всю глубину подбрускового пространства.

2.4.5. Качество обработки деталей

К характеристикам качества относят микрогеометрию поверхности, точность формы и физико-механическое состояние поверхностного слоя обработанной детали.

Теоретические исследования процесса формирования микрогеометрии детали при абразивной обработке были рассмотрены выше. Экспериментальные данные, полученные многими авторами [28, 63, 73,], показывают, что при хонинговании повышение зернистости, удельного давления, пластичности обрабатываемого материала, а также снижение вязкости СОЖ ведет к увеличению высоты микронеровностей. Окружная скорость в зависимости от условий обработки может повышать или снижать шероховатость, в то время как осевая скорость всегда повышает ее.

Исправление погрешности формы деталей зависит в основном от жесткости детали и хонголки, режущих свойств брусков, способа крепления детали и инструмента, величины выхода хонголки.

В результате процесса резания в поверхностном слое детали возникает наклёп и остаточные напряжения [63, 73]. Установлено, что структурных превращений в металле при алмазном хонинговании не наблюдается, так как температура резания не превышает температуры отпуска основного металла, но при абразивном хонинговании твёрдость поверхностного слоя несколько снижается. Остаточные напряжения после хонингования носят сжимающий характер, что благоприятно отражается на работоспособности деталей. Абразивные бруски создают значительно большие остаточные напряжения, чем алмазные.

2.5. Математическое описание микрогеометрии алмазно-абразивных инструментов

Закономерности работы абразивных инструментов во многом определяются такими геометрическими параметрами, как суммарные площади S_0 и S_p передних поверхностей зёрен на основную плоскость (0) и плоскость резания (P) и среднего значения переднего угла зёрен γ (рисунок 2.5) [63].

Указанные величины зависят как от формы вершин зёрен, так и от закона распределения их по высоте, поэтому на разных уровнях H режущего слоя их значения меняются.

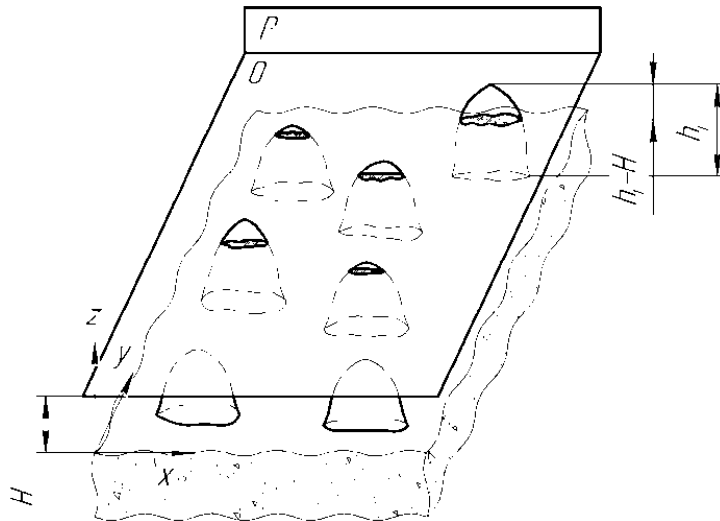


Рисунок 2.5. Схема режущего слоя абразивного инструмента

H - высота режущего слоя; h_i - высота вершины алмазно-абразивного зерна

Выразим $S_0(H)$, $S_p(H)$, $\gamma(H)$ через характеристики дискретной модели инструмента, которые зададим функцией $z(x)$, описывающей усреднённый профиль вершин зёрен, и объёмной плотностью $n(h)$ распределения вершин по высоте h режущего слоя, равной числу вершин в единице объёма на заданном уровне. На рисунке 2.5 показан участок поверхности инструмента единичной площади, причём основная плоскость проведена на высоте H [63].

Видно, что

$$S_0(H) = \frac{1}{2} \int_H^\infty \bar{S}_0(\square - H) \cdot n(\square) \cdot d\square, \quad (2.15)$$

$$S_p(H) = \int_H^\infty \bar{S}_p(\square - H) \cdot n(\square) \cdot d\square, \quad (2.16)$$

где $\bar{S}_0(\square), \bar{S}_p(\square)$ – математическое ожидание горизонтального и вертикального сечений зерна на высоте h от его вершины; $\frac{1}{2}$ множитель, учитывающий то, что передняя поверхность составляет половину вершины зерна.

Среднее значение переднего угла можно найти из соотношения площадей проекций:

$$\gamma(H) = -\arctg \frac{S_0(H)}{S_p(H)}. \quad (2.17)$$

Площади проекций вычислим исходя из радиуса $r(h)$ зерна в сечении h , являющегося случайной функцией полярного угла φ :

$$\bar{S}_0(\square) = M \left\{ \frac{1}{2} \cdot \int_0^{2\pi} r^2(\square) \cdot d\phi \right\} = \pi \cdot [R^2(\square) + \delta_R^2(\square)], \quad (2.18)$$

$$\bar{S}_p(\square) = M \left\{ 2 \cdot \int_0^\square r(\square) \cdot d\square \right\} = 2 \cdot \int_0^\square R(\square) \cdot d\square, \quad (2.19)$$

где $M\{\dots\}$ – операция нахождения математического ожидания; $R(\square)$ – математическое ожидание радиуса сечения зерна, причем $R(h)$, является обратной функцией к $z(x)$; $\delta_R^2(\square)$ – дисперсия радиуса.

Поскольку диаметральный размер сечения измерить значительно легче, чем радиус, заменим радиальные характеристики на соответствующие

диаметральные (причем учитываем, что корреляция между противоположными радиусами близка к единице):

$$\bar{S}_0(\square) = \frac{\pi}{4} [D^2(\square) + \delta_D^2(\square)] = \frac{\pi \cdot (1+k_v^2)}{4} \cdot D^2(\square), \quad (2.20)$$

$$\bar{S}_p(\square) = \int_0^\square D(\square) \cdot d\square, \quad (2.21)$$

где для удобства введен коэффициент вариации размера зерна:

$$k_v = \frac{\delta_D(\square)}{D(\square)}.$$

Как показывают исследования, коэффициент вариации k_v определяется в основном зернистостью и может считаться постоянным на всех уровнях. На основе данных работы [63, 73,] были рассчитаны коэффициенты вариации среднего диаметра для ряда зернистостей (таблица 2.2).

Таблица 2.2

Коэффициент вариации k_v среднего размера алмазных зерен

Марка зерна	АС 6	АС 10	АС 25
k_v	0,155	0,170	0,243

Учитывая сказанное, получим:

$$S_0(H) = \frac{\pi \cdot (1+k_v^2)}{8} \int_0^\infty D^2(z) \cdot n(H+z) \cdot dz, \quad (2.22)$$

$$S_p(H) = \int_0^\infty n(z+H) \cdot \left\{ \int_0^z D(x) \cdot dx \right\} \cdot dz. \quad (2.23)$$

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 :

$$E(H) = 2 \cdot S_0(H), \quad (2.24)$$

$$\lambda(H) = \int_0^\infty D(z) \cdot n(z+H) \cdot dz. \quad (2.25)$$

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 . С достаточной точностью можно принять степенную аппроксимацию:

$$D(\square) = \frac{2}{C^m} \cdot \square^m, n(\square) = \begin{cases} k \cdot \square^\beta & \text{при } \square > 0 \\ 0 & \text{при } \square \leq 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

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

$$S_o(H) = \frac{\pi \cdot (1+k_v^2) \cdot k \cdot \Gamma(\beta+1) \cdot \Gamma(2m+1)}{2 \cdot C^{2m} \cdot \Gamma(\beta+2m+2)} \cdot H^{\beta+2m+1}, \quad (2.27)$$

$$S_p(H) = \frac{2 \cdot k \cdot \Gamma(\beta+1) \cdot \Gamma(m+1)}{C^m \cdot \Gamma(\beta+m+3)} \cdot H^{\beta+m+2}, \quad (2.28)$$

$$\gamma(H) = -\arctg \left[\frac{\pi \cdot (1+k_v^2) \cdot \Gamma(2m+1) \cdot \Gamma(\beta+m+3)}{4 \cdot C^m \cdot \Gamma(\beta+2m+2) \cdot \Gamma(m+1)} \cdot H^{m-1} \right], \quad (2.29)$$

$$\lambda(H) = \frac{2 \cdot k \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)}{C^m \cdot \Gamma(\beta+m+2)} \cdot H^{\beta+2m+1}, \quad (2.30)$$

$$E(H) = \frac{\pi \cdot (1+k_v^2) \cdot k \cdot \Gamma(\beta+1) \cdot \Gamma(2m+1)}{C^{2m} \cdot \Gamma(\beta+2m+2)} \cdot H^{\beta+2m+1}, \quad (2.31)$$

где $\Gamma(x+1)$ – гамма-функция, значение которой берется из таблиц [149].

Эти формулы показывают взаимосвязь дискретной и непрерывной моделей алмазно- абразивного инструмента, дают возможность рассчитать ряд важных количественных характеристик, а также сделать некоторые выводы о работоспособности алмазно- абразивного инструмента.

С увеличением глубины внедрения H возрастает как площадь контакта S_o бруска с деталью, так и площадь среза S_p , которая увеличивается в большей степени. В связи с этим уменьшается отрицательный передний угол γ , что облегчает процесс резания и уменьшает долю пластических деформаций. При конической форме зёрен ($m=1$) угол γ не зависит от глубины внедрения и определяется только значением коэффициента C .

Возрастание зернистости алмазных хонинговальных брусков ведёт к уменьшению параметров k и C , причём k изменяется в большей степени, чем C . В связи с этим для достижения необходимой площади среза крупнозернистыми брусками и снижения отрицательного угла γ нужна значительно большая глубина внедрения, чем для мелкозернистых брусков.

2.6. Расчет для степенной аппроксимации закона распределения и формы зерен

Анализ различных функциональных аппроксимаций объемной плотности $n(h)$ распределения вершин по высоте и $z(x)$ функцией, описывающей усреднённый профиль вершин зерен, показал, что наиболее подходящими являются степенные зависимости, которые не только хорошо соответствуют экспериментальным данным, но и позволяют получить удобные расчётные формулы для параметров процесса резания-царапания [5].

Итак

$$z(x) = c|x|^{\frac{1}{m}}, \quad n(x) = \begin{cases} k \cdot x^{\beta}, & \text{при } x > 0, \\ 0, & \text{при } x \leq 0. \end{cases}$$

При этом направление отсчёта высоты зёрен меняем на противоположное, приняв его в тело инструмента.

2.6.1. Микрогеометрия поверхности детали

Рассмотрим микрогеометрию поверхности детали. Из закона распределения высоты микронеровностей находим [1]

$$P(x) = \exp\left\{\frac{-2 \cdot k}{b \cdot c^m \cdot (\beta + 1)} \cdot \int_0^x z^m \cdot (x - z)^{\beta + 1} \cdot dz\right\}. \quad (2.32)$$

где b — интенсивность съёма металла, c , m — параметры описывающие параболическую форму абразивного зерна, h — глубина внедрения в металл абразивного зерна, β — показатель степени распределения зерен по высоте h .

Интеграл, входящий в (2.32) выражается через гамма-функцию $\Gamma(x)$, поэтому

$$P(x) = \exp(-\rho \cdot x^p) \quad \text{при } x \geq 0, \quad (2.33)$$

где

$$\rho = \frac{2 \cdot k \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)}{b \cdot c^m \cdot \Gamma(\beta+1)}, \quad (2.34)$$

$$p = \beta + m + 2. \quad (2.35)$$

Математическое ожидание высоты профиля (над уровнем наиболее глубоко внедрившегося зерна) равно

$$M = \Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right) \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{1}{p}}, \quad (2.36)$$

Среднеквадратическая высота неровностей

$$H_{СК} = \sqrt{\Gamma\left(\frac{p+2}{p}\right) - \Gamma^2\left(\frac{p+1}{p}\right)} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{1}{p}}, \quad (2.37)$$

Часто удобно пользоваться безразмерной высотой профиля, приняв что

$$\square * = \frac{\square}{H_{СК}}, \quad (2.38)$$

Закон распределения высоты микронеровностей при этом будет

$$P(\square *) = \exp\left[-\left(\square * \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{p+2}{p}\right) - \Gamma^2\left(\frac{p+1}{p}\right)}\right)^p\right] = \exp[-(\square * \cdot \xi)^p], \quad (2.39)$$

где

$$\xi = \sqrt{\Gamma\left(\frac{p+2}{p}\right) - \Gamma^2\left(\frac{p+1}{p}\right)}$$

Такая запись весьма удобна тем, что форма кривой распределения зависит лишь от одного параметра p .

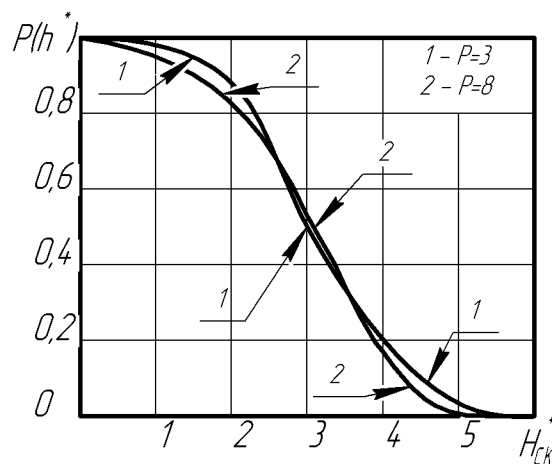


Рисунок 2.6. Распределение высот микронеровностей

На рисунке 2.6 изображены графики распределения высот микронеровностей $P(h^*)$, из которых видно, что с увеличением P асимметрия распределения возрастает. При этом опорная поверхность на относительно высоких уровнях увеличивается, что благоприятно сказывается на работоспособности детали [6]. Выражение (2.36) записываем в виде

$$H_{СК} = r_1 \cdot \left(\frac{b \cdot c^m}{k} \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (2.39)$$

Аналогично, среднеарифметическая высота неровностей R_a

$$R_a = r_1 \cdot \left(\frac{b \cdot c^m}{k} \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (2.40)$$

Для облегчения пользования формулами произведен расчет коэффициентов r_1 и r_2 , которые зависят, практически, только от β и не зависят от формы абразивного зерна m . (рисунок 2.7)

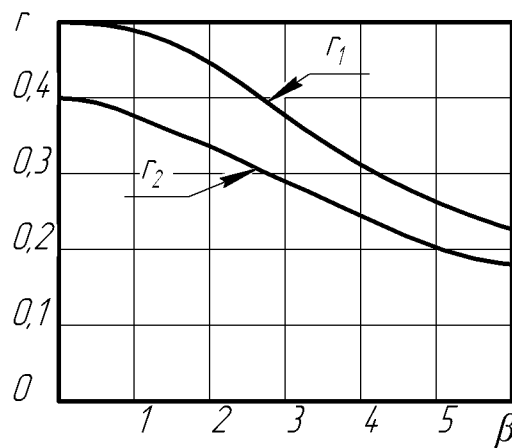


Рисунок 2.8. Определение коэффициентов r_1 и r_2 .

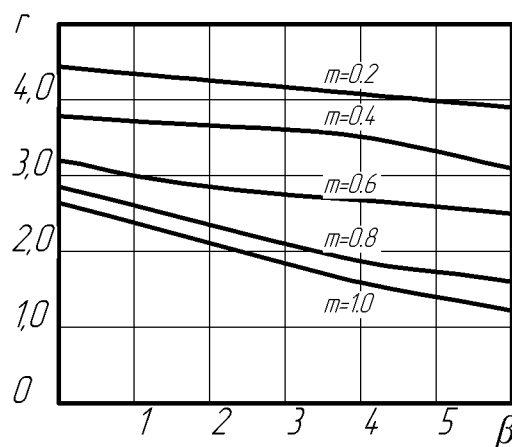


Рисунок 2.8. Определение коэффициента r_3 .

Шаг неровностей по средней линии S_m представлен в виде

$$S_m = \frac{b \cdot (1+\beta) \cdot (2+\beta)}{k \cdot M^{\beta+2} \cdot \sin \alpha} \cdot \exp(\rho \cdot M^p), \quad (2.41)$$

или

$$S_m = \frac{r_3}{\sin \alpha} \cdot \left(\frac{b}{k}\right)^{\frac{m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{c}\right)^{\frac{m \cdot (\beta+2)p}{p}} \quad \text{делить на } p \text{ (с числителя убрать)}, \quad (2.42)$$

где r_3 – коэффициент, зависящий от β и m .

$$r_3 = \frac{(\beta+2) \cdot (\beta+1)}{\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)\right]^{\beta+2}} \cdot \left[\frac{2 \cdot \Gamma(m+2) \cdot \Gamma(\beta+1)}{\Gamma(p+1)}\right]^{\frac{\beta+2}{p}} \cdot \exp\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)\right]^p. \quad (2.43)$$

Графики определения коэффициента r_3 приведены на рисунке 2.8. Сравнивая показатели степеней при разных параметрах, входящих в формулу (2.41), видим, что режимы обработки и распределение зёрен по высоте мало влияют на шаг неровностей S_m , в то время как форма зёрен влияет весьма заметно, с увеличением размеров зёрен шаг S_m значительно возрастает [3].

2.6.2. Геометрические параметры взаимодействия брусков и детали

Математическое ожидание площадей проекций поверхности контакта единичного зерна высотой H_3 с деталью выражается через зависимость

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3) = \frac{2}{c^m} \cdot \int_0^\infty z^m \cdot \exp[-\rho \cdot (z + H_3)^p] \cdot dz, \\ \bar{S}_o(H_3) = \frac{\pi \cdot m}{c^{2 \cdot m}} \cdot \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-\rho \cdot (z + H_3)^p] \cdot dz. \end{cases} \quad (2.44)$$

где $\bar{S}_p(H_3)$ — проекция сечения недеформированной стружки; $\bar{S}_o(H_3)$ — проекция вдавленного абразивного зерна; H_3 — высота абразивного зерна при контакте с металлом; C , m — параметры описывающие параболическую форму абразивного зерна.

Для удобства введём нормирование высоты,

$$H_3^* = \frac{H_3}{H_{СК}} = \frac{H_3 \cdot \rho^{\frac{1}{p}}}{\varepsilon}, \quad (2.45)$$

тогда

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3^*) = \frac{2}{C^{m \cdot \rho} \frac{m+1}{p}} \cdot \int_0^\infty z^m \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] \cdot dz, \\ \bar{S}_o(H_3^*) = \frac{\pi \cdot m}{C^{2 \cdot m \cdot \rho} \frac{2 \cdot m}{p}} \cdot \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] \cdot dz. \end{cases} \quad (2.46)$$

Выразить эти интегралы в конечном виде через элементарные функции невозможно, поэтому запишем так:

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3^*) = 2 \cdot f_p(H_3^*, \beta, m) \cdot \left(\frac{b}{k}\right)^{\frac{m+1}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{m \cdot (\beta+1)}{p}}, \\ \bar{S}_o(H_3^*) = \pi \cdot m \cdot f_o(H_3^*, \beta, m) \cdot \left(\frac{b}{k}\right)^{\frac{2 \cdot m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{2m \cdot (\beta+2)}{p}}. \end{cases} \quad (2.47)$$

где $f_p(H_3^*, \beta, m)$ и $f_o(H_3^*, \beta, m)$ выражаются системой уравнений

$$\begin{cases} f_p(H_3^*, \beta, m) = \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{m+1}{p}} \cdot \int_0^\infty z^m \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] dz, \\ f_o(H_3^*, \beta, m) = \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{2 \cdot m}{p}} \cdot \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] dz, \end{cases} \quad (2.48)$$

Для оптимизации практического применения зависимостей рассмотрим графики этих функций рисунки 2.9, 2.10.

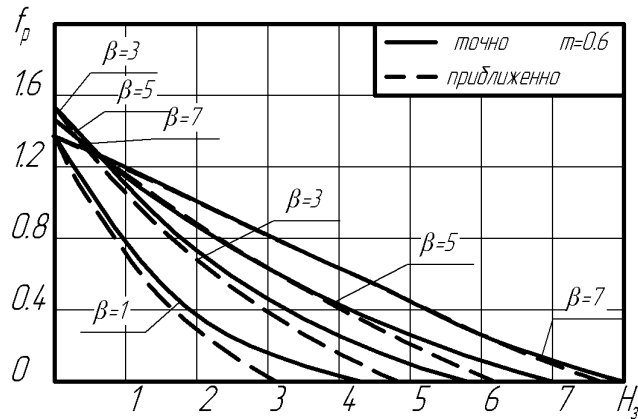


Рисунок 2.9. График функции $f_p(H_3^*, \beta, m)$.

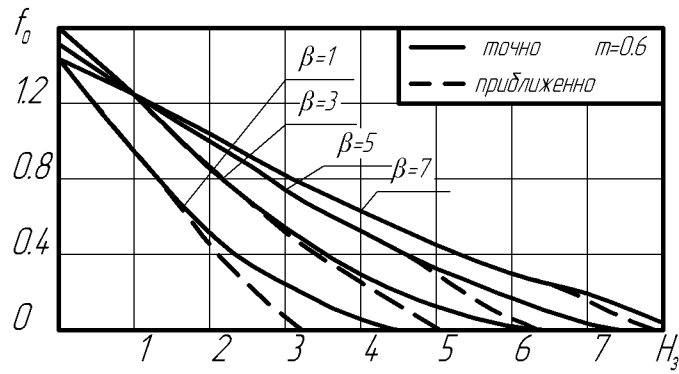


Рисунок 2.10. График функции $f_0(H_3^*, \beta, m)$.

Сравнивая решения (2.48) с приближенным расчетом площадей $\bar{S}_p(H_3)$ недеформированной стружки и $\bar{S}_0(H_3)$ вдавливания зерна в металл, не учитывающим шероховатость поверхности детали, получаем что высота профиля детали считается постоянной и равной математическому ожиданию M , следовательно:

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3) \approx 2 \cdot \int_0^{(M-H_3)} x(z) \cdot dz = \frac{2 \cdot (M-H_3)^{m+1}}{c^m \cdot (m+1)}, \\ \bar{S}_0(H_3) \approx \frac{\pi}{2} [x(M-H_3)]^2 = \frac{\pi \cdot (M-H_3)^{2 \cdot m}}{2 \cdot c^{2 \cdot m}}. \end{cases} \quad (2.49)$$

Подставляя сюда значения M из (2.48) и используя нормировку высоты H_3 (2.45) найдем значения функций.

$$\begin{cases} f_p(H_3^*, \beta, m) \approx \frac{[\Gamma(\frac{p+1}{p})]^{m+1}}{(m+1)} \cdot \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{m+1}{p}} \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon \cdot H_3^*}{\Gamma(\frac{p+1}{p})} \right]^{m+1}, \\ f_0(H_3^*, \beta, m) \approx \frac{[\Gamma(\frac{p+1}{p})]^{2m}}{2 \cdot m} \cdot \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{2 \cdot m}{p}} \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon \cdot H_3^*}{\Gamma(\frac{p+1}{p})} \right]^{2m}. \end{cases} \quad (2.50)$$

На рисунках 2.9, 2.10 пунктиром показаны графики приближенных функций f_p и f_0 . Мы видим, что для зерен, глубоко внедряющихся в металл (H_3^* - мало), точность приближения хорошая, а для зерен имеющих малую глубину внедрения (H_3^* - велико), расхождение значительно.

Рассмотрим суммарные площади проекций поверхностей контакта всех зерен, имеющих на единице площади брусков [6].

Поскольку $\bar{S}_p = b$ независимо от вида функций $n(h)$ распределения вершин по высоте и $z(x)$ функцией, описывающей усреднённый профиль вершин зерен, то вычисляем только:

$$\bar{S}_o = \frac{\pi \cdot m \cdot k}{C^{2 \cdot m}} \cdot \int_0^\infty H_3^\beta \cdot \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-\rho \cdot (z + H_3)^p] \cdot dz \cdot dH_3. \quad (2.51)$$

После ряда преобразований получим:

$$\bar{S}_o = \frac{\pi \cdot m \cdot \Gamma(2 \cdot m) \cdot \Gamma(\beta + 1) \cdot \Gamma\left(\frac{\beta + 2 \cdot m + 1}{p}\right)}{p \cdot \Gamma(\beta + 2 \cdot m + 1)} \cdot \frac{k}{C^{2 \cdot m}} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{\beta + 2 \cdot m + 1}{p}}, \quad (2.52)$$

или

$$\bar{S}_o = \pi \cdot r_4 \cdot b^{\frac{\beta + 2 \cdot m + 1}{p}} \cdot k^{\frac{1 - m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{m \cdot (\beta + 3)}{p}}, \quad (2.53)$$

где

$$r_4 = \frac{m \cdot \Gamma(2 \cdot m) \cdot \Gamma(\beta + 1) \cdot \Gamma\left(\frac{\beta + 2 \cdot m + 1}{p}\right)}{p \cdot \Gamma(\beta + 2 \cdot m + 1)} \cdot \left[\frac{\Gamma(p + 1)}{2 \cdot \Gamma(m + 1) \cdot \Gamma(\beta + 1)} \right]^{\frac{\beta + 2 \cdot m + 1}{p}}. \quad (2.54)$$

Коэффициент r_4 , зависящий от β показателя степени распределения зерен по высоте и m параметра, описывающего форму зерна, представлен на рисунок 2.11.

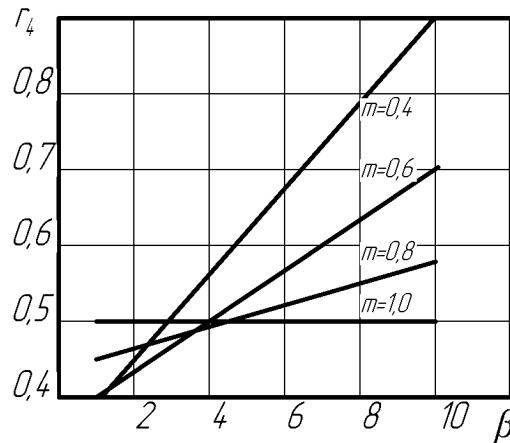


Рисунок 2.11. Определение коэффициента r_4 .

Зная площади проекций поверхности контакта бруска с деталью, можем определить среднее значение переднего угла γ_{cp} зерен при стационарном съеме:

$$\gamma_{cp} = -\arctg \left[\pi \cdot r_4 \cdot \left(\frac{1}{b}\right)^{\frac{1 - m}{p}} \cdot k^{\frac{1 - m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{m \cdot (\beta + 3)}{p}} \right], \quad (2.55)$$

Число режущих зерен на единицу площади брусков

$$n_p = k \cdot \int_0^\infty z^\beta \cdot \exp[-\rho \cdot (z + \square_{кр})^p] \cdot dz. \quad (2.56)$$

Выполнив те же преобразования, что и для площадей контакта, получим:

$$n_p(\square_{кр}^*) = f_n(\square_{кр}^*, \beta, m) \cdot b^{\frac{\beta+1}{p}} \cdot k^{\frac{m+1}{p}} \cdot C^{\frac{m(\beta+3)}{p}}, \quad (2.57)$$

где

$$f_n(\square_{кр}^*, \beta, m) = \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{\beta+1}{p}} \cdot \int_0^\infty z^\beta \cdot \exp[-(z + \square_{кр}^* \cdot \varepsilon)^p] \cdot dz. \quad (2.58)$$

Графики функции $f_n(\square_{кр}^*, \beta, m)$ представлено на рисунке 2.12.

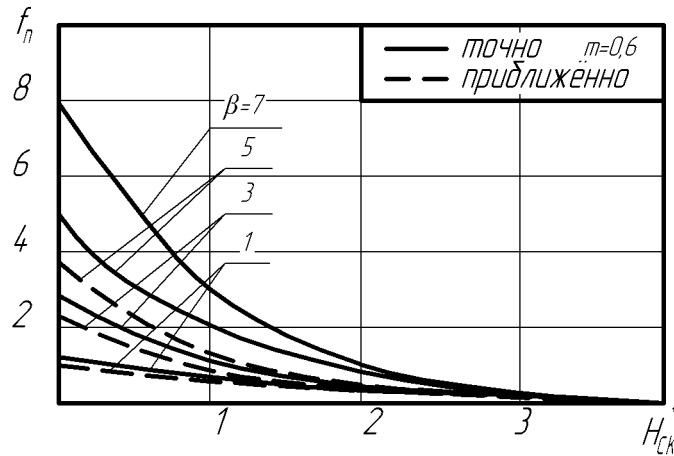


Рисунок 2.12. Определение функции $f_n(\square_{кр}^*, \beta, m)$.

В предложении, что высота профиля детали равна математическому ожиданию M , находим приближенные значения числа режущих зерен.

При этом формула (2.57) сохраняется, а приближенное значение $f_n(\square_{кр}^*, \beta, m)$ будет

$$f_n(\square_{кр}^*, \beta, m) \approx \frac{[\Gamma(\frac{p+1}{p})]^{\beta+1}}{\beta+1} \cdot \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{\beta+1}{p}} \cdot \left[1 - \frac{\square_{кр}^* \cdot \varepsilon}{\Gamma(\frac{p+1}{p})} \right]^{\beta+1}. \quad (2.59)$$

На рисунке 2.12 приближенные значения f_n показаны пунктиром для трех значений β .

Общее число контактных зерен получим из (2.57, 2.58) полагая $\square_{кр}^* = 0$.

$$n_k = r_5 \cdot b^{\frac{\beta+1}{p}} \cdot k^{\frac{m+1}{p}} \cdot C^{\frac{m(\beta+1)}{p}}, \quad (2.60)$$

где r_5 – коэффициент, зависящий от β и m представлен на рисунке 2.13.

$$r_5 = \frac{\Gamma\left(\frac{\beta+1}{p}\right)}{p} \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{\beta+1}{p}}. \quad (2.61)$$

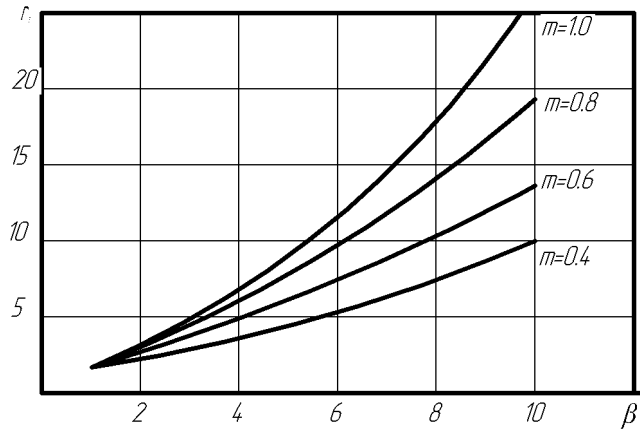


Рисунок 2.13. Определение коэффициента r_5 .

Найденные зависимости дают возможность перейти к расчёту усилий резания, температурных зависимостей [3, 4].

Если допустить, что условные напряжения среза постоянны и равны пределу текучести δ_s металла в данных условиях, а коэффициент трения по задней поверхности равен μ_m , то тангенциальную F_p и нормальную Q составляющие силы резания найдем по формулам

$$F_p = \delta_s \cdot (\bar{S}_p + \mu_T \cdot \bar{S}_o) = \delta_s \cdot \left[b + \frac{\pi \cdot r_4 \cdot \mu_T \cdot b^{\frac{\beta+2m+1}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}}}{C^{\frac{m \cdot (\beta+3)}{p}}} \right], \quad (2.62)$$

$$Q = \delta_s \cdot \bar{S}_o = \delta_s \cdot \frac{\pi \cdot r_4 \cdot b^{\frac{\beta+2 \cdot m+1}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}}}{C^{\frac{m \cdot (\beta+3)}{p}}}. \quad (2.63)$$

При хонинговании с заданным усилием прижима абразивных зёрен к металлу Q интенсивность съёма b будет равна

$$b = \left(\frac{Q}{\pi \cdot \delta_s \cdot r_4} \right)^{\frac{p}{\beta+2m+1}} \cdot \left(\frac{1}{k} \right)^{\frac{1-m}{\beta+2m+1}} \cdot C^{\frac{m(\beta+3)}{\beta+2m+1}}. \quad (2.64)$$

Таким образом, зная нормальное усилие, действующее на зерна, характеристики абразивных брусков и свойства обрабатываемого металла, можно определить интенсивности съёма, а также все другие рассмотренные параметры процесса хонингования. Однако нужно учитывать, что на усилие Q оказывает влияние обратные связи, возникающие при движении шлама и

СОЖ в зоне резания, а также трение в механизме хонинговальной головки [1, 2].

2.7. Исследование закономерностей повышения давления шлама и СОЖ

2.7.1. Движение шлама

Образующийся при резании шлам не может свободно удаляться из зоны резания, так как неровности связки брусков и выступающие из неё абразивные зёрна задерживают твёрдые частицы. Скапливающиеся под бруском частицы шлама давят друг на друга, на поверхности бруска и детали, что создаёт повышенное давление шлама в подбрусковом пространстве. Под действием этого давления, а также сил трения о движущиеся относительно инструмента поверхности детали шлам вытесняется из-под бруска, и таким образом устанавливается динамическое равновесие между поступлением и удалением шлама в зоне резания (рисунок 2.14).

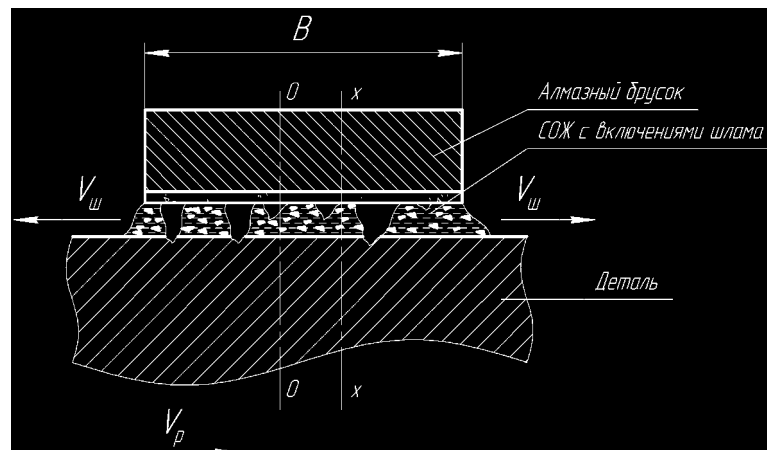


Рисунок 2.14. Схема движения шлама

$V_{ш}$ - скорость шлама; V_p - скорость резания.

При хонинговании хрупких и малопластичных материалов стружка имеет вид мелких чешуек, которые могут передвигаться в подбрусковом пространстве.

В нормальных условиях зона резания и находящиеся в ней частицы смочены СОЖ, поэтому трение в шламе носит жидкостный характер, а его движение подобно течению вязкой жидкости. Аналогия с вязкой жидкостью приближенно отражает важные стороны процесса и даёт возможность проанализировать закономерности движения шлама с помощью известных методов гидродинамики [29,63, 73].

Связь шлама с поверхностью бруска, имеющей значительную глубину неровностей, гораздо больше, чем со сравнительно гладкой поверхностью. Поэтому в первом приближении связь шлама с деталью можно не учитывать. Так как высота зазора δ_0 между связкой брусков и деталью меньше ширины B брусков ($\delta_0 \ll B$), а длина L брусков велика ($L \gg B$), то течение шлама считается одновременным и симметричным относительно сечения 0-0.

При этих условиях давление шлама в зазоре описывается уравнением [73]:

$$\frac{dQ_{ш}}{dx} = -R \cdot \eta_{ш} \cdot [V_{ш}(x)]^{\alpha_1}, \quad (2.63)$$

где R – коэффициент гидравлического сопротивления движению шлама в подбрусковом пространстве; α_1 – показатель степени; $\eta_{ш}$ – вязкость шлама; $Q_{ш}$ – среднее давление шлама; $V_{ш}(x)$ – скорость шлама в сечении X-X.

Количество шлама, проходящее через некоторое сечение X-X, равно объёму металла, снятому соответствующей поверхностью бруска, поэтому

$$V_{ш}(x) = \frac{k_n \cdot V_p \cdot b \cdot x}{\delta_0}, \quad (2.64)$$

где k_n – отношение плотности металла к плотности шлама; x – количество шлама; V_p – скорость резания; b – интенсивность съёма.

Решая уравнение (2.18), находим давление в сечении X-X, а затем среднее давление шлама на брусок:

$$Q_{ш} = C_{ш} (V_p \cdot b)^{\alpha_1} \cdot b^{\alpha_1+1}, \quad (2.65)$$

где для удобства записи обозначено

$$C_{ш} = \frac{R \cdot \eta_{ш}}{\alpha_1 + 2} \cdot \left(\frac{k_n}{\delta_0}\right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\alpha_1 + 1}. \quad (2.66)$$

Выражения (2.65), (2.66) показывают, что давление шлама увеличивается с ростом скорости резания, интенсивности съёма, вязкости шлама, зависящей от вязкости СОЖ, и ширины брусков. Увеличение зазора между связкой и поверхностью детали уменьшает давление шлама.

2.7.2. Движение СОЖ

Следует различать два вида течения СОЖ в подбрусковом пространстве:

- вынужденное течение под действием относительного движения бруска и детали;
- капиллярное течение между частицами шлама.

Капиллярное течение происходит вблизи активных зёрен, где непрерывно образуется большое количество частиц стружки, имеющих сухие поверхности. Проникновение СОЖ к этим участкам осуществляется благодаря силам поверхностного натяжения. Для устойчивого смачивания всех участков зоны резания необходимо, чтобы скорость капиллярного движения СОЖ была достаточно высокой. Иначе СОЖ не будет успевать проникать между движущимися частицами стружки к режущим зёрнам, трение из жидкостного перейдёт в сухое, стружка внедрится в связку, и наступит загрязнение брусков.

Поэтому при выборе СОЖ для хонингования необходимо обеспечить в числе её прочих физико-химических свойств максимальную скорость капиллярного движения (растекаемость, т.е. свойство жидкости распространяться по твёрдой поверхности под действием силы тяжести) СОЖ. Капиллярное движение СОЖ не сопровождается повышением давления.

а. Гидродинамический клин

Гидродинамический клин образуется, если зазор между скользящими телами сужается в направлении движения жидкости. При хонинговании сужение зазора между связкой и поверхностью детали происходит благодаря тому, что под действием окружной силы резания F_{OK} абразивные бруски упруго деформируют корпус хонголовки и поворачиваются на некоторый угол.

В начальный период хонингования за счёт погрешностей формы обрабатываемых деталей силы резания максимальны, следовательно, упругий поворот брусков также максимален. В этот же период происходит наиболее интенсивный износ брусков, поэтому их поверхность после приработки выравнивается относительно поверхности деталей в положении, соответствующем максимальному повороту брусков. На втором этапе, через 10-20 с от начала хонингования, после устранения основных погрешностей формы детали, силы резания снижаются в 1,5-3 раза, и бруски под действием упругости корпуса хонголовки поворачиваются в обратном направлении (рисунок 2.15).

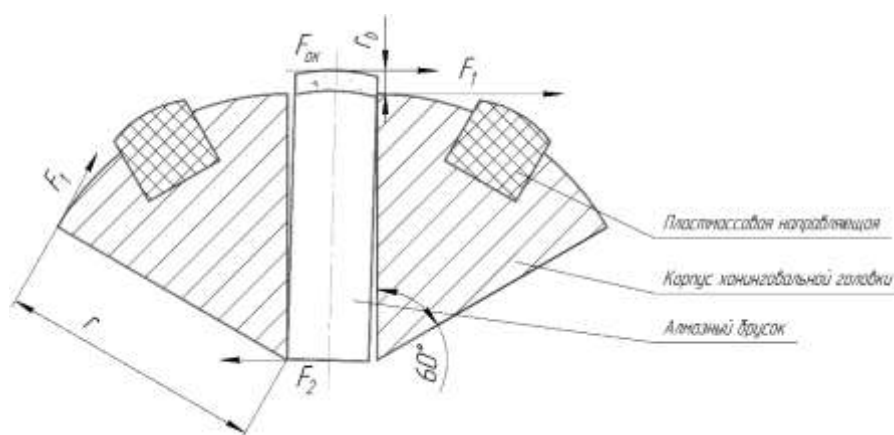


Рисунок 2.15. Схема действующих сил в хонголовке

Таким образом, на втором этапе хонингования течение СОЖ в зоне резания происходит в сужающемся зазоре, и возникает гидродинамический клин (рисунок 2.16), подобный действующему в подшипниках скольжения.

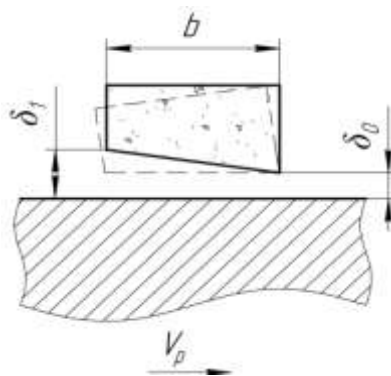


Рисунок 2.16. Схема гидродинамического клина

δ_0 -толщина зазора на входе; δ_1 - толщина зазора на выходе.

Среднее значение давления СОЖ в подбрусковом пространстве можно определить на основе зависимостей, известных из теории смазки [14]:

$$Q_C = \frac{6 \cdot V_p \cdot \eta_c \cdot b}{\delta^2} \cdot \left(\frac{\ln(1+k)}{k^2} - \frac{2}{k \cdot (k+2)} \right), \quad (2.67)$$

где: η_c – вязкость СОЖ; b – ширина алмазного бруска; $\delta = (\delta_1 - \delta_0)$ – разность толщин зазора на входе и выходе потока СОЖ; $k = \frac{\delta}{\delta_0}$ – коэффициент сужения зазора.

Для определения величины δ рассмотрим деформацию корпуса хонголовки. Окружная сила F_{OK} , действуя на бруски, создает в стенках корпуса реакции:

$$F_1 = \frac{r+r_b}{r} \cdot F_{OK}, F_2 = \frac{r_b}{r} \cdot F_{OK}. \quad (2.68)$$

Каждую из стенок корпуса приближенно можно рассматривать как призматический стержень треугольного сечения, жёстко закреплённый по концам и работающий на кручение (рисунок 2.15). Геометрическая жёсткость при кручении такого стержня, имеющего сторону сечения r и высоту h , равна:

$$J_T = \frac{1}{30} \cdot r \cdot \square^3. \quad (2.69)$$

В данном случае

$$\square = r \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (2.70)$$

поэтому

$$J_T = 0,0216 \cdot r^4. \quad (2.71)$$

При изменении окружной силы на величину ΔF_{OK} сужение зазора будет равно

$$\delta = \frac{M_{KP} \cdot l_0 \cdot b}{2 \cdot G \cdot J_T} = 23,2 \cdot \frac{\Delta F_{OK} \cdot (r_b + \frac{1}{2}r) \cdot l_0 \cdot b}{G \cdot r^4}, \quad (2.72)$$

где G – модуль сдвига материала корпуса хонголовки; l_0 – длина скручиваемого участка стенки хонголовки.

Фактически G может иметь несколько большее значение из-за контактных деформаций, за счёт выемки под пластмассовую направляющую, выполненную в корпусе хонголовки. При необходимости все эти факторы можно учесть в уточнённом расчёте деформаций.

В качестве примера рассчитаем гидродинамическое давление при алмазном хонинговании чугунных гильз, приняв следующие исходные данные:

$r_b = 7$ мм, $r = 28$ мм, $l_0 = 30$ мм, $b = 12$ мм, $\delta_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ мм, $G = 0,785 \cdot 10^5$ МПа, $V_p = 60$ м/мин, $\alpha = 60^\circ$, $\Delta F_{OK} = 980$ Н, $\eta_c = 1,08 \cdot 10^{-9}$ Н/мм² (для керосина при $T = 40^\circ$ С), $\eta_c = 13,2 \cdot 10^{-9}$ Н/мм² (для солярового масла при $T = 40^\circ$ С).

Величина сужения зазора:

$$\delta = 23,2 \cdot \frac{980 \cdot (7 + \frac{1}{2} \cdot 28) \cdot 30 \cdot 12}{0,785 \cdot 10^5 \cdot 28^4} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ (мм)}.$$

Среднее давление СОЖ на бруски (при охлаждении керосином):

$$Q_c = \frac{6 \cdot 1000 \cdot 1,08 \cdot 10^{-9} \cdot 12}{(5 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \left(\frac{\ln 1,72}{0,72^2} - \frac{2}{0,72 \cdot 2,72} \right) = 0,0775 \left(\frac{H}{\text{мм}^2} \right),$$

а при охлаждении СОЖ с вязкостью, близкой к соляровому маслу, давление возрастёт до $0,94$ Н/мм²

С увеличением давления в подбрусковом пространстве абразивные зёрна внедряются в металл на меньшую глубину, что увеличивает зазор δ_0 и тем самым ограничивает рост давления СОЖ.

При хонинговании брусками на пористых связках давление СОЖ уменьшается за счёт фильтрации жидкости из зоны резания через поры связки.

б. Вязкостный клин

Переменные температуры и вязкость в потоке СОЖ приводят к повышению гидродинамического давления. Подобное явление, происходящее в подшипниках скольжения, называется вязкостным клином. Физическая сущность этого явления следующая.

К нагретому бруску с поверхности детали подходит охлажденная СОЖ, которая после прохождения зоны резания нагревается почти до той же температуры, что и брусок. Поэтому на входе в зазор вязкость СОЖ вблизи поверхности детали больше, чем у поверхности бруска, а на выходе из зазора градиент вязкости значительно меньше. Вследствие этого движущаяся поверхность детали затягивает в зазор большее количество СОЖ, чем выносит из него (рисунок 2.17). Избыточный приток жидкости в подбрусковое пространство вызывает повышение её давления, которое тормозит поток на входе и ускоряет его на выходе, выравнивая расходы во всех сечениях.

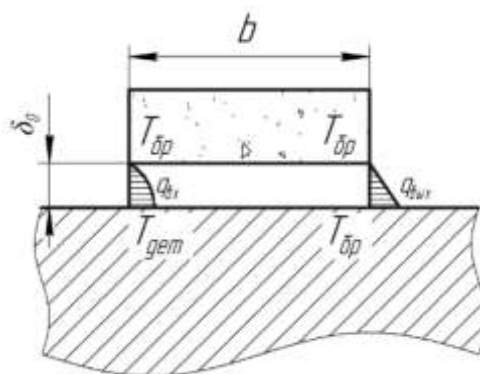


Рисунок 2.17. Схема образования вязкостного клина

Ввиду того что повышение давления зависит от избыточного притока СОЖ на входе в зазор, для приближенной оценки давления в вязкостном клине можно сравнить избыточный приток СОЖ при вязкостном и гидродинамическом клине. Для этого условно принимаем, что повышение давления не влияет на поток жидкости в зазоре.

При гидродинамическом клине разность расходов на входе и выходе зазора:

$$q_{изб} = \frac{1}{2} \cdot V_p \cdot (\delta_1 - \delta_0), \quad (2.73)$$

или в относительных величинах:

$$\frac{q_{изб}}{q_{вых}} = k. \quad (2.74)$$

Для расчёта $q_{изб}$ при вязкостном клине полагаем толщину зазора постоянной и равной δ_0 . Пусть разность температур поверхностей бруска и детали на входе в зазор равна ΔT , а на выходе равна нулю. Изменение температуры по толщине зазора (z) близко к линейному, поэтому

$$T_z = T_g + \frac{\Delta T}{\delta_0} \cdot z. \quad (2.75)$$

Вязкость СОЖ зависит от температуры экспоненциально:

$$\eta(z) = \eta_g \cdot e^{-\frac{A \cdot \Delta T}{\delta_0} \cdot z}, \quad (2.76)$$

где A – постоянная, зависящая от физических свойств СОЖ; η_g – вязкость при температуре детали на выходе из зазора.

Распределение скорости СОЖ в потоке $u(z)$, при отсутствии влияния давления, можно найти из уравнения Рейнольдса:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta(z) \cdot \frac{\partial u(z)}{\partial z} \right] = 0. \quad (2.77)$$

Решая уравнение и выполнив интегрирование по z , находим расход СОЖ на входе:

$$q_{bx} = V_p \cdot \delta_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{\ln n} + \frac{1}{n-1} \right), \quad (2.78)$$

где для удобства введено обозначение для величины отношения вязкостей СОЖ при температуре детали и температуре бруска:

$$n = \frac{\eta_g}{\eta_b} = e^{A \cdot \Delta T}. \quad (2.79)$$

Избыточный расход при этом равен:

$$q_{изб} = V_p \cdot \delta_0 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\ln n} + \frac{1}{n-1} \right), \quad (2.80)$$

или в относительном виде:

$$\frac{q_{изб}}{q_{вых}} = 1 - \frac{2}{\ln n} + \frac{2}{n-1}. \quad (2.81)$$

Численные расчёты по приведённым зависимостям показывают, что в условиях процесса хонингования избыточный приток СОЖ для вязкостного клина составляет 0,1–0,3 этой величины для гидродинамического клина, что приводит к соответствующему повышению давления СОЖ.

Закономерности влияния различных физических факторов на давление в вязкостном клине аналогичны рассмотренным выше для гидродинамического клина. При необходимости более подробного анализа явления вязкостного клина можно обратиться к исследованиям по теории смазки.

2.8. Влияние давления шлама и СОЖ в подбрусковом пространстве на процесс хонингования

Повышенное давление шлама и СОЖ в зоне резания уменьшает усилие, внедряющее абразивные зёрна в металл, но общее усилие, действующее на деталь и вызывающее её деформацию, не снижается. Вследствие этого происходит уменьшение производительности и ухудшение точности обработки.

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

$$V_{P.П} = \frac{Q \cdot \delta_0^2}{Q_c \cdot \eta_c \cdot b \cdot (1+t)}, \quad (2.82)$$

$$b_{П} = \frac{Q \cdot \delta_0^2}{Q_c \cdot \eta_c \cdot V_p \cdot (1+t)}. \quad (2.83)$$

Увеличение вязкости СОЖ повышает давление в подбрусковом пространстве, снижает интенсивность и скорость съёма металла, но при этом улучшается чистота обработки, так как абразивные зёрна внедряются на меньшую глубину.

Такое влияние вязкости СОЖ на производительность обработки экспериментально обнаружено [63, 73], но физические механизмы этой зависимости не были выяснены. Однако в процессе исследований установлено, что при хонинговании закалённой стали алмазными брусками добавление в керосин 1/5 части масла И12 [13] уменьшает съём на 20%, а 1/2 части – на 30–40%.

Увеличение вязкости также должно снижать предельную скорость резания (рисунок 2.18). Например, при хонинговании с охлаждением чистым керосином давление на бруски $Q = 1\text{МПа}$, $t = 1,1$ (см. 4.6), предельная скорость резания

$$V_{P.L.} = \frac{1 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2}{0,15 \cdot 1,08 \cdot 10^{-9} \cdot 12 \cdot 2,1} = 367,43(\text{м/мин})$$

Аналогично при использовании СОЖ с вязкостью, близкой к вязкости солярового масла, $V_{P.L.} = 30,06$ (м/мин).

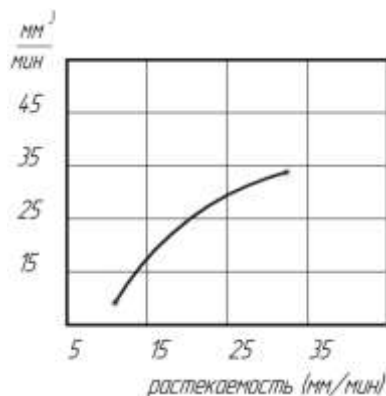


Рисунок 2.18. Влияние растекаемости СОЖ на производительность хонингования

Предельная скорость резания и ширина брусков взаимосвязаны, поэтому если задана скорость резания V_P , то можно найти предельную ширину брусков $b_{П.}$. Например, при $V_{P.L.} = 160$ (м/мин), СОЖ – керосин

$$b_{П.} = \frac{0,98 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2}{0,13 \cdot 1,7 \cdot 10^{-9} \cdot 160 \cdot 2,1} = 20(\text{мм}),$$

а при СОЖ с вязкостью, близкой к соляровому маслу, $b_{П.} = 4,0\text{мм}$.

Предельные скорость резания и ширина брусков зависят также от высоты зазора между связкой и деталью, которая определяется в основном

зернистостью брусков. Поэтому применение мелкозернистых брусков требует снижения скорости резания и их ширины.

Из проведённых расчётов 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. Опытные данные по выбору скорости резания приводятся во многих работах [29, 63, 73], в них указывается, что оптимальная скорость резания при хонинговании чугуна с использованием маловязких СОЖ равна 80–100 м/мин, а с увеличением вязкости требуемая скорость снижается до 50 м/мин. Исследования влияния вязкости на оптимальную ширину брусков отсутствуют. На величину давления шлама и СОЖ оказывает влияние угол наклона траекторий брусков к оси детали α . С увеличением α и приближению его к 90° происходят два конкурирующих процесса, а именно:

- уменьшение длины пути, проходимого частицами шлама под бруском, что снижает давление в подбрусковом пространстве и облегчает съём металла;
- зерна пересекают гребешки металла под меньшим углом, что ухудшает условия резания.

Поэтому должно быть определено оптимальное значение угла α . Из практики известна подобная зависимость производительности от угла α (рисунок 2.19) [73].

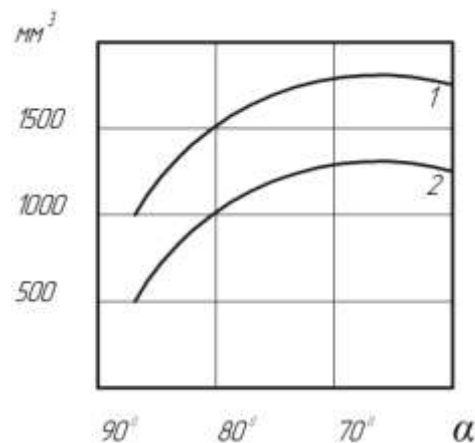


Рисунок 2.19. Зависимость съема металла от угла α при продолжительности опыта 120 с (1 – $Q=0,29$ МПа, 2 – $Q=0,14$ МПа)

2.9. Хонингование брусками с прерывистой рабочей поверхностью

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

Использование узких брусков приводит к уменьшению суммарной режущей поверхности, поэтому для поддержания высокой производительности одновременно следует увеличить количество брусков в хонголовке [73].

В промышленных масштабах бруски можно получать методами порошковой металлургии с применением фигурных пуансонов, а в небольших количествах – путем прорезки канавок на сплошных брусках. Расположение канавок на поверхности брусков может быть продольным, поперечным, наклонным и перекрестным.

Оценим с точки зрения положения о повышении давления в подбрусковом пространстве потенциальную эффективность хонинговальных брусков с прерывистой рабочей поверхностью.

Соотношение интенсивности съема при сплошных и прерывистых брусках:

$$k_{эф} = \left(\frac{b^*}{b}\right) = \left(\frac{Q-Q_{II}^*}{Q-Q_{II}}\right)^t, \quad (2.84)$$

где значком (*) отмечены параметры для прерывистых брусков.

Пусть, например, для условий хонингования: $r_b=7$ мм, $r=28$ мм, $l_0=30$ мм, $b=12$ мм, $\delta_0=5\cdot 10^{-3}$ мм, $G=0,78\cdot 10^5$ МПа, $V_p=60$ м/мин, $\alpha=60^\circ$, $\Delta F_{OK}=9,8$ МПа, $\eta_c=1,66\cdot 10^{-9}$ МПа*с, СОЖ (керосин) – вместо сплошных брусков применены бруски с прерывистой рабочей поверхностью [56], которые имеют равную площадь рабочей поверхности и две продольные канавки. При этом ширина каждого сплошного участка будет в 3 раза меньше, следовательно, и давление СОЖ снизится в 3 раза, а скорость съема увеличится:

$$k_{\text{эф}} = \left(\frac{0,98 - \frac{0,13}{3}}{0,98 - 0,13} \right)^{1,1} = 1,14$$

При использовании более вязких СОЖ повышение производительности будет более значительно.

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. На рисунке 2.20 показано влияние отношения длины участка a к его ширине b на уменьшение давления СОЖ по сравнению с бруском бесконечной длины. Экспериментальные данные подтверждают повышение производительности хонингования при использовании брусков с прерывистой рабочей поверхностью на 20–60%.

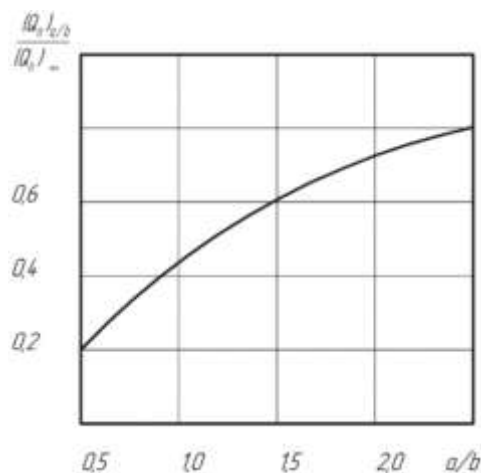


Рисунок 2.20. Влияние соотношения a/b на гидродинамическое давление СОЖ

Проведённое исследование даёт теоретическое обоснование применению хонинговальных брусков с прерывистой рабочей поверхностью и наряду с имеющими экспериментальными данными (глава 4 диссертационной работы) позволяет рекомендовать их к промышленному производству.

2.10. Теоретическое обоснование методики исследования микрогеометрии абразивных инструментов

Высокой точностью характеризуется метод исследования формы профиля вершин зёрен, основанный на царапании абразивным инструментом полированных образцов. Однако из-за кривизны поверхности инструмента глубина царапин отличается от высоты выступания зёрен (рисунок 2.21), в силу чего данный метод не позволяет непосредственно измерить распределение зёрен по высоте и для этой цели не применяется.

Если установить математическую зависимость между законами распределения высоты зёрен и глубины царапин, то появится возможность путем царапания образцов и последующего профилографирования их поверхности с достаточной точностью найти как параметры формы профиля зёрен, так и закон распределения их по высоте.

Для вывода расчётных зависимостей рассмотрим схему нанесения царапин на образец (рисунок 2.21), который может быть цилиндрическим или плоским ($R_0 = \infty$).

Пусть уровни отсчёта высоты зёрен (1-1) и глубины царапин (2-2) в центральном сечении 0 совпадают, а направление отсчёта приняли в тело инструмента.

За счёт кривизны поверхностей инструмента и образца глубина царапины, оставленной некоторым зерном, уменьшается на величину $\Delta(x)$, зависящую от расстояния x зерна до центрального сечения 0 .

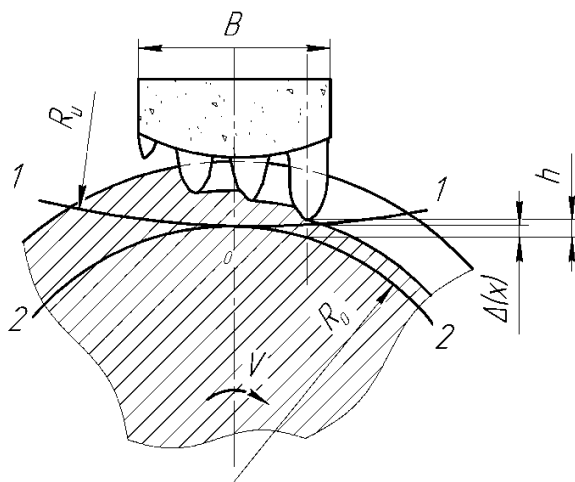


Рисунок 2.21. Схема царапания образца

Плотность распределения высоты зёрен относительно уровня отсчёта глубины царапин (окружность 2-2) будет

$$n(\square) = \int_{-\infty}^{\infty} n[\square - \Delta(x)] \cdot dx, \quad (2.85)$$

где $n(h)$ – плотность распределения зёрен по высоте.

Часть царапин может перекрываться, из-за чего плотность распределения глубины царапин $n_u(h)$ будет меньше, чем (2.85):

$$n_u(\square) = P(\square) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} n(\square - \Delta(x)) \cdot dx, \quad (2.86)$$

где $P(h)$ – относительная опорная длина профиля образца после царапания, равная отношению суммарной длины выступов на уровне h к общей длине профилограммы.

Ввиду малости дуги контакта инструмента с образцом

$$\Delta(x) \approx \frac{x^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{R_u} + \frac{1}{R_o} \right) = \frac{x^2}{2 \cdot R_{np}}, \quad (2.87)$$

где R_o , R_u – радиус образца и инструмента; R_{np} – приведенный радиус.

Обозначим отношения $n_u(h)$ к $P(h)$ через $\eta(h)$ – плотность распределения глубины канавок с учетом вероятности их перекрытия и запишем (3.2) в виде:

$$\eta(\square) = \frac{n_u(\square)}{P(\square)} = 2 \cdot \int_0^{\infty} n\left(\square - \frac{x^2}{2R_{np}}\right) \cdot dx = \sqrt{2 \cdot R_{np}} \cdot \int_{-\infty}^{\square} \frac{n(z)}{\sqrt{\square - z}} \cdot dz. \quad (2.88)$$

Полученное интегральное уравнение, известное в математике как уравнение Абеля, связывает искомое распределение $n(h)$ с функцией $\eta(h)$, значение которого легко рассчитать по профилограмме.

Точное решение этого уравнения [63] описывается формулой:

$$n(z) = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot R_{np}}} \cdot \frac{d}{dz} \cdot \int_{-\infty}^z \frac{\eta(z)}{\sqrt{z-z}} dz. \quad (2.89)$$

Однако непосредственная подстановка в (3.5) экспериментальных значений функции $\eta(h)$ может не дать желательных результатов. Для получения устойчивого решения необходимо экспериментальное значение $\eta(h)$ предварительно аппроксимировать определенными аналитическими выражениями, после чего можно использовать формулу (3.5).

Численный метод решения уравнения Абеля с использованием ортогональных полиномов [36] применим к любому виду функций $\eta(h)$. Однако если аппроксимировать начальный участок $\eta(h)$ степенной зависимостью, то решение значительно упрощается.

Пусть

$$\eta(z) = \begin{cases} k_{\eta} \cdot z^{\beta_{\eta}} & \text{при } z > 0 \\ 0 & \text{при } z \leq 0 \end{cases} \quad (2.90)$$

тогда искомая плотность распределения зёрен по высоте:

$$n(z) = \begin{cases} \frac{k_{\eta} \cdot \Gamma(\beta_{\eta} + 1)}{\sqrt{2\pi R_{np}} \cdot \Gamma(\beta_{\eta} + 0,5)} \cdot z^{\beta_{\eta} - 0,5} & \text{при } z > 0 \\ 0 & \text{при } z \leq 0 \end{cases} \quad (2.91)$$

Представляется интересным также рассмотреть случай, когда поверхности исследуемого инструмента и образца прилегают, т.е. когда

$$\frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_u} = 0.$$

Если над некоторым сечением образца при царапании прошёл участок инструмента длиной L , то вместо (3.2) имеем:

$$n_u(z) = P(z) \cdot L \cdot n(z), \quad (2.92)$$

откуда сразу получим $n(z) = \frac{n_u(z)}{L \cdot P(z)}$.

Итак, зависимости (2.89-2.92) дают возможность найти распределение зёрен по высоте исходя из двух характеристик профилограммы царапанного образца $n_y(h)$ и $P(h)$.

Профиль царапин на образце соответствует поперечному профилю вершин абразивных зёрен. Однако округленность вершины иглы профилографа приводит к некоторому изменению формы профилограммы. Если радиус вершин зёрен r_3 значительно больше радиуса иглы r_u , то эти изменения несущественны. В случае, когда радиусы сравнимы по величине, но $r_3 > r_u$, возникающую погрешность можно учесть расчётным путём.

Пусть уравнение впадины по профилограмме $z_n = z_n(x_n)$, тогда действительный профиль царапин найдем по формулам, которые выведены с помощью простых геометрических построений:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_n + \frac{r_u \cdot z'_n(x_n)}{\sqrt{1+(z'_n(x_n))^2}} \\ z &= z_n(x_n) - \frac{r_u}{\sqrt{1+(z'_n(x_n))^2}} + r_u \end{aligned} \right\} \quad (2.93)$$

где $z'_n(x_n) = \frac{dz_n(x_n)}{dx_n}$ – производная.

Если $r_3 < r_u$, то игла не поместится во впадину на образце, полезная информация теряется и не может быть полностью восстановлена расчётами.

Выводы к главе 2

1. Представлено математическое описание режущей поверхности абразивных инструментов. Дано сравнение дискретной и непрерывной моделей инструмента, а также найдена математическая связь между ними.

2. Установлена математическая зависимость между распределением абразивных зёрен по высоте и распределением глубины царапин, нанесённых данным инструментом. С использованием этой зависимости, выраженной интегральным уравнением, разработана методика определения параметров дискретной модели абразивного хонинговального инструмента путём царапания полированных образцов. Предложенная методика имеет достаточную для практики точность и простоту.

3. Теоретически установлено, что при хонинговании в подбрусковом пространстве возникает повышенное давление шлама и СОЖ, создающее обратные связи между усилием прижима брусков и выходными факторами, а также оказывающее существенное влияние на процесс обработки.

4. Представлены физические механизмы повышенного давления в подбрусковом пространстве:

а) повышение давления шлама возникает за счёт сопротивления его движению в подбрусковом пространстве, создаваемого неровностями связки и выступающими из неё абразивными зёрнами;

б) возникновение гидродинамического клина при течении СОЖ в подбрусковом пространстве, причиной которого является деформационный поворот брусков в корпусе хонинговальной головки под действием окружной силы резания;

в) возникновение вязкостного клина вследствие переменных температуры и вязкости СОЖ, движущейся в подбрусковом пространстве, составляет 0,1–0,3 этой величины для гидродинамического клина.

5. Установлено влияние различных факторов на технологические показатели хонингования и дано объяснение ряда наблюдаемых на практике закономерностей, а именно:

а) повышенное давление шлама и СОЖ в зоне резания снижает производительность и точность обработки;

б) увеличение вязкости СОЖ повышает давление в подбрусковом пространстве и уменьшает скорость съёма металла, а именно добавление в керосин 1/5 части масла И12 уменьшает съём на 20%, а 1/2 части – на 30–40%;

в) увеличение скорости резания и ширины сплошных брусков снижает интенсивность съёма металла;

г) существуют предельные значения скорости резания и ширины сплошных брусков, превышение которых уменьшает производительность обработки;

д) увеличение толщины зазора между связкой брусков и деталью, например, при повышении размера абразивных зёрен, уменьшает давление шлама и СОЖ и повышает производительность обработки.

6. Уменьшение площади сплошного контакта [73] брусков с деталью путём нанесения канавок на их рабочую поверхность позволяет снизить давление в подбрусковом пространстве и повысить производительность и качество обработки. При этом ширина каждого сплошного участка будет в 3 раза меньше, следовательно, и давление СОЖ снизится в 3 раза.

Глава 3. Методика экспериментальных исследований микроргеометрии алмазно-абразивного хонинговального инструмента

3.1. Микроргеометрия режущей поверхности инструмента

Микроргеометрия алмазного хонинговального инструмента является одним из важных факторов, определяющих механику процессов резания и пластического деформирования металла при хонинговании. Она прямо или косвенно влияет на все закономерности обработки.

Теории, позволяющие достоверно рассчитывать параметры микроргеометрии инструмента исходя из его физико-механических свойств и условий работы, отсутствуют. Поэтому мы остановимся на экспериментальных способах исследования микроргеометрии и методике её математического описания.

Наиболее сложным вопросом является исследование и математическое описание не отдельных зёрен, а микроргеометрии поверхности инструмента в целом, которая характеризуется статистическими параметрами формы вершин абразивных зёрен, а также распределением их по высоте и по площади режущего слоя.

Распределение зёрен по площади можно зафиксировать путём наблюдения через оптический микроскоп либо поверхности самого инструмента, либо его отпечатка на мягком материале. Сложнее найти закон распределения зёрен по высоте, так как предложенные для этой цели методы оказались либо чрезмерно трудоёмкими, либо недостаточно точными.

Указанный недостаток преодолел И.Е. Фрагин [73]. Он прокатывал алмазный хонинговальный брусок по плитке Иогансона, на поверхность которой был нанесён электролитическим методом слой олова заданной толщины. Меняя толщину осаждённого слоя, можно найти распределение зёрен по высоте.

Другой вариант контактного метода разработали японские учёные К. Окамура и Т. Накадзима [26, 52]. К абразивному кругу прижимается контактный ролик, и между ними подаются три ленты: первая – из целлофана, вторая – из копировальной бумаги, третья – из обычной бумаги. Круг приводится во вращение, и количество отпечатков, полученных на бумаге, даёт нам число абразивных зёрен, находящихся в слое инструмента по толщине, равной толщине всех лент. Т. Накадзима [52] использовал контактный ролик, имеющий наружную поверхность в виде сдвоенного конуса с углами образующих 1° , что дало возможность находить не только общее число зёрен, но и их распределение по высоте.

Перечисленные контактные методы достаточно просты, но имеют низкую точность, поэтому начальный участок кривой распределения зёрен по высоте остаётся неопределённым.

Высокую точность имеют методы исследования поверхности инструмента с помощью щуповых приборов. Получаемая при записи колебаний щупа профилограмма содержит информацию о режущих свойствах инструмента, поскольку на ней отражены абразивные зёрна. Для выделения участков профилограммы, соответствующих абразивным зёрнам, предложено записывать дополнительный сигнал, используя токопроводность металлических связок. Удобство методов профилографирования состоит в простоте и точности записи рельефа режущей поверхности, однако высота и форма выступов на профилограмме не совпадают с высотой и формой профиля вершин абразивных зёрен, так как щуп прибора проходит через случайные сечения зёрен, а не через их вершины.

Таким образом, сравнение различных методов экспериментального исследования микрорельефа поверхности абразивных инструментов показывает, что наибольшей точностью измерения и удобством отличаются методы профилографирования, но ни один из известных вариантов этих методов не позволяет измерить распределение зёрен по высоте. Поэтому весьма желательна разработка таких методов исследования, которые

позволяли бы получать указанные характеристики абразивного инструмента с помощью профилографирования.

Микрорельеф абразивного инструмента в процессе обработки изменяется за счёт упругих деформаций связки и отдельных зёрен под действием сил резания. Локальные упругие деформации круга при шлифовании соизмеримы с глубиной резания отдельными зёрнами, поэтому существенно влияют на механику процесса шлифования.

При хонинговании эти явления также имеют место, особенно в случае использования брусков на эластичных связках [53]. Однако в литературе нет данных по нахождению упругой постоянной крепления зёрен в связке хонинговальных брусков, в связи с чем имеет большое значение разработка удобной методики определения упругих свойств хонинговальных брусков и оценка влияния упругих деформаций на процесс хонингования.

3.2. Методика моделирования по методу Монте-Карло

Исходными данными для моделирования служат: информация о микрогеометрии режущей поверхности и упругих свойствах хонинговальных брусков, режимы резания, характеристики обрабатываемого материала и исходная геометрия поверхности детали. В результате расчёта необходимо получить основные параметры микрогеометрии обработанной поверхности детали и процесса съёма металла.

Предлагаемая методика моделирования заключается в следующем.

Рассматриваются изменения в процессе резания произвольного участка (рисинок 3.1) в осевом сечении детали. Этот участок разбивается на ряд равнорасположенных точек, высота профиля которых записывается в соответствующий массив ячеек памяти машины. В отдельном массиве памяти нормируется профиль режущих зёрен.

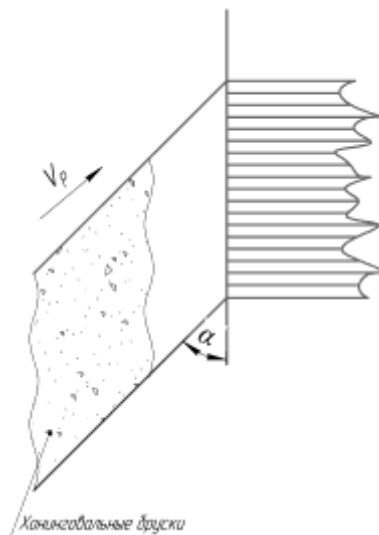


Рисунок 3.1. Схема формирования профиля детали

Моделирование резания абразивными зёрнами производится путём нахождения случайных координат и высоты зёрен, последовательно проходящих над данным участком, и уменьшения высоты профиля детали в местах контакта с зёрнами. Одновременно вычисляются площади среза, усилия, число контактных зёрен и т.д. Такая схема позволяет в одной программе рассчитывать, как параметры микропрофиля детали, так и параметры резания. Схема алгоритма моделирования показана на рисунок 3.2.

После ввода исходных данных (блок 1) в массиве z_g формируется начальный микропрофиль детали, например пилообразный, отвечающий расточке резцом, или другой (блок 2).

Работу блока 3 поясним позже, поскольку в нём используется ряд последующих блоков, пока считаем начальное сближение A бруска с деталью известным.

Блоки 4-5 служат для подготовки циклов по "зёрнам" и по "ходам". Под словом "ход" подразумеваются отрезки времени хонингования t_x , через которые происходит выдача на печать промежуточных результатов моделирования. Величину t_x можно принять равной времени одного хода хонголовки.

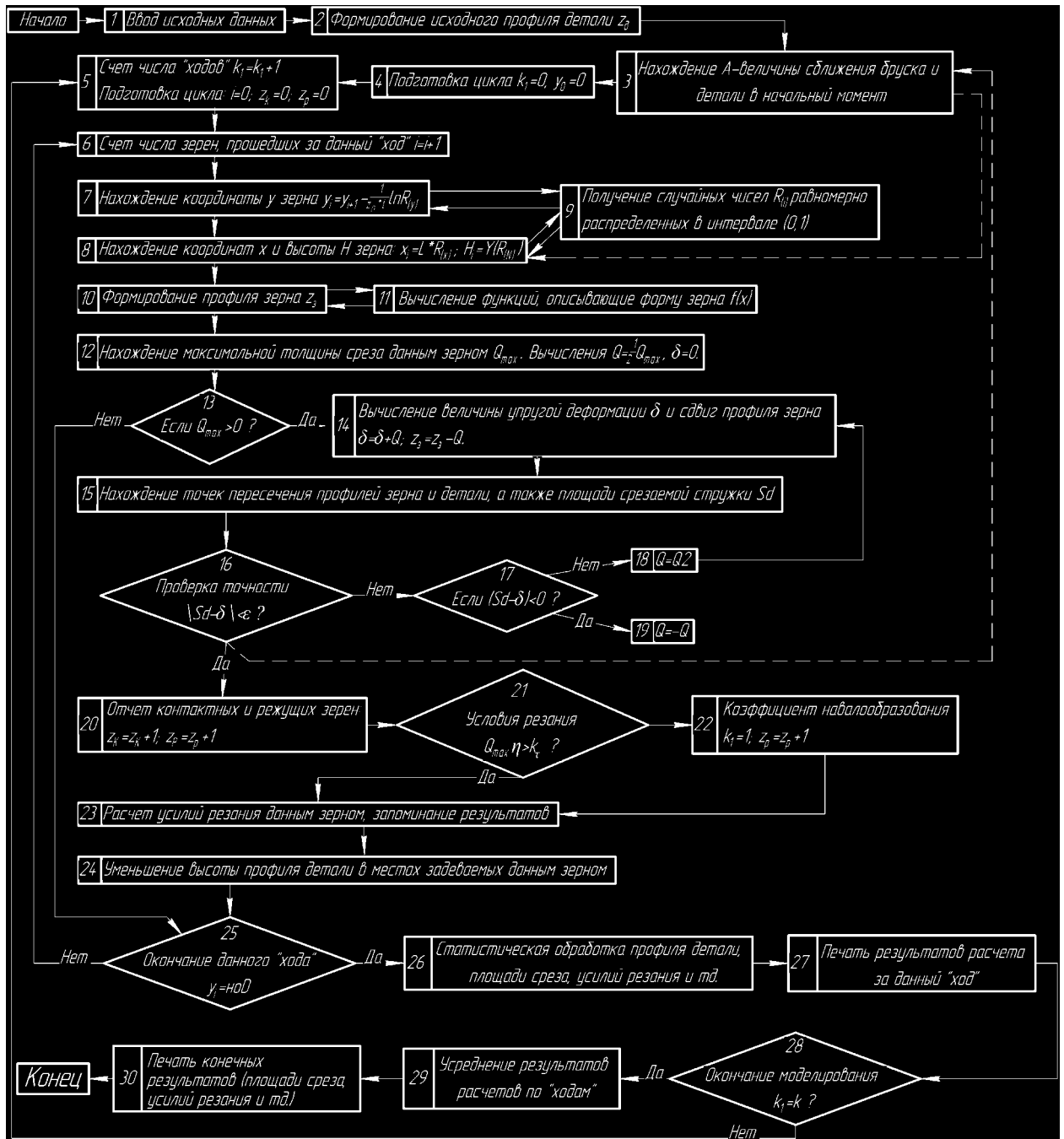


Рисунок 3.2. Блок-схема алгоритма статического моделирования процесса хонингования методом Монте-Карло

Мелирование прохождения какого-либо зерна начинается с определения его координат и высоты (блоки 7-8).

Построение ведём в прямоугольной системе координат $[X, Y]$. Ось Y направляем вдоль вектора скорости резания, а ось X перпендикулярно. По оси Y удобно откладывать суммарную длину абразивного полотна, прошедшего над данным сечением к моменту времени t

$$Y = t \cdot \frac{b \cdot n_{\delta} \cdot n}{\sin \alpha}.$$

Поскольку зерна на поверхности брусков распределены по закону Пуассона, то расстояние Y между проекциями центров соседних зерен на плоскости Z, Y имеет показательный закон распределения, который в интегральной форме запишем так

$$Y(y) = P\{(y_i - y_{i-1}) \leq y\} = e^{-\lambda \cdot y}. \quad (3.1)$$

Параметр λ зависит от среднего числа зёрен на единице площади бруска z_0 и ширины L абразивного полотна, проходящего над участком АВ,

$$\lambda = z_0 \cdot L = z_0 \cdot \overline{AB} \cdot \sin \alpha,$$

Получение случайной величины Y с заданным законом распределения можно вести следующим способом

$$y = \tilde{Y}(R_y), \quad (3.2)$$

где $\tilde{Y}(R_y)$ - функция, обратная к $Y(y)$, R_y - случайное число с равномерным распределением в интервале $[0,1]$.

Учитывая (3.1, 3.2)

$$y_i = y_{i-1} - \frac{1}{z_0 \cdot L} \cdot \ln R_y. \quad (3.3)$$

Координата x_i зерна распределена равномерно в интервале $[0,L]$, поэтому

$$x_i = R_x \cdot L, \quad (3.4)$$

где R_x - новое случайное число.

Высота зерна H_i находится аналогично исходя из распределения зерен по высоте $Y(H)$ (блок 8).

Если плотность распределения зерен по высоте степенная

$$n(\square) = \begin{cases} k \cdot \square^\beta, \text{ при } \square > 0 \\ 0, \text{ при } \square \leq 0 \end{cases}$$

и максимальная высота выступления зерен из связки H_{max} , то

$$z_0 = \frac{k \cdot H_{max}^{\beta+1}}{\beta+1}; \quad Y(H) = \begin{cases} 0, \text{ при } H \leq 0 \\ 1 - \left(\frac{H_{max} - H}{H_{max}} \right)^{\beta+1}, \text{ при } 0 < H < H_{max} \\ 1, \text{ при } H \geq H_{max} \end{cases}, \quad (3.5)$$

причем высота H измеряется над уровнем связки.

В этом случае, согласно (3.2)

$$H_i = H \left(1 - R \frac{1}{H^{\beta+1}} \right)_{max} . \quad (3.6)$$

Случайные числа R с равномерным распределением (блок 9) можно либо взять из специальных таблиц и ввести в память машины, либо получать т.н. «псевдослучайные» числа с помощью специальных алгоритмов.

В таблице 3.1 приведены статические параметры случайных чисел и чисел, полученных с помощью программного датчика, а также идеальные значения статических параметров.

Таблица 3.1.

Характеристики случайных чисел.

№ п/п	Параметры	Табличные	Программный датчик	В идеальных условиях
1.	Общее количество проанализированных чисел	13492	30000	∞
2.	Математическое ожидание M	0,4853079	0,5002061	0,5000000
3.	Моменты высших порядков			
	M2	0,0807981	0,0835689	0,0833333
	M3	0,0017508	-0,0001981	0,0000000
	M4	0,0118567	0,0125344	0,0125000

После нахождения координат и высоты в отдельном массиве z_3 формируется проекция профиля данного зерна на осевое сечение детали (блок 10)

$$z_3 = A - by_i - H_i + z(|x \cdot \sin \alpha - x_i|), \quad (3.7)$$

где $b, z(x)$ - имеют те же значения, что и ранее.

Функция, описывающая форму профиля зерна, может быть произвольной. В программе предусмотрена возможность моделирования параболической, конической, цилиндрической и усечено-конической формы вершины зерен (блок 11).

В блоке 12 происходит вычисление максимальной глубины внедрения зерна в металл Q_{max} . Если Q_{max} (блок 13), то проверяется окончание цикла моделирования и переход к следующему зерну.

Если Q_{max} , то начинается моделирование резания с учетом упругого вдавливания зерна в связку.

Для нахождения величины упругого вдавливания зерна используем коэффициент корреляции связи между деформацией и площадью среза.

При этом между площадью среза $S_p(H)$ и величиной деформации δ будет существовать зависимость

$$S_p(H_i - \delta) \cdot d = \delta. \quad (3.8)$$

Решение уравнения (3.8) осуществляется в программе методом последовательных приближений (блок 14-19). Итерации продолжаются до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность ε .

В блоках 21-22 происходит расчет количества контактных z_k и режущих z_p зерен. При этом зерно считается контактное, если хотя бы одна точка его профиля пересекает профиль детали, т.е. если Q_{max} . Режущим считается зерно, если

$$Q_{рез_{кр_{max}}} > 0. \quad (3.9)$$

Эти определения более точно соответствуют действительности. Здесь наглядно проявляется преимущество метода Монте-Карло перед аналитической теорией, поскольку уточнение физической модели почти не усложнило алгоритм и программу.

По найденным размерам поперечного сечения срезаемой стружки вычисляются усилия резания (блок 23). При этом можно воспользоваться политропическим законом или упрощенными формулами, соответствующими постоянному значению напряжений δ_y, δ_z на поверхность контакта зерна с металлом.

В конце цикла производится уменьшение высоты профиля детали в местах контакта с абразивным зерном (блок 24)

$$z_{\partial} = \begin{cases} z_{\partial}, & \text{если } z_{\partial} < z_3 \\ z_3, & \text{если } z_{\partial} > z_3 \end{cases} \quad (3.10)$$

Если количество прошедших к данному моменту зёрен соответствует полному «ходу» (блок 25)

$$y_i \geq \text{ноD} = \frac{t_x \cdot b \cdot n_6 \cdot n}{\sin \alpha}, \quad (3.11)$$

то происходит статистическая обработка результатов моделирования (блок 26) и выдача их на печать.

Поясним теперь работу блока 3.

Величина A начального сближения бруска с деталью, как известно, определяется нормальным давлением на бруски.

Если исходить из пропорциональности нормальной нагрузки площади контакта зёрен с металлом и заданной интенсивности съёма b , то средняя площадь среза одним зерном будет

$$S_p = \frac{b}{z_0}. \quad (3.12)$$

Поэтому нужно найти такое значение сближения A , при котором обеспечивается данная средняя площадь среза S_p .

Эта задача решается с помощью способа нелинейной регрессии.

Предварительно задаются верхняя и нижняя граница A_1 и A_2 , в которых может лежать искомое сближение A . Весь интервал $[A_1, A_2]$ разбивается на k промежутков и при каждом значении A_j моделируется площадь среза для N зерен. При этом координата $y_i = 0$, что соответствует начальному моменту хонингования, а блоки 20-27, необходимые для моделирования процесса резания не используются.

Площадь среза N зерен для каждого A_j усредняются и по рассчитанным значениям средних площадей S_{pj} строится регрессионная зависимость в виде полинома

$$A = A(S_p) = b_0 + b_1 \cdot S_p + b_2 \cdot S_p^2 + \dots \quad (3.13)$$

В это уравнение подставляется S_p из (3.12) и вычисляется искомое сближение A .

3.2.1. Некоторые результаты моделирования

По описанному алгоритму составлена программа и проведены вычисления, цель которых состояла в том, чтобы выявить влияние отдельных факторов на микрогеометрию детали и процесс резания при хонинговании, а также сравнить результаты моделирования с аналитической теорией.

Использовался принцип последовательного варьирования каждого из рассматриваемых факторов, что дало возможность изучить их влияние. Экспериментальным путём это сделать, фактически, невозможно, поскольку происходит изменение сразу нескольких величин. Например, увеличив скорость вращательного движения мы одновременно изменим абсолютную скорость резания и угол скрещивания, а изменяя марку хонинговальных брусков мы сразу варьировем как форму зерен, так и законы распределения по высоте.

Рассмотрим конкретные данные, полученные при моделировании.

За базовую точку, от которой варьировались взято хонингование со следующими параметрами:

$$\begin{array}{ll}
 b = 7,1 \cdot 10^{-6}; & C = 0,0173 \text{ мкм}; \\
 H_{max} & m = 0,5; \\
 \beta = 1,56; & \square_{кр} = 1,5 \text{ мкм}; \\
 z_0 = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ шт/мкм}^2 & d = 0; \\
 k = 5,69 \cdot 10^{-9}; & \alpha = 64^\circ, (\sin \alpha = 0,9); \\
 нOD = 4 \cdot 10^5 \text{ мкм}; & \mu_T = 0,15; \\
 & \delta_y = \delta_z = 0,2 \cdot 10^5 \text{ МПа}
 \end{array}$$

Форма профиля зёрен принята параболическая, закон распределения по высоте - степенной. Исходный профиль детали принят гладкий.

В качестве примера приведена распечатка некоторых результатов расчета процессе хонингования (для базовых условий).

Вначале идут исходные данные, причём в связи со спецификой машинного расчета обозначения ряда переменных отличаются от принятых в тексте диссертации.

Затем следуют результаты расчёта величины A , заглабления брусков в деталь. Даются коэффициенты уравнения регрессии.

$$A = -4,518394 - 0,1166896 \cdot S_p + 0,000615136 \cdot S_p^2,$$

значение $A = -6,324344$, рассчитанное для заданных условий, а также результаты моделирования средней площади среза единичным зерном при различных значениях заглабления A .

Поясним обозначения в заголовке таблицы. По порядку следования столбцов напечатаны: номер «хода», количество контактных и режущих зерен, прошедших за данный «ход» над участком профиля AB , математическое ожидание высоты профиля детали (мкм), среднеквадратичное и среднеарифметическое отклонение высоты микронеровностей детали (мкм), математическое ожидание площади среза единичным контактным зерном (мкм²), нормальное и тангенциальное усилие резания на ед. площади брусков (МПа), шаг неровностей профиля детали по средней линии (мкм).

Для получения более точных статистических данных в конце моделирования результаты последних десяти "ходов" усреднены и выданы на печать. Кроме указанных выше параметров выдаётся также другая информация в частности: плотность распределения высоты профиля детали, нормированная автокорреляционная функция профиля и для наглядности соответствующие графики.

Таблица 3.2.

Результаты моделирования процесса хонингования методом Монте-Карло.

1. Результаты расчета величины начального заглабления зерен в металл

Коэффициент регрессии: $B_0 = -4,518394$; $B_1 = -0,1166896$; $B_2 = 0,000615136$		
Расчетное значение: $A = -6,324$ (мкм)		
Значение A (мкм)	Площадь среза одним зерном (мкм ²)	Отклонение от уравнения регрессии (мкм)
-5,0	5,1973	-0,10825
-5,5	6,5868	0,2397
-6,0	15,2725	-0,1571

-6,5	20,5153	-0,1534
-7,0	24,4851	-0,0068
-7,5	28,6257	0,1453
-8,0	36,6655	0,0301
-8,5	51,1547	-0,3779
-9,0	46,7623	0,3701
-9,5	64,7699	0,0042

Таблица 3.3.

Результаты моделирования процесса хонингования методом Монте-Карло.

2. Результаты промежуточных расчетов по каждому «ходу»

№ хода	z_k , шт	z_p , шт	M , мкм	$H_{ск}$, мкм	Ra , мкм	S_p , мкм ²	Q , МПа	F_p , МПа	S_M , мкм
1	151	67	-3,81	1,401	1,152	22,33	0,9951	0,3366	51,89
2	75	36	-6,05	1,662	1,298	27,44	0,5640	0,1989	49,23
3	106	55	-8,94	1,598	1,264	25,59	0,7932	0,2697	49,23
4	98	57	-12,24	1,600	1,294	29,54	0,8265	0,2848	53,33
5	96	49	-14,74	1,484	1,230	23,11	0,6858	0,2261	51,89
6	112	61	-17,85	1,709	1,352	25,24	0,8278	0,2812	56,47
7	88	51	-20,60	1,566	1,276	27,89	0,7099	0,2428	49,23
8	97	57	-23,60	1,557	1,256	27,86	0,7797	0,2671	46,83
9	94	54	-26,55	1,620	1,311	28,02	0,7612	0,2605	42,67
10	85	42	-28,64	1,354	1,102	21,80	0,5750	0,1892	49,23
11	108	57	-31,86	1,551	1,313	26,52	0,8295	0,2835	51,89
12	95	53	-34,92	1,809	1,433	29,58	0,7995	0,2760	45,71
13	102	51	-37,36	1,613	1,287	22,07	0,6738	0,2261	49,23

Примечание: указано общее количество контактных и режущих зерен на каждый «ход».

Таблица 3.4

Результаты моделирования процесса хонингования методом Монте-Карло.

3. Результаты усреднённых расчетов

Число «ходов», за которые проведено усреднение	10
Среднеарифметическая высота неровностей профиля	$Ra = 1,286$ (мкм).
Среднеквадратическая высота неровностей профиля	$H_{ск} = 1,591$ (мкм).
Асимметрия закона распределения высоты неровностей	$A_s = -0,07211$
Экссесс закона распределения высоты неровностей	$E_x = -0,09544$
Шаг неровностей профиля по средней линии	$S_M = 21,389$ (мкм).
Количество контактных зерен на ед. площади бруска	$n_k = 97,565$ (шт/см ²)
Количество режущих зерен на ед. площади бруска	$n_p = 53,200$ (шт/см ²)
Нормальная составляющая силы резания	$Q = 0,7469$ (МПа)
Тангенциальная составляющая силы резания	$F_p = 0,2537$ (МПа)

Аналогичные расчеты проведены также для других условий хонингования и построены графики (рисунок 3.3), показывающие влияние различных факторов на основные показатели процесса. В каждом расчёте варьировался лишь один какой-либо фактор от базового значения (на

графиках рисунок 3.3 они отмечены стрелками), а остальные факторы неизменны.

Влияние интенсивности съема показано на рисунок 3.3.а. Увеличение коэффициента b ведет к повышению шероховатости $H_{СК}$, площади среза единичным зерном S_p , числа режущих z_p и контактных z_k зерен (причем z_p и z_k на графиках даны в процентах от общего количества зерен, содержащихся в слое бруска высотой H_{max}).

На продольные характеристики микропрофиля интенсивность съема влияет незначительно.

$$b = 10 \cdot 10^{-10} \quad \text{и} \quad b = 5 \cdot 10^{-10}$$

Изменение формы зерен (коэффициент C) влияет на все параметры процесса (рисунок 3.3.б). Чем более острее зерна (C увеличивается), тем больше число режущих зерен и меньше нагрузка на одно зерно, следовательно, процесс резания протекает в более благоприятных условиях. При уменьшении C , например, за счет затупления зерен или применение абразива с более округленными вершинами, резание затрудняется, однако качество обрабатываемой поверхности повышается (рисунок 3.3.б).

Продольные характеристики шероховатости больше зависят от формы зерен, чем от интенсивности съема.

С уменьшением C неровности становятся более пологими, микропрофиль как бы растягивается в длину и уменьшается по высоте. Это повышает опорную поверхность и эксплуатационные свойства детали.

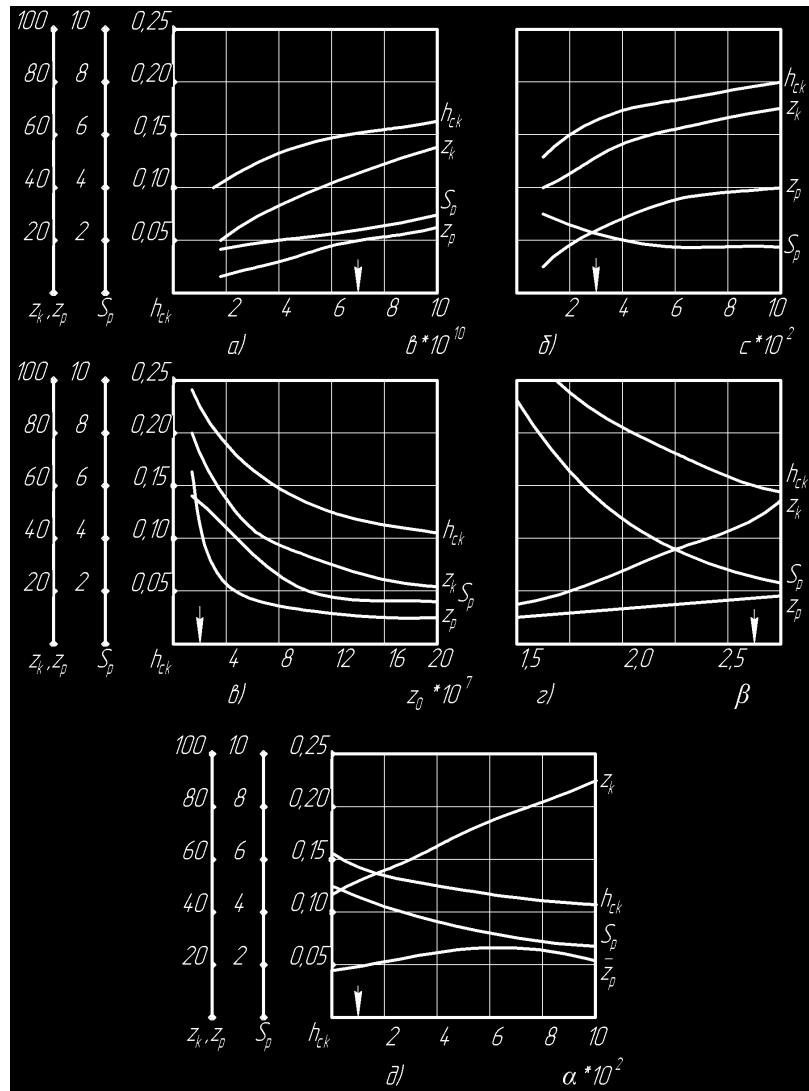


Рисунок 3.3. Влияние отдельных факторов на параметры процесса хонингования (размерности z_k, z_p – %; S_p – мкм^2 ; h_{ck} – мкм)

Пропорциональное изменение количества зёрен z_0 на всех уровнях режущего слоя оказывает противоположное влияние, чем интенсивность съёма (рисунок 3.3.в). С физической точки зрения это можно объяснить так. Брусочек с большим числом зёрен можно представить как брусочек с малым числом зёрен, но сжатый по оси Y . т.е. увеличение z_0 равноценно растяжению по оси Y . Но увеличение масштаба Y означает уменьшение интенсивности съёма, поэтому влияние коэффициентов b и z_0 взаимоположное.

Показатель степени β закона распределения зёрен по высоте $n(h)$ во многом характеризует режущие свойства брусочков. Изменение показателя степени β влечёт одновременное изменение коэффициента k или, что-то же

самое, z_0 . Поэтому в эксперименте невозможно выявить отдельно влияние β и z_0 , однако моделирование с помощью Монте-Карло позволяет сделать это. На рисунок 3.3. г показана зависимость параметров хонингования от показателя β , с увеличением которого возрастает процент режущих и контактных зерен, уменьшается нагрузка на одно зерно и снижается шероховатость поверхности детали.

Роль упругих деформаций в процессе хонингования иллюстрируется графиками рисунок 3.3.д. При повышении коэффициента деформирования средняя площадь среза на одно зерно и шероховатость 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. С увеличением d разномысность несколько снижается и припуск распределяется более равномерно, поэтому r увеличивается. Дальнейшее возрастание d приводит к тому, что жёсткость крепления зерна оказывается недостаточной для внедрения зерна в металл на глубину, большую критической, поэтому z_p падает.

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 3.3. д), поэтому бруски на металлической связке при обработке чугуна можно рассматривать как жёсткие.

3.2.2. Сравнение моделирования с аналитической теорией

Поскольку моделирование Монте-Карло и аналитические расчёты представляют собой независимые методы теоретического исследования, то сравнение результатов, полученных при одинаковых исходных данных, даёт

возможность проверить правильность как аналитических зависимостей, так и алгоритма моделирования.

По формуле (98) рассчитаем среднеквадратическую высоту неровностей для хонингования с параметрами, отвечающими базовым условиям

$$H_{СК} = r_1 \left(\frac{b \cdot c^m}{k} \right)^{\frac{1}{p}} = 0,45 \cdot \left(\frac{7,1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0173^{0,5}}{5,69 \cdot 10^{-9}} \right)^{\frac{1}{4,06}} = 1,58(\text{мкм})$$

Моделированием при помощи Монте-Карло получено $H_{СК} = 1,59(\text{мкм})$.

Сравнительные результаты расчётов при других исходных данных сведены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5

Сравнение аналитической и моделирование Монте-Карло

№п/п	Варьируемые факторы	Теоретически		Моделирование		Отклонение, %	
		$H_{СК}$	Ra	$H_{СК}$	Ra	$H_{СК}$	Ra
1	Базовый	1,58	1,26	1,59	1,28	+0,7	+1,7
2	$C = 0,01$	1,48	1,18	1,45	1,16	-2,1	-1,7
3	$C = 0,04$	1,76	1,4	1,74	1,40	-1,1	-0,7
4	$C = 0,08$	1,91	1,53	1,93	1,54	+1,0	+0,6
5	$b = 3 \cdot 10^{-10}$	1,28	1,02	1,24	0,99	-3,2	-3,0
6	$b = 5 \cdot 10^{-10}$	1,45	1,16	1,41	1,13	-2,7	-2,6
7	$b = 10 \cdot 10^{-10}$	1,72	1,38	1,69	1,37	-1,5	-0,7
8	$z_0 = 2 \cdot 10^{-7}$	2,06	1,65	2,16	1,72	+4,6	+4,0
9	$z_0 = 10 \cdot 10^{-7}$	1,38	1,10	1,36	1,09	-1,4	-0,9
10	$z_0 = 20 \cdot 10^{-7}$	1,16	0,93	1,16	0,93	0,0	0,0
Средняя погрешность, %						-0,067	-0,033

Наблюдаемое расхождение незначительно и объясняется статистической природой моделирования. Для получения более высокой точности можно увеличить число «ходов», за которое происходит усреднение, впрочем, с практической точки зрения это не требуется.

По другим параметрам результаты теории и моделирования так же совпадают.

Шаг неровностей профиля по средней линии для базового опыта рассчитываем:

$$S_M = \frac{3,16}{0,9} \cdot \left(\frac{7,1 \cdot 10^{-10}}{5,69 \cdot 10^{-9}} \right)^{\frac{0,5}{4,06}} \cdot \left(\frac{1}{0,0173} \right)^{\frac{0,5 \cdot 3,56}{4,06}} = 21,36(\text{мкм})$$

При моделировании также получено $S_M = 21,36$ (мкм).

Усилия резания, приходящиеся на единицу площади поверхности брусков:

$$F_p = 2 \cdot 10^3 \cdot \left[7,1 \cdot 10^{-10} + 3,14 \cdot 0,42 \cdot 0,15 \cdot (7,1 \cdot 10^{-10})^{\frac{3,56}{4,06}} \cdot (5,69 \cdot 10^{-9})^{\frac{0,5}{4,06}} \cdot \left(\frac{1}{0,0173} \right)^{\frac{2,28}{4,06}} \right] = 0,103(\text{МПа})$$

$$Q = 2 \cdot 10^3 \cdot 3,14 \cdot 0,42 \cdot (7,1 \cdot 10^{-10})^{\frac{3,56}{4,06}} \cdot (5,69 \cdot 10^{-9})^{\frac{0,5}{4,06}} \cdot \left(\frac{1}{0,0173} \right)^{\frac{2,28}{4,06}} = 0,236(\text{МПа})$$

При моделировании усилия резания составили

$$F_p = 0,101(\text{МПа}); Q = 0,298(\text{МПа}),$$

т.е. расхождение менее 3%.

На рисунок 3.4 показана зависимость суммарной площади среза \overline{S}_p от глубины внедрения H бруска в гладкую поверхность, рассчитанная по формуле (2.28)

$$\begin{aligned} \overline{S}_p(H) &= \frac{2 \cdot k \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1) \cdot H^p}{c^m \cdot \Gamma(p+1)} = \frac{2 \cdot 5,69 \cdot 10^{-9} \cdot 0,8862 \cdot 1,3878 \cdot H^{4,06}}{0,0173^{0,5} \cdot 26,80} \\ &= 4,05 \cdot 10^{-9} \cdot H^{4,06} \end{aligned}$$

Результаты моделирования отмечены на рисунок 3.4 точками, причем для расчета каждой точки моделировалось резание 25-ю зёрнами.

Расхождение этих данных также в пределах статистических отклонений.

При моделировании мы исходили из более точного определения, полагая зерно контактным, если какая-либо точка его профиля соприкасается с металлом.

Поэтому для выяснения погрешности можно внести упрощенный подход в аналитический расчет. Доля контактных зерен:

$$\frac{n_k}{z_0} = \frac{r_5}{z_0} \cdot b^{\frac{\beta+1}{p}} \cdot c^{\frac{m \cdot (\beta+1)}{p}} \cdot k^{\frac{m+1}{p}} = \frac{1,56}{5,7 \cdot 10^{-7}} \cdot (7,1)^{0,63} \cdot (0,0173)^{0,316} \cdot (5,69 \cdot 10^{-9})^{0,369} = 0,40$$

При моделировании доля контактных зерен составила 0,46 (см. рисунок 3.3). Таким образом, мы получили, что теоретические значения на 13% меньше действительных. Такая погрешность допустима, можно пользоваться на практике.

Проведенное сопоставление результатов моделирования и аналитических расчетов выявлено хорошее совпадение и подтвердило правильность, как математических выводов, так и разработанного алгоритма моделирования.

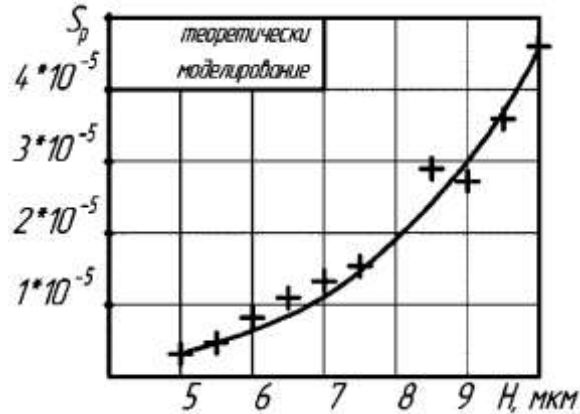


Рисунок 3.4. Зависимость суммарной площади среза от глубины внедрения H .

3.3. Методика измерения упругих деформаций инструмента

В процессе хонингования абразивные зёрна под действием сил резания упруго вдавливаются в связку, что изменяет глубину внедрения зёрен в металл и может значительно влиять на показатели обработки.

Согласно методу [52], использованному при исследовании, на поверхности плоского или круглого образца из обрабатываемого материала прорезается узкий паз, расположенный под углом к направлению царапания. Паз заполняется мягким материалом (например, сплавом свинца с оловом), а затем образец доводится до высокой степени точности.

Исследуемый инструмент с помощью специального приспособления прижимается с постоянным усилием к образцу, и производится царапание.

Пока абразивное зерно движется по твёрдому материалу, оно упруго деформировано и вдавлено в связку. При переходе на мягкий материал высота зерна восстанавливается, что приводит к увеличению глубины царапины. С участков разной твёрдости снимают профилограммы (вдоль

паза). Замерив разность глубины царапин, можно найти упругие деформации и сопоставить их непосредственно с размерами поперечного сечения срезного слоя.

Для количественной оценки величины упругой деформации удобно ввести коэффициент деформации d , выражающий корреляционную связь между величиной упругой деформации δ и площадью среза S_p :

$$d = \frac{M\{\delta\}}{M\{S_p\}}, \quad (3.10)$$

где $M\{\dots\}$ – математическое ожидание.

Этот коэффициент комплексно отражает упругие свойства инструмента и силовое воздействие обрабатываемого материала, что весьма ценно при математическом анализе процесса хонингования.

Предложенный способ отличается невысокой трудоемкостью, универсальностью – он применим к различным видам абразивных инструментов, достаточно прост в осуществлении, позволяет проводить статистический анализ величины упругих деформаций совокупности зёрен.

3.4. Оборудование и техника измерений

Плоские образцы для царапания изготавливались из чугуна СЧ25, который соответствует по составу и свойству чугуну, применяемому для изготовления гильз КамАЗ-740. Размеры образцов 400*700*6 мм, рабочая поверхность шлифовалась, а затем доводилась притиркой до $Ra=0,1$ мкм отклонение от плоскостности составляло не более 1 мкм.

Подготовка образца для измерения упругих деформаций была несколько иной. Вначале на образце прорезался паз шириной 2 мм, глубиной 3 мм под углом 30° к продольной оси, и рабочая поверхность доводилась до требуемых параметров. Затем паз обезжировали и заполняли расплавленным оловянно-свинцовым припоем ПОС-40. Последующая обработка разделялась на два этапа:

а) черновое удаление излишков припоя на доводочной плите алмазной пастой зернистостью 40/28; для защиты ранее доведённой поверхности на неё наклеивались полоски тонкой бумаги с помощью водорастворимого клея;

б) окончательная обработка для получения заданной чистоты велась на прецизионной доводочной плите с поливом керосином без пасты (предварительно защитный слой бумаги удаляли).

Для повышения точности определения упругой деформации зёрен после полировки образцов измерялась фактическая разновысотность участков мягкого и твёрдого материалов. Эта величина прибавлялась к разности глубины царапин.

Для нанесения царапин хонинговальным бруском на плоские образцы использовалось специальное приспособление к токарному станку 1Е61М, позволяющее создать прижим бруска к образцу с усилием 10 МПа и движение образца скоростью до 9 м/мин.

При измерении микрогеометрии с помощью одного образца можно исследовать 5-7 брусков, при измерении упругих деформаций – только один брусок. Для записи профиля царапин применялся профилометр SurfTest SJ-210.

Перед измерениями, согласно инструкции прибора, проводили тарировку. Скорость движения датчика принималась постоянной при всех измерениях $V_{\text{датч}} = 1$ мм/мин.

При движении иглы профилографа по мягким материалам возникает опасность микрорезания и, следовательно, искажения измеряемого профиля. Поэтому перед профилографированием с поверхности образцов, имеющих паз, залитый оловянно-свинцовым припоем, снимали реплики с помощью самотвердеющей пластмассы «Протакрил» [16], твёрдостью НВ=16-18.

Как показало сравнение профилограмм, записанных с реплик и непосредственно с образцов, расхождение между ними незначительно, поэтому часть измерений была проведена без снятия реплик.

Выводы к главе 3

1. Разработана методика определения параметров дискретной модели абразивного хонинговального инструмента путём царапания полированных образцов. Предложенная методика имеет достаточную для практики точность и простоту.

2. Разработан алгоритм моделирования процесса хонингования методом Монте-Карло, которые дают возможность сосчитывать шероховатость поверхности детали, площади среза единичными абразивными зёрнами, количество контактных зёрен, усилия резания и другие параметры процесса.

3. Моделирование методом Монте-Карло является эффективным способом исследования. По сравнению с аналитической теорией моделирование ряд преимуществ, как например, возможность исследования более полных моделей процесса, возможность внесения дополнений и изменений в алгоритм моделирования и др. К недостаткам относится сложность разработки и отладки алгоритма.

4. Сравнение данных моделирования и аналитической теории при идентичных исходных предпосылках выявило их хорошее совпадение. Однако моделирование позволяет вести исследование исходя из более полных и точных моделей, с учётом таких явлений, как, например, упругие деформации инструмента.

5. В результате аналитических расчётов и моделирования для различных условий хонингования установлено влияние отдельных факторов на процесс резания и микрогеометрию детали. В частности, показано, что высотные характеристики шероховатости детали ($R_a, H_{СК}$) зависят, в основном, от закона распределения абразивных зёрен по высоте, а шаг неровностей (S_M) - от формы профиля вершин зёрен. Установлено, что при алмазном хонинговании чугунных деталей брусками на металлических

связках упругие деформации инструмента невелики и не оказывают существенное влияние на процесс резания.

6. Полученные формулы и алгоритм моделирования позволяют прогнозировать параметры процесса хонингования, назначать оптимальные режимы обработки в соответствии с требуемой микрогеометрией детали. Кроме того, результаты выполненных исследований могут быть использованы при оценке эксплуатационных свойств и разработке новых хонинговальных брусков, при анализе тепловых и силовых явлений, а также при изучении влияния обратных связей по усилию прижима брусков к детали на процесс хонингования.

7. Разработан способ измерения упругих деформаций абразивного инструмента, основанный на царапании комбинированного образца, на поверхности которого выполнен участок из материала низкой твердости, например, свинца. Данный способ позволяет найти величину упругого вдавливания в связку отдельных абразивных зёрен и сопоставить ее непосредственно с размерами срезаемого слоя металла.

Глава 4. Экспериментальные исследования алмазных хонинговальных брусков

С целью практической проверки методов и получения информации о микрогеометрии хонинговальных брусков мы провели экспериментальные исследования алмазных брусков марок АСМ 28/20, М2-01 100%, АС6 125/100 М2-01 100%, АС6 200/160 М2-01 100% [14] с размерами алмазного слоя 125*12*3 мм, радиусом R_u 52,5 мм.

4.1. Результаты экспериментальных исследований упругих деформаций

Обработка профилограмм (рисунок 4.1) позволила построить графики (рисунок 4.2), указывающие корреляционную зависимость деформации δ от площади среза S_p единичным зерном (в твёрдом материале).

Как видим, с увеличением площади среза деформации возрастают. Получение в отдельных случаях отрицательных значений деформации, особенно при малых глубинах внедрения зёрен, связано с погрешностями измерений.

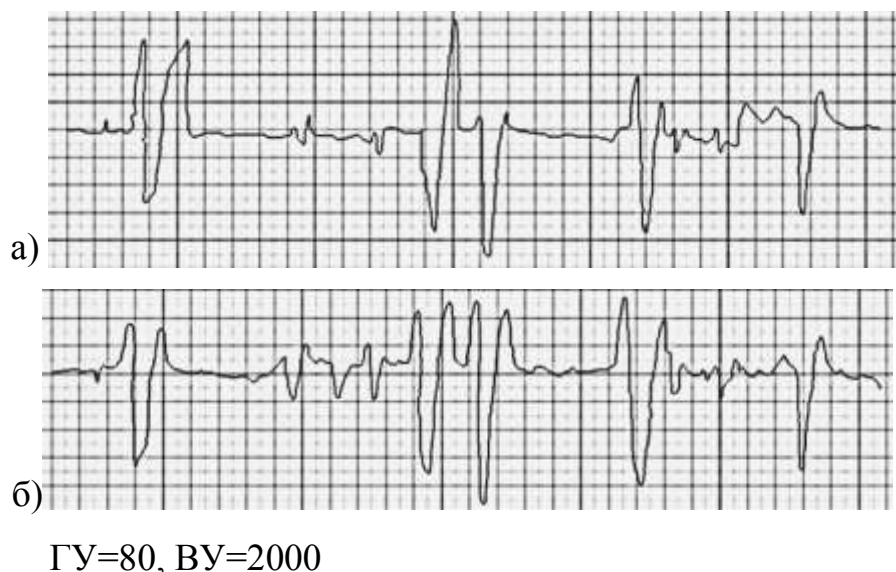


Рисунок 4.1. Профилограммы образца, царапанного бруском АС6 200/160 М2-01 100%. а) по твёрдому материалу, б) по мягкому материалу.

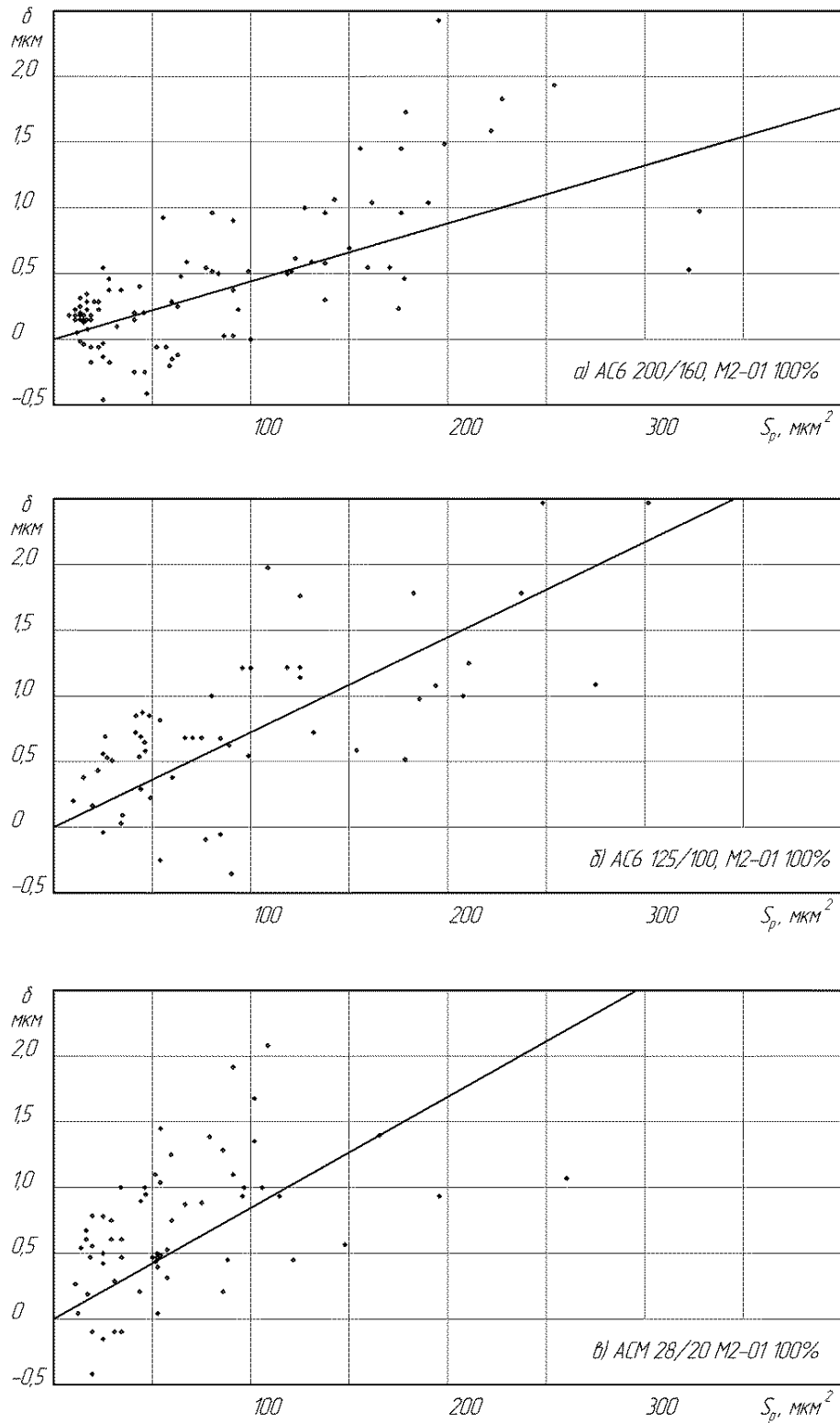


Рисунок 4.2. Зависимость упругой деформации δ от площади среза S_p (для брусков: а) АС6 200/160 М2-01 100%; б) АС6125/100 М2-01 100%; в) АСМ 28/20 М2-01 100%)

Математическая обработка экспериментальных данных заключалась в нахождении уравнения линейной регрессии и статистическом анализе достоверности результатов [73].

$$\delta = d \cdot S_p. \quad (4.1)$$

Если для какой-либо зернистости j имеется n экспериментальных точек, то значение d находится согласно методу наименьших квадратов по формуле:

$$d = \frac{\sum_i \delta_i \cdot S_{pi}}{\sum_i S_{pi}^2}. \quad (4.2)$$

Рассчитываются также средние значения и дисперсии независимых переменных:

$$\begin{aligned} \bar{\delta} &= \frac{1}{n} \sum_i \delta_i, & \bar{S}_p &= \frac{1}{n} \sum_i S_{pi} \\ S_{\delta}^2 &= \frac{1}{n} \sum_i (\delta_i - \bar{\delta})^2, & S_{S_p}^2 &= \frac{1}{n} \sum_i (S_{pi} - \bar{S}_p)^2, \end{aligned} \quad (4.3)$$

коэффициент корреляции ρ_k между δ и S_p :

$$\rho_k = \frac{\sum_i \delta_i \cdot S_{pi} - n \cdot \bar{\delta} \cdot \bar{S}_p}{n \cdot S_{\delta} \cdot S_{S_p}}, \quad (4.4)$$

показывающий степень тесноты и линейной зависимости между переменными.

Корреляция считается существенной, если

$$\rho_k > t_g \cdot \frac{1 - \rho_k^2}{\sqrt{n}}, \quad (4.5)$$

где $t_g - q\%$ – предел абсолютного нормального отклонения [80], при доверительной вероятности 95%, $t_g = 1.96$.

Дисперсию коэффициента d можно оценить с помощью выражения:

$$S_d = \frac{S_{\delta}}{S_{S_p}} \cdot \frac{1 - \rho_k^2}{\sqrt{n}}. \quad (4.6)$$

Результаты расчетов по этим формулам сведены в таблицу 4.1, (позиции 1–10), из которой видно, что корреляция между δ и S_p значительна (неравенство 4.5 выполняется во всех случаях).

Анализ графиков (рисунок 4.1) и таблицы 4.1 показывает, что с уменьшением зернистости коэффициент деформаций d увеличивается.

Чтобы оценить достоверность обнаруженного влияния зернистости на коэффициент d , воспользуемся критерием Стьюдента [63].

Вероятность того, что расхождения между значениями d для данной пары зернистостей (j и l) является случайным, находится следующим образом.

Вычисляем параметр

$$t_{jl} = \frac{d_j - d_l}{\sqrt{S_{d_j}^2 \cdot n_j^2 + S_{d_l}^2 \cdot n_l^2}} \sqrt{\frac{n_j \cdot n_l \cdot (n_j + n_l - 2)}{n_j + n_l}}, \quad (4.7)$$

затем по таблицам Стьюдента для данного t_{jl} и числа степеней свободы $f = (n_j + n_l - 2)$ определяем искомую вероятность P_{jl} .

Таблица 4.1

Статистический анализ результатов измерений упругих деформаций

№ п/п	Показатели	Зернистость		
		АС6 200/160 М2- 01 100%	АС6 125/100 М2- 01 100%	АСМ 28/20 М2- 01 100%
1	j	1	2	3
2	n	83	60	61
3	$\bar{\delta}(\text{мкм})$	0.46	0.792	0.702
4	$\bar{S}_p(\text{мкм}^2)$	95.6	100.2	65.3
5	$S_\delta(\text{мкм})$	0.63	0.616	0.506
6	$S_{S_p}(\text{мкм}^2)$	133.8	72.4	51.7
7	ρ_k	0.69	0.74	0.46
8	$t_q \cdot \frac{(1 - \rho_k^2)}{\sqrt{n}}$	0.12	0.12	0.19
9	$d(\text{мкм}^{-1})$	0.0047	0.0068	0.0085
10	$S_d(\text{мкм}^{-1})$	0.00039	0.00051	0.00083
11	t_{jl}	$t_{12} = 3.28$	$t_{23} = 1.75$	$t_{13} = 4.50$
12	P_{jl}	$P_{12} = 0.0011$	$P_{23} = 0.08$	$P_{13} = 0.0000$
13	$\bar{\square}(\text{мкм})$	4.1	4.3	3.0
14	$\frac{d \cdot \bar{S}_p}{\bar{\square}} \cdot 100(\%)$	11	12	18

Значения параметров t_{jl} и вероятностей P_{jl} , приведённые в таблице 4.1 (позиции 11–12), показывают, что зависимость коэффициента от зернистости не является случайной (все $P_{jl} < 0,1$).

Объяснить эту закономерность можно тем, что при сохранении подобия формы зёрен и удельного давления на бруски величина деформации возрастает примерно пропорционально размеру зерна, в то время как площадь среза возрастает в большей степени. Поэтому отношение $\frac{\delta}{S_p}$ убывает с повышением зернистости.

Как следует из результатов измерений, 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% (таблица 4.1, позиции 13–14).

Таким образом, при построении теории хонингования для рассмотренных условий упругими деформациями инструмента можно пренебречь.

При хонинговании высокопрочных, твёрдых материалов упругие деформации будут гораздо значительнее, и их нужно учитывать.

4.2. Результаты экспериментальных исследований формы зёрен и закона распределения их по высоте

Исследования алмазных хонинговальных брусков марок АС6 200/160 М2-01 100%; АС6 125/100 М2-01 100%; АСМ 28/20 М2-01 100% проводились по описанной выше методике с применением плоских образцов из серого чугуна, соответствующего по составу обрабатываемой детали.

Последовательность обработки профилограмм покажем на примере бруска АСВ 125/100, М1, 50%. (рисунок 4.3)



Рисунок 4.3. Участок профилограммы образца, царапанного бруском АСВ 125/100, М1, 50%

а. Усреднённый профиль вершин зёрен

Вначале замерялась полуширина $x_{ni}(z_j)$ каждой i -той канавки в зависимости от расстояния z_j до ее вершины и находилось математическое ожидание:

$$\bar{x}_n(z_j) = \frac{1}{n} \sum_j x_{nj}(z_j). \quad (4.8)$$

На рисунке 4.4. (а, б, в) кривые 1 соответствуют усредненному профилю канавок по профилограмме, а значками отмечены экспериментальные точки для каждого из трех брусков.

Вносим поправку на радиус иглы профилографа $r_u - 11$ мкм. По формулам (3.9) рассчитываем действительные значения координат. Например, для точки с координатами $x_n = 12,0$ мкм и $z_n = 1,45$ мкм (производная $z'_n = 0.226$) находим:

$$x = 12.0 + \frac{11 \cdot 0.226}{\sqrt{1 + 0.226^2}} = 14.42 \text{ (мкм)},$$

$$z(x) = 1.45 - \frac{11}{\sqrt{1 + 0.226^2}} + 11 = 1.72 \text{ (мкм)}.$$

Соответствующие графики профиля вершин зёрен (рисунок 4.4, кривые 2) показывают, что усреднённый профиль вершин зёрен близок к кривой параболического типа. Для нахождения параметров аппроксимирующей параболы

$$z = C \cdot |x|^{\frac{1}{m}}$$

воспользуемся методом наименьших квадратов [63].

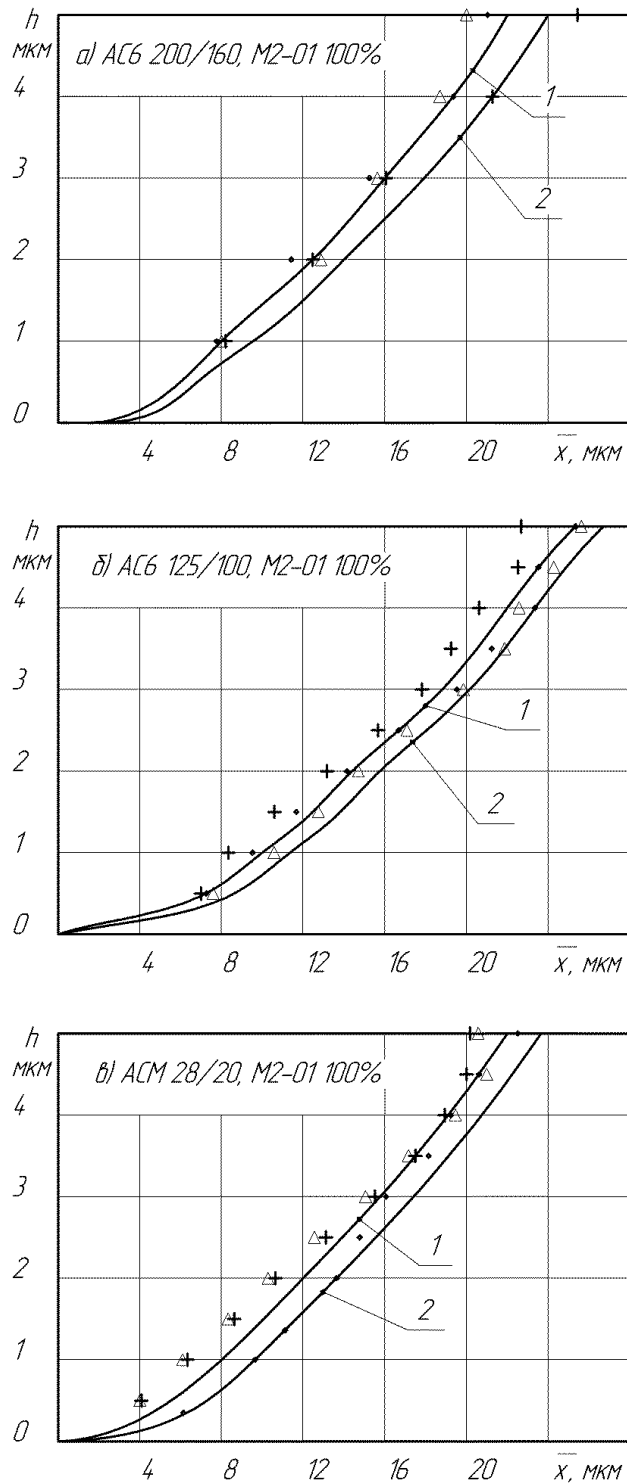


Рисунок 4.4. Усредненный профиль вершин зёрен (кривая 1 – усредненный профиль канавок, кривая 2 – профиль вершин зерен). Для брусков: а) АС6 200/160 М2-01 100%; б) АС6 125/100 М2-01 100%; в) АСМ 28/20 М2-01 100%

Логарифмируем уравнение параболы и, соответственно, экспериментальные значения координат профиля, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{m} &= \frac{\frac{1}{n} \sum_i \lg z_i \lg x_i - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg z_i\right) \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg x_i\right)}{\frac{1}{n} \sum_i (\lg x_i)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg x_i\right)^2}, \\ \lg C &= \frac{1}{n} \sum_i \lg z_i - \frac{1}{m \cdot n} \sum_i \lg x_i \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Для статистической оценки точности вычисляем отклонения расчетных значений от фактических:

$$\delta_i = \lg z_i - \left(\lg C + \frac{1}{m} \lg x_i \right) \quad (4.10)$$

и находим среднеквадратическую погрешность коэффициентов регрессии:

$$\left. \begin{aligned} S_{\lg C} &= \frac{1}{\sqrt{n-2}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i \delta_i^2}, \\ \frac{S_1}{m} &= \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i \delta_i^2}}{\sqrt{n-2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (\lg x_i)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg x_i\right)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

Теперь с помощью критерия Стьюдента $t_{q,(n-2)}$ определяем доверительные интервалы для $\frac{1}{m}$ и $\lg C$ (доверительную вероятность принимаем 90%).

О степени близости экспериментальных точек к параболе или в пространстве логарифмических координат к прямой можно судить по коэффициенту корреляции:

$$\rho_k = \frac{\frac{1}{n} \sum_i \lg z_i \cdot \lg x_i - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg z_i\right) \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg x_i\right)}{\sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_i (\lg x_i)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg x_i\right)^2\right] \cdot \left[\frac{1}{n} \sum_i (\lg z_i)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_i \lg z_i\right)^2\right]}}. \quad (4.12)$$

Все результаты расчётов по этим формулам сведены в таблицу 4.2. Сравнивая показатели формы зёрен исследованных марок, мы видим, что между ними имеется статистически достоверное различие. Зёрна брусков АСМ 28/20 более островершинные (таблица 4.2, параметры C и $\lg C$), чем АС6 125/100. Несколько неожиданным оказалось то, что зёрна брусков АС6

200/160 острее, чем АС6 125/100, однако это становится понятным, если учесть следующие обстоятельства:

- 1) форма вершины зёрен на рабочей поверхности инструмента зависит как от геометрии исходных абразивных зёрен, так и от степени их затупления;
- 2) исследованные бруски АС6 200/160 М2-01 100% работали в условиях интенсивного самозатачивания, поэтому зёрна вырывались, не успевая затупляться;
- 3) форма профиля зёрен на небольшом уровне от вершины весьма слабо зависит от зернистости, так как микровершины зёрен примерно одинаковы.

Таблица 4.2

Результаты степенной аппроксимации профиля зерен

№ п/п	Показатели	Зернистость		
		АС6 200/160 М2-01 100%	АС6 125/100 М2-01 100%	АСМ 28/20 М2-01 100%
1	Число интервалов высоты n	7	11	11
2	$t_{q,n-2}$	2,015	1,833	1,833
3	$S_{lg C}$	0,0031	0,0034	0,0040
4	$S_{\frac{1}{m}}$	0,019	0,020	0,022
5	$lg C$	2,354±0,006	2,0131±0,006	2,400±0,007
6	C	0,0226±0,0030	0,0131±0,0020	0,0251±0,0040
7	$\frac{1}{m}$	1,70±0,04	1,82±0,046	1,67±0,04
8	m	0,58±0,02	0,55±0,02	0,59±0,02
9	ρ_k	0,99	0,99	0,98

б. Закон распределения зёрен по высоте

Вначале разбиваем всю высоту h профилограммы царапанного образца на интервалы $\Delta h_i = 1 \text{ мкм}$ и подсчитываем количество царапин $n_{ци}$, попавших в интервал h_i (середина интервала). Если какая-либо царапина

попадает точно на границу интервалов, то её относим наполовину к каждому интервалу. Затем измеряем суммарную длину $(\sum l)_i$ участков металла, имеющих высоту больше \square_i , и вычисляем относительную длину опорного профиля:

$$P_i = \frac{1}{L} (\sum L)_i,$$

где L – полная длина профилограммы.

Деля $n_{ци}$ на P_i и на Δh_i , получаем функцию $\eta(\square_i)$ – плотность распределения глубины канавок с учётом вероятности их перекрытия [63].

Последовательность вычислений для одного из участков образца, царапанного бруском АС6 125/100 М2-01 100%, показана в таблице 4.3 (началом отсчёта высоты служит полированная поверхность образца).

Таблица 4.3

Расчет плотности распределения глубины канавок для бруска
АС6 125/100 М2-01 100% (L=34,0 мм)

h_i , мкм	1	2	3	4	5	6
$n_{ци}$, шт	49,5	43,0	29,5	22,0	17,0	9,5
P_i	0,844	0,897	0,930	0,958	0,976	0,988
$\eta(\square_i) \cdot 10^3, \frac{\text{шт}}{\text{мкм}^2}$	1,725	1,410	0,933	0,675	0,512	0,283
h_i , мкм	7	8	9	10	11	12
$n_{ци}$, шт	3,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0
P_i	0,955	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
$\eta(\square_i) \cdot 10^3, \frac{\text{шт}}{\text{мкм}^2}$	0,088	0,088	0,029	0,029	0,029	0,000

Аналогичные расчёты $\eta(\square)$ выполнены для всех брусков, указанных выше зернистостей.

В дальнейшем необходимо аппроксимировать экспериментальные $\eta(\square)$ степенными зависимостями:

$$\eta(\square) = k_{\eta} \cdot \square^{\beta_{\eta}}. \quad (4.13)$$

Начало отсчета высоты при этом выбираем так, чтобы точность степенной аппроксимации была наибольшей.

Расчёт коэффициентов k_{η} и β_{η} ведём методом наименьших квадратов по таким же формулам, что и расчёт параметров формы зёрен (4.9 – 4.12), только вместо $\bar{x}, z(\bar{x}), \frac{1}{m}, C$ будут фигурировать $h, \eta(h), \beta_{\eta}, k_{\eta}$. Поэтому приводим сразу окончательные результаты, сведенные в таблице 4.4. Для иллюстрации показаны графики усредненных значений функций $\eta(\square)$ и соответствующие экспериментальные точки (рисунок 4.5 а, б, в).

Таблица 4.4

Степенная аппроксимация плотности распределения
глубины канавок (шт./мкм²)

№ п/п	Показателей	Зерно		
		АС6 200/160 М2-01 100%	АС6 125/100 М2-01 100%	АСМ 28/20 М2- 01 100%
1	Число измеренных брусков	3	3	3
2	Число интервалов n	15	12	11
3	$t_{10\%,n-2}$	1,770	1,812	1,833
4	$S_{lg k_{\eta}}$	0,032	0,082	0,034
5	$S_{\beta_{\eta}}$	0,183	0,020	0,146
6	$lg k_{\eta}$	8,857±0,057	7,744±0,036	6,256±0,062
7	$k_{\eta} \cdot 10^6$	0,073±0,010	0,55±0,01	1,82±0,26
8	β_{η}	3,06±0,32	3,05±0,15	2,69±0,27
9	ρ_k	0,997	0,996	0,987

Нахождение закона распределения зёрен по высоте режущего слоя производится по формуле плотности распределения зёрен по высоте (3.7). Например, для брусков АС6 125/100 М2-01 100% имеем:

$$n(\square) = k \cdot \square^\beta = \frac{0.55 \cdot 10^{-6} \cdot 6.311 \cdot \square^{3.05-0.5}}{\sqrt{2 \cdot 3.14 \cdot 52.5 \cdot 10^3 \cdot 3.474}} = 1.74 \cdot 10^{-9} \cdot \square^{2.55} (\text{шт}/\text{мкм}^2).$$

Закон распределения в интегральной форме:

$$N(\square) = 0.49 \cdot 10^{-9} \cdot \square^{3.55} = k_N \cdot \square^{\beta_N} (\text{шт}/\text{мкм}^2).$$

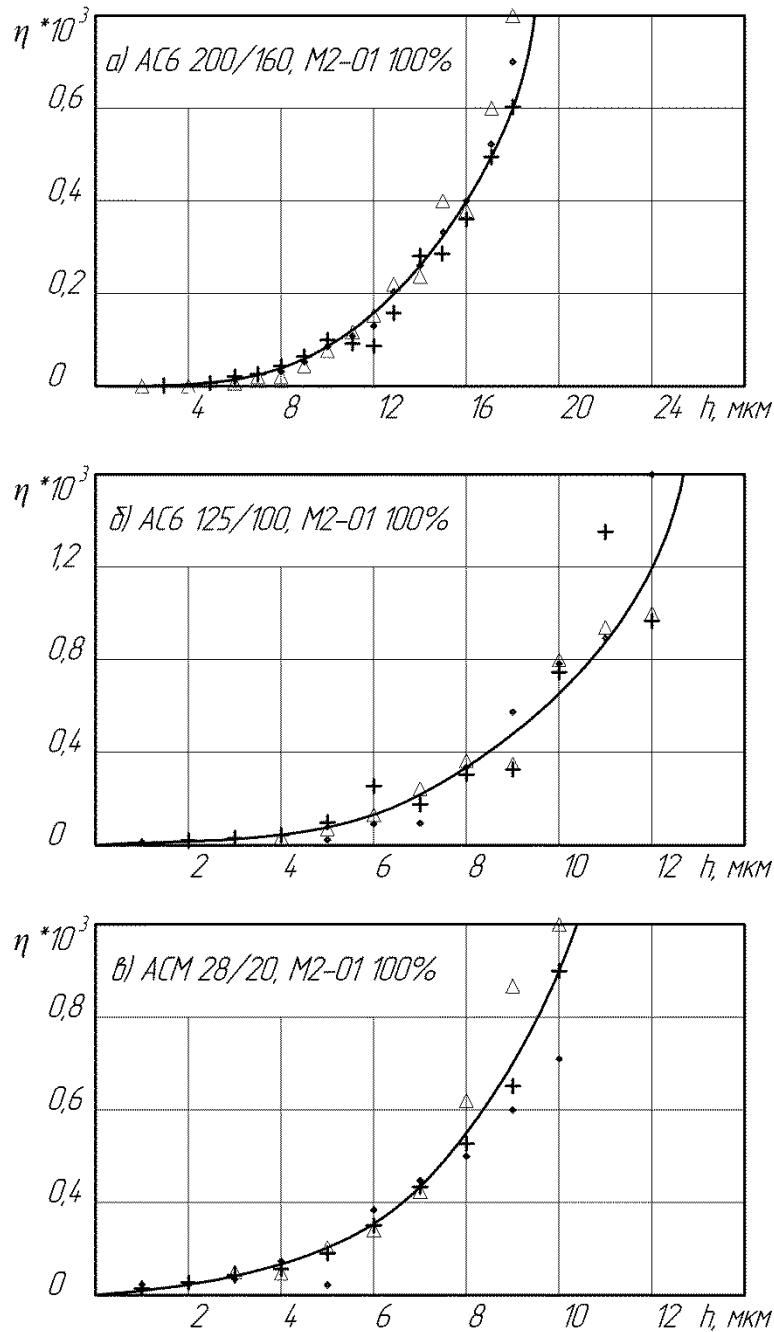


Рисунок 4.5. Плотность распределения глубин царапин (шт./мкм²).
Для брусков: а) АС6 200/160 М2-01 100%; б) АС6 125/100 М2-01 100%;
в) АСМ 28/20 М2-01 100%

Доверительные интервалы для параметров находим, подставляя в формулу (3.7) крайние значения k_N и β_N . Итоговые данные сведены в таблицу 4.5, а также построены графики закона распределения $N(\square)$ для исследованных зернистостей (рисунок 4.6).

Таблица 4.5

Параметры закона распределения зёрен по высоте
 $n(h)$ (шт/мкм²), или $N(h)$ (шт/мкм²)

№ п/п	Показатель	Зерно		
		АС6 200/160 М2-01 100%	АС6 125/100 М2-01 100%	АСМ 28/20 М2-01 100%
1	$k \cdot 10^9$	0.232±0.032	1.79±0.12	5.39±0.75
2	β	2.56±0.32	2.55±0.13	2.19±0.22
3	$k_N \cdot 10^9$	0.065±0.009	0.49±0.034	1.69±0.24
4	β_N	3.56±0.32	3.55±0.13	3.19±0.22

Полученные результаты показывают влияние зернистости брусков на закон распределения зёрен по высоте. С увеличением зернистости повышается высота зёрен над уровнем связки, и одновременно резко уменьшается число зёрен на единице площади инструмента. Это ведёт к некоторому возрастанию показателя степени β и к значительному уменьшению коэффициента k . Однако рассматривать изменения β и k независимо друг от друга нельзя, так как только их сочетание характеризует форму и значения закона распределения. Например, смещение начала отсчета глубины царапин на несколько микрометров приводит к существенным изменениям обоих параметров β и k .

В качестве примера выполним расчет геометрических характеристик режущей поверхности брусков АС6 125/100 М2-01 100%.

Используя формулы (2.27 – 2.31) и данные таблиц 2.1 – 2.5, находим:

$$S_0(H) = \frac{3.14 \cdot (1 + 0.17^2) \cdot 1.74 \cdot 10^{-9} \cdot 3.474 \cdot 1.0465 \cdot H^{4.65}}{2 \cdot 0.0131^{1.1} \cdot 65.853} = 1.87 \cdot 10^{-8} \cdot H^{4.65},$$

$$S_p(H) = \frac{2 \cdot 1.74 \cdot 10^{-9} \cdot 3.474 \cdot 0.8882 \cdot H^{5.10}}{0.0131^{0.55} \cdot 142.46} = 0.822 \cdot 10^{-9} \cdot H^{5.10},$$

$$\gamma(H) = -\arctg \left[\frac{S_0(H)}{S_p(H)} \right] = -\arctg(22.7 \cdot H^{-0.45}),$$

$$\lambda(H) = \frac{2 \cdot 1.74 \cdot 10^{-9} \cdot 3.474 \cdot 0.8882 \cdot H^{4.10}}{0.0131^{0.55} \cdot 27.933} = 4.19 \cdot 10^{-9} \cdot H^{4.10} \left(\frac{\mu\text{м}}{\text{мкм}} \right),$$

$$E(H) = \frac{3.14 \cdot (1 + 0.17^2) \cdot 1.74 \cdot 10^{-9} \cdot 3.474 \cdot 1.0465 \cdot H^{4.65}}{0.0131^{1.1} \cdot 65.853} = 3.73 \cdot 10^{-8} \cdot H^{4.65}.$$

Анализируя эти зависимости, можно увидеть, что проекции площади контакта S_0 , S_p очень быстро возрастают с увеличением глубины внедрения H . Передний угол γ меняется значительно медленнее: от -90° при $H=0$, до -81° при $H=14$ мкм.

Для проверки полученных данных сопоставим характеристики непрерывной модели $\lambda(H)$ и $E(H)$, найденные путём расчёта, с экспериментальными значениями, определёнными непосредственно по профилограмме АС6 125/100 М2-01 100%. На рисунке 4.7 в логарифмических координатах построены расчётные графики функций $\lambda(H)$, $E(H)$ и нанесены экспериментальные точки. В диапазоне высоты до 14 мкм, в котором производилось измерение глубины царапин, соответствие расчётных и экспериментальных данных подтверждает правильность разработанной методики исследования закона распределения по высоте и формы вершин абразивных зёрен.

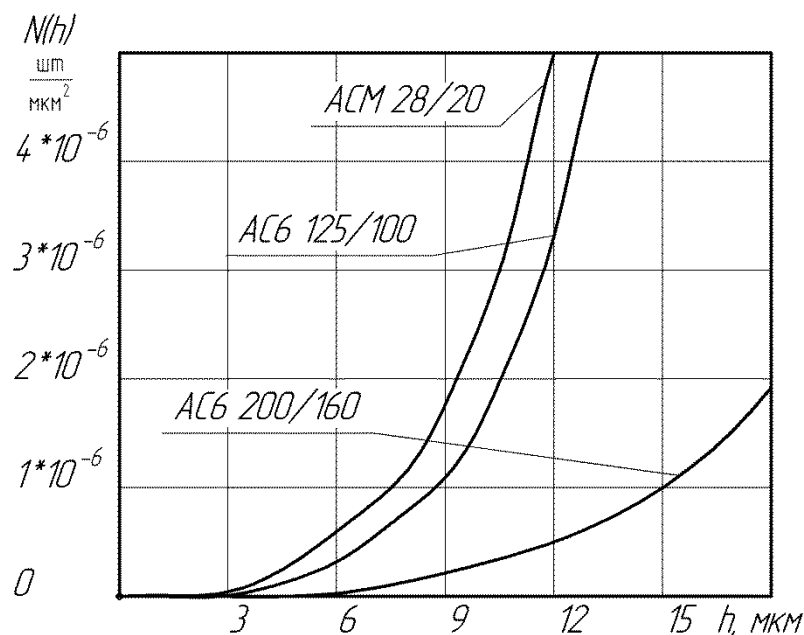


Рисунок 4.6. Закон распределения зёрен по высоте $N(h)$

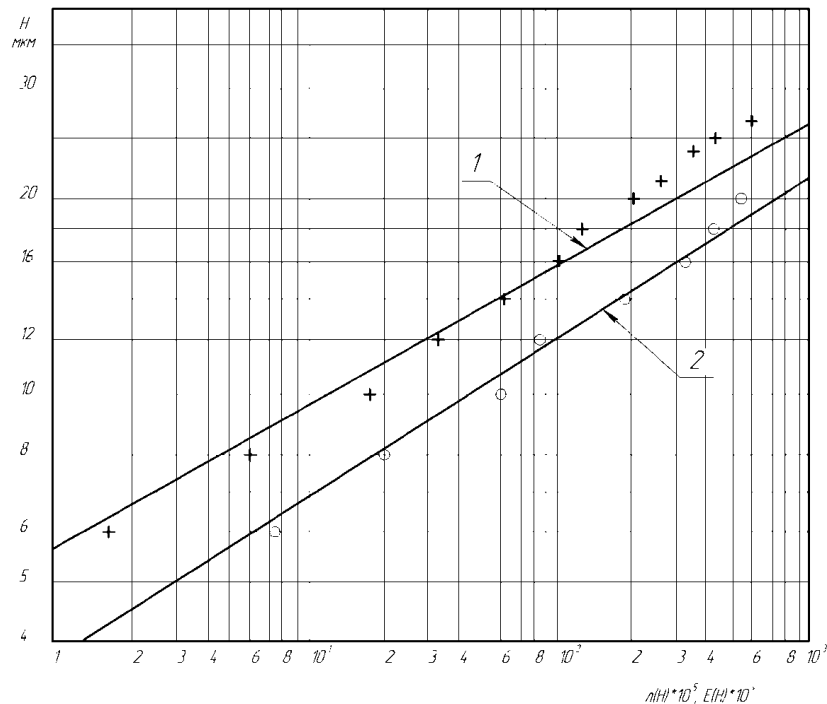


Рисунок 4.7. Сравнение экспериментальных (точки) и расчетных значений функций: 1 – среднее число выступов, $\lambda(H) \cdot 10^5$ (шт./мкм²), 2 – распределение высоты неровностей, $E(H) \cdot 10^3$

4.3. Экспериментальные исследования процесса хонингования чугунных гильз ДВС хонинговальными брусками с прерывистой рабочей поверхностью

Исследовалось влияние характеристик хонинговальных брусков, скоростей вращательного и возвратно-поступательного движений, а также усилия прижима брусков к детали на производительность, шероховатость поверхности и точность обработки. Также проведены испытания алмазных брусков с прерывистой поверхностью.

Постановка опытов велась с применением математических методов планирования экспериментов [18, 65] что дало возможность повысить точность и сократить объем исследований.

4.3.1. Условия проведения и обоснование плана экспериментов

Исследования проводились на гильзах КамАЗ-740, изготовленных из СЧ25 ГОСТ 1412-85, химический состав указан в таблице 4.6.

Таблица 4.6

Состав и свойства чугуна СЧ 25

Марка двигателя (чугуна), страна (фирма)-производитель	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo
КамАЗ-740, среднелегированные (СНГ)	3,1-3,4	1,9-2,5	0,6-0,9	0,2	0,12	0,25-0,5	0,15-0,4	0,25-0,4	0,12	-	-

Детали для эксперимента проходили предварительную обработку по стандартному технологическому процессу, включавшую черновое и чистовое растачивание отверстия, обточку наружной поверхности и предварительное хонингование брусками АС6 125/100 М2-01 100%. Время обработки замерялось секундомером и составляло 30-50 с.

Величина съёма металла рассчитывалась как разность средних размеров детали до и после обработки. Детали измерялись в трёх сечениях индикаторным нутромером с ценой деления 0,002 мм (НИ 10-18 0.002 КАЛИБР), причём в каждом сечении находили максимальный и минимальный размеры. Погрешности формы оценивались по овальности деталей, которая равна наибольшей из разности размеров в каждом сечении.

План эксперимента во многом определяется видом математической модели, выбранной для описания искомых эмпирических зависимостей. В общем виде связь между выходной величиной Y и независимыми переменными X_i выражается некоторой функциональной зависимостью:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots). \quad (4.14)$$

Для аппроксимации этой зависимости используются различные аналитические функции, например линейные полиномы:

$$Y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3 + \dots + B_{12}x_1x_2 + B_{13}x_1x_3 + \dots, \quad (4.15)$$

степенные функции:

$$Y = A \times x_1^{b_1} \times x_2^{b_2} \times x_3^{b_3} \quad (4.16)$$

и другие.

С точки зрения удобства планирования и проведения эксперимента целесообразны линейные модели, однако практика показывает, что большинство зависимостей при хонинговании не линейны, а близки к степенным. Чтобы совместить эти два условия, можно применить простой приём – перевод к логарифмическим координатам: $y^* = \lg y$, $x_i^* = \lg x_i$. Тогда в пространстве логарифмических координат степенные зависимости станут линейными, операция умножения заменится сложением, и мы получим удобную линейную модель, имеющую достаточную точность.

Для нахождения параметров линейных моделей процесса хонингования использована методика полного факторного эксперимента ПФЭ 2^n . Математическое планирование эксперимента применялось для исследования процессов алмазно- абразивной обработки [73]. Варьируемые факторы:

- X_1 – давление на бруски (Q),
- X_2 – окружная скорость ($V_{ок}$),
- X_3 – осевая скорость ($V_{ос}$).

Таблица 4.7

Уровни варьирования факторов в предварительных опытах

Факторы \ Уровни	Q, (кгс/см ²), (МПа)	$V_{ок}$, (м/мин)	$V_{ос}$, (м/мин)
	x^1	x^2	x^3
Верхний +1	10.6 (1,08 МПа)	83.1	14.4
Нижний -1	7.9 (0,8 МПа)	48.2	9.6

Каждый опыт повторялся трижды, рассчитывалось среднее значение переменной \bar{Y}_u и дисперсии единичного значения $S^2\{Y_{ul}\}$:

$$\bar{Y}_u = \frac{\sum_l Y_{ul}}{m}, \quad (4.17)$$

$$S^2\{Y_{ul}\} = \frac{\sum_l Y_{ul}^2 - m \times \bar{Y}_u^2}{m}, \quad (4.18)$$

где $l = 1, 2 \dots m$; m – число повторения каждого опыта.

Воспользовавшись линейной моделью, рассчитываем коэффициенты регрессии для скорости съёма:

$$b_i = \frac{\sum_u x_{ui} \times \bar{Y}_u}{N}, b_{ij} = \frac{\sum_u x_{ui} \times x_{uj} \times \bar{Y}_u}{N}, \quad (4.19)$$

где N – число опытов в матрице планирования ($N=8$).

Таблица 4.8

Матрица планирования и результаты предварительных опытов

№	Варьируемые факторы			Выходные параметры		
	X1	X2	X3	Величина съёма на диаметр детали (мкм)	Скорость съёма, \bar{Y}_u (мкм/мин)	Дисперсия $s^2\{Y_{ul}\}$
1	-1	-1	-1	53,8	162	128
2	+1	-1	-1	57,2	172	8
3	-1	+1	-1	66,9	200	338
4	+1	+1	-1	75,0	230	675
5	-1	-1	+1	58,1	174	826
6	+1	-1	+1	60,2	180	334
7	-1	+1	+1	72,0	216	1980
8	+1	+1	+1	82,3	246	1078

В результате расчётов получено уравнение регрессии в кодированном виде:

$$Y = 65.5 + 2.99x_1 + 8.35x_2 + 2.46x_3 + 1.62x_1x_2 + 0.11x_1x_3 + 0.64x_2x_3 + 0.44x_1x_2x_3.$$

Для статистического анализа уравнения регрессии подсчитываем:

1. Среднюю дисперсию единичного значения:

$$S^2\{Y\} = \frac{\sum_u s^2\{Y_{ul}\}}{N} = \frac{5367}{8} = 671. \quad (4.20)$$

2. Дисперсию среднего:

$$S^2\{\bar{Y}\} = \frac{\sum_u s^2\{Y_{ul}\}}{m \times N} = \frac{671}{3} = 224. \quad (4.21)$$

3. Дисперсию коэффициентов регрессии:

$$S^2\{b_i\} = \frac{1}{N} S^2\{\bar{Y}\} = \frac{224}{8} = 28. \quad (4.22)$$

Доверительный интервал для b_i определяем с помощью критерия Стьюдента. Число степеней свободы $f_t = N - 1 = 7$, уровень риска оцениваем 10%, тогда $t_{10\%,7} = 1.90$.

Коэффициент регрессии считается значимым, если

$$|b_i| > t \times \sqrt{S^2\{b_i\}}. \quad (4.23)$$

В данном случае:

$$t \times \sqrt{S^2\{b_i\}} = 1.90 \times \sqrt{28} = 10.0.$$

Сравнивая это значение с коэффициентами уравнения регрессии, видим, что все они меньше критического значения, и лишь коэффициент x_2 приближается к нему. Из этого следует, что точность полученного уравнения недостаточна из-за разброса экспериментальных данных. Кроме того, коэффициенты при факторах x_1 и x_3 почти в три раза меньше коэффициента при x_2 , что свидетельствует о слишком малом диапазоне варьирования давления (x_1) и возвратно-поступательной скорости (x_3). На основании этого были сделаны следующие выводы:

1. Для повышения стабильности процесса и уменьшения влияния побочных факторов необходимо:

- а) снизить исходную погрешность формы деталей путём отбора для опытов деталей с погрешностью не более 0,04 мм;
- б) рассортировать детали по твёрдости на четыре группы, причём в каждом опыте использовать равное число деталей из каждой группы;
- в) порядок проведения экспериментов (опытов) принять случайным.

2. Для повышения статистической достоверности результатов следует увеличить число повторений каждого опыта до восьми.

3. Увеличить диапазон варьирования давления и возвратно-поступательной скорости до пределов $\frac{x_{max}}{x_{min}=2 \div 3}$.

4. Для более точной аппроксимации экспериментальных данных и учёта нелинейного характера искомых зависимостей перейти в плане эксперимента к логарифмическим координатам.

4.4. Результаты экспериментального исследования алмазного хонингования по плану ПФЭ 2^4

На основании предварительных экспериментов разработан план ПФЭ 2^4 исследования алмазного хонингования брусками АС6 I25/I00 М2-01 100%, и АСМ 28/20 М2-01 100% [64]. Фиксируемые выходные параметры процесса:

- а) величина съёма металла (Δ),
- б) скорость съёма (q),
- в) интенсивность съёма (b),
- г) среднеарифметическая высота микронеровностей поверхности детали (Ra),
- д) овальность деталей (a).

Варьируемые факторы x_1 , x_2 , x_3 те же, что и ранее, но к ним добавлен четвёртый фактор x_4 – зернистость, которую можно охарактеризовать одним параметром – среднекубическим размером зёрен D . Согласно измерениям, для зернистости 125/100, принимаем $D=112$, а для зернистости 28/20, принимаем $D=89$.

Уровни изменения факторов указаны в таблице 4.4, причём для последующей оценки адекватности уравнений регрессии предусмотрены промежуточные уровни варьирования.

Таблица 4.9

Уровни варьирования факторов в основных опытах

Факторы Уровни	Q, кгс/см ² , (МПа)	V _{ок} , м/мин	V _{ос} , м/мин	D, мкм
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
Верхний +1	13,6 (1,3 МПа)	83,1	18,3	112

Факторы	Q, кгс/см ² , (МПа)	V _{ок} , м/мин	V _{ос} , м/мин	D, мкм
Уровни	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
Нижний -1	6,6 (0,6 МПа)	48,2	5,6	89
Промежуточный	10,1 (1 МПа)	54,2	11,9	-

Переход к логарифмическим координатам и кодирование независимых переменных выполнены по следующим формулам:

$$x_1 = \frac{\lg Q - (\lg Q)_{cp}}{(\lg Q)_{cp} - (\lg Q)_{min} \lg Q}, \quad (4.24)$$

аналогично для других факторов:

$$x_2 = 8.40 \cdot \lg V_{ок} - 15,15 \quad (4.25)$$

$$x_3 = 3.89 \cdot \lg V_{ос} - 3,91 \quad (4.26)$$

$$x_4 = 20.0 \cdot \lg D - 40.0 \quad (4.27)$$

Также прологарифмированы зависимые переменные:

$$y_1 = \lg q, y_2 = \lg b, y_3 = \lg R_a, y_4 = \lg a. \quad (4.28)$$

Матрица планирования, результаты измерения переменных и их дисперсии сведены в таблицу 4.9.

Прежде чем вести регрессионный анализ эксперимента, рекомендуется проверить однородность дисперсии переменных по критерию Кохрена:

$$G = \frac{S_{umax}^2}{\sum_u S_{u,кр}^2} \quad (4.29)$$

Если неравенство выполняется при значении $G_{кр}$, соответствующем выбранному уровню значимости (обычно 0,05), то гипотеза об однородности принимается. Числа степеней свободы для критерия Кохрена равны $f_1=16$, $f_2=7$, причём в данном случае аналогичны. Уровень значимости принимаем 0,05, тогда $G_{кр} = 0,1911$.

Вычисляем отношение Кохрена для параметров:

$$\text{(скорость съёма)} \quad G = \frac{0.00827}{0.05650} = 0.1462$$

$$\text{(интенсивность съёма)} \quad G = \frac{0.00827}{0.05650} = 0.1462$$

$$\text{(шероховатость)} \quad G = \frac{0.00476}{0.02829} = 0.1682$$

$$(\text{овальность}) \quad G = \frac{0.0788}{0.5913} = 0.1355$$

Поскольку все отношения меньше критического значения, то дисперсии считаем однородными.

Вычисляем коэффициенты регрессии по формулам (4.19) и находим уравнение регрессии в кодированном виде для:

- скорости съёма металла (4.30)

$$y_1 = 2.246 + 0.0935x_1 + 0.0910x_2 + 0.0988x_3 - 0.0011x_4 - 0.0076x_1x_4 + 0.0226x_1x_3 + \\ + 0.0024x_2x_3 - 0.0060x_1x_4 - 0.0105x_2x_4 + 0.0090x_3x_4 + 0.0242x_1x_2x_3 + 0.0040x_1x_2x_4 - \\ - 0.0109x_1x_3x_4 - 0.0031x_2x_3x_4 + 0.0090x_1x_2x_3x_4;$$

- интенсивности съёма (4.31)

$$y_2 = -5.2703 + 0.0917x_1 - 0.0247x_2 + 0.0914x_3 - 0.0036x_4 - 0.0054x_1x_2 + 0.0202x_1x_3 + \\ + 0.0053x_2x_3 - 0.0051x_1x_4 - 0.0074x_2x_4 + 0.0074x_3x_4 + 0.0268x_1x_2x_3 + 0.0033x_1x_2x_4 - \\ - 0.0083x_1x_3x_4 - 0.0009x_2x_3x_4 + 0.0068x_1x_2x_3x_4;$$

- среднеарифметической высоты неровностей (4.32)

$$y_3 = -0.0001 + 0.0156x_1 + 0.0028x_2 + 0.0186x_3 + 0.0189x_4 + 0.0031x_1x_2 + 0.0064x_1x_3 - \\ - 0.0018x_2x_3 + 0.0031x_1x_4 - 0.0022x_2x_4 + 0.0034x_3x_4 + 0.0072x_1x_2x_3 - 0.0058x_1x_2x_4 - \\ - 0.0019x_1x_3x_4 + 0.0010x_2x_3x_4 + 0.0030x_1x_2x_3x_4;$$

- овальности деталей (4.33)

$$y_4 = 1.048 + 0.0361x_1 + 0.0194x_2 - 0.230x_3 + 0.0598x_4 + 0.0002x_1x_2 + 0.0029x_1x_3 - \\ - 0.0196x_2x_3 + 0.0276x_1x_4 - 0.0306x_2x_4 + 0.0200x_3x_4 - 0.0100x_1x_2x_3 + 0.0085x_1x_2x_4 + \\ + 0.0171x_1x_3x_4 - 0.154x_2x_3x_4 + 0.0170x_1x_2x_3x_4.$$

Значимость коэффициентов регрессии находим при помощи критерия Стьюдента (4.23), для чего по формулам (4.20 – 4.22) рассчитываем дисперсии и доверительные интервалы соответствующих величин (таблица 4.10)

Таблица 4.10

Дисперсии и доверительные интервалы ($t_{5\%, 15} = 2.13$)

Дисперсия Переменная	$S^2\{y\}$	$S^2\{\bar{y}\}$	$S^2\{b_i\}$	$t\sqrt{S^2\{b_i\}}$
y1	0.00353	0.000441	0.0000276	0.0112
y2	0.00353	0.000441	0.0000276	0.0112
y3	0.00177	0.000221	0.0000138	0.0079

y4	0.0370	0.00462	0.000289	0.0362
----	--------	---------	----------	--------

Отбросив несущественные члены уравнений, для которых коэффициенты регрессии меньше критического значения, получим:

- для скорости съёма металла (4.34)

$$y = 2.2460 + 0.0935x_1 + 0.0910x_2 + 0.0988x_3 + 0.0226x_1x_3 + 0.0242x_1x_2x_3;$$

- для интенсивности съёма (4.35)

$$y_2 = -5.2703 + 0.0917x_1 - 0.0247x_2 + 0.0914x_3 + 0.0202x_1x_3 + 0.0268x_1x_2x_3;$$

- для среднеарифметической высоты неровностей (4.36)

$$y_3 = -0.0001 + 0.0156x_1 + 0.0186x_3 + 0.0189x_4;$$

- для овальности деталей (4.37)

$$y_4 = 1.0480 + 0.0361x_1 + 0.0598x_4.$$

Оценим адекватность уравнений регрессии с помощью дополнительных к ПФЭ 2^4 опытов, поставленных на промежуточных уровнях варьирования факторов (таблица 4.11, позиции 17–18).

Рассчитываем дисперсию адекватности по сумме квадратов отклонений расчётных значений переменных от фактических:

$$S_{ag}^2 = \frac{1}{m} \cdot \sum_u (y_{расч.u} - \bar{y}_u)^2. \quad (4.38)$$

Вычисляем отношение:

$$F = \frac{S_{ag}^2}{S^2\{\bar{y}\}} \quad (4.39)$$

и сравниваем его с табличным значением критерия Фишера $F_{кр}$. Если $F < F_{кр}$ для принятого уровня риска, то гипотеза адекватности принимается. Табличное значение $F_{кр}$ для данных условий равно $F_{5\%,112,2} = 3.08$ (где 5% – уровень риска, 112 – число степеней свободы для $S^2\{\bar{y}\}$, 2 – число степеней свободы для S_{ag}^2). Результаты расчётов (таблица 4.11) показывают, что уравнения регрессии (4.34 – 4.37) адекватно описывают процесс хонингования в исследованной области изменения входных факторов.

Проверка адекватности

Переменная	Опыт № 17		Опыт № 18		S_{ag}^2	F
	Расчёт	Фактич.	Расчет	Фактич.		
y1	2.228	2.224	2.228	2.271	0.000933	2.11
y2	-6.779	-6.774	-6.779	-6.821	0.000893	2.02
y3	-0.012	-0.042	0.025	0.042	0.000594	2.68
y4	0.995	1.134	1.114	1.140	0.0100	2.16

Поскольку план эксперимента ПФЭ 2ⁿ ортогональный, все коэффициенты регрессии некоррелированы между собой. Это даёт возможность анализировать процесс хонингования, рассматривая величину каждого коэффициента регрессии отдельно – независимо от других.

Увеличение давления на бруски (x_1) ведёт к повышению скорости и интенсивности съёма металла, также возрастают шероховатость и овальность деталей. На это указывают положительные коэффициенты при x_1 .

Окружная скорость (x_2) повышает скорость съёма металла, однако интенсивность съёма при этом снижается. Объяснить эту закономерность можно исходя из положения о возникновении повышенного давления в зоне резания. Чем больше скорость резания, тем меньше усилие, внедряющее зёрна в металл, и меньше интенсивность съёма. Снижению интенсивности съёма способствует также то, что с увеличением $V_{ок}$ уменьшается угол скрещивания рисок 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 (x_2) большого влияния не оказывает.

С ростом осевой скорости хонинговки $V_{ос}$ (x_3) интенсивность и скорость съёма увеличиваются, также повышается и шероховатость детали. Такой характер влияния $V_{ос}$ 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, а зависимость съёма от угла скрещивания достигает максимума. Однако в наших опытах угол α был менее 67° , поэтому максимум не достигался – рассматриваемая зависимость монотонно возрастающая.

Уравнения (4.34, 4.35) показывают наличие взаимодействия давления скорости движения хонголки. Это объясняется следующим образом: при большом давлении на бруски ($x_1=+1$) и высокой окружной скорости ($x_2=+1$), возрастает давление в подбрусовом пространстве, поэтому повышение осевой скорости движения (x_3) и связанное с этим улучшение выхода шлама из-под бруска должно в гораздо большей степени повышать съём, чем при малых значениях окружной скорости и давления.

Уравнения регрессии (4.34, 4.35) показывают, что в исследованном диапазоне зернистость практически не влияет на съём металла. Это обусловлено двумя причинами:

- 1) Острота зёрен брусков АСМ 28/20 больше, чем у АС6 125/100, что должно увеличивать интенсивность съёма.
- 2) Зазор между связкой и металлом у брусков АСМ 28/20 меньше, что затрудняет выход шлама, увеличивает давление в зоне резания и снижает интенсивность съёма. Действие этих противоположных тенденций в данных условиях хонингования, очевидно, взаимно компенсируется.

4.5. Сравнение теоретических и экспериментальных положений

Рассмотрим, в какой степени соответствуют полученным экспериментальным данным результаты теоретических исследований.

Рассчитаем среднеарифметическую высоту микронеровностей поверхности детали при хонинговании брусками АСМ 28/20 М2-01 100%:

$$R_a = r_2 \cdot \left(\frac{b \cdot C^m}{k} \right)^{\frac{1}{p}} = 0.32 \cdot \left(\frac{0.0251^{0.59}}{5.39 \cdot 10^{-9}} \right)^{\frac{1}{4.78}} \cdot b^{\frac{1}{4.78}} = 10.9 \cdot b^{0.209} \text{ (МКМ)}$$

Аналогично для брусков АС6 125/100 М2-01 100%:

$$R_a = 10.1 \cdot b^{0.196} \text{ (МКМ)}.$$

Перейдём к логарифмическим координатам и подставим в эти формулы значение интенсивности съёма b из уравнения (4.17), тогда:

$$\lg R_a = -0.064 + 0.0192x_1 - 0.0052x_2 + 0.0191x_3 + 0.0042x_1x_3 + 0.0056x_1x_2x_3 \text{ (для АСМ 28/20 М2-01 100\%);}$$

$$\lg R_a = -0.027 + 0.0180x_1 - 0.0048x_2 + 0.0179x_3 + 0.0040x_1x_3 + 0.0052x_1x_2x_3 \text{ (для АС6125/100 М2-01 100\%).}$$

Сравнивая расчётные значения коэффициентов регрессии с критическим уровнем значимости (таблица 4.12), видим, что всеми взаимодействиями можно пренебречь.

Объединим оба уравнения в одно, введя четвёртый фактор – зернистость брусков x_4 . При этом новые коэффициенты регрессии находятся как полусумма исходных, а коэффициент при новом факторе равен полуразности свободных членов:

$$y_3 = \lg R_a = -0.0455 + 0.0186x_1 + 0.0185x_3 + 0.0185x_4. \quad (4.40)$$

Сопоставляя (4.40) с уравнением (4.36), полученным экспериментально, делаем вывод, что расхождение коэффициентов при всех факторах находится в пределах случайных погрешностей. Статистически достоверна только разница свободных членов, из-за которой теоретическое значение в среднем на 12% меньше действительного. Для наглядности на рисунке 4.8. показаны теоретическая и экспериментальная зависимости шероховатости от давления на бруски.

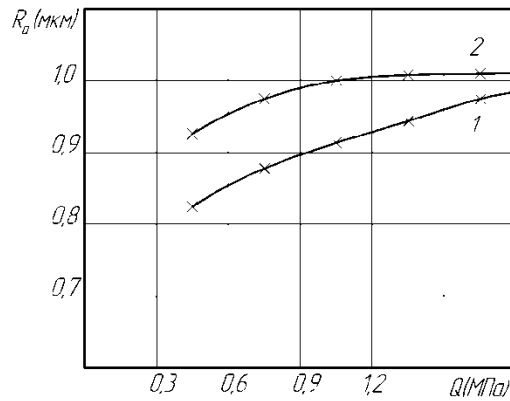


Рисунок 4.8. Зависимость шероховатости Ra от давления на бруски Q (сечение плана эксперимента ПФЭ2⁴ гиперплоскостью $x_2=x_3=x_4=0$).
1 – теоретическая, 2 – экспериментальная.

Случайное расхождение объясняется влиянием пластического вытеснения металла по краям царапин, которое не учитывалось при теоретическом исследовании. Однако эта разница допустима на практике, поэтому следует признать, что полученные теоретические зависимости согласуются с экспериментальными данными.

Выражение для расчёта интенсивности съёма металла в зависимости от давления, внедряющего абразивные зерна в металл, и физических характеристик процесса хонингования:

$$b = \left[\frac{Q \cdot C \frac{m \cdot (\beta + 3)}{p}}{\pi \cdot r_4 \cdot \delta_s \cdot k \frac{1-m}{p}} \right]^{\frac{p}{\beta + 2m + 1}}$$

Найдём интенсивность съёма металла в зависимости от давления:

для брусков АСВ100/80 М1 50%:

$$b = \left[\frac{0.0251 \left(\frac{0.59 \cdot 5.19}{4.78} \right) \cdot Q}{3.14 \cdot 0.45 \cdot (5.39 \cdot 10^{-9})^{\frac{0.41}{4.78}} \cdot 2 \cdot 10^5} \right]^{\frac{4.78}{4.37}} = 5.02 \cdot 10^{-7} \cdot Q^{1.093};$$

для брусков АСВ 125/100 М1 50%:

$$b = \left[\frac{0.0251 \left(\frac{0.55 \cdot 5.55}{5.1} \right) \cdot Q}{3.14 \cdot 0.46 \cdot (1.74 \cdot 10^{-9})^{\frac{0.45}{5.1}} \cdot 2 \cdot 10^5} \right]^{\frac{5.1}{4.66}} = 4.18 \cdot 10^{-7} \cdot Q^{1.096}.$$

Перейдем к логарифмическим координатам и введем преобразование давления Q (4.11), тогда:

для брусков АСМ 28/20 М2-01 100%:

$$\lg b = -5.230 + 0.172x_1;$$

для брусков АС6 125/100 М2-01 100%:

$$\lg b = -5.305 + 0.173x_1;$$

или, объединив оба уравнения, получим:

$$y_2 = \lg b = -5.267 + 0.172x_1 - 0.037x_4. \quad (4.41)$$

В то же время уравнение (4.41) предсказывает более сильное влияние давления (x_1) и зернистости (x_4), чем в действительности, и не учитывает влияние скоростей движения (x_2, x_3).

Характер различия коэффициентов регрессии уравнений (4.41) и (4.35) соответствует положению о возникновении давления в зоне резания. При разомкнутых обратных связях интенсивность съёма почти прямолинейно зависит от давления на бруски Q (рисунок 4.9, кривая 1). Однако с увеличением давления Q одновременно возрастает противодействие шлама и СОЖ, поэтому интенсивность съёма фактически должна повышаться в меньшей степени, чем Q . Данные эксперимента показывают правомерность такого вывода (рисунок 4.9, кривая 2).

В среднем экспериментальные значения интенсивности съёма на 30% меньше расчётных, соответствующих процессу хонингования при условно разомкнутых обратных связях. При неблагоприятных сочетаниях скоростей движения и давления на бруски разница достигает 50%.

Таким образом, проведённые эксперименты подтверждают закономерность процесса хонингования и свидетельствуют о наличии значительного резерва повышения эффективности хонингования за счёт уменьшения вредного давления в подбрусковом пространстве.

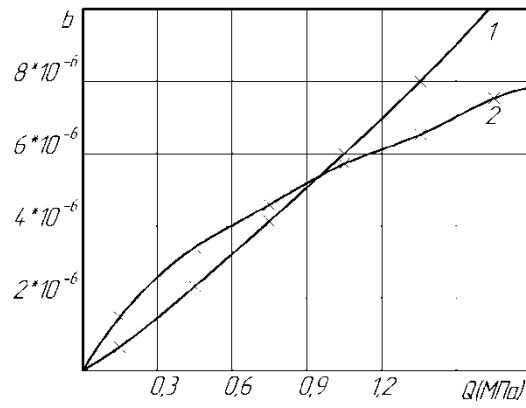


Рисунок 4.9. Зависимость интенсивности съема b от давления на бруски Q (сечение плана эксперимента ПФЭ 2^4 гиперплоскостью $x_2=x_3=x_4=0$).

1 – теоретическая, при условно разомкнутых обратных связях,

2 – экспериментально

Матрица планирования, результаты измерения переменных и их дисперсии

п/п	Варьируемые факторы				Выходные параметры											
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Скорость съема \bar{q} , мкм/мин	$Y_{1u} = \lg \bar{q}$	Дисперсия $S^2\{Y_{1u}\}$	Интенсивност ь съема \bar{b}	$Y_{1u} = \lg \bar{b}$	Дисперсия $S^2\{Y_{2u}\}$	Шероховатост ь R_a , мкм	$Y_{1u} = \lg \bar{R}_a$	Дисперсия $S^2\{Y_{3u}\}$	Овальность \bar{e} , мкм	$Y_{1u} = \lg \bar{e}$	Дисперсия $S^2\{Y_{4u}\}$
1	-1	-1	-1	-1	93	1.968	0.00479	$3.77 \cdot 10^{-6}$	-6.576	0.00479	0,089	-0.050	0.00095	9.4	0.973	0.0788
2	+1	-1	-1	-1	143	2.155	0.00551	$5.89 \cdot 10^{-6}$	-6.770	0.00551	0,097	-0.014	0.00113	9.6	0.982	0.0801
3	-1	+1	-1	-1	164	2.215	0.00252	$3.86 \cdot 10^{-6}$	-6.586	0.00252	0,094	-0.027	0.00135	11.1	1.045	0.0580
4	+1	+1	-1	-1	196	2.292	0.00341	$4.62 \cdot 10^{-6}$	-6.665	0.00341	0,090	-0.046	0.00118	13.1	1.127	0.0498
5	-1	-1	+1	-1	126	2.100	0.00263	$5.18 \cdot 10^{-6}$	-6.714	0.00263	0,095	-0.022	0.00198	7.4	0.870	0.0408
6	+1	-1	+1	-1	229	2.360	0.00152	$8.73 \cdot 10^{-6}$	-6.942	0.00152	0,107	+0.033	0.00064	8.5	0.930	0.0576
7	-1	+1	+1	-1	203	2.308	0.00224	$4.68 \cdot 10^{-6}$	-6.670	0.00224	0,094	-0.027	0.00108	10.8	1.033	0.0215
8	+1	+1	+1	-1	380	2.580	0.00080	$8.76 \cdot 10^{-6}$	-6.943	0.00080	0,101	0.004	0.00055	8.9	0.950	0.0452
9	-1	-1	-1	+1	88	1.944	0.00537	$3.57 \cdot 10^{-6}$	-6.553	0.00537	0,093	-0.031	0.00222	11.1	1.045	0.0144
10	+1	-1	-1	+1	147	2.168	0.00197	$5.95 \cdot 10^{-6}$	-6.774	0.00197	0,105	-0.022	0.00291	13.5	1.130	0.0258
11	-1	+1	-1	+1	151	2.179	0.00075	$3.56 \cdot 10^{-6}$	-6.552	0.00075	0,099	-0.004	0.00292	12.3	1.090	0.0304
12	+1	+1	-1	+1	181	2.258	0.00763	$4.27 \cdot 10^{-6}$	-6.630	0.00763	0,100	0.000	0.00260	15.1	1.180	0.0399
13	-1	-1	+1	+1	160	2.204	0.00805	$6.10 \cdot 10^{-6}$	-6.786	0.00805	0,106	+0.026	0.00123	12.1	1.083	0.0076
14	+1	-1	+1	+1	220	2.342	0.00827	$8.30 \cdot 10^{-6}$	-6.920	0.00827	0,114	+0.056	0.00476	16.6	1.220	0.0125
15	-1	+1	+1	+1	201	2.303	0.00049	$4.64 \cdot 10^{-6}$	-6.667	0.00049	0,102	+0.009	0.00214	9.1	0.960	0.0057
16	+1	+1	+1	+1	366	2.562	0.00055	$8.45 \cdot 10^{-6}$	-- -6.927	0.00055	0,118	+0.072	0.00064	14.4	1.158	0.0232
17	+0,18	- 0,60	+0,20	-1	168	2.224	-	$5.95 \cdot 10^{-6}$	-6.774	-	0,091	-0.42	-	13.6	1.134	-
18	+0,18	- 0,60	+0,20	+1	187	2.271	-	$6.63 \cdot 10^{-6}$	-6.821	-	0,110	+0.042	-	13.8	1.140	-

4.6. Результаты испытаний хонинговальных брусков с прерывистой рабочей поверхностью

Теоретически проанализирована возможность снижения давления шлама и СОЖ в зоне резания путём нанесения канавок на рабочую поверхность хонинговальных брусков. С целью проверки эффективности брусков с прерывистой рабочей поверхностью в технологическом процессе нами были проведены на базе ОАО «59 Арсенал» исследования по хонингованию чугунных гильз к двигателю КамАЗ-740.

Испытывались абразивные бруски КЗ 10 СТ1 К и алмазные бруски АС6 160/125 М2-01 100% при хонинговании гильз из закалённого серого чугуна СЧ25 ГОСТ 1412-85, а также алмазные бруски АС6 125/100 М2-01 100% и АС 28/20 М2-01 100%.

Обработка велась на вертикально-хонинговальном станке ЗБ8ЭЗ. Режимы хонингования были одинаковыми для всех видов брусков. Окружная скорость вращения хона $V_{окр} = 63 \text{ м/мин}$, $V_{г-н} = 15,5 \text{ м/мин}$, давление $P = 1,4 \text{ МПа}$. Прерывистая поверхность на брусках создавалась путём прорезки канавок дисковым алмазным кругом MESSER G/A 200x1,6x22,2/25,4 мм. Количество канавок на одном бруске – 2 (рисунок 4.10) [73].

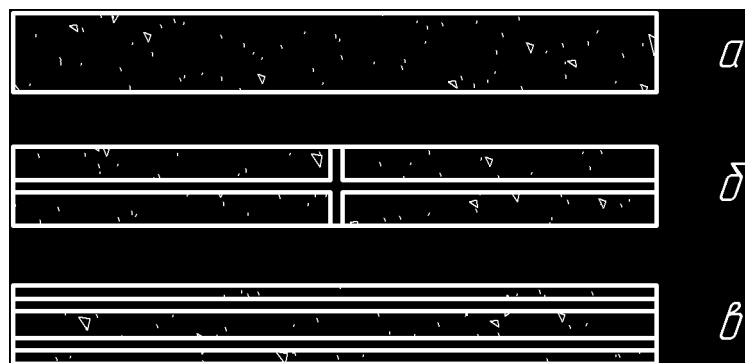


Рисунок 4.10. Абразивные или алмазные хонинговальные бруски (с канавками (б,в) и без канавок (а)).

Для более точного определения степени влияния прерывистой поверхности на процесс хонингования и уменьшения случайных погрешностей, связанных с нестабильностью брусков, был разработан поэтапный план:

- а) подготовка комплекта брусков с канавками и без канавок;
- б) обработка пары деталей хонинговальными брусками без канавок с заданными режимами обработки;
- в) обработка пары деталей хонинговальными брусками с канавками с заданными режимами обработки;
- г) сравнение полученных данных.

Достоверность полученных данных о влиянии прерывистой поверхности брусков на технологические параметры процесса оценивали с помощью критерия Стьюдента:

$$t_f = \frac{\bar{y} - \bar{x}}{\sqrt{n_1 \cdot S_x^2 + n_2 \cdot S_y^2}} \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (4.42)$$

где \bar{y}, \bar{x} – значение технологического параметра для сплошных и прерывистых брусков; n_1, n_2 – число измерений при наложении среднего значения параметра; $f = (n_1 + n_2 - 2)$ – число степеней свободы.

По значениям t_f с помощью таблиц [63] найдены доверительные вероятности P , свидетельствующие о том, что разность величин $(\bar{y} - \bar{x})$ существенна, а не случайна. Доверительные вероятности представлены в таблице 4.13.

Скорость съёма металла прерывистыми брусками оказалась выше, чем сплошными. Наибольший эффект наблюдался при черновом хонинговании гильз из незакалённого серого чугуна алмазными брусками АС6 125/100 М2-01 100%.

Одновременно с увеличением производительности обработки значительно возросла точность формы деталей, особенно при черновом алмазном хонинговании. Объясняется этот факт несколькими причинами.

Устранение исходной погрешности формы деталей при хонинговании происходит за счёт повышения давления брусков и, следовательно, скорости съёма в местах сужения детали. Но скорость съёма зависит от разности давления, приложенного к бруску извне, а также давления шлама и СОЖ в зоне резания, поэтому у брусков с прерывистой поверхностью колебание внешнего давления в большей степени изменяет скорость съёма, за счёт чего происходит более интенсивное исправление погрешности формы деталей.

Второй фактор, влияющий на точность, это тепловые деформации детали при обработке. Бруски с прерывистой поверхностью имеют лучшее охлаждение, кроме того, уменьшается тепловыделение, возникающее при трении шлама о деталь и связку бруска, поэтому тепловые деформации также уменьшаются.

Всё это приводит как к уменьшению среднего значения погрешности, так и к снижению поля её рассеивания (рисунки 4.11, 4.12). В двух случаях (черновое хонингование абразивными брусками и чистовое хонингование алмазными) повышение точности обработки было небольшим. Это связано с сильным нагревом деталей при черновом абразивном хонинговании закалённого чугуна и малым припуском на чистовое алмазное хонингование.

Прерывистые бруски позволяют более рационально использовать припуск Δ , что можно видеть по изменению коэффициента использования припуска (таблица 4.13):

$$k_{u.n} = \frac{e_1 - e_2}{\Delta}, \quad (4.43)$$

где e_1 и e_2 – овальность детали до и после обработки.

Проведённые исследования позволили рекомендовать алмазные бруски с прерывистой поверхностью к промышленному применению.

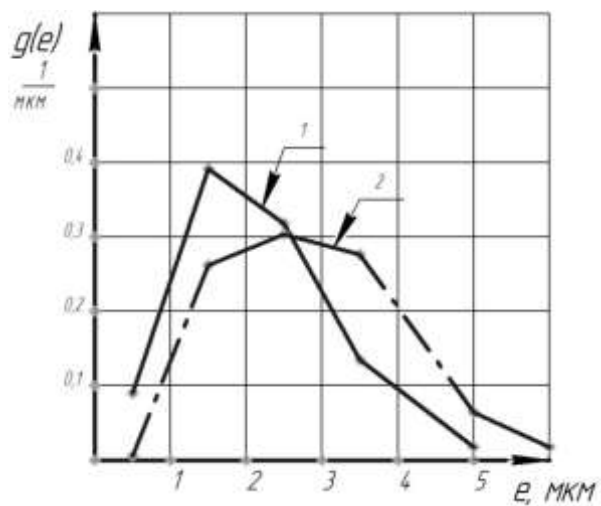


Рисунок 4.11. Плотность распределения гильз по овальности после хонингования брусками АС6 160/125 М2-01 100% (1 – брусочки прерывистые, 2 – брусочки сплошные)

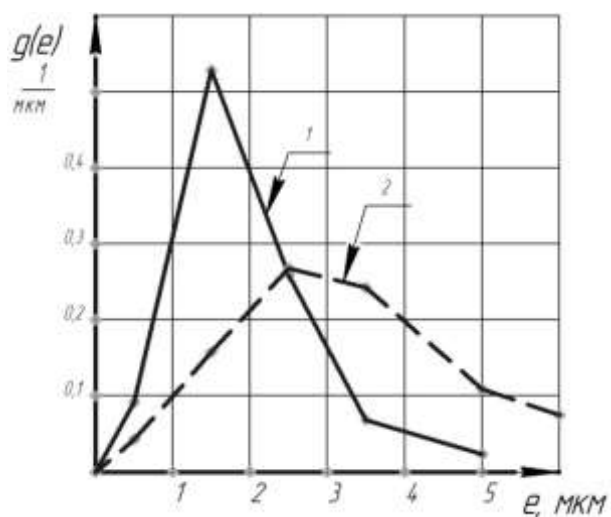


Рисунок 4.12. Плотность распределения гильз по овальности после хонингования брусками АС6 125/100 М2-01 100% (1 – брусочки прерывистые, 2 – брусочки сплошные)

Таблица 4.13

Сравнение некоторых технологических показателей обработки сплошными и прерывистыми брусками

№ п/п	Показатели. Бруски	КЗ 10 СТ 1К (черновое хонингование)	АС6 160/125 М2-01 100% (черновое хонингование)	АС6 125/100 М2- 01 100% (черновое хонингование)	АСМ 28/20 М2- 01 100% (чистовое хонингование)
1.	Исходное состояние деталей:				
1.1	Материал детали	Чугун серый, закалённый	Чугун серый, закалённый	Чугун серый, легированный	Чугун серый, легированный
1.2	Предварительная обработка	Растачивание	Растачивание	Растачивание	Черновое хонингование
1.3	Шероховатость	Ra=0,63	Ra=0,32	Ra=0,32	Ra=0,16
1.4	Овальность (мкм)	60	60	60	30
2.	Режим обработки:				
2.1	Q (МПа)	0,51	0,93	0,62	0,62
2.2	V _{ок} (м/мин)	53,0	60,0	53,0	53,0
2.3	V _{ос} (м/мин)	11,0	11,0	15,6	11,3
3.	Скорость съёма q (мкм/мин):				
3.1	Сплошные бруски	163	136	54	77
3.2	Прерывистые бруски	179	148	68	86
3.3	Увеличение производительности (%)	10,0	8,8	25,9	11,7
3.4	Доверительная вероятность P	0,95	0,96	0,99	0,99
4.	Овальность детали до и после обработки (мкм):				
4.1	Сплошные бруски	59,3/28,8	59,1/30,3	58,4/33,2	27,7/22,3
4.2	Прерывистые бруски	59,1/25,4	59,5/20,8	52,8/19,4	29,1/20,7
4.3	Снижение овальности (мкм)	3,4	9,5	13,8	1,6

№ п/п	Показатели. Бруски	КЗ 10 СТ 1К (черновое хонингование)	АС6 160/125 М2-01 100% (черновое хонингование)	АС6 125/100 М2- 01 100% (черновое хонингование)	АСМ 28/20 М2- 01 100% (чистовое хонингование)
4.4	Доверительная вероятность P	0,82	0,99	0,99	0,76
5.	Коэффициент использования припуска $K_{и.п.}$				
5.1	Сплошные бруски	0,31	0,24	0,28	0,16
5.2	Прерывистые бруски	0,46	0,3	0,33	0,33

Выводы к главе 4

1. Экспериментальные исследования процесса алмазного хонингования проводило по методике полного факторного эксперимента, для повышения точности и сокращения объёма измерений.

2. Результаты экспериментов представлены в виде регрессионных уравнений со статистически независимыми коэффициентами, дана их интерпретация с точки зрения физической сущности процесса. Определено влияние зернистости брусков, удельного давления, скоростей вращательного и осевого движений на скорость и интенсивность съёма металла, шероховатость поверхности и точность формы деталей.

3. В результате производственных испытаний хонинговальных брусков с прерывистой рабочей поверхностью подтверждено, что:

- а) экспериментальные данные согласуются с теоретическими положениями, которые описывают процесс хонингования и влияние повышенного давления шлама и СОЖ, возникающего в подбрусковом пространстве;
- б) теоретические выводы о повышении эффективности и качества обработки хонинговальными брусками с прерывистой рабочей поверхностью подтвердились:
 - производительность обработки при черновом хонинговании выросла на 25,9%; при чистовом – на 11,7%;
 - уменьшился возврат деталей на исправление погрешности формы в 1,84 раза.

Глава 5. Экономическая эффективность хонингования брусками с прерывистой поверхностью

Экономическая оценка является заключительным этапом любого исследования.

Разработанный способ алмазного хонингования с прерывистой рабочей поверхностью алмазного инструмента дает положительный эффект по следующим показателям:

Повышается производительность обработки за счет снижения машинного времени при черновом хонинговании на 25,9%, при чистовом – на 11,7%.

Уменьшается в 1,84 раза возврат деталей на исправление погрешности формы и связанные с этим затраты.

Для технико-экономического сравнения предлагаемой технологии принимаем абразивное хонингование в два этапа алмазными хонинговальными брусками с прерывистой рабочей поверхностью и без на вертикально-хонинговальном станке ЗБ8ЭЗ.

Перед хонингованием для обоих вариантов проводилась расточка на вертикально-расточном станке 278Н. Припуск для хонингования составлял 0,08мм на диаметр.

Расчет технико-экономической эффективности производился по общепринятой методике [25].

Исходные данные для расчета технико-экономических показателей приведены в таблице 5.1., по данным ОАО «59 Арсенал».

Таблица 5.1

Исходные данные для расчета технико-экономических показателей обработки.

№	Наименование	исходный (базовый)	проектируемый
1	Масса конструкции, кг	956	956
2	Балансовая стоимость, руб.	450250	450250
3	Потребляемая (установленная)	4	4

№	Наименование	исходный (базовый)	проектируемый
	мощность, кВт		
4	Количество обслуживающего персонала, чел.	1	1
5	Разряд работы	4	4
6	Норма амортизации, %	10,3	10,3
7	Норма затрат на ремонт и ТО, %	4	4
8	Годовая наработка, час	1901	1901
9	Технический ресурс, мото-час.	4000	4000
10	Годовая программа, ед.	6000	6000

Часовая производительность машин на стационарных работах периодического действия определяется по формуле:

$$W_u = \frac{60 \cdot n}{T_u}, \quad (5.1)$$

где n — количество обрабатываемых деталей (в нашем случае количество гильз цилиндров) за один рабочий цикл, ед.; T_u — время одного рабочего цикла, мин.

Энергоемкость процесса определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_e = \frac{N_e}{W_u}, \quad (5.2)$$

где N_e — потребляемая устройством мощность, кВт.

Фондоёмкость процесса восстановления определяется по формуле

$$F_e = \frac{C_{\bar{o}}}{N}, \quad (5.3)$$

где $C_{\bar{o}}$ — себестоимость восстановления, руб; N — количество обрабатываемых деталей в год, шт./год.

Трудоемкость процесса определяется по формуле:

$$T_e = \frac{n_p}{W_u}, \quad (5.4)$$

где n_p — количество обслуживающего персонала, чел.

Металлоемкость процесса определяется по формуле:

$$M_e = \frac{G}{W_u \cdot T_{год} \cdot T_{сл}}, \quad (5.5)$$

где G - масса детали, участвующая в производственном процессе, кг; $T_{год}$ - годовая загрузка устройства, ч; $T_{сл}$ - срок службы устройства, лет.

Себестоимость восстановления по базовому и новому способам восстановления рассчитывается по формуле:

$$C_{\bar{o}} = C_{зн} + C_{соц} + C_{э} + C_{рем} + A + C_{он} + C_{ох} + C_{вн}, \quad (5.6)$$

где $C_{зн}$ - затраты на оплату труда, руб./ед.; $C_{соц}$ - отчисления на социальные нужды, руб.; $C_{э}$ - затраты на электроэнергию, руб./ед.; $C_{рем}$ - затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования, руб./ед.; A - амортизационные отчисления по оборудованию, руб./ед.; $C_{он}$ - общепроизводственные расходы, руб./ед.; $C_{ох}$ - общехозяйственные расходы, руб./ед.; $C_{вн}$ - внепроизводственные расходы, руб./ед.

Затраты на оплату труда производственных рабочих рассчитывается по формуле:

$$C_{зн} = C_{нр} + C_{доп}, \quad (5.7)$$

где $C_{нр}$ — основная заработная плата производственных рабочих, руб.; $C_{доп}$ — дополнительная заработная плата рабочих, руб.;

Основная заработная плата производственных рабочих определяется по формуле:

$$C_{осн} = z \cdot T_e, \quad (5.8)$$

где z - тарифная ставка, руб./чел.-ч.; T_e - трудоемкость процесса, чел.-ч.

Дополнительная заработная плата рабочих $C_{доп}$ включает оплату отпусков, компенсации за неиспользованный отпуск, доплаты за работу в ночное время, а также оплату льготных часов подростков и др.

По данным [26] дополнительная заработная плата рабочих $C_{доп}$ составляет 10% от основной заработной платы рабочих.

Сумма отчисления на социальные нужды определяется по формуле [26]:

$$C_{соц} = (C_{нф} + C_{соц} + C_{мс}) \cdot C_{зн}, \quad (5.9)$$

где $C_{нф}$ - отчисления в пенсионный фонд (ПФР), 22% от $C_{зн}$; $C_{соц}$ - отчисления в фонд социального страхования (ФСС), 2,9% от $C_{зн}$; $C_{мс}$ - отчисления на

медицинское страхование (ФФОМ), 5,1% от $C_{зп}$.

Затраты на электроэнергию определяются по формуле:

$$C_э = C_э \cdot Э_э, \quad (5.10)$$

где $C_э$ - отпускная цена электроэнергии, руб./кВт*ч,

Затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования определяются по формуле:

$$C_{рем} = \frac{C_б \cdot a_n}{100 \cdot N}, \quad (5.11)$$

Амортизационные отчисления по оборудованию определяются по формуле:

$$A = \frac{C_б \cdot a_n}{100 \cdot N}, \quad (5.12)$$

Общепроизводственные (цеховые) расходы включают в себя заработную плату административно-техническому персоналу, служащим и младшему обслуживающему персоналу, начисления на заработную плату этого персонала по всем основаниям, стоимость пара, воды; затраты на содержание помещений, затраты по охране труда, расходы по оплате налогов и прочие расходы, относящиеся к деятельности ремонтной мастерской.

Согласно [26] общепроизводственные цеховые расходы $C_{оп}$ составляют 100... 120% от заработной платы рабочих (принимаем 110%). По данным [26] общехозяйственные $C_{ох}$ и внепроизводственные расходы принимаем равным 50% и 10% от заработной платы рабочих соответственно.

Приведенные затраты определяются по формуле:

$$C_{прив} = C_б + E_n \cdot k, \quad (5.13)$$

где E_n - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, равный 0,15; k - удельные капитальные вложения или фондоёмкость процесса, руб./ед. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений определяется по формуле:

$$T_{ок} = \frac{C_{б1}}{Э_{год}}, \quad (5.14)$$

где $C_{б1}$ - балансовая стоимость конструкции, руб.

Коэффициент эффективности дополнительных капитальных вложений определяется по формуле:

$$E_{год} = \frac{\Delta \delta_1}{C_{\delta_1}} = \frac{1}{T_{ок}}, \quad (5.15)$$

Ниже кратко изложен расчёт экономического эффекта от применения разных хонинговальных брусков с прерывистой поверхностью (таблицы 5.2, 5.3).

Таблица 5.2

Затраты на инструмент (на 10 000 дет.)

п/п	Статья затрат	Бруски АС6 125/100 М2-01 100%	Бруски АСМ 28/20 М2-01 100%
1	Сплошные бруски	481 840,00 руб.	225 000,00 руб.
2	Прерывистые бруски	546 100,00 руб.	245 700,00 руб.

Таблица 5.3

Себестоимость обработки детали (программа 10 000 дет.)

п/п	Статья затрат	Бруски сплошные	Бруски прерывистые
Черновое хонингование брусками АС6 125/100 М2-01 100%			
2.	Хонинговальные бруски	481 840,00 руб.	546 100,00 руб.
3.	Станок	1 650 180,00 руб.	1 399 680,00 руб.
4.	Электроэнергия	1 545 600,00 руб.	1 226 400,00 руб.
5.	Всего	3 677 620,00 руб.	3 172 180,00 руб.
Чистовое хонингование брусками АСМ 28/20 М2-01 100%			
2.	Хонинговальные бруски	225 000,00 руб.	245 700,00 руб.
3.	Станок	213 060,00 руб.	199 360,00 руб.
4.	Электроэнергия	546 000,00 руб.	487 200,00 руб.
5.	Всего	984 060,00 руб.	932 280,00 руб.

Затраты на исправление погрешностей формы

Обрабатываемые детали, у которых при контроле обнаружены устранимые погрешности формы, возвращаются и повторно проходят чистовое хонингование и контроль. Брак деталей снизился в 1,84 раза, что уменьшило производственные расходы с 1 507 880 руб. до 817 360 руб. на 10 000 деталь.

Общая экономическая эффективность представлена в таблице 5.4., по данным ОАО «59 Арсенал».

Таблица 5.4

Общая экономическая эффективность

п/п	Статья затрат	Бруски сплошные	Бруски прерывистые
1	Черновое хонингование (АС6 125/100 М2-01 100%)	8 161 240,00 руб.	6 975 220,00 руб.
2	Чистовое хонингование (АСМ 28/20 М2-01 100%)	3 165 800,00 руб.	2 973 880,00 руб.
3	Брак деталей	1 507 880,00 руб.	817 360,00 руб.
4	Итого	12 834 920,00 руб.	10 766 460,00 руб.
5	Экономия		2 068 460,00 руб.

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

В современном мире для достоверного экономического анализа необходимо учитывать риски, которые возникают.

В диссертации был применен анализ рисков согласно методу Монте-Карло, который является одним из мощных средств проведения анализа реальных экономических систем. В основу данного метода, в том числе и стохастической 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, рисунок 5.1, изменяемой от роста или снижения статей затрат, приведенных в таблице 5.4, где количество рассчитываемых итераций составило $n=5000$, результаты расчетов представлены в таблице 5.5.

Результаты расчета по методу Монте-Карло.

Количество итераций	5000
Мин.	69,73446106
Макс.	209,048249
Среднее	139,8430212
Медиана	139,9228407
Стандартное отклонение	34,88556997
Таблица перцентилей	
P0%	69,73446106
P5%	85,10443692
P10%	91,71682359
P15%	98,27803441
P20%	104,7394949
P25%	110,5754686
P30%	116,1230536
P35%	121,9374407
P40%	128,0128523
P45%	133,7300506
P50%	139,9228407
P55%	145,6376337
P60%	151,2318208
P65%	157,8935937
P70%	163,8627494
P75%	169,8411484
P80%	175,2015297
P85%	181,1610043
P90%	187,602463
P95%	193,9363716
P100%	209,048249

В результате расчета были получены следующие данные: с вероятностью 50% экономия на одну деталь при реализации проекта 50 000 деталей 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.

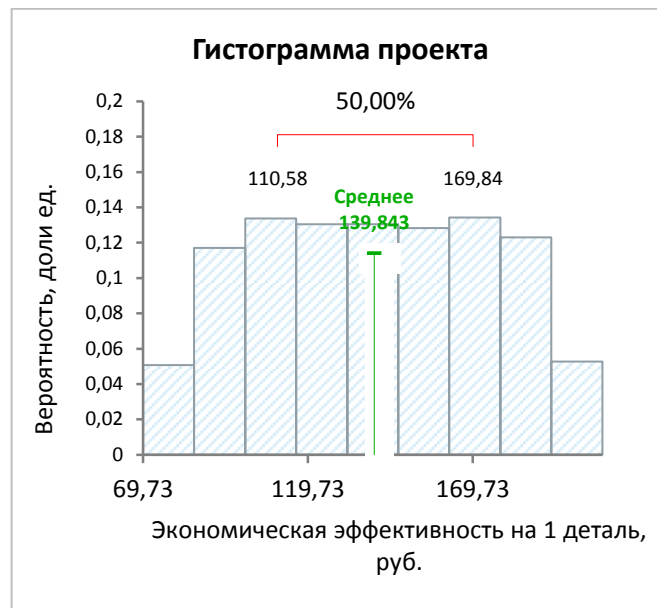


Рисунок 5.1. Зависимости экономической эффективности, изменяемой от роста или снижения статей затрат

Это позволяют сделать вывод, что даже при неблагоприятной конъюнктуре рынка, а именно росте цен на материалы и услуги проект останется эффективным.

Выводы к главе 5

1. Использование алмазных хонинговальных брусков с прерывистой рабочей поверхностью позволяет получить экономический эффект на каждом станке в размере 1 105 800,00 руб. (по данным ООО ЗУМ «ТРАНВЕРСИНДУСТРИ»).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 чугунных 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Марков, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1997. – 270 с.
2. Алексеев, Н. С. Влияние зернистости кругов на некоторые показатели шлифования / Н. С. Алексеев // Вестник машиностроения. – 2003. – № 4. – С. 66–69.
3. Андрейченко, В.Н. Причины натиров гильз цилиндров дизеля КАМАЗ - 740 [Текст]/ В.Н. Андрейченко, М.А. Григорьев, В.Т.Занребин // Автомобильная промышленность. - 1991. - №4. - С. 19 - 20.
4. Аскинази, Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой [Текст] / Б.М. Аскинази. - М.: Машиностроение. - 3-е изд., перераб. и доп., 1989. - 200 с.
5. Асташкевич, Б.М. Механизм изнашивания деталей ЦПГ тепловозных дизелей [Текст]/ Б.М. Асташкевич // Повышение износостойкости деталей ДВС. -М.: 1992.- С. 5- 12.
6. Бабаев С. Г. Алмазное хонингование глубоких и точных отверстий / С. Г. Бабаев, Н. К. Мамедханов, Р. Ф. Гасанов // - М.: Машиностроение, 1978. - 103с. (13)
7. Бабичев, А.П. Хонингование / А.П. Бабичев. – М.: «Машиностроение», 1965. – 96 с.
8. Брискин В. Д. Авторское свидетельство СССР № SU 1171292. Хонинговальная головка / В. Д. Брискин, И. Е. Фрагин, Н. И. Попова // - Опубликовано 07.08.1985 г. — Бюллетень № 29.(5)
9. Бугаев, В.Н. Эксплуатация и ремонт форсированных тракторных двигателей / В.Н. Бугаев. -М.: Колос, 1981. - 208 с.
10. Бутенко В. И. Авторское свидетельство СССР № SU 1166974. Способ хонингования отверстий деталей / В. И. Бутенко, А. В. Чистяков // Опубликовано 15.07.1985 г. - Бюллетень № 26.(4)

11. Гаркунов, Д. Н. Триботехника. Износ и безызносность / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 2001. – 616 с.
12. Генбом, Б.Б. Механизм влияния серы на износ двигателей внутреннего сгорания / Б.Б. Генбом // - М.: Машиностроение. - 1992. - С.56-45.
13. ГОСТ 20799-88 Масла индустриальные. Технические условия. – М. Стандартиформ, 1988. - 7с
14. ГОСТ 25594-83 Бруски алмазные хонинговальные. Технические условия. – М. Стандартиформ, 1983. - 17с.
15. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. – М.: Стандартиформ, 2018. – 8 с.
16. ГОСТ 31574-2012 Материалы стоматологические полимерные восстановительные. Технические требования. Методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2012. - 43 с.
17. ГОСТ 33534-2015 Бруски и сегменты шлифовальные. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2015. – 20 с.
18. Григорьев, М.А. Основные причины изнашивания деталей цилиндропоршневой группы двигателей ЯМЗ / М.А. Григорьев, С.В. Лебедев, С.Н. Федоров // Автомобильная промышленность. - 1994. - №2. - С.10- 13.
19. Григорян, М. А. Методика определения числа контактирующих зерен при абразивной обработке / М. А. Григорян // Металлообработка. - 2005. – № 3. – С. 17-20.
20. Григорян, М. А. Повышение износостойкости и срока службы алмазно-абразивного инструмента / М. А. Григорян // Металлообработка. - 2005. – № 5. – С. 12-16.
21. Емельяненко А. А. Влияние режимов суперфиниширования на износ и производительность абразивных брусков без связки / А. А. Емельяненко, С. А. Секачѳв // Известия ВолгГТУ. - Волгоград.: Политехник, 2003. - № 2. - С. 26 - 29. (26)

22. Емельяненко, А. А. Влияние режимов суперфиниширования на износ и производительность абразивных брусков без связки / А. А. Емельяненко, С. А. Секачѳв // Известия ВолгГТУ. - 2003. – № 2. – С. 26–29.
23. Зайцев В.И. Авторское свидетельство СССР № SU 1268328. Способ электрохимического хонингования / В.И. Зайцев, С.А. Климов, Н.Е. Гучек, Б. Л. Шелиспанский // Опубликовано 07.11.1986 г. - Бюллетень № 41.(6)
24. Зимин, Н.Е. Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятия / Н.Е. Зимин. – М.: Колос, 2007. – С. 384.
25. Зубарев, Ю. М. Применение методов теории планирования многофакторных экспериментов в технологии машиностроения / Ю. М. Зубарев, К. Н. Нечаев, В. И. Катенев, Г. А. Шишов. - учеб. пособие. – СПб.: ПИМаш: 2000. – 132 с.
26. Исследование теории шлифования. «Нихон кикай гаккай си», т 73. № 615, 1970. (Перевод ВИНТИ №91384/1).
27. Кондратьев, Г.И. Исследование износостойкости пар трения поршень - гильза двигателей Д-37 и А-41 и разработка способа восстановления гильз цилиндров методом усадки: отчет о НИР / Г.И. Кондратьев. – Казань: Казанский с.-х. ин-т., 1993. - 58 с.
28. Кремень, З. И. Технология шлифования в машиностроении / З. И. Кремень. – СПб.: Политехник, 2007. – 424 с.
29. Кудояров, Р. Г. Влияние динамических сил на работу алмазных хонинговальных брусков / Р. Г. Кудояров // Станки и инструменты. - 2006. – № 7. – С. 33–35.
30. Кудояров, Р. Г. Повышение качества деталей при алмазном хонинговании / Р. Г. Кудояров // Станки и инструменты. - 2006. – № 5. – С. 35–37.
31. Кудояров, Р.Г. Повышение эффективности процесса алмазного хонингования отверстий деталей машин / Р.Г. Кудояров // Сб. статей междун. научно- техн. конф. «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы». - Волжский.: Волжский инженерно-строительный институт филиал Волг- ГАСА. - 2001. - С. 130-133

32. Куликов С. И. Прогрессивные методы хонингования / С. И. Куликов, Ф. Ф. Ризванов, В. А. Романчук, С. А. Ковалевский // -М.: Машиностроение, 1983. -135с. (40)
33. Курсин, О.А. Повышение качества обработанной поверхности и снижение износа абразивного инструмента при хонинговании с возрастающей скоростью резания: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Курсин Олег Анатольевич. – Волгоград, 2009. – 161 с.
34. Курчаткин В. В. Надежность и ремонт машин / В. В. Курчаткин. – М.: Колос, 2000. – 776 с.
35. Мишин, А.И. Долговечность двигателей / А.И. Мишин // - Л.: Машиностроение, 1976. - 288 с.
36. Наерман, М. С. Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками / М. С. Наерман, С. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.
37. Намаконов, Б.В. Повышение долговечности гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания способом ФАБО / Б.В. Намаконов, В.В. Кисель, В.П. Лялякин // - М.: Машиностроение, 1990. - Вып. 4. - С. 139-144.
38. 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.
39. 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.

40. 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.
41. Нефедкин, А. И., Экспериментальное исследование процесса хонингования чугуновых 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.
42. 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.
43. 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.
44. Нефедкин, А.И. Исследование закономерностей воздействия абразивных зёрен хонингольных 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.
45. 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.

46. 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.

47. 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.

48. 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.

49. 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.

50. 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.

51. 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. (2.6.1)

52. 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. (2.6.2)

53. Нечаев, К. Н. Повышение эффективности процессов обработки металлов на основе методов теории планирования многофакторных экспериментов / К. Н. Нечаев // *Металлообработка*. - 2003. – № 1.
54. Окамура, К. Теория шлифования на основе явления переходного резания / К. Окамура, Т. Накадзима // *Сэймицу кикай [Япония]*, 1970. – Т. 36, № 3.
55. Оробинский, В.М. Повышение эффективности процесса хонингования. / В.К. Шаповал, Л.Г. Гильденбранд // *СТИН*. – 1995. - № 3. - С. 22 – 23
56. Павлиский В. М. Авторское свидетельство СССР № SU 1611706. Способ хонингования гильз цилиндров внутреннего сгорания / В. М. Павлиский, Л. Р. Трипольский, И. Н. Павлюк, У. В. Сорина, А. М. Мурый //- Опубликовано 07.12.1990 г. - Бюллетень № 45.(9)
57. Патент РФ № RU 2086395. Способ изготовления абразивных изделий / В. М. Оробинский, Ю. Н. Полянчиков, А. И. Курченко, А. И. Банников, А. Г. Головкин, Ю. В. Бобынин // – Опубликовано 10.08.1997 г.
58. Патент РФ. № 182190. Хонинговальная головка / А.И. Нефедкин, И.В. Одинокова, А.В. Суходоля // – 2018.
59. Пекленик, Ж. К вопросу применения корреляционной теории к процессу шлифования / Ж. К. Пекленик // «Конструирование и технология машиностроения». - 1964. - №2: – С. 3-13.
60. Польцер, Г. Финишная антифрикционная обработка (ФАБО) и избирательный перенос / Г. Польцер [и др.] // - М.: Машиностроение. - 1990. - Вып. 5. - С. 86-123.
61. Полянчиков, Ю. Н. Оптимизация процесса хонингования путём применения комбинированного абразивного инструмента без связки / Ю. Н. Полянчиков, С. А. Секачёв, А. И. Курченко, Ю. Н. Поступаев // *Известия ВолгГТУ*. - 2003. – № 2. – С. 59–62.
62. Полянчиков, Ю. Н. Хонингование высокоточных глухих отверстий / Ю. Н. Полянчиков, Л. Г. Гильдебранд, М. Ю. Полянчикова, П. В. Баранов // *Известия ВолгГТУ*. - 2004. – № 2. – С. 40–41.

63. Полянчиков, Ю. Н. Влияние характеристик абразивного инструмента на уменьшение технологической наследственности при хонинговании / Ю. Н. Полянчиков, М. Ю. Полянчикова, А. А. Кожевникова, К. В. Каленский // Известия ВолгГТУ. - 2006. – № 2. – С. 54–56.
64. Попов, С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
65. Пучин, Е.А. Технология ремонта машин / Е.А. Пучин, В.С. Новиков, Н.А. Очковский и др.; Под ред. Е. А. Пучина. - М.: Колос, 2007. — 488 с.
66. Редько, С.Г. Формирование профиля шлифованной поверхности / А.В. Королёв //- М: Машиностроение. - 1970. – С. 159-163.
67. Рекомендации по восстановлению гильз цилиндров автотракторных двигателей. – М.: ГОСНИТИ, 1977. – 36 с.
68. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. - Киев: Наука думка, 1984. -271 с.
69. Способ восстановления изношенных гильз цилиндров: А.С. 2006358 СССР / А.В. Дмитриев // - Оpubл. 30.01.94. - Бюл. №12.
70. Степанов Ю. С. Технология и инструмент для шлифования с параметрической осцилляцией // Ю. С. Степанов, Б. И. Афанасьев, А. И. Поляков // Станки и инструменты. - М.: Машиностроение, 2005. - № 12. - С. 28 - 31.(75)
71. Стратиевский, И. Х. Моделирование процессов абразивной обработки / И. Х. Стратиевский // Металлообработка. - 2002. – № 4.
72. Таннинг, Л. Исследование закономерностей изнашивания и совершенствование технологии и организации ремонта двигателей моделей ЗМЗ: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.10/ Л. Таннинг. – Л., 1979. – 285 с.
73. Технологические процессы восстановления основных деталей двигателя ЗИЛ - 130 / ВНПО «Ремдеталь». - М., 1986. - 280 с.
74. Фрагин, И. Е. О сущности явлений в контакте хонинговального бруска и обрабатываемой детали / И. Е. Фрагин. - Теория и практика алмазной и

абразивной обработки деталей приборов и машин: тезисы докладов Всесоюзной конференции. – М., 1973. – 96 с.

75. Фрагин, И.Е. Новое в хонинговании / И. Е. Фрагин. – М.: Машиностроение. - 1980. – 95 с.

76. Хрулев, А. Э. Ремонт двигателей зарубежных автомобилей / А. Э. Хрулев. – М.: За рулем, 1999. – 440 с.

77. Чеповецкий, И. Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке / И. Х. Чеповецкий. – Киев: Наукова думка, 1978. – 228 с.

78. Черноиванов, В.И. Восстановление деталей машин / В.И. Черноиванов, И.Г. Голубев // - М., 2010. – 371 с.

79. Чирков, Г. В. Алгоритм установления взаимосвязи эксплуатационных свойств поверхностного слоя материала с технологическими параметрами процесса обработки / Г. В. Чирков // Машиностроитель. - 2004. – № 8. – С. 30–33.

80. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г.Шнейдер. - СПб: СПбГИТМО, 2001. - 264 с.

81. Шумячер В. М. Модель взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого материала при шлифовании. Схема стружкообразования / В. М. Шумячер, А. В. Кадильников // Технология машиностроения. — М.: Машиностроение, 2007. - № 4. - С. 18 - 22.(90)

82. Шумячер, В. М. Модель взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого материала при шлифовании. Схема стружкообразования / В. М. Шумячер, А. В. Кадильников // Технология машиностроения. - 2007. – № 4. – С. 18–22.

83. Brown, R.H. Local elastic deflecktions in Grinding // K. Saito, M.C. Shaw/ «Ann.CIPS», - 1971. - №1.

84. Dave, R. New process Simultaneously plates and honens parts quickly and economically / R. Dave // Machienery (USA). – 1972. – Vol. 78, № 9. – P. 37–41.

85. Litvin, F. L. Gear geometry and applied theory / F. L. Litvin, A. Fuentes. – Cambridge U.K.: Cambridge University Press, 2004. – 800 p.

86. Buj-Corral I. Effect of grain size and density of abrasive on surface roughness, material removal rate and acoustic emission signal in rough honing processes / I. Buj-Corral, J. Alvarez-Flórez, A. Dominguez-Fernández // *Metals* 9(8). — 2019. — P. 850 (2.6.1 – [5])
87. Fang S. Surface structuring of polycrystalline diamond (PCD) using ultrashort pulse laser and the study of force conditions / S. Fang, S. Klein // *International journal of Refractory Metals and Hard Materials* 84.10536. — 2019. (2.6.1 – [6])
88. Neu Superfinish bearbeitungs maschine Supermat-808 // *Vaschine und Werkzeug.* – 2005. – Vol. 106, № 10. – S. 103.
89. Richter, A. Honing in on perfection / A. Richter // *Cutt. Tool Eng.* – 2006. – № 8. – P. 204–205.
90. Richter, A. Honing in on smooth, straight bores / A. Richter // *Cutt. Tool Eng.* – 2005. – № 9. – P. 24–25.
91. Tools for honing of machine tools. *Manufacturing Engineering.* – 2005. – Vol. 135, № 1. – 107 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 182190

ХОНИНГОВАЛЬНАЯ ГОЛОВКАПатентообладатель: *Нефедкин Анатолий Игоревич (RU)*Авторы: *Нефедкин Анатолий Игоревич (RU), Одинокова Ирина Вячеславовна (RU), Суходоля Александр Валерьевич (RU)*

Заявка № 2017128435

Приоритет полезной модели 09 августа 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 07 августа 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 09 августа 2027 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**182 190⁽¹²⁾ U1**(51) МПК
*B24B 33/08 (2006.01)*ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**(52) СПК
B24B 33/08 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017128435, 09.08.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.08.2017Дата регистрации:
07.08.2018Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 09.08.2017

(45) Опубликовано: 07.08.2018 Бюл. № 22

Адрес для переписки:
143922, Московская обл., г. Балашиха, мкр. Заря,
ул. Маршала Говорова, 16, кв. 3, Нефедкину
Анатолию Игоревичу

(72) Автор(ы):

Нефедкин Анатолий Игоревич (RU),
Одинокова Ирина Вячеславовна (RU),
Суходоля Александр Валерьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Нефедкин Анатолий Игоревич (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2108902 C1, 20.04.1998. SU
674875 A1, 25.07.1979. SU 1495086 A1,
23.07.1989. US 3037333 A1, 05.06.1962.**(54) ХОНИНГОВАЛЬНАЯ ГОЛОВКА****(57) Формула полезной модели**

Хонинговальная головка, содержащая корпус, несущий колодки и абразивные бруски с рабочей поверхностью, разжимные элементы, установленные с возможностью взаимодействия с колодками брусков, разжимной шток и механизм осевого перемещения абразивных брусков, отличающаяся тем, что абразивные бруски выполнены с прорезанными в них продольными и поперечными канавками, образующими на брусках прерывистую рабочую поверхность.

RU 182190 U1



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский Автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» Заведующей кафедрой «Деталей машин и теория механизмов» д.т.н., профессору Карелиной М.Ю.

АКТ

о внедрении результатов исследований, полученных в диссертации Нефедкина А.И. на тему: «Совершенствование технологического процесса хонингования с использованием алмазного инструмента с прерывистой рабочей поверхностью»

Составлен комиссией в составе:

Председатель: генеральный директор АО «Дукс» Клишкин Ю.П.

Члены комиссии: главный инженер Артемов А.В.

В период с 04.12.2016 по 14.02.2017 комиссия предприятия АО «Дукс» провела работу по определению объема внедрения результатов диссертационной работы Нефедкина А.И. на тему: «Совершенствование технологического процесса хонингования с использованием алмазного инструмента с прерывистой рабочей поверхностью», выполненной на кафедре «Деталей машин и теория механизмов» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский автомобильно- дорожный государственный технический университет (МАДИ)». Диссертация выполнялась в период обучения в аспирантуре МАДИ.

По решению комиссии от 04 декабря 2016 алмазные хонинговальные бруски марки АС6 125/100 М2-01 100% с прерывистой рабочей поверхностью были внедрены на станке чернового хонингования, а бруски АСМ 28/20 М2-01 100% на станке чистового хонингования конструкционных изделий. Получение прерывистой поверхности (комбинации продольных и поперечных канавок) на алмазных хонинговальных брусках производилось путем прорезки канавок шириной 1,6 мм алмазными отрезными кругами.

В результате испытаний и наблюдений за работой указанных брусков в производственных условиях установлены следующие технико-экономические показатели:

1. Бруски с прерывистой рабочей поверхностью позволяют значительно улучшить исправления погрешности формы тонкостенных деталей и сократить брак деталей.

2. Повышается производительность обработки за счет сокращения машинного времени при черновом хонинговании на 25,2%, а при чистовом на 11,2%.

В связи с тем, что бруски с прерывистой рабочей поверхностью отечественной промышленностью в настоящее время не выпускаются, а прорезка канавок на алмазных брусках в массовом порядке затруднена, прерывистые бруски применяются на заводе при необходимости исправления значительных погрешностей формы деталей, когда сплошные бруски недостаточно эффективны

Для широкого внедрения алмазных брусков с прерывистой рабочей поверхностью необходимо налаживание их серийного выпуска на заводах абразивно-алмазной промышленности.

Генеральный директор

АО «Дукс»

Главный инженер



Клишин Юрий Петрович

Артемов А.В.

ООО ЗУМ «ТРАВЕРСИНДУСТРИ»

630108, г. Новосибирск, ул. Станционная, 32 офис 305

т/ф (383) 36-000-36, 341-13-68

Эл. адрес: info@zavod-traversindustry.ru

Сайт: zavod-traversindustry.ru



АКТ

**о внедрении результатов исследований, полученных в диссертации Нефедкина А.И.
на тему: «Совершенствование технологического процесса хонингования с
использованием алмазного инструмента с прерывистой рабочей поверхностью»**

В период с 27.02.2017 по 03.03.2017 комиссия предприятия ООО ЗУМ «ТРАВЕРСИНДУСТРИ» повела работу по определению объема внедрения результатов диссертационной работы Нефедкина А.И. на тему: «Совершенствование технологического процесса хонингования с использованием алмазного инструмента с прерывистой рабочей поверхностью», выполненной на кафедре «Деталей машин и теория механизмов» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)». Диссертация выполнялась в период обучения в аспирантуре МАДИ.

По решению комиссии от 27 февраля 2017 алмазные хонинговальные бруски марки АС6 125/100 М2-01 100% с прерывистой рабочей поверхностью были внедрены на станке чернового хонингования, а бруски АСМ 28/20 М2-01 100% на станке чистового хонингования чугуновых гильз двигателя КамАЗ 740. Получение прерывистой поверхности (комбинации продольных и поперечных канавок) на алмазных хонинговальных брусках производилось путем прорезки канавок шириной 1,6 мм алмазными отрезными кругами.

В результате испытаний и наблюдений за работой указанных брусков в производственных условиях установлены следующие технико-экономические показатели:

1. Бруски с прерывистой рабочей поверхностью позволяют значительно улучшить исправления погрешности формы тонкостенных деталей и сократить брак деталей.
2. Повышается производительность обработки за счет сокращения машинного времени при черновом хонинговании на 25,2%, а при чистовом на 11,2%.

В связи с тем, что бруски с прерывистой рабочей поверхностью отечественной промышленностью в настоящее время не выпускаются, а прорезка канавок на алмазных брусках в массовом порядке затруднена, прерывистые бруски применяются на заводе при необходимости исправления значительных погрешностей формы деталей, когда сплошные бруски недостаточно эффективны

Для широкого внедрения алмазных брусков с прерывистой рабочей поверхностью необходимо налаживание их серийного выпуска на заводах абразивно-алмазной промышленности.

Директор
ООО ЗУМ «ТРАНВЕРСИИДУСТРИ»

Главный инженер

Мастер цеха



Рукоусева А.А.

Денисенко С.А.

Мягков Д.П.