Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Алтайский государственный технический университет

имени И.И. Ползунова

На правах рукописи

Соломин Дмитрий Евгеньевич

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДАМИ СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Леонов С.Л.

Барнаул - 2024

оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОТДЕЛОЧНО-ЧИСТОВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ	10
1.1 Обзор финишных методов обработки поверхностей	10
1.2 Расчет параметров шероховатости поверхности при абразивной	
обработке	19
1.3 Модели для расчета сил резания	24
1.4 Аналитическое описание процесса абразивной обработки	30
1.5 Цель и задачи исследования	34
2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ	
ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ	35
2.1. Физическая модель формирования шероховатости и съема металла	
при МАО	35
2.2 Структурная модель процесса магнитно-абразивной обработки	46
2.3 Метод стохастического моделирования	48
2.4 Выводы	53
З РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ	
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ МАГНИТНО-	
АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	55
3.1 Общие положения	55
3.2 Расчет магнитных сил	56
3.3 Расчет сил резания	58
3.4 Определение радиусов округления режущих вершин магнитно-	
абразивного порошка	64
3.5 Определение числа режущих зерен	80
3.6 Определение глубины резания при магнитно-абразивной обработке	82
3.7 Расчет параметров шероховатости на основе математической	
модели	84
3.8 Выводы	91

4 ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	93
4.1 Экспериментальные исследования	93
4.2 Исследование весового съема материла при магнитно-абразивной	
обработке	99
4.3 Определение сил резания	102
4.4 Определение параметров индукторов для обработки деталей	
сложной конфигурации	106
4.5 Проектирование операций магнитно-абразивной обработки	120
4.6 Выводы	128
Основные результаты и выводы по работе	129
Список литературы	131
Приложение А	146
Приложение Б	147
Приложение В	148
Приложение Г	149
Приложение Д	150

введение

Актуальность темы исследования. Автоматизация финишных операций является актуальной технологической проблемой. Выполнение финишных операций на станках с ЧПУ позволяет обеспечивать стабильное качество обрабатываемых поверхностей, повышает производительность и снижает себестоимость готового изделия. Одним из наиболее эффективных способов финишной обработки сложно-профильных поверхностей является процесс магнитно-абразивной обработки. Магнитное поле, действующее на зерна, удерживает их в рабочем зазоре, тем самым обеспечивая их эластичную связку, позволяя копировать контур обрабатываемого изделия.

Съем металла и формирование шероховатости при магнитноабразивной обработке (МАО) определяется массовым взаимодействием абразивных зерен с материалом заготовки. Зерна имеют случайные геометрические характеристики, случайно расположены на поверхности инструмента и внедряются в обрабатываемый материал, на глубину, также имеющую случайные составляющие. Абразивные вершины осуществляют резание металла, некоторые из них попадают в ранее сформированные риски и не режут, а некоторые осуществляют только пластическое деформирование металла (давящие вершины зерен). Поэтому магнитно-абразивная обработка обеспечивает не определенное значение шероховатости, а ее диапазон.

При обработке сложно-профильных поверхностей, таких как прессформы, магнитно-абразивная обработка производится после лезвийной обработки. Сначала происходит съем микронеровностей, полученных на предыдущих операциях. Шероховатость снижается до определенного момента, где стабилизируется и уже сам процесс магнитно-абразивной обработки вносит свою шероховатость. Момент стабилизации шероховатости определяет производительность процесса МАО. Однако определение ЭТОГО момента на этапе технологической подготовки производства практически невозможно. Обычно время обработки назначают

с запасом, гарантируя получение заданной шероховатости обработанной поверхности, что снижает производительность обработки.

Применение математического моделирования процесса магнитноабразивной обработки, позволяет прогнозировать интервал шероховатости получаемой поверхности и рассчитать время обработки.

Степень разработанности темы исследования. Магнитно-абразивная обработка является одним из методов алмазно-абразивной обработки, поэтому все особенности формирования поверхностей определяются массовым взаимодействием абразивных вершин с обрабатываемой поверхностью. Этими вопросами занимались многие выдающиеся ученые: С.М. Братан, А.Е. Зверовщиков, С.Л. Леонов, Д.В. Лобанов, Ю.К. Новоселов, В.А. Носенко, М.А., Тамаркин, А.С. Янюшкин. Проведенные ими исследования позволили решить ряд вопросов по прогнозированию качества и производительности различных видов алмазно-абразивной обработки, в шлифования. Однако многие работы базируются основном на эмпирических данных, что не позволяет использовать их за пределами проведенных экспериментов.

В то же время МАО имеет значительные особенности по сравнению со шлифованием. Это в первую очередь – низкая скорость резания. Это приводит к снижению производительности обработки, но также и к значительному уменьшению теплонапряженности процесса. Некоторые из этих вопросов исследованы в работах Ю.М. Барона, В.В. Гусева, В.И. Ждановича, А.М. Иконникова, В.С. Майборода, С.П. Приходько, Ф.Ю. H.C. Хомича. Подробно исследованы Сакулевича, распространение полей. магнитных возникновение сил резания, стохастические характеристики распределения режущих элементов зерен и т.п. Однако обработка немагнитных материалов и, в частности, алюминия имеет существенные особенности, связанные с распространением магнитных полей и пластичностью обрабатываемого материала. Кроме того, в исследованиях авторов рассмотрены средние этих значения высотных параметров

шероховатости *Ra* и *Rz*. Вопросы гарантированного обеспечения заданных значений всех параметров шероховатости с учетом стохастических характеристик ее распределения при МАО не изучено вовсе.

Возможность проектирования операции МАО с гарантированным обеспечением заданных параметров шероховатости (в том числе и относительной опорной длины профиля) должно базироваться на прогнозировании топографии формируемой поверхности или хотя бы ее профиля.

Цель работы. Установление законов распределения параметров шероховатости и времени обработки путем стохастического моделирования для получения годных деталей на операциях магнитно-абразивной обработки алюминиевых сплавов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Создать методику расчета законов распределения параметров шероховатости поверхностей деталей из алюминиевых сплавов с учетом стохастических характеристик взаимодействия режущих вершин зерен с заготовкой при магнитно-абразивной обработке.

2. Создать стохастическую модель для расчета вероятности получения годных деталей по значениям заданных параметров шероховатости обработанной поверхности.

3. Разработать методику прогнозирования времени обработки и надежности его обеспечения.

4. Выполнить экспериментальную проверку разработанных методик и математических моделей в лабораторных и производственных условиях. Внедрить результаты исследований на производстве.

Потребность в решении перечисленных задач обусловлена запросами производства, что определяет актуальность представленной работы.

Научная новизна:

1. Разработана и экспериментально обоснована имитационная стохастическая модель формирования профиля шероховатости поверхности для операции магнитно-абразивной обработки алюминиевых сплавов (на примере Д16Т), учитывающая размеры магнитно-абразивных зерен, законы распределения радиусов округления их вершин, глубин внедрения вершин зерен, геометрические и магнитные характеристики индуктора, режим резания.

2. Установлено, что распределение радиусов округления вершин зерен подчиняется экспоненциальному закону и определяет формирование параметров шероховатости поверхности, а также время их достижения.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

1. Разработана методика для проектирования операций магнитноабразивной обработки алюминиевых сплавов.

2. Реализованы методики: построения полигонов распределения параметров шероховатости обработанной поверхности при магнитноабразивной обработке; определения размеров режущих вершин магнитноабразивного зерна по профилограмме обработанной поверхности; расчета сил резания при магнитно-абразивной обработке (Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ: 2022660633, от 07.06.2022; 2022668683 от 11.10.2022. RU 2019617098, от 03.06.2019)

3. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на промышленном предприятии ООО «Харвест», математическая модель расчета параметров шероховатости при магнитно-абразивной обработке принята к внедрению в учебный процесс направления подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

Объектом исследования является процесс магнитно-абразивной обработки

Предметом исследования являются закономерности формирования геометрических параметров качества сложно-профильных поверхностей и производительности при магнитно-абразивной обработке немагнитных материалов.

Методология и методы исследования. В работе применялись базе теоретические исследования научных на основ технологии теории резания, системного анализа, сопротивления машиностроения, материалов, теории пластичности и упругости, методов конечных элементов и математического моделирования. В исследованиях применялся аппарат Подтверждение теории вероятности математического анализа. И теоретических положений обеспечивалось экспериментальными методами лабораторных исследований с обработкой экспериментальных данных. физические методы анализа Применялись параметров шероховатости поверхностного И микрорельефа. Результаты слоя экспериментов обрабатывались с помощью методов математической статистики.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в прогнозировании полигонов распределения параметров шероховатости обработанной поверхности и минимизации вероятности брака по этим параметрам, а также – производительности обработки, путем расчета профилограмм обработанных поверхностей с помощью методик стохастического моделирования.

Ряд исследований в данной работе проводились в рамках государственного Задания № FZMM-2023-0003 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов работы обеспечивается строгостью постановки задач при построении математических моделей, обоснованностью принятых допущений, использованием математически корректных методов.

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на международных конференциях

8

«Инновации в машиностроении», г. Барнаул, 2018, г. Кемерово, 2019, г. Бийск, 2020, Новосибирск, 2021.; г. Барнаул, 2022. Всероссийских научнопрактических конференциях «Наука и молодежь» г. Барнаул, 2019-2023 г., Городской научно-практической конференции «Молодежь-Барнаулу» 2019-2020; на научных и методических семинарах кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им.И.И. Ползунова» в период с 2020 по 2024г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 16 печатных работах, из которых, 9 – в изданиях РИНЦ, 3 – в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 1 – в издании, индексируемом в международной базе Scopus и WebOfSience, получено 3 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ.

1 ОТДЕЛОЧНО-ЧИСТОВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

1.1 Обзор финишных методов обработки поверхностей

В настоящее время в машиностроительных изделиях удельный вес деталей, изготовленных из композиционных, пластиковых, пластмассовых, резиновых материалов постоянно увеличивается. Такие изделия эффективно формируются на термопласт-автоматах. Основным видом технологической оснастки термопласт-автомата является пресс-форма. Пресс-формы преимущественно изготавливают из алюминиевых сплавов. Качество поверхностей изделий определяется шероховатостью формообразующей поверхности пресс-формы. Современная лезвийная обработка позволяет обеспечить высокую точность обработанной поверхности, но требует последующих финишных операций

К финишным операциям относят целый ряд способов: шлифование, суперфиниширование, доводка, полирование, магнитно-абразивная обработка (рисунок 1.1) [4, 8, 23, 36, 37, 39, 60, 64, 69, 91, 119].



Рисунок 1.1 – Способы абразивной обработки

Одним из распространенных способов финишной обработки является шлифование [8, 36, 59, 60, 75, 80, 91, 97, 115, 116]. Шлифование характеризуется массовым скоростным процессом микрорезания поверхностей обработки большим числом мельчайших шлифующих зерен, соединенных между собой при помощи связки. Шлифование, как правило, происходит на высоких скоростях от 35 до 100 м/с. В процессе шлифования удаление абразивным зерном металла имеет сходство с резанием одиночным резцом. При этом в зависимости от характеристик шлифовального круга и параметров режима резания режущие зерна могут работать в режиме затупления или самозатачивания. В последнем случае зерна в связке в процессе резания ломаются и выкрашиваются, обнажая новые острые режущие кромки [19, 36, 48, 61, 64, 70, 75, 80, 102, 117, 118].

По способу шлифование различают на две категории: связанное или закрепленное и свободное. При связанном методе зерна (рисунок 1.2) закрепляются при помощи жесткой, либо мягкой связки, тем самым образуя круг, брусок, сегмент, ленту. Закрепление на мягкой связке происходит путем приклеивания зерен к гибкому основанию, тем самым режущий инструмент приобретает форму шлифовальной ленты [16, 59, 61, 64, 99, 114].



Рисунок 1.2 – Схема основных методов шлифования связанным зерном: наружное круглое (*a*, *б*, *в*, *г*); внутреннее круглое (*d*, *e*, *ж*, *з*); плоское (*u*, *к*, *л*, *м*); специальное (*н*, *o*, *n*, *p*) [64]

Обработка свободным зерном происходит при использовании массы порошка, состоящей из зерен (рисунок 1.3). Данный способ используется при шлифующе-жидкостной, шлифующе-ультразвуковой обработках [1, 31, 59, 61, 63, 64, 75, 97, 99, 101, 114-116].



Рисунок 1.3 – Схемы основных методов шлифования свободным абразивом: а – струйное; б – ультразвуковое [64]

Шлифование для обработки внутренних поверхностей пресс-форм из алюминиевых сплавов не применяется. Исключение операций шлифования объясняется сложностью конструкции пресс-формы (рисунок 1.4), в связи с перепадом высот конструктивных элементов и сложностью в обработке алюминиевых сплавов, из-за засаливания шлифовальных кругов.

Также не, представляется возможность использовать метод суперфиниширования из-за конструктивных особенностей пресс-форм.



Рисунок 1.4 – Пресс-форма для термопласт-автомата из алюминиевого

сплава

Доводка является процессом абразивной обработки, обеспечивающим низкую шероховатость, Ra = 0,02...0,08 мкм, и высокую точность формы поверхности, отклонение от плоскостности до ±1 мкм. [4, 7, 37, 60, 65, 73, 74, 119]

В процессе доводки используются свободные абразивы в виде суспензии, которая находится между обрабатываемой заготовкой и притиром. Обработка производится посредством перемещения притира относительно детали или наоборот. По внешнему виду обработанная поверхность часто бывает матовой изза наличия на ней беспорядочно ориентированных микроцарапин. [4, 37, 74, 119]

Доводку выполняют вручную, либо с применением специальных станков (рисунок 1.5). В обоих случаях износ притира должен быть небольшим либо равномерным. Равномерный износ и удаление материала возможно только тогда, когда все точки на поверхностях обрабатываются с одной скоростью и давлением. Станки для доводки применяются, как правило, для обработки плоских, цилиндрических и более сложных поверхностей [4, 74, 81].



Рисунок 1.5 – Схема доводки плоских (а, б), цилиндрических (в, ж) и сферических (г, д, е, в, и) поверхностей: [74]

И. Дж. Армарего приводит данные, в которых проводились исследования процесса доводки образцов из алюминиевого сплава, меди, и углеродистой стали. Обнаружено, что на алюминиевом сплаве самая высокая интенсивность съема и худшая шероховатость. Тем самым процесс доводки не всегда позволяет обеспечить заданное качество поверхности пресс-форм из алюминиевых сплавов [4].

Полирование финишной обработки. также относится К методам Полирование характеризуется получением гладкой поверхности с низкой шероховатостью Ra = 0,01...0,005 мкм. и с высокой способностью отражения Полирование применяется при обработке наружных и внутренних света. цилиндрических, конических, плоских, сферических, фасонных и других поверхностей деталей машин. Чаще всего полированию подвергаются детали криволинейного профиля. При полировании, сложного называемом глянцеванием, снимаемый слой измеряется в долях микрометра. Применяемый при полировании инструмент: фетровые или хлопчатобумажные круги, на которые нанесен тонкий слой пасты. [35, 36, 65, 66, 73, 119]

Существует два вида полирования, это чистовое и черновое. При чистовом полировании происходит удаление неровностей при помощи свободного абразива нанесенного на рабочие поверхности специальных кругов и лент. При чистовом полировании применяются мелкие шлифовальные порошки или мягкие эластичные круги и ленты, также добавляются поверхностно-активные вещества. [35]

При помощи полирования производится обработка любых материалов: алюминиевые сплавы, нержавеющие и закаленные стали, чугун, и т.д. При полировании активно используются станки. На станках производят обработку плоских, цилиндрических, сферических, конических поверхностей. Фасонные поверхности, чаще всего обрабатывают при помощи ручного полирования, применение станочного оборудования затруднительно [35-37, 65, 73]. Ручное полирование не обеспечивает стабильные показатели качества поверхности, требует высокой квалификации рабочего и имеет низкую производительность. Так же при ручном полировании формируется неравномерная по качеству поверхность обработанного изделия, что может приводить к появлению брака. К тому же ручное полирование увеличивает себестоимость готового изделия.

Одним из наиболее перспективных способов финишной обработки сложнопрофильных поверхностей является процесс магнитно-абразивной обработки (рисунок 1.6). Магнитное поле, действующее на зерна, удерживает их в рабочем зазоре, тем самым обеспечивая их эластичную связку, позволяя копировать контур обрабатываемого изделия [2, 3, 10-12, 30, 32, 38, 40, 62, 82-87, 93-95, 107, 113, 120-122, 124-132]. Выполнение финишных операций на станках с ЧПУ позволяет обеспечивать стабильное качество обрабатываемых поверхностей, повышает производительность и снижает себестоимость готового изделия. [3, 32, 38, 40, 46, 62, 67, 76, 82-87, 107, 120, 124, 126, 127, 129, 131]



Рисунок 1.6 – Схема магнитно-абразивной обработки [118]

В процессе магнитно-абразивной обработки происходит механический, а также механохимический съем материала. Помимо этого происходит процесс поверхностного пластического деформирования, путем сглаживания микронеровностей магнитно-абразивными зернами, уплотненными магнитным полем, которое выступает связкой, позволяющей удерживать зерна магнитно-абразивного порошка в подвижно-связанном состоянии [10-12, 82-87, 93-95].

Постоянный контакт магнитно-абразивного порошка с поверхностью обработки, является особенностью процесса магнитно-абразивной обработки (МАО). Гибкая связка позволяет самопроизвольно принимать форму

микронеровностей обрабатываемой поверхности и устраняет возможность появления в рабочей зоне высоких температур, избыточного давления и трения связки. Отсутствие жесткой связки позволяет свободно перемешиваться порошку, уменьшая износ режущих верши зерен, обработка будет вестись острыми кромкам, исключается, как таковой процесс засаливания зерен.

Барон Ю.М. приводит следующую классификацию процесса магнитноабразивной обработки [10-12]

Функциональное назначение

I — магнитное поле формирует из порошковой ферромагнитной абразивной массы режущий инструмент с управляемой жесткостью и создает силы резания;

II — магнитное поле формирует из порошковой ферромагнитной абразивной массы режущий инструмент с управляемой жесткостью, создает силы резания и сообщает режущему инструменту движения резания;

 III — магнитное поле сообщает силы и движения резания несформированной массе ферромагнитного абразивного порошка;

IV — магнитное поле сообщает необходимые для резания движения непосредственно заготовке или абразивному инструменту;

V — магнитное поле в зоне обработки интенсифицирует или улучшает качественные характеристики существующих абразивных способов обработки.

Форма обрабатываемых поверхностей

А — схемы обработки наружных поверхностей вращения;

Б — схемы обработки внутренних поверхностей вращения;

В — схемы обработки плоскостей и линейчатых фасонных поверхностей;

Г — схемы обработки трехмерных фасонных поверхностей.

Тип используемого магнитного индуктора

1 — схемы с электромагнитными индукторами постоянного тока;

2 — схемы с электромагнитными индукторами переменного тока;

3 — схемы с электромагнитными индукторами трехфазного тока;

4 — схемы с индукторами на постоянных магнитах

16

Процесс магнитно-абразивной обработки в литературе хорошо описан. процесса магнитно-абразивной обработки Изучением занимались такие исследователи, как Ю.М, Барон, В.И. Жданович, А.М. Иконников, Е.Г. Коновалов, С.П. Приходько, Ф.Ю. Сакулевич, Н.С. Хомич, Г.С. Шулев. Т. Shinmura, K. Takazava, E. Hitano, S. Yin, H. Yamaguchi, V.K. Jain. [2, 3, 10-12, 30, 32, 38, 41, 62, 82-87, 93-95, 113, 120-122, 124-131]. Достаточно часто для автоматизации процесса магнитно-абразивной обработки стали применяться станки с числовым программным управлением (ЧПУ). Станок с ЧПУ позволяет обрабатывать сложно-профильные поверхности по траектории. При обработке можно использовать электромагнитные индукторы и индукторы на постоянных индукторы магнитах. Электромагнитные имеют несколько недостатков, применительно к данному методу обработки [10-13, 32, 62, 82-87]. Это его большие габариты по сравнению с индуктором на постоянных магнитах и постоянный подвод электричества, для работы данного индуктора. Индуктор на постоянных магнитах состоит из чередующихся магнитов и магнитопроводов. Магниты устанавливают в немагнитном корпусе [10-13, 32, 62, 82-87]. Чаще всего постоянные магниты изготавливаются из NdFeB, BaOFeO, SrOFeO, AlNiCo, SmCo. Наибольшей магнитной индукцией обладает магнит из сплава NdFeB. Индукция составляет порядка 1.4 Тл. [22, 28, 79, 96, 106]

Обработка магнитных и немагнитных заготовок кардинально отличается (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Схема распределения магнитной индукции :1 – магнитопровод, 2 – магнит, 3 – магнитно-абразивные зерна в рабочем зазоре, 4 – заготовка; а) – для магнитных заготовок; б) – для немагнитных заготовок

Как видно из рисунка 1.7 обрабатывающий материал влияет на распределение магнитной индукции и концентрацию порошка в рабочем зазоре. При обработке магнитно-проницаемых материалов порошок сосредоточен под обработка магнитопроводами. Когда происходит немагнитной заготовки, распространяются магнитные поля ПО другому, порошок сосредоточен непосредственно под магнитом [32]. Так как индукторы на выполняют с различным числом магнитов, то процесс магнитно-абразивной обработки будет напоминать процесс прерывистого шлифования, за счет прохождения порции порошка в рабочем зазоре, уплотненного магнитным полем. Так же при прерывистом воздействии порции порошка, происходит меньший нагрев обрабатываемого изделия, что положительно характеризует процесс магнитноабразивной обработки, по сравнению со шлифованием [32, 116].

Магнитно-абразивный порошок, сосредоточенный в рабочем зазоре имеет режущие и магнитные свойства. Зернистость порошка, радиусы режущих вершин и их число имеют случайное значение. Размер зерна также будет влиять на глубину резания, зерно контактирует с обрабатываемой поверхностью несколькими гранями, которые непосредственно участвуют в процессе резания. Увеличение размера зерен приводит к уменьшению их количества в рабочем зазоре, уменьшению контактирующих с обрабатываемой приводит к поверхностью граней [32].

В литературе, в большей степени описаны методы магнитно-абразивной обработки индукторами на электромагнитах. Применение индукторов на постоянных магнитах слабо исследовано. Применительно к обработке прессформ, рациональнее использовать индуктор на постоянных магнитах, так как он может быть выполнен в форме концевой фрезы. Индуктор можно использовать на станке с программным управлением, который позволяет полностью провести обработку всех сложно-профильных поверхностей пресс-формы. Также значительно внимание уделяется процессам магнитно-абразивной меньше обработки деталей со сложной пространственной формой, изготовленных из немагнитных материалов [32].

Таким образом, исследование процесса обработки сложно-профильных поверхностей пресс-форм магнитно-абразивной обработкой немагнитных материалов является актуальным.

1.2 Расчет параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке

показателей финишной обработки Одним ИЗ основных является шероховатость обработанной поверхности. Поэтому во многих исследованиях по абразивной обработке уделяется особое внимание прогнозированию И обеспечения заданных параметров шероховатости.

Так, например, выбор оптимальных условий и характеристик абразивных кругов по критерию наименьшей шероховатости поверхности рассмотрено в статье инженера Рябенков И.А. [92]. Для определения шероховатости поверхности после шлифования предложена следующая зависимость.

$$R_{\max} = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{450 \cdot \pi \cdot V_{\partial em}}{m \cdot V_{\kappa p}}}$$

где *m* – объемная концентрация зерен круга (для 100% - й концентрации алмазного круга – *m*=100); \bar{X} - зернистость круга, м.

Выявлены закономерности формирования шероховатости поверхности при шлифовании как с учетом, так и без учета разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга. Несмотря на это, при получении зависимостей использованы значительные упрощения и рассчитывается только среднее значение параметра *Rmax*.

В работах С.Г. Бишутина [14, 15] рассмотрены система и взаимосвязи различных факторов технологической операции шлифования, учитываемые при моделировании процесса формирования параметров шероховатости поверхности. За основу им тоже выбран параметр шероховатости *Rmax*:

$$R \max = \frac{121\rho^{-0.25}t_{\phi}^{0.5}}{\left(k_{g}\frac{m_{\phi}}{m_{o}}\frac{V_{\kappa}}{V_{s}}A^{0.5}Hq\left(0.62\frac{N}{V}\right)^{-2}F_{c}(t_{\phi})\right)^{0.5}} + \delta$$

Для параметров шероховатости предложены остальных весьма приближенные среднестатистические соотношения между параметрами шероховатости. Несмотря на то, что автор заявляет о прогнозировании профиля обработанной поверхности, рассчитываются только средние значения параметров шероховатости. Кроме того, использование эмпирических зависимостей сужает диапазон применения таких моделей и практически не позволяет их использовать для магнитно-абразивной обработки.

Суслов А.Г. [103] при теоретическом описании взаимосвязи параметров качества поверхностного слоя деталей машин с условиями механической обработки использует описание параметров высот профиля (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Исходная схема для расчета высоты профиля шероховатости поверхности при механической обработке [103]

Средняя высота профиля шероховатости в общем случае при всех методах механической обработки определяется равенством

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_2$$

где h_1 , h_2 , h_3 , h_4 – составляющие профиля шероховатости, соответственно обусловленное геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки, шероховатостью рабочих поверхностей инструмента.

При шлифовании общее уравнение взаимосвязи средней высоты профиля шероховатости поверхности:

$$R_{z} = \frac{\xi \left(N\frac{B}{s_{np}} - 1\right)}{10^{3}} \left\{ t - \frac{P_{y}}{j_{TC}} - \frac{\frac{P_{y}}{s_{np}} \left[E_{2}(1 - \mu_{1}^{2}) + E_{1}(1 - \mu_{1}^{2})\right]}{\pi E_{1}E_{2}} \times \frac{10^{2} \left(1 + \frac{P_{y}}{s_{np}}\right)}{\frac{P_{y}}{s_{np}} \left[E_{2}(1 - \mu_{1}^{2}) + E_{1}(1 - \mu_{1}^{2})\right]} + \frac{l^{2}(1 \pm \frac{V_{D}}{60v_{\kappa p}})}{4D \cdot 10^{3}} \right\} + \frac{\left(1 - \frac{\tau_{CAB}}{\sqrt{\tau_{CAB}^{2} + \sigma_{T}^{2}}}\right) \left[2s + r\left(\frac{\tau_{CAB}}{\sqrt{\tau_{CAB}^{2} + \sigma_{T}^{2}}}\right)\right]}{32}$$

Также у А.Г. Суслова рассчитываются *S_m*, *s* - шаговые параметры и *tp* - относительная опорная длина профиля.

$$S_{m} = \frac{l_{m}s_{np}}{B} \xi^{\left(N\frac{B}{S_{np}}-1\right)}$$

$$s = \frac{s_{np}}{\sum_{0}^{t} \xi^{\left(N\frac{B}{S_{np}}-1\right)}}$$

$$tp = 0.02 p^{2} \text{ при } p \le 50\%$$

$$tp = 100 - 0.02(100 - p)^{2} \text{ при } p \ge 50\%$$

Приведенные зависимости не учитывают стохастический характер абразивной обработки и не дают возможность анализировать стабильность обеспечения параметров шероховатости.

Для магнитно-абразивной обработки Ф.Ю. Сакулевич описывает микро- и макрогеометрические характеристики обработанной поверхности следующим образом [93-95]:

$$S_m = \frac{t_{PH} + t_{pm}}{n}$$
$$t_{R_p} = \frac{t_{pm}}{t_{pm} + t_{pe}}$$

$$\rho = \frac{9R_a^2 S_m^2}{128(R_p - 0.5R_a)^3}$$
$$t_p = t_{R_p} \left(\frac{y}{R_p}\right)^{\nu}$$
$$\nu = 2t_{R_p} \frac{R_p}{R_a} - 1$$
$$B = t_{R_p} \left(\frac{R_{\max}}{R_p}\right)^{\nu}$$
$$R_{\max} = R_p + R_m$$

где, tp – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; R_p – расстояние между линией выступов и средней линией; R_m – расстояние от линии впадин до средней линии; t_{pm} – абсолютная опорная длина профиля металла на средней линии; t_{p6} – абсолютная опорная длина профиля воздуха на уровне средней линии на трассе интегрирования; y – расстояние от линии выступов до рассматриваемого уровня; B, v – параметры начального участка опорной кривой.

Эти зависимости влияют на динамику и стохастический характер обработки И не позволяют определить момент времени ee окончания, то есть позволяет производительность операции, ЧТО ИХ использовать при не технологической подготовке производства.

Барон Ю.М. [10-12] при описании закономерности процесса магнитноабразивной обработки пишет, что время, затрачиваемое на достижение заданного качества поверхности, определяется скоростью удаления исходного дефектного слоя материала заготовки. Производительность МАО можно оценивать толщиной или массой материала, удаляемого в единицу времени. В практике исследовании оценку снятого материала производят измерением его массы при взвешивании заготовки (образца) до и после полирования. Для удобного сопоставления производительности разных схем процесса независимо от размеров заготовки рассматривают неполное значение массы Q снятого материала со всей площади Sобрабатываемой поверхности, а удельный съем материала q, мг/см², полученный с единицы площади: Изменение значений *q* при увеличении длительности полирования всегда имеет вид степенной зависимости с показателем степени *m*<1

 $q = q_1 r^m$

Данная зависимость представлена кривой 1 на рисунке 1.9. Коэффициент *q*₁ обозначает начальную производительность процесса.



Рисунок 1.9 – Основные закономерности изменения значений *q* и *Rz* при магнитно-абразивной обработке [10]

Производительность процесса, являясь частной производной съема материала по времени, уменьшается с увеличением длительности обработки.

$$dq/dt = q_1 m \tau^{m-1} = q_1 m / \tau^{1-m}$$

Кривые 2 и 3 (рисунок 1.8) отображают наблюдаемый обычно характер изменения высоты микронеровностей поверхности заготовки при увеличении длительности полирования. На *I* этапе происходит резкое снижение высоты исходных неровностей. Если прервать обработку до завершения *I* этапа, то шероховатость обработанной поверхности будет характеризоваться преимущественно невыведенными следами исходных неровностей. На *II* этапе полирования шероховатость характеризуется исключительно условиями

q = Q/S

магнитно-абразивной обработки и механическими свойствами обрабатываемого материала. [10]

Параметры шероховатости в работах Барона Ю.М. получены экспериментально, преимущественно для сталей и твердых сплавов различными видами порошков и разной зернистостью. Для алюминиевых сплавов данных нет.

В целом необходимо отметить, что все эмпирические зависимости обладают ограниченной областью применения: они справедливы только для диапазонов изменения входных параметров, которые были использованы при получении экспериментальных данных. Имитационные и теоретические зависимости обычно обладают большим диапазоном адекватности в связи с отсутствием ограничений на значения входных параметров.

С другой стороны, эмпирические зависимости обычно обладают большей точностью прогнозирования. В этом и заключается противоречие между ними: повышение точности снижает диапазон адекватности моделей.

1.3 Модели для расчета сил резания

Большинство авторов для расчета составляющих силы резания опирается на величину срезаемого слоя металла и прочностные характеристики обрабатываемого материала.

Так, например, Переладов А.Б. использует зависимости Е.П. Калинина для расчета сил резания при шлифовании .[33,78]

$$P_{z}^{'} = \sigma_{e}(28,5a_{3}d_{u} + 0,13d_{u}^{2})$$
$$P_{y}^{'} = \sigma_{e}(34a_{3}d_{u} + 0,84d_{u}^{2})$$

где P_z - тангенциальная составляющая силы резания; P_y - радиальная составляющая силы резания; σ_e - предел прочности материала заготовки при растяжении; a_z - средняя высота среза зерном; d_u - диаметр площадки износа.

Переверзев П.П. [77] использует в своих работах модель, разработанную С.Н. Корчаком [42] (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Схема среза, эпюра напряжений и составляющих усилия [77] Суммарная тангенциальная и радиальная составляющая сила резания единичным зерном находится по формулам [42, 77]:

$$P_{y} = P_{YS} + P_{YTP} = \left(\frac{\sqrt{3,25}a\sin\beta}{\sin\beta_{1}} + 0,5l_{3}\right)\frac{0,5\sigma}{\sqrt{3}}$$
$$P_{Z} = P_{ZS} + P_{ZYTP} = \left(\frac{\sqrt{3,25}a\sin\beta}{\sin\beta_{1}} + \mu 0,5l_{3}\right)\frac{0,5\sigma}{\sqrt{3}}$$

где P_{YS} , P_{ZS} - нормальная и тангенциальная составляющие силы от всестороннего сжатия и сдвига металла, действующих в зоне стружкообразования при резании единичным зерном, H; P_{YTTP} , P_{ZYTP} - нормальная и тангенциальная составляющие силы трения, возникающий в результате действия напряжений на площадке затупления зерна и вызывающей трение на площадке затупления, H; a – толщина среза единичным зерном, мм; β – угол между направлением скорости резания и равнодействующей силы при резании острым зерном; β_1 – угол между вектором скорости резания и плоскостью сдвига; μ - коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемому материалу; l_3 – длина площадки затупления зерна, мм; σ – интенсивность напряжений в движущемся объеме деформируемого металла, характеризующая сопротивление металла пластическому течению, H/м² [42, 77]

В упрощенной модели плоского шлифования с зернами, имеющими случайные геометрические характеристики Воронов С А. [20] использует систему

формул для определения сил резания каждого зерна в зоне контакта для схемы, представленной на рисунке 1.11

$$\begin{cases} F_t = \left[C_{t1} \left(\frac{A_h}{A_0} \right)^{C_{t2}} + C_{t3} \right] \sigma_T A_0 \\ F_n = \left[C_{n1} \left(\frac{A_h}{A_0} \right)^{C_{n2}} + C_{n3} \right] \sigma_T A_0 \end{cases}$$

где F_t и F_n – касательная и нормальные составляющие силы резания; C_{tl} , C_{t2} , C_{t3} , C_{nl} , C_{n2} , C_{n3} – коэффициенты сил резания; A_0 – характерная площадь, используемая для обезразмеривания; A_h – площадь врезания; $\sigma_{\rm T}$ – предел текучести материала.



Рисунок 1.11 – Схема упрощенной модели шлифования с зернами, имеющими случайные геометрические характеристики:

1- шлифовальный круг; 2 – заготовка; 3 – (*j*+1) – е зерно; 4 - (*j*-1) – е зерно; 6 – дорожки [20]

Часто в предлагаемых авторами зависимостях используются коэффициенты, которые трудно определить, или коэффициенты, имеющие различные (случайные) значения для различных зерен. Все это затрудняет использование моделей и применение их для прогнозирования результатов магнитно-абразивной обработки.

Еще труднее применять классические эмпирические зависимости, связывающие параметры режима резания и характеристики инструмента с составляющими силы резания. Так, например в исследованиях Киселева И.А [34] эмпирическая модель, требуется определить 4 коэффициента. Радиальная F_{rj} и касательная F_{tj} составляющие силы резания, приходящуюся на каждое зерно ј представлены в виде:

$$F_{rj} = K_{re} dS_j + K_{rc} a_j h_j(t)$$
$$F_{tj} = K_{te} dS_j + K_{tc} a_j h_j(t)$$

где dS_j – длина линии контакта *j*-ого элементарного отрезка режущей кромки с обрабатываемой поверхностью;

*а*_{*i*} – характерная ширина зерна;

 $h_{j}(t)$ – толщина срезаемого слоя для центральной точки зерна;

K_{te}, K_{re} – коэффициенты модели сил резания, характеризующие трение между зерном и обрабатываемой поверхностью;

K_{tc}, *K_{rc}* - коэффициенты модели сил резания в окружном и радиальном направлении соответственно, определяющие зависимость от толщины срезаемого слоя.

Шавва М.А. [111], используются классические степенные зависимости:

$$P_{zp} = 9.81C_{pz}t^{x_{pc}}S_{npod}^{y_{pz}}v^{z_{pz}}F_{k}^{m_{pz}}\prod_{i=1}^{m}K_{zi}$$
$$P_{yp} = 9.81C_{py}t^{x_{py}}S_{npod}^{y_{py}}v^{z_{py}}F_{k}^{m_{py}}\prod_{i=1}^{m}K_{yi}$$

где C_{py} , C_{pz} , x_{pz} , x_{py} , y_{pz} , y_{py} , z_{pz} , z_{py} , m_{pz} , m_{py} – коэффициенты и показатели степеней, значение которых зависит от вида связки шлифовального круга, $\prod_{i=1}^{m} K_{zi}$ и

 $\prod_{i=1}^{m} K_{yi}$ - произведение поправочных коэффициентов, учитывающих изменение условий работы. Поправочные коэффициенты определяют условия шлифования:

 K_{yl} , K_{zl} – вид связки шлифовального круга;

 K_{y2} , K_{z2} – зернистость шлифовального круга;

*К*_{у3}, *К*_{z3} – концентрацию алмазных зерен в шлифовальном круге;

*К*_{у4}, *К*_{z4} – охлаждение зоны резания при шлифовании;

*К*_{у5}, *К*_{z5} – марку твердого сплава заготовки.

Можно, конечно, уточнить для МАО значения коэффициентов и получить аналогичные формулы, но составлять таблицы поправочных коэффициентов, учитывающих различные параметры операции – крайне неблагодарная задача.

Более эффективно использовать стохастическое моделирование, учитывающее физику явлений, происходящих при МАО. Также модели для процесса шлифования невозможно описания использовать для процесса магнитно-абразивной обработки, так как при шлифовании глубина резания заранее известна. При магнитно-абразивной обработке глубину резания можно найти лишь после расчета контактных сил между зернами и сил резания

Сакулевич Ф.Ю. в исследованиях, для определения сил при магнитноабразивной обработке приводит две схемы расположения зерен в рабочем зазоре. В качестве допущения принято, что в рабочем зазоре действует однородное магнитное поле, зерна имеют одинаковые размеры в пределах фракции и сферическую форму (рисунок 1.12) [93-95].



Рисунок 1.12 – Характер формирования под действием магнитного поля в рабочем зазоре магнитно-абразивной массы:

а) – система параллельных цепочек, б) – система плотной упаковки [94]

28

Для определения сил при системе параллельных цепочек предполагается, что в контакте с реальной частицей находится мнимый шар 8 (рис. 1.12а) расположенный в теле детали. Так как размеры сфер одинаковы, а координата r = 2b используются формулы:

$$F_{r} = \frac{3\pi b^{2}}{4\mu_{0}\mu_{e}} \left(\frac{\mu_{i\partial} - \mu_{e}}{\mu_{i\partial} + 2\mu_{e}}\right) \left(\frac{\mu_{i} - \mu_{e}}{\mu_{i\partial} + 2\mu_{e}}\right) \times \left[1 - 3\cos^{2}\Theta - \frac{1}{8} \left(\frac{\mu_{i\partial} - \mu_{e}}{\mu_{i\partial} + 2\mu_{e}}\right) (1 + 3\cos^{2}\Theta)\right] (1.1)$$

$$F_{\Theta} = -\frac{3}{8} \cdot \frac{\pi b^{2}}{\mu_{0}\mu_{e}} \left(\frac{\mu_{i\partial} - \mu_{e}}{\mu_{i\partial} + 2\mu_{e}}\right) \left(\frac{\mu_{i} - \mu_{e}}{\mu_{i\partial} + 2\mu_{e}}\right) \times \sin 2\Theta \left(2 + \frac{1}{8}\frac{\mu_{i\partial} - \mu_{e}}{\mu_{i\partial} + 2\mu_{e}}\right) (1.2)$$

На находящуюся в контакте с деталью частицу 3 действует нормальная сила $F_r(\Theta = 0)$ тогда частица 4 введенная в контакт с первой при $\Theta < \pi$ под действием силы F_{Θ} займет положение на линии общей оси мнимого шара 8 и контактирующего с ним шара 3. Аналогично определяется для других зерен в цепочке.

При системе плотной упаковки (рисунок 1.12б) зерна 2 и 3 по отношению к поверхности детали испытывают только нормальные силы притяжения. Сила их отталкивания определяется выражением (1.1) и составляет $\Theta_{2,3} = \pi$. Однако на каждое из этих зерен со стороны зерна 3 действует сила $F_{\Theta}(\Theta_{4,3} = 30^{\circ})$, параллельная первой и определяется выражением (1.2).

В модели определения сил резания Барон Ю.М [10] рассчитывает нормальную составляющую силы резания *P_y*, для каждого зерна, находящегося в контакте с заготовкой, можно вычислить по формуле

$$P_{v}(k) = p_{v}(k)\Delta S / N = p_{v}(k)b^{2}$$
(1.3)

где $P_y(k)$ - среднее значение силы P_y в пределах малой площадки ΔS с центром в точке z=k; $p_y(k)$ - давление на заготовку в точке z=k; $N = \Delta S/b^2$ - число зерен порошка, размещающихся на площадке ΔS ; b – размер зерен.

Тангенциальные составляющие силы резания в каждой точке линии контакта *dd*₁ равны:

$$P_{z}(k) = F_{TP,3}^{*}(k)\Delta S / N = F_{TP,3}^{*}(k)b^{2}$$
(1.4)

При условии, что при движении заготовки соблюдено условие равновесия всех сил в направлении оси Z, действующих на границах внутри области *aa*₁*d*₁*d*.

Из формул (1.3) (1.4) можно увидеть, что расчет нормальных и тангенциальных составляющих сил резания сводится к расчету распределений давления p_y и удельных сил трения $F_{TP,3}^*$ на поверхность заготовки.

Для расчета давления в статике Барон Ю.М. [10] использует следующий метод расчета. Исходными условиями являются: размеры и форма рабочего зазора, распределение плоского магнитного поля в пределах области aa_1d_1d , заполненной порошком (рисунок 1.13)



Рисунок 1.13 – Схема к расчету давлений *p*_v в статике методом «столбиком»

Недостатком данного метода является то, что автор рассматривает массу магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре, как сплошную среду. Данное допущение дает погрешность при расчете магнитных сил и сил резания [32]. Исходная шероховатость рассматривается после шлифования, что так же не представляет возможность использовать этот метод в данном исследовании.

1.4 Аналитическое описание процесса абразивной обработки

Наибольший вклад в аналитическое описание процессов абразивной обработки сделан профессором Новоселовым Ю.К. [17,18, 68]. На основе аналитического преобразования законов распределения входных случайных параметров в выходные им получены аналитические зависимости, позволяющие

рассчитывать по крайней мере средние значения параметров шероховатости, съема металла, составляющих силы резания.

В основе разработки моделей находится понятие вероятности удаления которая зависит ОТ уровня В пределах металла, слоя шероховатости, Доказано, формируемого поверхности детали. что эта вероятность на определяется выражением:

$$P(M) = 1 - e^{-a_1(y) - a(y,\tau)}$$

где у – уровень в пределах слоя шероховатости от наружной поверхности заготовки (рисунок 1.14),

 $a_{I}(y)$ – характеризует профиль заготовки до обработки,

 $a(y, \tau)$ – характеризует профиль заготовки в текущий момент времени τ .



Рисунок 1.14 – профиль формируемой поверхности при абразивной обработке [68]

Считая, что режущие вершины зерен распределены случайно по поверхности и глубине инструмента, а также – имеют случайные значения радиусов округления, автор выводит аналитические выражения для вероятности удаления металла. Следует отметить, что вероятность удаления материала тесно связана с относительной опорной диной профиля tp. Фактически tp = 1 - P(M). Отличие заключается еще и в том, что аргументом tp является относительная величина уровня, а Ю.К. Новоселов использует абсолютный параметр y.

Взяв за основу вероятность удаления материала, автор вывел зависимости для прогнозирования средних значений параметра шероховатости *Ra*, съема металла за единицу времени, и значений составляющих силы резания. Для учета

пластических деформаций обрабатываемого металла использован коэффициент стружкообразования *kc*, равный отношению площади срезаемого слоя отдельным зерном к площади его режущей части.

Одним из важнейших преимуществ разработанных моделей является возможность прогнозирования параметров шероховатости и съема металла в динамике. Это стало возможным за счет использования уравнения баланса перемещений, связывающего фактическую глубину резания $t\phi$ с размерными параметрами обработки:

$$\Delta A = t\phi + \Delta r + \Delta R + \Delta y \tag{1.5}$$

где ΔA – изменение расстояния от инструмента до заготовки за счет подачи, Δr – величина съема металла,

 ΔR – величина износа инструмента,

 Δy – упругие отжатия.

Величина ΔA известна и определяется режимом резания (рисунок 1.15). Съем, износ и упругие отжатия зависят от фактической глубины. Таким образом, выражение (1.5) позволяет определять в каждый момент времени значение $t\phi$ и замкнуть обратную связь с получением динамической модели процесса обработки.



Рисунок 1.15 – Уравнение баланса перемещений [68]

Несмотря на громоздкость полученных формул, расчет с их использованием на современной вычислительной технике не представляет никаких сложностей и занимает доли секунды.

Недостатком моделей профессора Новоселова Ю.К [17, 18, 68] является то, что некоторые особенности магнитно-абразивной обработки не позволяют использовать эти формулы без доработки. Эта доработка выполнена в исследованиях Иконникова А.М. [32]. Самое главное - невозможность при магнитно-абразивной обработке использования уравнение баланса перемещений (рисунок 1.11). Дело в том, что инструмент при шлифовании жесткий, а высокие скорости резания позволяют не учитывать деформации шлифовального круга в зоне резания. При магнитно-абразивной обработке рабочая часть инструмента – магнитно-абразивный порошок, уплотненный магнитным полем. Он достаточно упругий, что не позволяет построить уравнение баланса перемещений.

В исследованиях Иконникова А.М. [32] за основу взят расчет силы резания, действующей на каждое режущее зерно. Для получения силы методом конечных элементов решается задача расчета магнитных сил, а затем – задача контактной устойчивости магнитных зерен в зоне резания. После расчета сил определяется глубина внедрения режущих вершин в металл. То есть вместо уравнения баланса перемещений решается задача контактного взаимодействия зерен в магнитном поле.

Остальная часть модели (расчет съема металла и шероховатости обработанной поверхности) выполнена аналогично, как у профессора Новоселова Ю.К. [17, 18, 68], но с учетом других законов распределения радиусов режущих вершин и их расположения по глубине инструмента, а также – более низких скоростей резания.

Основным недостатком описанных моделей является невозможность прогнозировать разброс параметров шероховатости и стабильности результатов обработки. Кроме того, авторы рассчитывают только параметр шероховатости Ra, ну и относительную опорную дину профиля *tp*, фактически совпадающую с вероятностью неудаления материала.

В этом плане перспективным является подход Иконникова А.М. [32] в сочетании с методикой стохастического моделирования, предложенный профессором Леоновым С.Л. [48]. Такая методика позволяет с одной стороны учесть физические явления при магнитно-абразивной обработке, а с другой – получить информацию по стабильности обеспечения геометрических параметров качества обработанной поверхности и производительности обработки вплоть до расчета полигонов их распределения.

1.5 Цель и задачи исследования

<u>Цель работы.</u> Установление законов распределения параметров шероховатости и времени обработки путем стохастического моделирования для получения годных деталей на операциях магнитно-абразивной обработки алюминиевых сплавов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Создать методику расчета законов распределения параметров шероховатости поверхностей деталей из алюминиевых сплавов с учетом стохастических характеристик взаимодействия режущих вершин зерен с заготовкой при магнитно-абразивной обработке.

2. Создать стохастическую модель для расчета вероятности получения годных деталей по значениям заданных параметров шероховатости обработанной поверхности.

3. Разработать методику прогнозирования времени обработки и надежности его обеспечения.

4. Выполнить экспериментальную проверку разработанных методик и математических моделей в лабораторных и производственных условиях. Внедрить результаты исследований на производстве.

Потребность в решении перечисленных задач обусловлена запросами производства, что определяет актуальность представленной работы.

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

2.1. Физическая модель формирования шероховатости и съема металла при МАО

Возрастающие требования к эксплуатационным свойствам современных машин и механизмов вызывают необходимость постоянно совершенствовать способы финишной обработки, одним из которых является МАО. Повышенный интерес к этому виду обработки в последние годы объясняется появлением возможности автоматизации этого процесса с помощью числового программного управления. Появление новых оригинальных конструкций индукторов [32] позволяет обрабатывать этим способом сложные криволинейные поверхности, как плоские, так и объемные, такие как рабочие поверхности штампов, к которым предъявляются высокие требования к качеству поверхностного слоя.

Расширение области применения этого способа финишной обработки требует углубления теоретических представлений о механизме съема и формировании шероховатости поверхности, которые определяются абразивными свойствами магнитного порошка и магнитного поля.

Сущность магнитно-абразивной обработки состоит в удалении припуска способом с созданием магнитного преимущественно абразивным поля непосредственно в зоне резания. В зависимости от схемы МАО роль магнитного В формировании ИЗ магнитно-абразивного заключается: порошка поля абразивного инструмента и в удерживании этого порошка в зоне резания; в создании сил резания; в придании абразивному инструменту или заготовке рабочих движений как показано на рисунке 2.1 [2, 3, 10-12, 32, 62, 64, 82-87, 93-95].

При классическом способе обработки – шлифовании, скорость резания значительно выше скорости резания при магнитно-абразивной обработке. Соответственно, производительность процесса шлифования выше, но за счет высокой скорости возникают участки прижогов. При магнитно-абразивной обработке силы и теплонапряженность процесса значительно ниже. Также еще одним плюсом данного способа является отсутствие засаливания инструмента. Особенно это касается обработки алюминиевых сплавов. В процессе обработки немагнитная стружка будет сама удаляться из зоны обработки.



Рисунок 2.1 – Механизм съема металла [64]

Съем металла и формирование шероховатости при магнитно-абразивной обработке (МАО) определяется массовым взаимодействием магнитно-абразивных зерен с материалом заготовки. Зерна имеют случайные геометрические случайно характеристики, расположены на поверхности инструмента И внедряются в обрабатываемый материал, на глубину, также имеющую случайные составляющие. Зерно воздействует с заготовкой лишь несколькими абразивными вершинами. Обработка деталей осуществляется этими режущими вершинами зерен, расположенными случайно по поверхности инструмента и внедряющиеся в обрабатываемый материал на случайную глубину [2, 3, 10-12, 32, 82-87, 93-95, 98, 108].

Отличие магнитно-абразивной обработки от классического шлифования заключается в разных причинах внедрения режущих вершин в металл. При шлифовании инструмент (шлифовальный круг) жесткий и имеется четкая конфигурация зоны резания, в которой происходит съем металла – рисунок 2.2. При этом фактическая глубина резания четко определяется геометрическими параметрами этой зоны. При магнитно-абразивной обработке такой явной зоны контакта нет [2, 3, 10-12, 32, 82-87, 93-95, 98, 108]. Магнитно-абразивные зерна уплотнены магнитным полем и их режущие вершины внедряются в металл на
глубину, определяемую максимальным значением нормальной составляющей силы резания P_y – рисунок 2.3. До определенного значения эта сила будет уплотнять зерна (увеличивать силы их контактного взаимодействия). При увеличении силы P_y зерна начинают "расползаться": для некоторых из них контактное взаимодействие прекращается.



Рисунок 2.2 – Конфигурация зоны резания при шлифовании [68]

Таким образом, уплотненные магнитным полем зерна внедряются в металл, но сила резания не может превысить некоторую максимальную величину, которая и определяет максимальное значение глубины резания t_{ϕ} . Это и является существенным отличием шлифования от магнитно-абразивной обработки: при шлифовании первичным является фактическая глубина резания: она определяется геометрией зоны контакта инструмента и заготовки. Затем по ее значению рассчитывается сила резания. При магнитно-абразивной обработке первичной является сила резания: именно она определяет глубину внедрения режущих вершин в металл.

Аналогичные рассуждения можно сделать и о касательной составляющей силы резания *P*_z.



Рисунок 2.3- Силы, действующие на зерно

Эффективность МАО во многом зависит от физико-механических свойств порошков композиционных магнитно-абразивных материалов, которые должны обладать высокими абразивными, магнитными и прочностными свойствами. На зерна порошка действуют магнитные силы от магнитов индуктора. Значения магнитных сил влияет распределение значений магнитной индукции в зазоре с порошком и магнитные свойства самих зерен. Обычно зерна изготавливают путем спекания ферромагнитной основы и твердого сплава. Ферромагнитная связка обеспечивает удержание порошка магнитными силами, а твердый сплав придает порошку абразивные свойства [22]. Наибольшее применение при магнитно-абразивной обработке получил материал кермет. Кермет получается путем спекания порошка железа и абразива (Fe+20% Al₂O₃) [94]. Существует еще ряд материалов 23AM40Fe80, TiCFe50 также получаемые спеканием [22].

Имеются два способа получения магнитно-абразивных зерен. Первый способ состоит из размола полученного брикета и просеивания через систему сит, с последующим определением фракции. Зерна, полученные размолом (рисунок 2.4), имеют множество острых граней. В процессе резания участвует не все зерно, а именно данные грани. Второй способ заключается в капиллярном распылении расплавленного материала. Зерна получаются округлой формы. Данный метод

характеризуется равномерными по форме зернами и малым числом режущих вершин, по сравнению с зернами полученными размолом [22].

Магнитные свойства непосредственно зависит от объема зерна. В пределах фракции размер зерна имеет случайные значения. Чем больше абразивное зерно, тем больше магнитная сила, а от магнитной силы напрямую зависит механическая сила. Уменьшение размера магнитно-абразивного зерна, приводит к уменьшению как магнитных, так и механических сил [32].

Режущие свойства зерна определяются геометрическими параметрами его режущих вершин. По аналогии со шлифованием, режущие вершины описываются радиусной частью. Количество режущих вершин определяется в основном зернистостью порошка.



Рисунок 2.4 – Зерна магнитно-абразивного порошка полученные размолом В связи с тем, что глубина резания вершинами зерен очень мала, большую роль при магнитно-абразивной обработке играют пластические деформации обрабатываемого металла. Часть вершин может не только не удалять материал в связи с малой глубиной внедрения, но и, попадая в риски от предыдущих вершин, совсем не касаться металла, либо при касании осуществлять только пластические деформации (давящие вершины зерен). Все это абсолютно аналогично любому процессу абразивной обработки И быть коэффициентом может учтено стружкообразования k_c . Последний определяется с одной стороны геометрическими параметрами режущих вершин (соотношением глубины резания и радиусом режущей вершины), а с другой - свойствами обрабатываемого материала. Более твердым и хрупким обрабатываемым материалам соответствуют большие значения *k_c* [32].

На производительность процесса магнитно-абразивной обработки решающее значение оказывают параметры и конструкция индуктора. основными конструктивными особенностями индукторов является: диаметр индуктора, магнитопровод, число магнитов и их габаритные размеры. На рисунке 2.5 приведена схема магнитно абразивного индуктора.



Рисунок 2.5 – Магнитный индуктор:

 а) – Схема магнитного индуктора, где В- ширина магнита, D – диаметр индуктора; б) – Магнитный индуктор на постоянных магнитах

Число магнитов должно быть четным, исключением является индуктор с одним магнитом. Нечетное число магнитов приводит к замыканию магнитных потоков. Число магнитов их материал, остаточная намагниченности, оказывают значительное влияние на магнитную индукцию, а магнитная индукция будет влиять на силы резания. [32]. В математической модели нами будут использоваться как входные данные число магнитов и ширина магнита.

Наибольшая величина индукции сосредоточена в месте контакта магнита и магнитопровода [32]. При магнитно-абразивной обработке немагнитных изделий зерна, сосредоточенные в рабочем зазоре, уплотненные магнитным полем, располагаются непосредственно под магнитом (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Распределение магнитной индукции в рабочем зазоре, при обработке немагнитных изделий

Профиль обработанной поверхности образуется массовым взаимодействием режущих вершин магнитно-абразивных зерен, с обрабатываемой поверхностью [44, 45]. Однако текущий профиль заготовки зависит также и от ее исходного профиля. По данным профессора Ю.М.Барона [10], при магнитно-абразивной обработке поперек рисок исходной шероховатости съем металла происходит преимущественно с вершин выступов шероховатости. Это связано с тем, что магнитно абразивные зерна практически не попадают в риски из-за кинематики процесса. Кроме того, магнитное поле как бы выталкивает зерна из рисок снижаемой шероховатости. Это явление существенно отличает магнитно-абразивную обработку от полирования свободным абразивом.

Независимо от площади контакта заготовки с массивом зерен, через каждое сечение заготовки за единицу времени проходит одинаковое количество режущих вершин. Поэтому скорость размерного съема практически постоянна: за единицу времени размер заготовки изменяется на одинаковую величину – рисунок 2.7. В соответствии с этим, в зависимости от исходного профиля наблюдается различный характер изменения параметров шероховатости во времени.



Рисунок 2.7 – Съем металла при магнитно-абразивной обработке за единицу времени

На рисунке 2.8 показаны профили микронеровностей для различных методов формирования снижаемой шероховатости. Независимо от профиля, съем металла за единицу времени постоянен. Поэтому через некоторое время на вершинах рисок исходного профиля появятся плоские площадки. При этом параметр шероховатости R_z снизится практически на одинаковую величину, независимо от исходного профиля. Это явление подробно описано у профессора Ю.М.Барона [10-12]. Характер быстрого уменьшения параметра R_z также отмечается и при обработке свободным абразивом [60, 64, 119].



Рисунок 2.8 – Исходный профиль поверхности заготовки:

а) – После фрезерования сферической фрезой; б) – После фрезерования
 торцевой фрезой; в) – После шлифования

Однако изменения параметра *Ra* имеет принципиально другой характер. Профиль после обработки заготовки сферическими фрезами имеет острые вершины. Поэтому в начальный период времени съем металла практически не изменит параметр шероховатости *Ra*. И только через некоторое время начнется его снижение.

Как правило, обработка сложно-профильных поверхностей производится сферическими фрезами, после предварительной обработки концевыми и торцевыми фрезами.

Фактически обработке при магнитно-абразивной фрезерованной большой шероховатостью, формирование поверхности с шероховатости происходит в два этапа [32, 105]. На первом этапе с вершин рисок исходного Вносимая магнитно-абразивной обработкой профиля снимается металл. шероховатость существенно меньше, чем высота исходного профиля, можно полагать, что получаемая профилограмма имеет плоские вершины. При этом шероховатость будет снижаться, сначала медленно, затем более интенсивно. Как только она достигнет значения достижимой самим процессом магнитноабразивной обработки шероховатости, процесс можно прекращать, так как дальнейшего уменьшения шероховатости не происходит (рисунок 2.9). Этот момент времени определяет производительность операции.



Рисунок 2.9 – График изменения шероховатости от времени при магнитноабразивной обработке

Рассмотрим подробнее первый этап. На первом этапе происходит исправление снижаемой шероховатости. Обработка производится поперек полученных на предыдущем этапе обработки микронеровностей. Съем, как правило, происходит с вершин рисок, за счет перемещения разного размера зерен в рабочем зазоре (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Схема съема материала при магнитно-абразивной обработке, где ∆ - величина съема материала, W – средняя линия, x* - координата пересечения профиля риски и средней линии, x₁ – ограничение высоты риске при

съеме материала, $\frac{S}{2}$ - половина ширины риски.

В работе Иконникова А.М для описания снижаемой шероховатости используется высотный параметр шероховатости, шаг по вершинам и кривая *tp*. Форма риски с учетом пластической деформации описывается формулой [32]:

$$u = ax^{b} \tag{2.1}$$

Максимальная высота риски [32]:

$$u_{\max} = a(\frac{s}{2})^b \tag{2.2}$$

Шероховатость для полной риски [32]:

$$Ra = \frac{2}{S} \int_0^{S/2} |u(x) - W| dx,$$
(2.3)

где W – средняя линия [32].

$$W = \frac{2}{S} \int_0^{S/2} u(x) dx = \frac{2}{S} \int_0^{S/2} ax^b dx = \frac{a}{b+1} (S/2)^b$$
(2.4)

Исходная формула шероховатости для полной риски [32]:

$$R_{a} = \left(\frac{2a}{b+1}\right) \left(\frac{S}{2}\right)^{b} \left[\left(\frac{1}{b+1}\right)^{1/b} - \left(\frac{1}{b+1}\right)^{\left(\frac{b+1}{b}\right)} \right]$$
(2.5)

Для неполной риски и съеме с ее вершины размера ∆ максимальная высота риски [32]:

$$u_{\rm max} = a \left(\frac{S}{2}\right)^b - \Delta \tag{2.6}$$

Координата x₁ описывается выражением [32]:

$$x_1 = \left(\left(\frac{S}{2}\right)^b - \frac{\Delta}{a}\right)^{1/b}$$
(2.7)

Форма риски определяется выражением [32]:

$$u = \begin{cases} ax^{b}, x \le x_{1} \\ u_{\max}, x > x_{1} \end{cases}$$
(2.8)

$$W = \frac{2}{S} \left[\frac{a}{b+1} x_1^{b+1} + \left(a \left(\frac{S}{2} \right)^b - \Delta \right) \left(\frac{S}{2} - x_1 \right) \right]$$
(2.9)

Исходная формула шероховатости для неполной риски [32]:

$$Ra = \frac{2}{S} \left(W \left(2x^* - x_1 \right) - \frac{a}{b+1} \left(2 \left(x^* \right)^{b+1} - x_1^{b+1} \right) + \left(u_{\max} - W \right) \left(\frac{S}{2} - x_1 \right) \right)$$
(2.11)

Риска в процессе обработки постепенно уменьшается. После каждого прохода происходит пересчет значения шероховатости, до того момента, как снижаемая шероховатость не будет полностью удалена процессом магнитноабразивной обработки. Далее происходит второй этап обработки - формирование достижимой самим процессом магнитно-абразивной обработки шероховатости. Дальнейшее продолжение процесса обработки не приведет к значимому изменению шероховатости. Время достижения полученного значения шероховатости определяет производительность магнитно-абразивной обработки.

Приведенное описание позволяет построить структурную модель операции магнитно-абразивной обработки.

2.2 Структурная модель процесса магнитно-абразивной обработки

Физические явления при магнитно-абразивной обработке, описанные в предыдущем параграфе, можно представить в виде структурной модели, которая является основой для дальнейшего построения математической модели.

Структурная модель должна предусматривать формирование шероховатости обработанной поверхности в 2 этапа. При обработке поперек рисок исходного профиля съем металла происходит преимущественно с их вершин. При этом достижимая магнитно-абразивной обработкой шероховатость значительно меньше снижаемой и можно считать, что на вершинах рисок образуются плоские площадки. И только когда достижимая шероховатость будет сравнима со снижаемой (рисунок 2.9), процесс обработки можно останавливать. Таким образом, текущий профиль обработанной поверхности формируется из исходного профиля с учетом съема материала и достигаемой процессом обработки шероховатости (рисунок 2.11).

Максимальная глубина резания t_{ϕ} определяется в первую очередь величиной максимальной силы резания, действующей на зерна с учетом радиуса режущих вершин и твердости обрабатываемого материала. Для каждой режущей вершины глубина резания является случайной величиной в диапазоне [0; t_{ϕ}].

В свою очередь силы резания получаются из решения задачи контактирования зерен. Максимальное значение силы резания определяется разрывом контактных связей между зернами порошка ("расползание" зерен). Контакт между зернами обеспечивается наличием магнитных сил. Таким образом, нахождение максимальной силы эквивалентно решению задачи устойчивости конгломерата зерен: магнитные силы обеспечивают контактирование зерен, а сила резания приводит к разрыванию этого контакта.

Исходными данными для расчета силы резания являются параметры индуктора, характеристики порошка и магнитные свойства обрабатываемого материала.



Рисунок 2.11 – Структурная схема магнитно-абразивной обработки

шероховатости Процесс формирования достижимой является явно стохастическим. Режущие вершины магнитно-абразивных зерен имеют случайное расположение ПО поверхности конгломерата зерен И внедряются В обрабатываемую заготовку на случайную глубину (в пределах [0; t_{d}]). Сами профили режущих вершин можно аппроксимировать параболами, также случайные характеристики. Таким образом, имеющими съем метала И формируемый профиль обработанной поверхности образуется за счет целого ряда стохастических явлений.

Использование в качестве выходной величины именно профиля обработанной поверхности является важным преимуществом предполагаемого подхода. Из профилограммы обработанной поверхности можно получить любые параметры шероховатости, как высотные, так и шаговые и, в том числе, кривую относительной опорной длины профиля.

Стохастические характеристики процесса обработки требуют использования специального подхода для моделирования, позволяющего по стохастическим характеристикам исходных данных (радиусы режущих вершин зерен, их распределение по поверхности и глубине конгломерата зерен и т.п.) рассчитывать стохастические характеристики шероховатости, съема металла и производительности обработки.

2.3 Метод стохастического моделирования

При проектировании операций механической обработки часто необходимо решать задачу идентификации – определения математического описания по экспериментальным данным. Для детерминированных систем получение такого описания осуществляется достаточно просто: используется методики планирования экспериментов или метод наименьших квадратов в чистом виде.

Процесс механической обработки является стохастической системой. Действительно, и параметры заготовки, и параметры инструмента, и режим резания содержат случайные составляющие. В этом случае и результат выполнения операции (характеристики детали – размер, шероховатость и т.п.)

являются случайными, распределенными по какому-либо закону распределения. При этом закон распределения выходных характеристик определяется законами распределения (и их параметрами) входных.

Обычно аналитически "пересчитать" законы распределения входных параметров в законы распределения выходных не представляется возможным. В этом случае используют метод стохастического моделирования или метод Монте-Карло. Суть данного метода достаточно проста и напоминает проведение экспериментальных исследований [123].

Прежде всего, составляется детерминированная часть модели преобразования случайных входных параметров операции в выходные (тоже случайные). Алгоритм стохастического моделирования заключается в следующем:

1. Для каждого из входных параметров определяется закон распределения и параметры этого закона.

2. Генерируют с помощью датчиков случайных чисел наборы случайных значений входных параметров. Таких наборов должно быть значительное количество – по крайней мере – несколько сотен.

3. По детерминированной модели рассчитываются значения выходных параметров. Так как значения входных параметров случайное, то случайными являются и значения выходных.

4. По значениям выходных параметров определяют их законы распределения и параметры этих законов.

Иногда закон распределения входных параметров известен: если значения параметра определяется большим количеством случайных факторов и явлений, то он близок к нормальному (закону распределения Гаусса). В противном случае закон распределения определяют на основе экспериментальных исследований с использование критерия согласия χ^2 . Так же можно определить и законы распределения выходных параметров.

Для некоторых законов распределения имеются готовые формулы генерации случайных величин. Например, для нормального закона распределения используют зависимость:

$$y = \left(\sum_{i=1}^{12} R_i - 6\right)\sigma + \bar{y}$$
(2.12)

где R_i – равномерно распределенные на интервале (0; 1) числа (практически в любом языке или математическом пакте программ предусмотрена генерация таких чисел);

 σ и \bar{y} – параметры нормального распределения.

В случае отсутствия готовых формул для генерации можно использовать обратную функцию закона распределения: если случайная величина у распределения по закону F(y), то для генерации ее значений можно использовать формулу

$$y = F^{-1}(x)$$
 (2.13)

где x распределен по равномерному закону на интервале (0; 1);

 F^{l} обратная функция закона распределения F.

Например, для экспоненциального распределения $F(y) = 1 - \exp(-\lambda y)$. Выразив *у* из этой формулы, получим выражение для генерации случайной величины по экспоненциальному закону:

$$y = F^{-1}(x) = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - x)$$
 (2.14)

На рисунке 2.12 приведен алгоритм стохастического моделирования операции магнитно-абразивной обработки. Исходными данными для его реализации являются:

1. Фактическая глубина резания *t*^{*ф*} и параметры закона распределения глубины резания отдельными вершинами зерен.

2. Параметры законов распределения радиусов округления режущих вершин.

3. Параметры законов распределения расположения режущих вершин по поверхности инструмента.



Рисунок 2.12 - Алгоритм стохастического моделирования

Конец

4. Параметры закона распределения количества режущих вершин.

5. Количество повторения расчетов *N_r* для накопления статистики.

Результат расчета – профилограмма обработанной поверхности, по которой рассчитываются параметры шероховатости. Все расчеты повторяются *N_r* раз и накапливаются в таблице, по которой строятся полигоны распределения параметров шероховатости и выясняется предполагаемый закон их распределения.

Каждый проход моделирования заключается в генерации случайных значений радиуса режущей вершины ρ и ее расположения по поверхности и глубине $t \leq t_{\phi}$. Далее с учетом пластических деформаций (учитываются коэффициентом стружкообразования k_c) профиль режущей вершины "вырезается" из профиля поверхности заготовки. В результате этого процесса формируется профиль обработанной поверхности. На рисунке 2.13 показан процесс формирования профиля.

При повторении расчета будет получен другой профиль обработанной поверхности в связи с тем, что случайные параметры, вызывающие его формирование, примут другие значения – в соответствии с законами их распределения. В связи с этим и значения параметров шероховатости также будут различными. Накопив массив их значений, можно построить полигон плотности распределения и даже попытаться установить вид закона распределения. Сама методика аналогична методике экспериментальных исследований, но сами профилограммы и значения параметров шероховатости получаются с помощью математической модели.

Алгоритм стохастического моделирования позволяет также рассчитывать и съем металла за единицу времени по величине смещения верхнего уровня профилограммы. Величина съема металла, рассчитанная по предлагаемому алгоритму, также является случайной и обработкой результатов можно установить закон и параметры ее распределения [88].



Рисунок 2.13 – Последовательно формирование профиля обработанной поверхности

Таким образом, для реализации алгоритма стохастического моделирования необходимо установить законы распределения радиусов режущих вершин, глубину резания, число зерен, участвующих в процессе резания, параметры индуктора и режимы обработки.

2.4 Выводы

1. Профиль обработанной поверхности образуется массовым взаимодействием режущих вершин магнитно-абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью. Параметры режущих вершин (радиус округления, координаты по поверхности и глубине внедрения) содержат случайные составляющие с соответствующими законами распределения.

2. При моделировании магнитно-абразивной обработки результатом операции является профилограмма обработанной поверхности, по которой можно

рассчитать любые параметры шероховатости, величину съема металла и производительность операции.

3. В отличие от классических методов абразивной обработки (шлифования) при магнитно-абразивной обработке фактическая (максимальная) глубина резания определяется значением силы резания, которая, в свою очередь, рассчитывается из решения контактной задачи взаимодействия зерен при обработке.

4. В связи со стохастическим характером процесса формирования профиля обработанной поверхности, для прогнозирования параметров шероховатости, съема металла и производительности обработки наиболее эффективно использовать методику стохастического моделирования. Предлагаемый подход позволяет получить не только средние значения этих параметров, но и их разброс вплоть до построения полигонов распределения.

5. Для реализации методики стохастического моделирования необходимо установить законы распределения входных параметров операции.

З РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Общие положения

Съем металла и формирование шероховатости при магнитно-абразивной обработке (MAO) определяется массовым взаимодействием абразивных зерен, на которые действует магнитное поле от индуктора, с материалом заготовки. Зерна имеют случайные геометрические характеристики, случайно расположены на поверхности инструмента и внедряются в обрабатываемый материал, на глубину также имеющую случайные составляющие.

Для расчета параметров шероховатости и величины съема в соответствии со структурной схемой 2.12 необходимо определить основные этапы:

1. Расчет магнитных сил

2. Определение контактных сил и силы резания

3. Вычисление глубины резания

4. Получение профилограммы, путем стохастического моделирования

5. Определение любых параметров шероховатости, с построением полигонов

Расчет магнитных сил осуществляется путем математического моделирования магнитной индукции в среде Ansys Maxwell. Для описания математической модели необходимо определить ее входные параметры: диаметр индуктора, размеры магнита и магнитопровода, зазор между заготовкой и индуктором (рабочий зазор). Также, к входным параметрам будет относиться число слоев зерен, размер зерна и его материал, а также материалы магнита, магнитопровода и заготовки.

На основе результатов расчета магнитных сил происходит определение контактных сил F_{Mi} и максимальной силы резания F_{pes} . Максимальная сила резания будет служить исходным параметром для определения глубины резания.

Стохастическое моделирование заключается в моделировании прохода конгломерата режущих вершин зерен по поверхности со случайной глубиной резания. Глубина резания t для каждого зерна будет разной, но не превышать максимальной t_{ϕ} , это учитывается коэффициентом стружкообразования - k_c . Для моделирования необходимо определить радиусы скругления режущих вершин зерен ρ , закон их распределения, а также количество зерен на единицу площади - n_3 .

При заданных входных параметрах стохастической модели происходит ее подсчет и генерация профилограммы достижимой шероховатости. На основе данной профилограммы можно посчитать любые параметры шероховатости, а на основе массива профилограмм построить полигоны распределения шероховатости и времени достижения достижимой процессом магнитноабразивной обработки шероховатости.

3.2 Расчет магнитных сил

На этапе расчета магнитных сил и сил резания, в качестве допущения при создании модели была принята сферическая форма магнитно-абразивного зерна среднего размера 0,33 мм [32]. Зазор между индуктором и заготовкой или рабочий зазор, заполнен зернами из одного материала - FeTiC. Величина зазора составляет 1 мм. Зерна располагаются в три слоя (ряда). Материал заготовки – алюминиевый сплав Д16Т. Материал магнита - SmCo₅, магнитопровода – конструкционная сталь.

Для определения магнитных сил и сил резания использована методика, разработанная д.т.н. Иконниковым А.М. [32] В ANSYS MAXWELL произвели расчет магнитной индукции и магнитных сил, действующих на зерна в зазоре (рисунок 3.1) [53].

ANSYS Maxwell решает задачи электромагнитного поля, используя уравнения Максвелла в конечной области пространства с соответствующими граничными условиями и определенными пользователем начальными условиями,

чтобы получить гарантированно единственное решение. Результатом решения является распределение магнитной индукции и магнитные силы, действующие на каждое из зерен. На рисунке 3.2 показаны рассчитанные проекции сил, действующие на зерна каждого ряда. Первый слой (ряд) зерен расположен у индуктора, а третий - у заготовки.



Рисунок 3.1 - Расчет магнитных сил для индуктора диаметром 180 мм



Рисунок 3.2 - Магнитные силы:

а) проекция по оси у; б) проекция по оси х

В соответствии с полученными графиками можно утверждать, что для первого слоя (у индуктора) изменение магнитных сил значительное и имеются резкие, близкие к разрывам пики, для остальных слоев эти изменения сглаживаются. Первый слой не только не прижимается к индуктору, а наоборот – имеется отталкивание: отрицательная проекция сил по оси *у* напротив магнитопровода. Однако третий наружный слой обеспечивает притяжение зерен.

Кроме того, вдоль оси *х* магнитные силы сжимают слои, обеспечивая контактные силы между зернами.

3.3 Расчет сил резания

Расчет механических сил, действующих на индуктор и заготовку, требуют определение контактных сил между зернами. Для расчета механических сил в рабочем зазоре решим задачу равновесия сферических зерен в магнитном поле [32]. Алгоритм расчета реализован с помощью MS Excel [89].

Для начала рассмотрим три зерна, находящиеся в магнитном поле на границе магнита и магнитопровода (рисунок 3.3)



Рисунок 3.3 - Силы, действующие на зерна

На каждое зерно действует магнитная сила. Ее можно разложить на 2 составляющие – проекция по оси x (F_{Mix}) и проекция по оси y (F_{Miy}). Если зерно неподвижно, то сумма всех сил, действующих на него (сила инерции не рассматривается в связи с малой скоростью резания) должна быть равна нулю. Если рассматривать 2 проекции, то получается 6 уравнений для нахождения контактных сил.

На первый слой зерен, расположенный у индуктора действуют силы реакции контакта с индуктором F_{pi} , а также сила трения F_{mp} . Сила трения одинакова для всех зерен в связи с тем, что рассматривается задача равновесия и все зерна неподвижны. Фактически рассматривается сила трения покоя, которая действует на каждое зерно первого слоя. Кроме того, имеется 3 контактные силы между зернами. Итого – 6 контактных сил.

Если рассмотреть для каждого зерна проекции этих сил на оси *x* и *y*, получаем систему уравнений:

Зерно 1

y)
$$F_{m1y} = F_{P1} - \frac{\sqrt{3}}{2} F_{13}$$
 (3.1)

$$x) F_{m1x} = F_{\rm TP} + 0.5 F_{13} + F_{12} \tag{3.2}$$

Зерно 2

y)
$$F_{m2y} = F_{p2} - \frac{\sqrt{3}}{2}F_{23}$$
 (3.3)

x)
$$F_{m2x} = F_{\rm Tp} - 0.5 F_{23} - F_{12}$$
 (3.4)

Зерно 3

y)
$$F_{m3y} = \frac{\sqrt{3}}{2}F_{13} + \frac{\sqrt{3}}{2}F_{23}$$
 (3.5)

x)
$$F_{m2x} = 0.5 F_{23} - 0.5 F_{13}$$
 (3.6)

Силы *Fm_i* все известны. Необходимо найти все контактные силы. Систему уравнений удобно представить в матричном виде:

$$AX = B$$

где: матрица А показана в таблице 3.1. Пустые ячейки таблицы соответствуют нулевым значениям матрицы.

	F _{Tp}	F _{p1}	F _{p2}	F ₁₂	F ₁₃	F ₂₃
1y		1			$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	
2у			1			$-\frac{\sqrt{3}}{2}$
3у					$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
1x	1			1	0,5	
2x	1			-1		-0,5
3x					-0,5	0,5

Таблица 3.1 - Матрица А

Правая часть системы – вектор-столбец В (таблица 3.2). Он содержит значения проекций магнитных сил, которые предварительно рассчитываются с помощью метода конечных элементов в системе Ansys Maxwell:

Таблица 3.2 – Матрица В

	F _m , H
1y	0,0001598
2y	0,0040842
3у	0,0022389
1x	0,0026424
2x	-0,0045395
3x	0,0006051

Решение системы уравнений выполнялось в табличном процессоре Excel с вычислением обратной матрицы системы. Расчет максимальной силы резания (F_{pe3} на рисунке 3.3) осуществляется подбором ее значения, при котором контактная сила F_{12} становится равной 0. Дальнейшее увеличение силы резания невозможно, т.к контакт между зернами 1 и 2 разрывается и они будут фактически все больше раздвигаться, не позволяя увеличить силу резания.

Для подбора значения силы резания ее значение фактически добавляется к магнитной силе F_{M3y} и для каждого нового значения заново решается система уравнений. Подбор значения силы резания осуществлялся надстройкой "Поиск решения" в Excel.

Таким образом задача равновесия трех зерен в магнитном поле с расчетом контактных сил и, в том числе, силы резания легко решается Однако с увеличением рассматриваемых зерен задача усложняется и становится статически неразрешимой.

Рассмотрим систему из 5 зерен. Первая цифра в обозначении зерна показывает слой, вторая – порядковый номер зерна в слое. Если между зернами второго слоя будет контактная сила, то получается статически неразрешимая задача, где число неизвестных будет превышать число уравнений. Общее количество уравнений – 10, искомых сил – 11. Из них: 1 сила трения, 3 реакции индуктора, 2 связи в первом слое, 1 связь во втором и 4 контактных силы между слоями зерен (рисунок 3.4). Одним из методов перевода такой задачи в класс статически разрешимых является исключение из рассмотрения "лишних" сил.

Исключим контактную силу между зернами второго слоя, получаем статически определимую систему, состоящую из 10 уравнений и 10 искомых сил. Из них: 1 сила трения, 3 реакции индуктора, 2 связи в первом ряду, и 4 контактных силы между слоями зерен (рисунок 3.5). В последующих расчетах, для произвольного количества зерен примем допущение, что зерна второго и последующих слоев, между собой в ряду не контактируют.



Рисунок 3.4 – Статически неопределимая система, для пяти зерен



Рисунок 3.5 – Статически определимая система, для пяти зерен

На рисунке 3.6 представлена схема сил действующих на зерна в соответствии со схемой рисунка 3.1. В первом слое – у индуктора находятся 53 зерна, во втором (среднем) слое – 52 зерна и в третьем слое у детали – 51 зерно. Размер зерна составляет 0,33 мм.



На схеме обозначены силы трения, силы реакции индуктора, контактные силы в первом слое и контактные силы между слоями зерен.

Рисунок 3.6 – Фрагмент схемы сил, действующих на зерна

В результате решения в табличном процессоре Excel получены графики определения контактных сил между зернами для индуктора диаметром 180 мм. (рисунки 3.7 -3.8):



Рисунок 3.7 - Силы между зернами верхнего слоя порошка магнитного индуктора



Рисунок 3.8 - Силы, действующие на индуктор

Из анализа графиков и числовых значений сил можно утверждать, что крайние зерна 1-го слоя (по 4 с каждой стороны) практически не прижимаются к индуктору и между собой. При малейшей силе они оторвутся от индуктора. Появление силы резания только ухудшит это явление. Отрицательные значения контактных сил между слоями зерен могут быть скомпенсированы появлением сил резания от взаимодействия 3-го слоя порошка с заготовкой.

Сила резания определяется состоянием равновесия, На нижний слой зерен (рисунок 3.6) действует сила резания, стремящаяся вывести зерна из состояния равновесия. Расчет сил происходит путем подбора F_{pes} для обеспечения нулевой силы между зернами первого слоя. полученной значение - это максимальное

значение силы. При меньших значениях конфигурация зерен сохраняется, при больших – разрушается: зерна первого рада раздвинутся [50]. Для схемы (рисунок 3.1) получим значение F_{pes} =0,02 H - это максимальное значения силы. Полученная сила используется для определения максимальной глубины резания режущими вершинами зерен.

3.4 Определение радиусов округления режущих вершин магнитноабразивного порошка

Магнитно-абразивное зерно имеет сложную форму (рисунок 3.9) [5, 6] с различными режущими кромками. При прохождении в рабочем зазоре зерно контактирует несколькими гранями, тем самым оно погружается в материал не полностью, а на часть глубины данных режущих кромок (рисунок 3.10). Режущая кромка при вершине имеет определенный радиус округления [42]. Для математического моделирования профилограммы обработанной поверхности необходимо определить значения радиусов округления режущих вершин зерен ρ , за счет прохождения которых будет формироваться моделируемый профиль вносимой шероховатости, а также закон распределения данных вершин. [44, 67, 72]. Для определения радиусов был проведен эксперимент.



Рисунок 3.9 – Магнитно-абразивные зерна:

А, В - Размеры зерна для фракции порошка 40/16, *р*-радиус округления вершины

зерна, *є*- угол при вершине зерна [6]



Рисунок 3.10 - Стохастический характер магнитно- абразивной обработки: *А* – абразивное зерно; *BC* – линия среза; *H* – глубина резания;

V-скорость резания; Z-заготовка

При измерении радиусов возможно использование материала, обеспечивающего копирование профиля вершин.

Было принято решение заменить алюминиевый сплав Д16Т на органическое стекло СО-95-К, т.к. магнитная проницаемость материалов незначительно отличается, и на стекле остаются достаточно глубокие риски, после магнитноабразивной обработки.

Для получения профилей режущих вершин анализировали профили царапин, нанесенных зернами инструмента на поверхности полированного органического стекла. Для этого пластина органического стекла прижималась к индуктору с зернами с усилием 500 Н. Затем производилось перемещение пластины относительно неподвижного инструмента. На рисунке 3.11 приведена схема установки для формирования рисок.



Рисунок 3.11 – Установка для получения профилей рисок

Магнитный индуктор 4 помещается в стойку-держатель 5 и на его торцевую часть наносится магнитно-абразивный порошок. Планка 2 имеет выступ, в который устанавливается немагнитный образец 3 из органического стекла. Планка с прикрепленным образцом устанавливаются на торцевую часть индуктора и прижимаются немагнитным грузом, который обеспечивает усилие 500H. Плиту 2 перемещаем вдоль оси, для получения рисок.

В эксперименте использован магнитно-абразивный порошок зернистостью 630/40 до обработки и после обработки деталей в течение 30 мин. На рисунке 3.12 показаны фотографии образцов с полученными рисками.



Рисунок 3.12 – Образцы с рисками: а) полученными неизношенным магнитноабразивным порошком; б) полученными после 30 минут работы магнитноабразивного порошка

Фотографии рисок (рисунок 3.13), после экспериментальных исследований были получены при помощи микроскопа ММИ-2 (рисунок 3.14).



Рисунок 3.13 – Риски под микроскопом



Рисунок 3.14 – Микроскоп ММИ-2

Полученные на установке риски анализировались на профилографепрофилометре HOMMEL TESTER W55 рисунок 3.15. и оптическом профилометре Veeco NT9080 (рисунок 3.16). Оптический профилометр объединяет в себе интерферометр и микроскоп.



Рисунок 3.15 – Профилограф-профилометр HOMMEL TESTER W55



Рисунок 3.16 – Оптический профилометр Veeco NT9080

На рисунке 3.17 показан пример сформированной топографии. Из этого рисунка видно, что по краям полученных рисок имеются навалы. Поэтому для анализа радиусов вершин зерен необходимо брать только внутреннюю часть рисок, исключая их края.



Рисунок 3.17 – Топография поверхности с рисками

На рисунке 3.18 показан фрагмент профилограммы поверхности с рисками. Для анализа выбирались наиболее глубокие риски, чтобы исключить влияние связывающей части магнитно-абразивных зерен. На профилограммах явно видны профили навалов, которые при анализе профилей рисок исключались из рассмотрения.



Рисунок 3.18 – Фрагмент профилограммы с рисками

Обработка профилограмм производилась в табличном процессоре Excel с

использованием макросов на VBA. На первом этапе сравнивались два вида аппроксимации профилей вершин: с помощью параболы и с помощью дуги окружности.

Радиусы режущих вершин определяют, аппроксимируя их либо параболическим профилем, либо окружностью. На рисунке 3.19 показано представление режущей вершины параболой. При этом аналитически параболу можно описать выражением

$$y = a \cdot (x - x_1) \cdot (x - x_2)$$
 (3.7)

где: x_1 и x_2 – координаты пересечения с осью абсцисс; a – параметр масштаба.



Рисунок 3.19 – Моделирование профиля режущей вершины параболой Радиус при вершине параболы (радиус кривизны) определяется формулой:

$$\rho = 1/(2 \cdot a) \tag{3.8}$$

В соответствии с методом наименьших квадратов (МНК)

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{y_i}{(x_i - X_1) \cdot (x_i - X_2)}$$
(3.9)

При аппроксимации профиля режущей части зерна дугой окружности ее математическое описание имеет вид:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$$
(3.10)

где *x*₀, *y*₀, *R* – координаты центра и радиус.

При прохождении окружности через точки X₁ и X₂ координаты ее центра определяются выражениями:

$$x_0 = \frac{X_1 + X_2}{2}; \quad y_0 = \sqrt{R^2 - (\frac{X_1 - X_2}{2})^2}$$
 (3.11)

Для нахождения *R* можно использовать метод наименьших квадратов.

Использование рисок реального профиля в стохастическом алгоритме формирования профилограммы обработанной поверхности практически невозможно – время расчетов оказывается слишком большим. Кроме того, для стохастического моделирования нужно большое количество профилей зерен.

В принципе можно генерировать и случайный профиль режущей вершины зерна. Для этого, например, С.Л. Леоновым и А.М. Иконниковым [32] предлагалось разлагать профиль зерна в ряд Фурье и с учетом полученных амплитуд гармоник формировать для каждой вершины свой профиль. Однако подобный подход также очень существенно увеличивает время моделирования. Поэтому и предлагается замена реального профиля на более простой (окружность или парабола) и определение законов распределения числовых параметров этого профиля.

На рисунке 3.20 приведены примеры результатов аппроксимации двух крупных рисок. Из этого рисунка видно, что глубины профиля рисок (4...6 мкм) значительно больше глубины резания при магнитно-абразивной обработке. Поэтому зерно будет резать не всем профилем, а только его вершиной, где радиус округления значительно меньше.



Рисунок 3.20 – Примеры аппроксимации рисок параболами и дугами окружности Для рисок меньшей глубины аппроксимация параболой и окружностью практически не различаются (радиус кривизны при вершине параболы фактически совпадает с радиусом вписанной в нее окружности). Поэтому в дальнейшем рассматривалась только аппроксимация параболами с радиусом при вершине *р*. Это видно и на рисунке 3.20.

На рисунке 3.21 показаны риски меньшей глубины и их аппроксимация параболой. Из этого рисунка видно, что для рисок малой глубины такая аппроксимация дает существенно меньшую погрешность. Однако необходимо доказать, что снижение точности расчета профилограммы при замене реальных рисок параболическими, не внесет значительной погрешности.



Рисунок 3.21 – Пример аппроксимации профиля рисок малой глубины

Из этого рисунка видно, что для рисок малой глубины аппроксимация их профиля параболой дает существенно меньшую погрешность. В таблице 3.3 приведены примеры сравнения площадей рисок, полученных по реальному профилю и аппроксимацией радиусом в соответствии с рисунком 3.21.

Таблица 3.3 – Сравнение площадей рисок (по рисунку 3.21)

Вариант	Площадь реальной риски, мкм ²	Площадь параболической риски, мкм ²	Погрешность, %
Рисунок 3.21а	4,12	3,84	6,5
Рисунок 3.21б	11,98	12,77	6,6

Из таблицы видно, что при замене риски на параболическую, площадь ее может быть как больше, так и меньше реальной.

Для проверки возможности замены реального профиля риски на радиусную также были проведены пробные расчеты с генерированием профиля по методике стохастического моделирования, изложенной в главе 2. Для сравнения результатов был выбран реальный профиль зерна, приведенный на рисунке 3.216 и параболическая риска, соответствующая этому профилю. Максимальная глубина резания t_{ϕ} =1 мкм, базовая длина 1000 мкм. Распределение вершин зерен по глубине и по поверхности инструмента в пределах базовой длины приняты равномерными. Выполнялось фиксированное количество расчетов по копированию профиля режущих вершин – 4000 штук. При этом учитывалось, что некоторые из них могут пройти по ранее сформированной риске частично или даже полностью. Коэффициент стружкообразования не учитывался: профиль формировался только геометрическим копированием.

Для примера было сформировано 5 профилей и по ним рассчитаны значения средней лини и параметры шероховатости Ra [25, 26]. В таблице 3.4 приведены результаты сравнения полученных значений параметров шероховатости. Необходимо параболическая отметить, ЧТО риска дает завышенные значения параметра шероховатости Ra, но отклонение от реальной риски невелико: средняя погрешность замены реальной риски на радиусную по параметру *Ra* составляет менее 4%.

N⁰	W, мкм		Ra	Погрешность,	
	Реальная	Параболическая	Реальная	Параболическая	%
	риска	риска	риска	риска	
1	0,162	0,151	0,090	0,087	3,46
2	0,161	0,152	0,087	0,082	4,78
3	0,161	0,157	0,085	0,085	0,16
4	0,159	0,159	0,085	0,084	1,88
5	0,168	0,163	0,090	0,081	9,34

Таблица 3.4 – Примеры расчета параметров шероховатости

В большинстве рассмотренных примеров реальная риска дает немного меньшее значение параметра шероховатости *Ra*, но эти отклонения невелики. На рисунке 3.22 показан пример фрагментов полученных профилей. Видно, что характер профилограмм достаточно близок.

Можно предположить, что более существенно замена реальной риски на параболическую может сказаться на расчете шаговых параметров шероховатости. Связано это с тем, что радиусная риска имеет более гладкий профиль. На расчет относительной опорной длины профиля влияние замены рисок сказывается
незначительно. В то же время упрощение расчета профиля рисок значительно сокращает время моделирования.



Рисунок 3.22 – Фрагменты сформированного профиля:

а) реальный профиль риски; б) параболический профиль риски

Необходимо заметить, что при формировании профилограмм в приведенном примере все риски были **одинаковыми и по форме и по размеру**. При реальном стохастическом моделировании не только положение, но и размер рисок должен быть случайным. Кроме того, наличие упруго-пластических деформаций при резании реальными вершинами рисок дополнительно сгладят результаты упрощения.

Алгоритм расчета радиусов рисок, соответствующих радиусам режущих вершин, реализуется в следующей последовательности:

1. Расчет средней линии профиля, учитывающей погрешности установки образца. При этом профиль риски образовывался отрицательными значениями ординат.

2. Выделение отдельных рисок, исключая навалы по краям риски. Для рисок глубиной более 2 мкм выбиралась только их впадина, глубиной около 2 мкм.

3. Аппроксимация профиля каждой риски параболой и расчет ее радиуса кривизны.

Алгоритм реализован на языке VBA в табличном процессоре Excel [90]. В соответствии с ним для профилогрофа-профилометра HOMMEL TESTER W55 получены радиусы 333 зерен свежей порции порошка и 146 зерен после его износа. Для оптического профилометра Veeco NT9080 563 зерна до обработки и 821 после 30 минут работы. По полученным значениям построены полигоны распределения значений радиусов и в соответствии с критерием χ^2 доказаны принадлежности соответствующих выборок экспоненциальному закону с плотностью распределения

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda \rho} \tag{3.12}$$

На рисунке 3.23 показана экранная форма результатов сравнения радиусов округления режущих вершин, полученных при обработке профилограмм на профилографе-профилометре HOMMEL TESTER W55 до обработки, а на рисунке 3.24 - соответствующие этим данным полигоны распределения. Аналогично на рисунках 3.25 и 3.26 приведены данные сравнения после 30 минут работы.

Xmin=	2,9733	МИН	Количест	333	Расче	т количества точек	
Xmax=	123,8229	MAKC					1
Xcp=	30,1431	СРЗНАЧ			Постро	ение графика	
sigma=	24,8677	СТАНДОТ	ГКЛОН				
lambda=	0,036357						
Колич.ин	гервалов	8		h=	15,106194	(max-min)/колич.ui	нтервалов
Пересчет т	габлицы: С	trl-a	Ľ				
Хлев	Хправ	Хс	m	f эксп	f экспонен	(эксп-норм)²/норм	
2,9733	18,0795	10,5264	144	0,028626	0,024796	0,000592	
18,0795	33,1857	25,6326	81	0,016102	0,014317	0,000223	
33,1857	48,2919	40,7388	50	0,009940	0,008267	0,000338	
48,2919	63,3981	55,8450	22	0,004373	0,004773	0,000033	
63,39812	78,50431	70,95122	14	0,002783	0,00275615	2,63561E-07	
78,50431	93,61051	86,05741	10	0,001988	0,00159142	9,87929E-05	
93,61051	108,7167	101,1636	9	0,001789	0,00091889	0,000824163	
108,7167	123,8229	116,2698	3	0,000596	0,00053058	8,16092E-06	
					ХИ2=	10,65268458	
					XИ2(a,k-3)=	11,07049775	

Рисунок 3.23 – Экранная форма результатов сравнения радиусов округления режущих вершин, полученных при обработке профилограмм на профилографепрофилометре HOMMEL TESTER W55 до обработки





Xmin=	3,6918	МИН	Количест	146	Расчет количества точек		
Xmax=	123,8229	MAKC					
Хср=	30,9042	СРЗНАЧ			Постро	ение графика	
sigma=	24,9083	СТАНДОТ	клон				
lambda=	0,035834						
Колич.ин	гервалов	8		h=	15,016387	(max-min)/колич.u	нтервалое
Пересчет т	габлицы: С	trl-a					
Хлев	Хправ	Хс	m	f эксп	fэкспонен	(эксп-норм)²/норм	
3,6918	18,7082	11,2000	57	0,025999	0,023988	0,000169	
18,7082	33,7246	26,2164	44	0,020069	0,014006	0,002625	
33,7246	48,7410	41,2328	18	0,008210	0,008177	0,000000	
48,7410	63,7573	56,2492	12	0,005473	0,004774	0,000102	
63,7573	78,7737	71,2655	7	0,003193	0,002788	0,000059	
78,7737	93,7901	86,2819	3	0,001368	0,001628	0,000041	
93,7901	108,8065	101,2983	2	0,000912	0,00095024	1,51887E-06	
108,8065	123,8229	116,3147	3	0,001368	0,0005548	0,001193025	
					ХИ2=	9,188587062	
					XИ2(a,k-3)=	11,07049775	

HOMMEL TESTER W55 до обработки

Рисунок 3.25 – Экранная форма результатов сравнения радиусов округления режущих вершин, полученных при обработке профилограмм на профилографепрофилометре HOMMEL TESTER W55 после 30 минут работы



Рисунок 3.26 – Полигоны распределения радиусов округления режущих вершин,

полученных при обработке профилограмм на профилографе-профилометре

HOMMEL TESTER W55 после 30 минут работы

На рисунках 3.27-3.30 показаны аналогичные результаты, полученные на оптическом профилометре Veeco NT9080.

Xmin=	2,0356	МИН	Количест	563	Расчет количества точек		
Xmax=	134,9240	MAKC					
Xcp=	30,2152	СРЗНАЧ			Постро	ение графика	
sigma=	25,3406	СТАНДОТ	КЛОН				
lambda=	0,036						
Колич.ин	гервалов	8	-	h=	16,611060	(max-min)/колич.ui	нтервалов
Пересчетт	габлицы: С	trl-a					
Хлев	Хправ	Хс	m	f эксп	f экспонен	(эксп-норм)²/норм	
2,0356	18,6466	10,3411	247	0,026411	0,024810	0,000103	
18,6466	35,2577	26,9522	140	0,014970	0,013643	0,000129	
35,2577	51,8687	43,5632	82	0,008768	0,007503	0,000213	
51,8687	68,4798	60,1743	39	0,004170	0,004126	0,000000	
68,4798	85,0909	76,7853	28	0,002994	0,002269	0,000232	
85,0909	101,7019	93,3964	14	0,001497	0,001248	0,000050	
101,7019	118,313	110,0075	8	0,000855	0,0006861	4,1791E-05	
118,313	134,924	126,6185	5	0,000535	0,00037729	6,56212E-05	
					ХИ2=	7,813076763	
					ХИ2(a,k-3)=	11,07049775	

Рисунок 3.27 – Экранная форма результатов сравнения радиусов округления режущих вершин, полученных при обработке профилограмм на оптическом профилометре Veeco NT9080 до обработки



Рисунок 3.28 – Полигоны распределения радиусов округления режущих вершин,

полученных при обработке профилограмм на оптическом профилометре Veeco

Xmin=	1,5275	МИН	Количест	821	Расче	т количества точек	
Xmax=	128,3071	MAKC					
Xcp=	26,5026	СРЗНАЧ			Постро	ение графика	
sigma=	22,1431	СТАНДОТ	КЛОН				
lambda=	0,041114						
Колич.ин	тервалов	8		h=	15,847445	(max-min)/колич.u	нтервалов
Пересчетт	таблицы: С	trl-a					
Хлев	Хправ	Хс	m	f эксп	f экспонен	(эксп-норм)²/норм	
1,5275	17,3750	9,4512	372	0,028592	0,027876	0,000018	
17,3750	33,2224	25,2987	215	0,016525	0,014530	0,000274	
33,2224	49,0699	41,1461	115	0,008839	0,007574	0,000211	
49,0699	64,9173	56,9936	58	0,004458	0,003948	0,000066	
64,9173	80,7648	72,8410	31	0,002383	0,002058	0,000051	
80,7648	96,6122	88,6885	20	0,001537	0,001073	0,000201	
96,6122	112,4596	104,5359	6	0,000461	0,00055905	0,000017	
112,4596	128,3071	120,3834	4	0,000307	0,0002914	0,000001	
					ХИ2=	10,93107056	

NT9080 до обработки

Рисунок 3.29 – Экранная форма результатов сравнения радиусов округления режущих вершин, полученных при обработке профилограмм на оптическом профилометре Veeco NT9080 после 30 минут работы

XИ2(a,k-3)=

11,07049775

77



Рисунок 3.30 – Полигоны распределения радиусов округления режущих вершин, полученных при обработке профилограмм на оптическом профилометре Veeco NT9080 после 30 минут работы

В таблице 3.5 сведены результаты параметров распределений, полученных в проведенном исследовании

Параметр	Обозначе-	Профи профиломе TESTI	лограф- гр HOMMEL ER W55	Оптический профилометр Veeco NT9080		
	ние	До	После 30	До	После 30	
		обработки	мин работы	обработки	мин работы	
Минимальный радиус,	$ ho_{min}$	2.97	3 69	2.04	1 53	
МКМ		2,97	5,05	2,01	1,55	
Максимальный радиус,	$ ho_{max}$					
МКМ		123,82	123,82	134,92	128,31	
Средний радиус, мкм	$ ho_{cp}$	30,14	30,90	30,22	26,50	
СКО радиуса, мкм	$\sigma_{ ho}$	24,87	24,91	25,34	22,14	
Параметр		0.036	0.035	0.036	0.041	
распределения, 1/мкм	λ	0,030	0,055	0,030	0,041	
Значение критерия χ^2	χ^2	10,65	9,19	7,81	10,93	

T C 0 C	П			U						
	-11a	раметры	расп	релелении	ралич	VCOB	пеж	иних	Ber	лпин
таотпіца сто	1100	panie i pbi	protin	реденении	paga.	,	P •	<i></i>		

Табличное значение критерия χ^2 составляет 11,07 (при 5% уровне значимости). Поэтому можно утверждать, что все экспериментальные значения радиусов округления подчиняются экспоненциальному закону распределения.

Для экспоненциального распределения среднее значение и среднеквадратичное (стандартное) отклонение имеют равные значения, а параметр распределения $\lambda = 1/\rho cp = 1/\sigma \rho$. Для расчета этого параметра по полученным значениям использовалось среднее значение:

$$\lambda = \frac{2}{\rho_{cp} + \sigma_{\rho}}.\tag{3.13}$$

Экспоненциальный закон свидетельствует о том, что в резании преимущественно участвуют вершины малого радиуса, но в выборке имеются риски, оставленные вершинами с радиусом, сопоставимым с размером самого магнитно-абразивного зерна [52, 58, 100].

Для сравнения распределений радиусов округления до обработки и после 30 минут работы данные, полученные с профилографа-профилометра HOMMEL TESTER W55 и с оптического профилометра Veeco NT9080 были объединены. По полученным массивам данных (до обработки и после 30 минут работы) были построены полигоны распределения и выполнено их сравнение по критерию χ^2 . На рисунке 3.31 приведены полученные полигоны плотности распределения.



Рисунок 3.31 – Сравнение полигонов распределения

Несмотря на близость кривых плотности распределения, расчетное значение критерия χ^2 =13,46, а табличное - 11,07 (при 5% уровне значимости). Поэтому законы распределения, хоть и незначительно, но различаются. Это видно также и из таблицы 3.5 при сравнении значений параметров распределения λ . Поэтому для более точных расчетов необходимо учитывать изменение параметра распределения в процессе работы.

Для другой зернистости магнитно-абразивных порошков, можно предположить, что кривая будет также подчиняться экспоненциальному закону. При износе может произойти изменение закона распределения в сторону гамма распределения, или распределения Гаусса. Более точно ответить на этот вопрос можно проведя дополнительные эксперименты с изменением зернистости и времени обработки данными порошками.

Найденные значения параметра распределения λ будут использованы при стохастическом моделировании для генерации радиусов округления зерен.

3.5 Определение числа режущих зерен

Для определения плотности распределения зерен на единицу площади был произведен эксперимент, аналогичный эксперименту по определению радиуса режущих вершин. В качестве образца использовалось не органическое, а силикатное стекло с высокой твердостью. Выбор силикатного стекла обоснован необходимостью определения следов от вкраплений твердого сплава в зерне магнитно-абразивного порошка.

Производилось измерение количества рисок на силикатном стекле (рисунок 3.33), с размерами 10х3 мм в трех сечениях (рисунок 3.32). Подсчет осуществлялся при помощи микроскопа ММИ-2 с установленной видеокамерой BR-5101LC-UF, подключенной к компьютеру (рисунок 3.7). Исследования производилось на 4 образцах Перемещение на заданную длину, осуществлялось при помощи микрометрического винта стола микроскопа. Полученные данные представлены в таблице 3.6.

80



Рисунок 3.32 – Схема проведения эксперимента



Рисунок 3.33 – Риски на стекле

Таблица 3.6 – Количество рисок на силика	тном стекле
--	-------------

Номер образца	Номер сечения	Число рисок после перемещения по У на 10 мм., шт
	1	89
1	2	94
1	3	103
	4	95
	1	94
2	2	99
2	3	106
	4	101
	1	98
2	2	94
3	3	93
	4	96
	1	101
4	2	95
	3	96
	4	93

Как видим из таблицы, число царапин колеблется случайным образом в интервале от 89 до 106 штук. Количество зерен на единицу площади n_3 при зернистости 630/40 мкм, будет находиться в интервале 8,9...10,6 шт/мм²

3.6 Определение глубины резания при магнитно-абразивной обработке

Максимальная сила резания, определенная при решении задачи расчета контактных сил, определяет максимальную глубину резания t_{ϕ} . Глубина резания отдельными режущими вершинами зернен не превышает t_{ϕ} . Задачу расчета максимальной глубины резания можно решить в системе ANSYS Explicit Dynamics в динамике – рисунок 3.34. Использование методов теории подобия позволяют учесть при решении изменение в широком диапазоне скорости резания, размера шарика, прикладываемой силы резания.



Рисунок 3.34 – Решение задачи в динамике

Расчет необходимо производить до стабилизации процесса и упругих отжатий материала, т.к. из-за инерционных сил имеется колебательное движение шарика – режущей вершины зерна. Для обеспечения точности решения конечноэлементную сетку необходимо выбирать как можно более мелкой, что приводит к росту времени расчетов: время решения статической задачи заняло порядка 8 часов на четырех ядерном процессоре Intel Core i5 8250, с тактовой частотой 3,2 ГГц. Решение задачи с приложением скорости резания приводит к увеличению времени расчета в 10 раз, прохождение сферой расстояния 0,032 мм рассчитывалось порядка 80 часов. Даже применение параллельных вычислений, для решения задачи с использованием CUDA-ядер современных видеокарт (современные версии ANSYS позволяют использовать CUDA-ядра) не позволяет существенно снизить время решения.

Кроме того, полученные результаты расчета практически невозможно проверить экспериментально, а принятые при моделировании допущения (шаровидная форма режущей вершины, масса зерна, постоянство скорости и силы резания и т.п.) могут свести на нет точность получаемых результатов.

В связи с большой трудоемкостью получения результатов и невозможностью гарантировать их точность, было решено отказаться от использования этого подхода. Для расчета глубины резания вершинами магнитноабразивных зерен А.М.Иконниковым [32] использована зависимость:

$$t_{\phi} = \frac{0.102Fk_d}{2\pi\rho(HB)},$$
 (3.14)

где F – нормальная составляющая силы резания (H),

 ρ – радиус округления режущей вершины (мм),

НВ – твердость заготовки по Бринеллю,

 k_d – коэффициент, учитывающий динамические явления при резании ($k_d < 1$).

Формула получена из ГОСТ 9012-59 [27], для статического нагружения при упругопластическом вдавливании шара в металл. Динамические явления и, в том числе - скорость резания, учитываются эмпирическим коэффициентом k_d . Это, конечно, снижает точность расчетов. Подбор коэффициента k_d можно производить по конечным результатам расчета параметров шероховатости. Поэтому в рамках данной работы было решено выполнять расчет максимальной глубины резания по формуле (3.14).

Для того чтобы получить максимальную глубину резания необходимо выбирать минимальные радиусы режущих вершин зерен и максимальную силу резания. При F = 0,02 H, HB = 100, радиусе режущей вершины зерна $\rho = 0,002$ мм. и $k_d = 0,7$ фактическая (максимальная) глубина резания $t_d = 0,0011$ мм = 1,1 мкм.

3.7 Расчет параметров шероховатости на основе математической модели

После определения недостающих данных, перейдем к математическому моделированию процесса магнитно-абразивной обработке. В данной математической модели входные параметры подразделяются на случайные и детерминированные. Случайными параметрами являются: t – глубина резания; ρ – распределение радиусов скругления режущих вершин зерен; n_3 – число зерен; k_c – коэффициент стружкообразования. Детерминированными параметрами являются геометрические параметры индуктора и режим резания: D – диаметр индуктора; B - ширина магнита; N_{mag} – количество магнитов в индукторе; n_m – частота вращения индуктора.

Само стохастическое моделирование заключается в многократном расчете профилограммы, которая формируется за счет съема металла режущими вершинами с учетом коэффициента стружкообразования (пластические деформации). Некоторые из вершин попадают в ранее полученные риски и не контактируют с заготовкой, а некоторые только пластически деформируют металл (давящие вершины зерен). Для каждой режущей вершины зерна генерируется случайное значение ее радиуса, случайная глубина резания и случайное положение вершины вдоль профилограммы. Базовая длина в расчетах принималась равной 1 мм.

Рассмотрим подробнее случайные параметры и способы их генерации для реализации стохастического моделирования.

Экспериментально было установлено [52, 58], что радиусы скругления режущих вершины зерен распределяются по экспоненциальному закону (3.12).

84

Для генерации радиусов, распределенных по этому закону, в соответствии с (пунктом 2.2), используется формула:

$$\rho = -\ln(1-X)/\lambda, \,\mathrm{MM} \tag{3.15}$$

где *X* – равномерно распределенные на интервале [0; 1] числа.

λ - параметр распределения (1/мм), учитывающий зернистость используемого порошка

Для расчета максимальной (фактической) глубины резания вершинами магнитно-абразивных зерен [32] использована зависимость (3.14).

Ю.К. Новоселовым [17, 18, 68] доказано, что распределение глубины резания зернами при абразивной обработке осуществляется по закону:

$$F(t) = \left(\frac{t_{\phi} - t}{t_{\phi}}\right)^{1,5} \tag{3.16}$$

При моделировании для генерации случайных значений глубины резания каждым зерном в соответствии с (пунктом 2.2) используется формула:

$$t = t_{\phi} \left(1 - X^{1/1,5} \right),$$
 MM (3.17)

где X – равномерное распределение в пределах от 0 до 1.

Магнитно-абразивные зерна имеют сложную нерегулярную геометрию. Поэтому на количество режущих вершин влияет большое число случайных факторов, распределенных по различным законам распределения. Поэтому положим, что количество режущих вершин на поверхности инструмента n_3 (шт/мм²) подчиняется нормальному закону с параметрами $\overline{n_3}$ и σ_n . Если считать, что основные значения n_3 расположены в диапазоне от n_3 min до n_3 max, для вычисления параметров распределения можно использовать формулы:

$$\bar{n_3} = \frac{n_3 \min + n_3 \max}{2} \tag{3.18}$$

$$\sigma_n = \frac{n_{3\,max} - n_{3\,min}}{6} \tag{3.19}$$

Последнее выражение следует из правила трех сигм.

Для генерации значений, распределенных по нормальному закону, можно использовать формулу:

$$n_{3} = \left(\sum_{i=1}^{12} x_{i} - 6\right) \sigma_{n} + \bar{n}_{3}$$
(3.20)

На съем материала при магнитно-абразивной обработке значительное влияние оказывают пластические деформации. Величина данного влияния учитывается k_c - коэффициентом стружкообразования. Коэффициент стружкообразования является отношением площади удаляемого материала S_y , к теоретической площади риски S_o .



Рисунок 3.35 – Коэффициент стружкообразования

Значения коэффициента стружкообразования функционально связаны со свойствами обрабатываемого металла и соотношением глубины резания и радиуса режущей вершины $\Pi = \frac{t}{\rho}$. На основе экспериментальных данных Аскалоновой Т.А. [5], Иконниковым А.М. были получены формулы [32]:

$$k_{c} = \begin{cases} 0, \Pi \leq \Pi_{0} \\ k_{c_{\max}} \{1 - \exp[-5, 5(\Pi - \Pi_{0})]\}, \Pi > \Pi_{0} \end{cases}$$
(3.21)

где $\Pi_0 = 309000(10H_v)^{-1.89}$ - коэффициент, определяющий начальные условия резания;

 $k_{c_{\text{max}}} = 0,34t^{0.56}V^{0.08}$ - максимальный коэффициент стружкообразования.

При этом глубина резания и ρ задаются в мкм, а скорость – в м/с.

Для глубины резания t=1 мкм., $\rho = 4,7$ мкм., Hv=195 МПа. V=1,884 м/с. значение $k_c=0.0473$.

В таблице 3.7 представлены полученные входные параметры

Расчеты проводились для обработки без подачи, зазор между индуктором и заготовкой 1 мм.

Для корректного получения профилограммы на первом этапе расчета подбирается время стабилизации профиля и съема металла. Затем в цикле стохастического моделирования используется этот промежуток времени. Время стабилизации профиля подбирается таким, чтобы величина съема металла была отличной от нуля.

Название параметра	Значение	Размерность
Количество расчетов	5000	ШТ
Коэффициент стружкообразования	0,05	
Фактическая глубина резания	0,001	MM
Параметр распределения радиусов режущей вершины λ	30	MM
Ширина магнита	5	MM
Диаметр индуктора	180	MM
Количество магнитов	20	ШТ
Количество режущих зерен на 1 мм ² поверхности	9	шт/ мм ²
индуктора		
Частота вращения индуктора	200	об/мин
Шаг для формирования профилограммы	0,001	MM
Базовая длина	1	MM

Таблица 3.7 Исходные данные для математической модели

После проведения расчетов (имитационного моделирования) был получен набор профилограмм. Методика построения расчетных профилограмм подробно изложена во второй главе. На рисунке 3.36 пример профилограммы [88].



Рисунок 3.36 – Пример полученной профилограммы

Значение шероховатости для полученной профилограммы составило *Ra*=0,000106 мм = 0,106 мкм.

На основе массива профилограмм можно получить любые параметры шероховатости. По ГОСТ 2789-73 существует 6 параметров шероховатости: высотные (*Ra, Rz, Rmax*), шаговые (*S, Sm*) и относительную опорную длину профиля - *tp*. [26, 29]

На рисунке 3.36, 3.37 изображены полигоны распределения параметра шероховатости и скорости съема металла. Параметры распределений и значения коэффициентов χ^2 показаны в таблице 3.8.



Рисунок 3.37 – Полигон плотности распределения параметра шероховатости Ra



Рисунок 3.38 – Полигон плотности распределения скорости съема металла Из полигонов распределения и значений параметра χ² видно, что распределение параметра шероховатости *Ra* подчиняется нормальному закону распределения, а скорость съема – не подчиняется.

	Ra	Скорость съема
Среднее	0,1025 мкм	0,0120 мкм/с
СКО	0,0045 мкм	0,00309 мкм/с
χ^2 pacy	9,53	24,24
χ^2 maõ	11,07	11,07

Таблица 3.8 – Результаты расчета по математической модели

Если на чертеже детали задано максимальное значение шероховатости, то по аналитической плотности распределения можно спрогнозировать вероятность получения годной детали (площадь под кривой плотности распределения в заданном диапазоне *Ra*).

Приведенные результаты расчетов по имитационной стохастической модели описывают достижимую шероховатость обработанной поверхности. Производительность обработки деталей определяется временем получения этой шероховатости, которое рассчитывается по моменту перехода от текущей шероховатости, рассчитываемой по формулам (2.1-2.11), к достижимой. При этом при расчете изменения шероховатости с течением времени используются значения скорости съема металла, получаемые по стохастической модели. На рисунке 3.39 показан пример расчета изменения шероховатости при одинаковых значениях снижаемой и достижимой шероховатости и разных значениях скорости съема.

При необходимости можно также провести большое количество расчетов и получить полигон распределения времени обработки, а по нему определить минимально-необходимое время обработки для достижения заданной шероховатости детали.

На рисунке 3.40 показаны примеры рассчитанных значений относительной опорной длины профиля. При необходимости можно также построить полигоны плотности распределения ее значений, например, при p = 0,25, p = 0,5, p = 0,75 или при любых других значениях.



Рисунок 3.39 – Пример графиков изменения снижаемой шероховатости во



время обработки

Рисунок 3.40 – Относительная опорная длина профиля

На рисунке 3.41 показан пример полигона плотности распределения значений относительной опорной длины профиля при *p* = 0,5, полученных при тех же исходных данных.



Рисунок 3.41 – Полигон плотности распределения значений относительной опорной длины профиля при *p* = 0,5

В таблице 3.9 приведены характеристики полученного распределения:

Таблица 3.9 – Параметры распределения относительной опорной длины профиля при *p* = 0,5

Минимальное	Максимальное	Среднее	СКО
0,0707	0,3915	0,2092	0,0648

Аналогичные полигоны распределения можно рассчитать и для других значений *p*.

3.8 Выводы

1. Результатом стохастического моделирования являются профилограммы обработанной поверхности, по которым рассчитываются съем материала и любые параметры шероховатости вплоть до построения их полигонов распределения.

 Доказано, что радиусы режущих вершин распределены по экспоненциальному распределению с параметром λ, что свидетельствует о том, что в резании преимущественно участвуют вершины малого радиуса.

3. Двухэтапный метод расчета сил резания (расчет магнитных сил с помощью ANSYS MAXWELL и равновесия контактных сил) позволяет прогнозировать их максимальные значения, необходимые для определения максимальной глубины резания t_{ϕ} . Применение для этих же целей программного пакета ANSYS Explicit Dynamics позволяет получить достаточно точный расчет и

наглядное изображение процесса, но требует слишком больших затрат времени на моделирование, что не всегда приемлемо.

4. Установление законов распределения параметров шероховатости и съема металла позволяет прогнозировать производительность операции, ее стабильность и вероятность получения годных деталей на этапе технологической подготовки производства.

4 ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

4.1 Экспериментальные исследования

Для проверки адекватности математического моделирования шероховатости обработанной поверхности производили эксперимент на станке с ЧПУ ГФ2171С5Ф3. Обработка производилась с одной установки. Обрабатываемый материал - пластина из материала Д16Т. Заготовка прямоугольник представлена на рисунке 4.1



Рисунок 4.1 – Заготовка из Д16Т

Чтобы избежать погрешности установки, заготовку обрабатывали с одной установки. Пластину закрепляли в тисах и обрабатывали плоскость торцевой фрезой, диаметром 125 мм со сменными многогранными пластинами из материала ВКЗ. Далее сферической твердосплавной фрезой, диаметром 3 мм наносили профиль по всей длине пластины с шагом 0.6 мм. В качестве СОЖ использовалось масло индустриальное И20.



Рисунок 4.2 – Обработка заготовки и нанесение регулярного профиля



Рисунок 4.3 – Регулярный профиль

По нанесенному профилю производим магнитно-абразивную обработку свежей порцией порошка 40/16 по поверхности в трех участках. На первом участке, при неизменном зазоре 1 мм., производим обработку в течение 5 минут индуктором, диаметром 180 мм., при частоте вращения шпинделя 200 мин⁻¹. Далее инструмент отводится по оси y, перемещается по x на 83 мм и вновь подводится инструмент. Обработка в данном положении производилась 10 минут и аналогично в третьем положении 15 минут (рисунок 4.4). Как видно из схемы с правой части заготовки остается участок, не попадающий в область МАО. Измерение исходного профиля данного участка осуществлялось на профилографе-профилометре HOMMEL TESTER W55. (рисунок 4.5)



Рисунок 4.4 – Схема магнитно-абразивной обработки



Рисунок 4.5 – Обработка индуктором: а) в первой положении; б) в последующих После обработки снимали заготовку и производили измерения на профилографе-профилометре HOMMEL Tester W55. Повторяемость эксперимента - 5 раз (рисунки 4.6-4.8). Также производили микрофотосъемку профиля (рисунок 4.9)



Рисунок 4.6 – Фотографии профиля: a) до обработки б) через 15 минут после обработки



Рисунок 4.7 – Процесс измерения на профилографе-профилометре HOMMEL Tester W55



Рисунок 4.8 – Результаты измерения:

а) исходный профиль; б) достижимая шероховатость



Рисунок 4.9 – Фото профиля под микроскопом: а) до обработки б) через 15 минут Шероховатость нанесенного регулярного профиля по параметру *Ra* составила 3,23 мкм. Достижимая шероховатость – *Ra*=0,69 мкм.

Полученные профилограммы обрабатывались при помощи табличного процессора Microsoft EXCEL. По данным профилограмам, в соответствии с формулами (2.1-2.11) для снижаемой шероховатости, приведенными в главе 2, произведены расчеты. Результаты расчетов и профилограммы изменения шероховатости от времени приведены в таблице 4.1.





На рисунке 4.10 приведен график изменения шероховатости в процессе магнитно-абразивной обработки. Как видим, сначала происходит съем микронеровностей с вершин рисок, через 15 минут работы исходный профиль Магнитно-абразивная обработка удален. практически нанесла свою шероховатость. Также данный метод позволяет нам производить обработку после нанесения технических надписей [9].



Рисунок 4.10 – Наложение профилограмм

На рисунке 4.11 приведены расчетные и экспериментальные значения получаемой в процессе обработки шероховатости, а в таблице 4.2 – их численные значения.





Из сравнения расчетных и экспериментальных данных видно, что процесс съема снижаемой шероховатости не окончен и при дальнейшей обработке можно достичь меньшей шероховатости.

Время, мин	Ra расч, мм	Ra эксп, мм
0	0,00378	0,003206
5	0,003458	0,00267
10	0,002420	0,002285
15	0,000630	0,000696
20	0,0001	

Таблица 4.2 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Расчет проводился по зависимостям, приведенным к главе 2. При этом съем металла, и достижимая шероховатость рассчитывались по стохастической модели, описанной в главе 3.

Сравнительно высокие погрешности при расчете шероховатости в начале обработки вызваны искажениями профиля обработанной поверхности при фрезеровании, связанные с прерывистым резанием и упруго-пластическими деформациями. Эти искажения хорошо видны на профилограммах в таблице 4.1 и на рисунке 4.10. Но в целом характер кривых и близкие значения шероховатости в конце обработки доказывают правильность стохастической модели.

4.2 Исследование весового съема материла при магнитно-абразивной обработке

Для определения весового износа И подтверждения расчетов шероховатости полученных И съема, стохастическим моделированием, произведен эксперимент. Из прутка материала Д16Т, были изготовлены ступенчатые образцы (рисунок 4.12). Диаметр первой ступени – 25 мм, второй ступени – 30. Высота образца 11 мм. Образцы предварительно обрабатывали торцовой фрезой с пластинами из твердого сплава ВКЗ (рисунок 4.13)



Рисунок 4.12 – образцы для изучения весового съема : а) 3D модель; б) образец из Д16Т



б)

 $B \qquad F^{0} = F^{0} + F^{0} +$

a)

Рисунок 4.13 – Предварительная обработка образцов:

а) установка образца; б) лезвийная обработка; в) образцы после обработки;

г) профилограмма

Из профилограммы (рисунок 4.13г) видно, что обработка фрезой нанесла регулярный профиль рисок, под последующую абразивную обработку.

Далее производили магнитно-абразивную обработку образцов. Обработка осуществлялась индуктором (рисунок 4.14) с диаметром 180 мм., при частоте вращения 200 мин⁻¹. Время обработки - 1, 2, 3, 4 мин.. Использовались две фракции порошка 40/16 и 16/0 мкм. Для каждого образца предварительно измерялась шероховатость и масса. Масса измерялась на аналитических весах САРТОГОСМ (рисунок 4.15). Данные после обработки приведены в таблице 4.3.



Рисунок 4.14 – Магнитно-абразивная обработка образцов



Рисунок 4.15 - Аналитические весы САРТОГОСМ

Таблица 4.3 – Весовой съем материала

Образец	Шероховатость до обработки Ra, мкм	Шероховатость после обработки Ra, мкм	Расчетная стохастическим моделированием шероховатость Ra, мкм	Масса до обработки, г	Масса после обработки, г	Зернистость	Время, мин	Разница масс г	Съем экспериментальный мкм/мин	Съем, расчитаный стохастическим моделированием, мкм/мин
1	0,8036	0,6967	0,7021	18,0881	18,0868	16/0	1	0,0013	0,1069	0,0979
2	0,8074	0,6533	0,6739	20,2964	20,295	16/0	2	0,0014	0,07705	0,06305
3	0,8131	0,6402	0,6227	17,9556	17,954	16/0	3	0,0016	0,0576333	0,0591
4	0,8102	0,5767	0,5831	18,5914	18,5898	16/0	4	0,0016	0,058375	0,054225
5	0,8032	0,6505	0,6422	18,5672	18,5662	40/16	1	0,001	0,1527	0,1578
6	0,7939	0,5724	0,5799	17,9022	17,9008	40/16	2	0,0014	0,11075	0,11005
7	0,8063	0,4836	0,4949	18,405	18,4003	40/16	3	0,0017	0,1075666	0,1017
8	0,8071	0,3902	0,4012	18,1446	18,1425	40/16	4	0,0021	0,104225	0,0997

Исходя из данных в таблице 4.3, можно утверждать, что при зернистости 40/16 через 4 минуты происходит уменьшение шероховатости по параметру *Ra* с 0,8 до 0,39 мкм. Расчетом в математической модели, получено сходное значение шероховатости *Ra*=0,4012 мкм.

Разница масс равная 0,0021 г. за 4 минуты обработки для зернистости 40/16, также свидетельствует о съеме материала при магнитно-абразивной обработке.

Среднее значение съема, полученное экспериментально составляет 0,0969 мкм/мин. Математическим моделированием получено значение 0,0929 мкм/мин.

Сходимость результатов расчета, полученного стохастическим моделированием и экспериментальных исследований шероховатости говорит о адекватности математической модели.

4.3 Определение сил резания

Для определения сил резания при магнитно-абразивной обработке невозможно использовать стандартный динамометр, так как он имеет магнитный корпус и дает погрешность измерения. Силы резания при обработке очень маленькие и требуется датчик с высокой точностью. Поэтому было принято решение использовать тензометрический датчик с максимальной измеряемой силой 1 кГ. и ценой деления 0,01 кг. (рисунок 4.16) [50]



Рисунок 4.16 – Датчик тензометрический

На стол станка был установлен тензодатчик и произведено его тарирование, путем нагружения различными мерами весов. При нагрузке массой 200 грамм показания на тензометре составляли 0,203 кг.

На датчике установлен немагнитный образец из материала Д16Т (рисунок 4.17). Образец выполнен в форме болта, резьбовая часть ввинчивается в резьбовое отверстие датчика. Диаметр образца равен 11 мм



Рисунок 4.17 – Образец для исследования сил резания

Экспериментальные исследования производились на фрезерном станке ГФ2171С5Ф3. В шпиндель станка был установлен индуктор диаметром 180 мм. и нанесен порошок с зернистостью 630/40. Экспериментальная установка состоит из вертикально-фрезерного станка, магнитного индуктора, тензодатчика, тензостанции и компьютера (рисунок 4.18).



Рисунок 4.18 – Экспериментальная установка для определения сил резания

При расчетах в CAE системе ANSYS Maxwell рабочий зазор был принят равным 1 мм. В экспериментальном исследовании также примем зазор равный 1. Индуктор подводился к исследуемому образцу, и производилась обработка (рисунок 4.19). Данные с тензометра выводились на экран компьютера (рисунок 4.20).



Рисунок 4.19 – Процесс определения сил



Рисунок 4.20 - Показания тензометрического датчика

Тензометр отображает значение в кгс. Среднее значение ~ 0,54 кгс что соответствует ~ 5,4 H.

Математическое моделирование показало, что нормальная составляющая силы резания, действующая на одну режущую вершину, составляет P_1 =0,02 H. Количество режущих вершин (зерен) на площади образца $S = \pi^* 5,52 = 95,03$ мм²

при $n_3 = 9 \text{ шт/мм}^2$: $n_{3CYM} = 855,3 \text{ штук}$. Эти зерна распределены по глубине в соответствии с функцией распределения:

$$F(x) = x^{1,5} (4.1)$$

где $x = t/t_{\phi}$ – относительная глубина резания.

Каждое зерно контактирует с металлом в соответствии с вероятностью контакта P_{κ} – рисунок 4.21 [32, 43]





резания х

Тогда усредненное значение суммарной силы резания определяется по формуле:

$$P_{y} = \int_{0}^{1} P_{1} n_{3\text{сум}} F(x) P_{\text{K}}(x) dx = P_{1} n_{3\text{сум}} \int_{0}^{1} x^{1,5} P_{\text{K}}(x) dx \qquad (4.2)$$

Интеграл в этом выражении вычисляется численным методом:

$$\int_{0}^{1} x^{1,5} P_{\kappa}(x) dx = 0.3443$$

Тогда получаем $P_y = 0,02*855,3*0,3443 = 5,89$ H.

Относительная погрешность моделирования составляет:

$$\delta = \frac{5,89 - 5,4}{5,4} 100\% = 9,07\%$$

Для обработки сложно-профильных поверхностей, индуктор диаметром 180 мм не обеспечит обработку сложного контура. Поэтому необходимо определить

параметры индукторов малого диаметра, позволяющих обрабатывать поверхности сложного профиля.

4.4 Определение параметров индукторов для обработки деталей сложной конфигурации

В индукторе диаметром 180 мм. применялись постоянные магниты из SmCo₅. При расчете индукторов малого диаметра были использованы постоянные магниты из материала NdFeB, так как они обладают большей магнитной силой [22, 28, 79, 96, 106]. Также немаловажным является число магнитов в индукторе, их должно быть четное количество. Исключением является индуктор с одним магнитом. Он фактически соответствует индуктору с двумя магнитами, но конструктивно он изготовлен из одного магнита. Четное число магнитов необходимо для того, чтобы не было замыкания магнитных полей. В данном исследовании были проведены расчеты магнитной индукции, магнитных сил и сил резания, для индукторов диаметром 20 мм., магнитов 40х20х5 мм и 10х7х5 мм. Схема индукторов приведена на рисунке 4.22 [56, 101].



Рисунок 4.22 – Принципиальная схема индукторов

Расчет магнитной индукции и магнитных сил производили с помощью ANSYS MAXWELL. Полученные результаты магнитной индукции показаны на рисунке 4.23

В рабочем зазоре находились три ряда магнитных зерен и два ряда по бокам от магнита. Зерна из однородного материала, размер зерен 0,33 мм., величина рабочего зазора составляет 1 мм. При обработке немагнитных заготовок порошок сосредотачивается именно напротив магнита. Как можно увидеть из рисунка 4.23 наибольшие магнитные силы находятся в месте контакта магнита и магнитопровода. [24, 47] На рисунке 4.24 представлена схема расположения зерен.



Рисунок 4.23 – Расчет магнитных сил для индукторов диаметром 20 мм.:



Рисунок 4.24- Схема сил действующих на зерна

На схеме (рисунок 4.24) показаны действующие на зерна силы в вертикальном и горизонтальном направлениях и силы, возникающие от взаимодействия зерен между собой.

На рисунках 4.25 и 4.26 показаны рассчитанные в ANSYS Maxwell магнитные силы. На основании графиков (рисунки 4.23 и 4.24) можно утверждать, индуктор с одним магнитом обладает большей магнитной силой (максимальное значение F_{my} =0,0061H, F_{mx} =0,0086 H), чем с четырьмя магнитами (F_{my} =0,0038 H, F_{mx} =0,0059 H). Это говорит о том, что лучшее удержание

абразивного порошка магнитными силами наблюдается у индуктора с одним магнитом.



Рисунок 4.25- Магнитные силы для индуктора с одним магнитом:

а) проекция по оси y; б) проекция по оси x



Рисунок 4.26- Магнитные силы для индуктора с четырьмя магнитами:

а) проекция по оси у; б) проекция по оси х

Значения механических сил действующих на индуктор приведены в таблице 4.4. По данным таблицы можно сделать вывод, что механические силы для индуктора с четырьмя магнитами в 1,5 раза меньше.


Таблица 4.4 – Сравнение магнитных сил для индуктора с 1 магнитом и 4 магнитами

Для подтверждения расчетов в лаборатории кафедры «Технология машиностроения» АлтГТУ им. И.И. Ползунова был изготовлен индуктор на постоянном NdFeB магните. Индуктор состоит из двух стальных магнитопроводов, магнита из NdFeB и хвостовика из немагнитного материала (рисунок 4.27). В качестве немагнитного материала была выбрана латунь ЛС65.



Рисунок 4.27 – Индуктор с одним магнитом

Для обработки применялась заготовка, приведенная в пункте 4.1 (рисунок 4.1). Пластина с заранее нанесенным регулярным профилем (рисунок 4.28) закреплялась в тисках. Индуктор производил обработку на подаче 10 мм/мин четыре участка, длиной 20 мм.. Обработка осуществлялась на станке 6М83, зазор между индуктором и заготовкой составлял 1 мм., зернистость порошка 40/16. Схема обработки изображена на рисунке 4.29.



Рисунок 4.28 – Профилограмма исходного профиля



Рисунок 4.29 - Схема магнитно-абразивной обработки индуктором малого

110

диаметра

В процессе проведения эксперимента обрабатывались 4 участка, длиной 30 мм., между участками находится не обрабатываемый магнитно-абразивной обработкой зазор 20 мм. Справа от 4 участка находится необрабатываемое поле, где производится измерение исходного профиля (рисунок 4.29). Значение исходного профиля по параметру Ra=3,73 мкм. На рисунке 4.30 изображена фотография процесса.



Рисунок 4.30-Фотография процесса

При обработке данным индуктором заготовки, съема материала не происходит. Шероховатость образца после 15 минут обработки составило *Ra*=3,68 мкм. (рисунок 4.31).



Рисунок 4.31- Профилограмма профиля через 15 минут обработки

Чтобы выявить причину неработоспособности индуктора произведем расчет сил взаимодействия зерен в рабочем зазоре. Данные расчетов приведены в таблице 4.5



Таблица 4.5 – Значение магнитных сил индуктора диаметром 20 мм

Как видно из графика горизонтальных сил (таблица 4.5) между зернами, силы для второго ряда имеют отрицательное значение, что свидетельствует о том, что происходит перемешивание магнитно-абразивного порошка, без взаимодействия с заготовкой. Аналогичные данные были получены для индуктора с четырьмя магнитами.

В связи с тем, что индуктор диаметром 20 мм не производит обработку немагнитных материалов, определен интервал диаметров индукторов, при котором будет происходить процесс обработки. Осуществим расчет для диаметра приближенного к среднему значению диаметров - 80 мм. В индукторе используются постоянные магниты из материала NdFeB размером 40x20x5 мм. На рисунках 4.32 и 4.33 представлены магнитные силы, полученные путем расчета в CAE системе ANSYS Maxwell.

Размер, материал зерен и величина рабочего зазора приняты аналогичные тем, которые применялись в расчетах для индуктора диаметром 20 мм. В рабочем зазоре находились три ряда магнитных зерен.



Рисунок 4.32 - Расчет магнитных сил для индуктора диаметром 80 мм в ANSYS

113

Maxwell





б)

Рисунок 4.33 - Магнитные силы для индуктора диаметром 80 мм:

а) проекция по оси y; б) проекция по оси x

Далее производим расчет силы взаимодействия зерен в рабочем зазоре. Данные расчетов приведены в таблице 4.6

Как видно из графиков, зерна удерживаются у индуктора, при воздействии силы резания расслоения и разрыва контактных сил не происходит. Максимальная сила резания составляет 0,016 Н. Индуктор будет производить обработку.

Для обработки внутренних поверхностей изделий, индуктор диаметром 80 мм., не всегда возможно использовать, осуществим расчет индуктора меньшего диаметра. Выберем диаметр 40 мм в качестве исследуемого.



Таблица 4.6 – Значения магнитных сил для индуктора диаметром 80 мм

115

Индуктор диаметром 40 мм имеет 6 магнитов (рисунок 4.34). Размер магнита 30x10x5 мм.

На рисунках 4.35-4.36 можно заметить, что крайние зерна каждого из рядов очень слабо удерживаются магнитной индукцией, при воздействии силы резания данные зерна «улетят», и не будут принимать участия в процессе обработки. Исключим данные зерна и малый ряд зерен у индуктора, и произведем повторный расчет в ANSYS Maxwell (рисунок 4.37)



Рисунок 4.34 – Магнитный индуктор диаметром 40 мм



Рисунок 4.35 – Магнитная индукция







Рисунок 4.36- Магнитные силы для индуктора диаметром 40 мм:

а) проекция по оси у; б) проекция по оси х



Рисунок 4.37- Пересчет магнитных сил, для меньшего числа зерен

Сравним изменение магнитных сил, после изменения числа зерен. На рисунке 4.38– 4.40 представлены магнитные силы вдоль осей у и *x*, для каждого слоя зерен.



Рисунок 4.38- Магнитные силы для первого слоя зерен:

а) проекция по оси у; б) проекция по оси х



Рисунок 4.39- Магнитные силы для второго слоя зерен: а) проекция по оси *y*; б) проекция по оси *x*





б)

Рисунок 4.40 - Магнитные силы для третьего слоя зерен:

а) проекция по оси y; б) проекция по оси x

Сравнение производилось по максимальному значению магнитной силы, по которой в последующем будет определяться максимальная сила резания. Результаты представлены в таблице 4.7

Таблица 4.7 – Значения магнитных сил, для различного числа зерен в зазоре

Ряд	Число зерен в ряду, шт	Проекция максимальной магнитной силы, Н			
		По оси х	По оси у		
1	37	0,000236	0,00109		
	27	0,00202	0,000969		
2	38	0,000606	0,000923		
	28	0,000521	0,001031		
3	37	0,001281	0,001883		
	29	0,001491	0,001681		

Осуществим подсчет отклонения в процентах по формуле:

$$\Delta = \frac{P_1 - P_2}{(P_1 + P_2)/2} *100\% \tag{4.1}$$

где, P_1 – магнитная сила зерна у индуктора с большим числом зерен; *P*₂ – магнитная сила зерна у индуктора с меньшим числом зерен.

Результаты расчета приведены в таблице 4.8

Таблица 4.8 – Значение погрешности

Hower rate	Отклонение, %			
помер ряда	По оси х	По оси у		
1	15,40335	11,76047		
2	15,03053	11,1165		
3	15,13572	11,37576		

Магнитная индукция зависит от количества зерен в рабочем зазоре. При изменении их количества в рабочем зазоре произойдет ее изменение. Значение погрешности по рядам проекции сил по оси y не превышает 11,8%, проекции сил по оси x не превышают значения 15,4%. Значение погрешности проекции сил по осям, свидетельствует о отсутствии необходимости пересчета магнитных сил в рабочем зазоре, при изменении количества зерен в процессе обработки. Тем самым происходит экономия времени проектирования операции.

У индуктора диаметром 40 мм при воздействии силы резания расслоения и разрыва контактных сил не происходит. Максимальная сила резания составляет - 0,012Н. Было принято решение изготовить данный индуктор. Экспериментальные исследования подтвердили расчеты. Процесс происходит стабильно, индуктор производит обработку.

4.5 Проектирование операции магнитно-абразивной обработки

Методика стохастического моделирования магнитно-абразивной обработки (глава 3) предполагает расчет сколь угодно большого количества реализаций профилограмм и вычисление по ним любых параметров шероховатости. Наиболее часто на производстве используется параметр *Ra*, хотя методика позволяет прогнозировать любые параметры шероховатости, как высотные, так и шаговые, и, в том числе – относительную опорную длину профиля.

Таким образом, в результате моделирования будут расчетным путем получены случайные значения параметров шероховатости. По этим значениям можно на этапе технологической подготовки производства прогнозировать не только их средние значения и дисперсию, но и построить полигон распределения таких параметров.

На рисунке 4.41 приведен пример такого распределения для параметра шероховатости *Ra*. Плотность нормального распределения построена по полученным стохастическим моделированием значениям достижимой шероховатости - рисунок 4.42. При этом построен не полигон, а именно кривая нормального распределения (значение критерия χ^2 доказывает возможность ее использования).

На рисунке 4.41 показано заданное конструктором предельное значение шероховатости (*Ra_{констр}*=0,11 мкм), а закрашенная область под кривой определяет вероятность брака. Числовое значение вероятности брака можно определить по формуле:

$$P_{\delta pa\kappa} = 1 - F(Ra_{\kappa o \mu cmp}) \tag{4.2}$$

где *F*(*Ra*) – значение функции нормального распределения – рассчитывается по таблице или с помощью функции НОРМРАСП в MS Excel.

Для рисунка 4.41 *Р_{брак}*=0,049.

обратить Необходимо внимание, что эта кривая получена не экспериментально, а на основе моделирования операции. Все характеристики процесса обработки, и, в первую очередь – среднее значение и дисперсия *Ra*, определяются исходными данными: режимом резания, характеристиками индуктора, магнитно-абразивного порошка, свойствами заготовки. Это позволяет на этапе проектирования операции не только оценить стабильность операции, но и проверить надежность выполнения требований по обеспечению заданной на чертеже шероховатости.

При расчете вероятности брака необходимо пользоваться не полигоном плотности распределения, а именно кривой плотности. Это связано с тем, что полигон не показывает "хвосты" распределения, а именно они и определяют вероятность брака. Аналогичный подход можно использовать и для определения производительности операции магнитно-абразивной обработки. Время обработки фактически определяется временем стабилизации значения параметров шероховатости – временем обеспечения достижимой шероховатости. При стохастическом моделировании это время также получается расчетным путем и по его значениям можно построить полигон и кривую плотности распределения.



Рисунок 4.41 – Полигон распределения шероховатости

Ramin	0,093461					
Ramax	0,112323					
Rasr	0,102514					
sigRa	0,00453					
Колич.интервалов:		8		h=	0,002358	
Хлев	Хправ	Xc	m	fэксп	fнорм	(эксп-норм)І/норм
0,093461	0,095819	0,09464	4	16,9657	19,45029	0,317383989
0,095819	0,098177	0,096998	13	55,13852	41,96793	4,133263627
0,098177	0,100535	0,099356	19	80,58706	69,06848	1,920960489
0,100535	0,102892	0,101713	22	93,31134	86,69884	0,504333016
0,102892	0,10525	0,104071	14	59,37994	83,00758	6,725471801
0,10525	0,107608	0,106429	10	42,41424	60,61683	5,466039819
0,107608	0,109965	0,108787	11	46,65567	33,76289	4,923263351
0,109965	0,112323	0,111144	7	29,68997	14,34357	16,41935341
					X1/12=	9,527475954
					ХИ2таб=	11,07049775

Рисунок 4.42 – Результаты стохастического моделирования

Если задаться требуемой производительностью (временем обработки), то также, как и по шероховатости, можно прогнозировать надежность обеспечения достижимой шероховатости – рисунок 4.43. Таким же образом, как и по

122

шероховатости, можно управляя параметрами операции обеспечивать снижение разброса производительности (повышение стабильности операции) и гарантировать получение заданного времени обработки.





На рисунке 4.44 приведен алгоритм проектирования операции магнитноабразивной обработки, основанный на методике стохастического моделирования операции.

Исходными данными являются предельные значения параметра шероховатости и желаемое значение производительности операции - времени обработки. Кроме того, задаются начальные значения параметров режима резания, и выбирается из базы данных параметры индуктора.

Следующим этапом является само стохастическое моделирование с формированием законов распределения шероховатости и времени обработки. Если по результатам моделирования требования по шероховатости и производительности обработки удовлетворяются, процесс проектирования считается законченным. В противном случае производится корректировка параметров режима резания и/или инструмента (индуктора).

В принципе задачу проектирования операции можно представить в виде задачи оптимизации: необходимо обеспечить минимизацию вероятности брака по параметрам шероховатости и заданную производительность обработки.



Рисунок 4.44 – Блок схема проектирования процесса магнитно-абразивной обработки

Параметры коррекции режима резания определяются возможностью реализации их на используемом оборудовании. База данных индукторов содержит их характеристики в плане обеспечения заданной индукции и силы резания в зависимости от геометрических и магнитных свойств. При отсутствии подходящего индуктора необходимо выполнить его расчет в соответствии с ранее описанной методикой. Затем параметры рассчитанного индуктора включаются в базу данных.

Разработанный алгоритм позволяет на этапе технологической подготовки производства проектировать операцию магнитно-абразивной обработки, гарантируя обеспечение заданной шероховатости и производительности обработки.

В соответствии с данным алгоритмом, на предприятии на ООО «Харвест» усовершенствован технологический процесс изготовления пресс-форм (Приложение Г).

В технологических процессах изготовления пресс-форм присутствовала слесарная операция. Слесарная операция была необходима, для обеспечения требуемой шероховатости сложно-профильной поверхности не более Ra=0,08 мкм. Операция выполнялась с использованием ручной бормашины со сменными войлочными кругами и абразивной пастой ГОИ №2. Обработка производилась на 22000 об⁻¹. Ручное полирование не обеспечивает стабильность параметров шероховатости в процессе обработки. Колебание шероховатости поверхности по параметру Ra составляло от 0,08 до 0,12 мкм. После контроля шероховатости полирования на магнитно-абразивную обработку на технологическом оборудовании приводит к автоматизации процесса.

Применение индукторов на постоянных магнитах в форме концевой фрезы, разработанной математической модели и САЕ систем позволяет сократить время обработки, а также обеспечить стабильность шероховатости – уменьшить количество брака. Для пресс-формы (рисунок 4.43) применялся индуктор на постоянных NdFeB магнитах, диаметром 40 мм. Математическое моделирование

показало, при зернистости 16/0 мкм, и частоте вращения 200 об/мин, колебание шероховатости поверхности по параметру *Ra* составит 0,07....0,08 мкм.



Рисунок 4.45 – Пресс-форма

Себестоимость операции определялась по формуле:

$$C = T_{um} \cdot (\mathcal{U}_{cm} + C_{cm}) + 3_{pacx} \tag{4.1}$$

где *Т*_{*um*} - штучно-калькуляционное время на операцию;

*Ц*_{ст –} цена станкочаса;

С_{ст} – тарифная ставка станочника;

З_{расх} – затраты на расходные материалы.

Штучно-калькуляционное время операции определяется по формуле:

$$T_{uum} = T_0 + T_s + T_{\partial on} \tag{4.2}$$

где *T*_o - основное время, ч;

*Т*_{*в*} - вспомогательное время, ч;

*Т*_{доп} - дополнительное время на обслуживание рабочего места и отдых, ч;

Для исходного технологического процесса полирования по данным предприятия стоимость станкочаса $U_{cm} = 325$ руб, штучно-калькуляционное время - $T_{um}(\Pi) = 1,31$ ч, тарифная ставка рабочего 5 разряда – $C_{cm}(\Pi) = 671$ руб/ч, затраты на расход абразивного материала и инструмента составляют $3_{pacx} = 87,3$ руб. Себестоимость будет равна:

$$C(\Pi) = 1,31 \cdot (325 + 671) + 87,3 = 1392,06 \text{ py6/mm}$$

Для предложенного технологического процесса магнитно-абразивной обработки пресс-формы $T_o(M) = 0,683$ ч, $T_e(M) = 0,053$ ч, $T_{don}(M) = 0,03$ ч, тарифная ставка станочника третьего разряда составляет $C_{cm}(M)=415$ руб/ч, стоимость станкочаса (по данным предприятия) $\mathcal{U}_{cm}=1106$ руб/ч, затраты на расход абразивного материала $3_{pacx}=18$ руб.

$$T_{uum}(M) = 0,683 + 0,051 + 0,03 = 0,764$$
 ч;
 $C(M) = 0,764 \cdot (1106 + 415) + 18 = 1180,04$ руб/шт

Экономический эффект рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{G} = (C(\Pi) - C(M)) \cdot N_{aa} \tag{4.3}$$

где N_{год} – годовая программа выпуска, шт

Годовая программа выпуска составляет 2 тыс. штук в год. Экономический эффект от внедрения технологического процесса равен:

$$\mathcal{F} = (1392,06 - 1180,04) \cdot 2000 \approx 424000 \text{ pyb}$$

Помимо внедрения производстве, разработанная на на основе математической модели программа для ЭВМ, успешно внедрена в учебный процесс кафедры «Технология машиностроения» Алтайского государственного технического университета (Приложение Д). Программа «Расчет параметров магнитно-абразивной шероховатости при обработке» (Приложение Б) практических занятиях дисциплины «Компьютерное применяется на машиностроении» направления подготовки 15.03.05 моделирование В «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

4.6 Выводы

1. Экспериментальные исследования на индукторе диаметром 180 мм., показали, что съем материала происходит, преимущественно с вершин профиля. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что процесс съема снижаемой шероховатости через 15 минут не окончен и при дальнейшей обработке можно получить меньшую шероховатость. Но в целом характер кривых и близкие значения шероховатости в конце обработки доказывают правильность стохастической модели.

2. Сравнение результатов расчета шероховатости и съема материала за единицу времени, полученных стохастическим моделированием и экспериментальными исследованиями, говорит о адекватности математической модели. Отклонение расчетных значений шероховатости и съема металла, около 5%

3 Экспериментально определенная сила резания для индуктора диаметром 180 мм составила 5,4 H, расчетная сила 5,89 H. Погрешность составила 9,07%.

4. Математическое моделирование магнитных сил, формируемых индукторами с одним и четырьмя магнитами показало, что магнитные силы между зернами выше для индуктора с одним магнитом.

5. Математическое моделирования контактных сил, формируемых индукторами диаметрами 80 и 40 мм, показало, что не происходит расслоения порошка в рабочем зазоре и разрыва контактных сил не происходит. Максимальная сила резания на зерно составила 0,016 H и 0,012 H соответственно. Экспериментальные исследования магнитного индуктора 40 мм. подтвердили его работоспособность.

6. Внедрение разработанной технологической операции пресс-формы для термопласт-автомата на ООО «Харвест» позволило получить экономический эффект 424000 руб. за счет сокращения времени обработки, уменьшения количества брака готовой продукции, снижения трудоспособности и себестоимости операции.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработанная стохастическая модель формирования профиля поверхностей деталей из алюминиевых сплавов (на примере Д16Т), полученных магнитно-абразивной обработкой, с учетом случайного характера взаимодействия абразивных зерен с поверхностью заготовки позволяет на этапе технологической производства рассчитывать необходимое подготовки время полирования, высотный параметр шероховатости *Ra* и относительную опорную длину профиля *tp*. Предложенный подход дает возможность прогнозировать не только средние значения параметров, но и их разброс, а также построение законов их распределения.

В связи с тем, что в основе разработанной модели лежит расчет профиля обработанной поверхности, возможно прогнозирование и других параметров шероховатости (в соответствии с ГОСТ 2789-73).

2. Расчет полигонов распределения и установление законов распределения параметров шероховатости *Ra* и *tp* и времени полирования на этапе технологической подготовки производства дает возможность определять вероятность получения годных деталей по этим параметрам, оценивать стабильность выполнения операции, а также прогнозировать необходимое время обработки.

3. Расчетный метод получения полигонов распределения параметров шероховатости и времени полирования позволяет производить объективное сравнение вариантов ее реализации, что дает возможность проектировать операцию магнитно-абразивной обработки, управляя режимами резания.

4. Экспериментально доказана адекватность полученных математических моделей и возможность их использования для проектирования операции магнитно-абразивной обработки немагнитных материалов Отклонение расчетных значений шероховатости и весового съема металла, около 5%

5. апробацию Результаты диссертационной работы прошли на промышленном предприятии ООО «Харвест», экономический эффект OT 424000 внедрения руб. Математическая модель расчета параметров шероховатости при магнитно-абразивной обработке принята к внедрению в учебный процесс направления подготовки 15.03.05 «Конструкторскотехнологическое обеспечение машиностроительных производств»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. / Под ред.
 Д-ра техн.наук проф. А.Н. Резникова. М., Машиностроение 1977 – 391 с. с ил.

2. Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2019. –272 с.

Акулович, Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. - Минск : БГАТУ, 2013. - 372

4. Армарего И. Дж Обработка металлов резанием / Армарего И. Дж., Браун Р.Х. Пер. с англ. В. А. Пастунова. М., «Машиностроение», 1977 – 325 с. с ил.

5. Аскалонова, Т. А. Исследование работоспособности хонинговальных брусков при обработке малых отверстий в стальных закаленных деталях: Дис, канд. техн. Наук. [Текст] / Т. А. Аскалонова. – Минск, 1973. – 192 с.

6. Аскалонова, Т. А. Обеспечение качества при абразивной обработке: вопросы теории и практики: монография [Текст] / Т. А. Аскалонова, А. М. Иконников, С. Л. Леонов, Ю. К. Новоселов, А. А. Ситников, Е. Ю. Татаркин; под ред. Проф Е. Ю. Татаркина. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 219 с

Бабаев С.Г. Притирка и доводка поверхностей деталей машин / Бабаев
 С.Г. М. Машиностроение 1976. – 128 с. с ил.

8. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов / Байкалов А.К. «Наукова думка», 1978. 207 с.

9. Балашов А.В. Обеспечение качества гравирования буквенноцифровых надписей на деталях машин и приборов [Текст] / А.В. Балашов, М.И.Маркова, Д.Е. Соломин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021 №1 (143) С. 5-15. 10. Барон Ю.М., Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Барон Ю.М. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1986. – 176 с: ил.

Барон, Ю. М. Технология абразивной обработки в магнитном поле /
Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение, 1975. – 128 с.

12. Барон, Ю. М. Физические основы работы магнитно-абразивных материалов / Ю. М. Барон // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев, 1980. – С. 10-17.

13. Басов К.А. ANSYS для конструкторов./ Басов К. А. — М.: ДМК Пресс, 2009. — С. 248

14. Бишутин С.Г. Прогнозирование и обеспечение параметров шероховатости шлифованной поверхности на основе моделирования процессов правки круга и обработки : автореферат дис. кандидата технических наук : 05.02.08 / Брянский гос. технич. ун-т. - Брянск, 1998. - 18 с.

15. Бишутин С.Г. Теоретическое определение параметров шероховатости поверхности при шлифовании и электроэрозионной обработке / Бишутин С.Г., Съянов С.Ю. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2001. № 1. С. 16-18.

16. Боровский Г.В. Профильное шлифование / Боровский Г.В., Белостоцкий В.Л. под ред. Л.Н. Филимонова – 3-е изд., перераб. и доп. // Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 160 с. с ил.

17. Братан С.М. Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования / Братан С.М., Богуцкий В.Б., Новоселов Ю.К., Рощупкин С.И. // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. № 5 (71). С. 9-18.

18. Братан С.М., Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования / Братан С.М., Богуцкий В.Б., Новоселов Ю.К., Рощупкин С.И. // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. № 5 (71). С. 9-18.

19. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников / М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.: ил.

20. Воронов С.А. Стохастическая модель процесса абразивной обработки. Динамика плоского шлифования / Воронов С.А., Вэйдун М. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 1 (694). С. 26-36.

21. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. Пер. с англ. / Галлагер Р. М.: Мир, 1984. - 428 с.

22. Гнесин, Г. Г. Принципы создания магнитно-абразивных материалов / Г. Г. Гнесин, М. Д. Крымский, Л. Н. Тульчинский // Магнитноабразивные материалы и методы их испытаний. – Киев, 1980. – С 17-25

23. Гончаров, В. Д. Прогрессивные технологические методы финишной обработки: учеб. пособие / В. Д. Гончаров. – М. : Станки, 1993. – 105 с

24. Горохов В.Ю. Формирование шероховатости поверхности при магитно-абразивной обработке (МАО) на основе математического моделирования. [Текст] / Горохов В.Ю, Соломин Д.Е. // Наука и молодежь. Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х томах. Отв. редактор М.В. Гунер. Барнаул, 2021. С. 220-222.

25. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности: дата введения 01.01.2016. – Москва, 2015, 18с.

26. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики: дата введения 01.01.1975. – Москва, 1973, 5 с.

27. ГОСТ 9012-59. МЕТАЛЛЫ. Метод измерения твердости по Бринеллю: дата введения 01.01.1960. – Москва, 1959, 39 с.

28. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали / Дружинин В.В. Изд. 2-е, перераб. М., «Энергия» 1974. – 240 с. с ил.

29. Дудин-Барковский, И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дудин-Барковский, А.Н. Карташова. // М.: Машиностроение, 1978. — 232

30. Жданович, В. И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей: автореферат дис. канд. техн. наук / В. И. Жданович. – Минск, 1974. – 23 с.

31. Зверовщиков А.Е. Технологическое обеспечение качества поверхностей деталей при многофункциональной центробежно-планетарной обработке: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.Е. Зверовщиков. Пенза, 2013 г. - 567 с.

32. Иконников А. М. Теоретические основы обеспечения качества и повышения производительности магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.02.07 311 с. 2022 г.

33. Калинин Е. П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента: автореф. д-ра техн. наук. 2006. 34 с

34. Киселёв И.А. Имитационная динамическая модель процесса шлифования сложнопрофильных деталей. Модель инструмента и обрабатываемой детали / Киселёв И.А., Воронова И.С., Ширшов А.А., Николаев С.М. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 9. С. 1-16.

35. Киселев С.П. Полирование металлов / Киселев С.П. Издательство: МАШГИЗ: 1961. – 72 с. с. ил.

36. Клименко С. А. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца // Минск: Беларуская навука, 2017. – 376 с

37. Кожуро Л.М. Отделочно-абразивные методы обработки: Справочное пособие / Кожуро Л.М., Панов А.А., Пономарева Э.Б., Чистосердов П.С. // Мн.: Выш. шк., 1983. – 287 с., ил.

Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М.
 Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 232 с

39. Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки / Коновалов, Е. Г., Минск: АН БССР, 1961. 297 с.

40. Коновалов, Е. Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е. Г. Коновалов, Г. С. Шулев. // Минск: Наука и техника, 1967. – 125 с

41. Константинов, О. Я. Магнитная технологическая оснастка / О. Я. Константинов. – Л. : Машиностроение, 1974. – 383 с

42. Корчак С. Н. Теоретические основы влияния технологических факторов на повышение производительности шлифовальных стальных деталей: дис. ...д-ра техн. наук. Челябинск, 1973. 372 с.

43. Крагельский И.В. Влияние шероховатости и свойств материала на фактическую площадь касания поверхностей. / Крагельский И.В. М.: Изд-во АН СССР, 1961, с. 12-15.

44. Крымский, М. Д. Распределение и уплотнение магнитноабразивного порошка в рабочем зазоре станка / М. Д. Крымский Магнитноабразивные материалы и методы их испытания. – Киев, 1980. – С. 92-97.

45. Кульгейко, М. П. Роль инверсионности способов магнитноэлектрической обработки при создании технологических комплексов генерации поверхностей / М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин, Н. М. Симанович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 4 (69). – С. 21–30.

46. Кунгуров Д.А. Методика определения стойкости порции абразивного ферромагнитного наполнителя магнитно-абразивном при Кунгуров Д.А. Вестник Пермского полировании национального / политехнического университета. Машиностроение, исследовательского материаловедение. 2016. Т. 18. № 2. С. 89-101.

47. Леонов С.Л. Магнитно-абразивная обработка композиционных материалов / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е., Горкин К.С. // В сборнике: Инновации в машиностроении. материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции ИнМаш-2022. Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. Барнаул, 2022. С. 121-123.

48. Леонов С.Л. Обеспечение геометрических параметров качества деталей на основе прогнозирования законов распределения методами имитационного стохастического моделирования: дисс. док. техн. наук / С.Л. Леонов. Барнаул, 2009. - 471 с

49. Леонов С.Л. Определение глубины внедрения режущей части зерна в металл при магнитно-абразивной обработке/ Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // Актуальные проблемы в машиностроении. 2020. Т. 7. № 1-2. С. 27-30

50. Леонов С.Л. Определение сил резания при магнитно-абразивной обработке немагнитных заготовок / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е., Горкин К.С. // В сборнике: Инновации в машиностроении. материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции ИнМаш-2022. Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. Барнаул, 2022. С. 62-65.

51. Леонов С.Л. Особенности применения метода конечных элементов при моделировании магнитного поля индуктора на постоянных магнитах в процессе магнитно-абразивной обработки [Текст] / С.Л. Леонов, А.М. Иконников, А.А. Кулавик, Р.В. Гребеньков // Инновации в машиностроении: тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: Изд-во: НГТУ, – 2017г. – С. 140-145.

52. Леонов С.Л. Распределение радиусов режущих вершин при магнитноабразивной обработке. [Текст] / Леонов С.Л. Иконников А.М Соломин Д.Е. // Ползуновский альманах. 2021. №3. С.29-32

53. Леонов С.Л. Расчет магнитной индукции в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке плоских поверхностей заготовок из ферромагнитных и немагнитных материалов индуктором на постоянных магнитах [Текст] / С.Л. Леонов, А.М. Иконников, Р.В. Гребеньков // Актуальные проблемы в машиностроении. – Новосибирск: Изд-во: НГТУ, – 2017г. – Т. 4 № 3. – С. 49-55.

54. Леонов С.Л. Способы расчета глубины резания при магнитно - абразивной обработке [Текст] / Леонов С.Л. Иконников А.М. Соломин Д.Е. //

Инновации в машиностроении: материалы XI Международной научнопрактической конференции (22-23 октября 2020 года, г. Бийск) / Алт.гос. техн. унт, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2020 С.30-35

55. Леонов С.Л. Способы расчета глубины резания при магнитно - абразивной обработке/ Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // В сборнике: ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ (ИнМаш-2020). материалы XI Международной научно-практической конференции. Бийск, 2022. С. 30-35

56. Леонов С.Л. Сравнение индукторов для магнитно-абразивной обработки немагнитных заготовок [Текст] / Леонов С.Л. Иконников А.М Соломин Д.Е // Наука и молодежь. Материалы XIX Всероссийской научнотехнической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Барнаул, 2022..

57. Леонов С.Л. Сравнение решателей системы конечно-элементного анализа ANSYS, применительно к магнитно-абразивной обработке / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // Сборник научных трудов «Вестник современных технологий» 2020. № 3.

58. Леонов С.Л. Установление параметров распределения радиусов режущих вершин магнитно-абразивных зерен / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // Воронежский научно-технический вестник. № 3. С. 24-35.

59. Лоскутов В.В. Шлифование металлов / Лоскутов В.В. Издательство: МАШГИЗ: 1962. – 280 с. с. ил.

60. Лурье Г.Б. Основы технологии абразивной доводочно-притирочной обработки. Учебник для повышения квалификации рабочих / Лурье Г.Б., Масловский В.В. М., «Высш. школа», 1973

61. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Лурье Г.Б., М., Изд-во «Машиностроение», 1969, 172 с.

62. Майборода В.С. Основи створэння і використання порошкового магштноабразивиого шструменту для фшнпноТобробки фасонних поверхонь : автореф. дис. д-ра технических наук : 05.03.01 / В. С. Майборода. ; Киев, политех, ин-т. - Киев, 2001. - 36 с.

63. Малкин Б.М. Технология профильного шлифования / Малкин Б.М. «Машиностроение», 1975 – 256 с. с ил.

64. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Маслов Е.Н.; М., «Машиностроение», 1974, 320 с.

65. Масловский В.В. Доводочные и притирочные работы / Масловский В.В., Учебное пособие. Изд. 2-е переработ. и доп. М., «Высшая школа», 1971, 256 с. с ил.

66. Масловский В.В. Полирование металлов и сплавов / Масловский В.В., Дудко П.Д. // Учебное пособие для подготовки рабочих на производстве. М., «Высшая школа», 1974, 255 с.

67. Наливко Г. Д. Некоторые свойства магнитно-абразивных порошков из псевдоплавленных композиций / Г. Д. Наливко Порошковая металлургия. – 1979.
 – № 8. – С. 83

68. Новоселов Ю. К. Динамика формирования поверхностей при абразивной обработке: монография / Ю. К. Новоселов. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 304 с.

69. Носенко В.А. Физико-химические методы обработки материалов / Носенко В.А., Даниленко М.В. / Старый Оскол, 2020. (2-е издание, переработанное и дополненное)

70. Носенко С.В. Взаимосвязь составляющих силы резания и мгновенной режущей способности при глубинном шлифовании титанового сплава с постоянной правкой абразивного инструмента / Носенко С.В., Носенко В.А., Лясин Д.Н., Кременецкий Л.Л.// Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 5 (674). С. 41-51.

71. Огородникова О.М. Компьютерный инженерный анализ в среде ANSYS Workbench [Электронный ресурс] / Огородникова О.М., Екатеринбург: Техноцентр компьютерного инжиниринга УрФУ. 2018. 350 с.

72. Оликер, В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки износостойких покрытий / В. Е. Оликер. – М. : Металлургия, 1990. – 175 с

73. Орлов П.Н. Доводка прецизионных деталей машин / Орлов П.Н., Савелова А.А., Полухин В.А., Нестеров Ю.И.; Под ред. Г.М. Ипполитова. // М.: Машиностроение, 1978. – 256 с., ил.

74. Орлов П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки / Орлов П.Н. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.: ил

75. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования / Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с. с ил.

76. Павлюкова Н.Л. Использование магнитно-абразивного полирования при отделке деталей из цветных сплавов / Павлюкова Н.Л. Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2010. № 3. С. 64-67.

77. Переверзев П.П. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с основными технологическими параметрами / Переверзев П.П., Попова А.В. // Металлообработка. 2013. № 3 (75). С. 24-30

78. Переладов А.Б. Определение силовых показателей взаимодействия абразивных зерен с заготовкой при шлифовании //Переладов А.Б., Камкин И.П. // Металлообработка. 2015. № 4 (88). С. 13-18.

79. Плетенев С.В. Магнитное поле, свойства, применение: Научное и учебно-методичсекое справочное пособие / Плетенев С.В. СПб.: Гуманистика, 2004. – 624 с.

80. Попов С.А. Шлифовальные работы. Учебник для СПТУ / Попов С.А.,
 М.: Высш. шк. 1987. – 383 с. ил.

81. Прилуцкий В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей / Прилуцкий В.А. М.: Машиностроение, 1978. – 136 с. с ил.

82. Приходько С. П. Магнитно-абразивное полирование индукторами на постоянных магнитах / С. П. Приходько, Ю. М. Барон // Автотракторное электрооборудование. – 1983. – № 5. – С. 11-14. 143.

83. Приходько С. П. Магнитные индукторы для полирования наружных поверхностей вращения / С. П. Приходько // Повышение эффективности

технологических процессов машиностроительного производства. – Барнаул, 1989. – С. 35. 144.

84. Приходько С. П. Магнитные индукторы для полирования плоских поверхностей / С. П. Приходько // Повышение эффективности технологических процессов машиностроительного производства. – Барнаул, 1989. – С. 52.

85. Приходько С. П. Моделирование процесса магнитно-абразивной обработки деталей машин на ЭВМ / С. П. Приходько // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. – Барнаул, 1987. – С. 115-119. 146.

86. Приходько С. П. Роль вихревых токов в процессе магнитноабразивной обработки / С. П. Приходько // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. – Барнаул, 1989. – С. 104-107.

87. Приходько С. П. Технологические закономерности магнитноабразивного полирования индукторами на постоянных магнитах / Приходько, Ю.
М. Барон // Автотракторное электрооборудование. – М., 1983. – № 6. – С. 12-14.

88. Программа для расчета параметров шероховатости при магнитноабразивной обработке / Леонов С. Л., Иконников А. М., Соломин Д. Е. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022660633, 07.06.2022. Заявка № 2022619158 от 19.05.2022.

89. Программа для расчета сил резания при магнитно-абразивной обработке / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019617098 от 03.06.2019.

90. Программа по определение размеров режущих вершин магнитноабразивного зерна по профилограмме обработанной поверхности / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022668683, 11.10.2022. Заявка № 2022667876 от 30.09.2022.

91. Резников А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов / Справочник. Под ред. д-ра техн.наук проф. А.Н. Резникова. М., «Машиностроение» 1977. – 391 с. с ил.

92. Рябенков И.А. Обоснование путей уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании / Рябенков И.А. В сборнике: Прогрессивные технологии и процессы. Сборник научных статей Международной молодежной научно-практической конференции: в 2-х томах. 2014. С. 171-175.

93. Сакулевич Ф. Ю. Объемная магнитно-абразивной обработка / Ф. Ю. Сакулевич, Л. М. Кожухов// Минск: Наука и техника, 1978. – 168 с. 156.

94. Сакулевич Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю.
 Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 328 с. 157.

95. Сакулевич Ф.Ю. Магнитноабразивная обработка точных деталей / Сакулевич Ф.Ю., Минин, Л.К., Олендер, Л.А. / Мн.; Высшая школа, 1977. - 288 с.: ил.

96. Семенов А.Л. Магнитные материалы микро- и наноэлектроники: учеб. пособие / Семенов А.Л., Гаврилюк А.А., Душутин Н.К., Ясюкевич Ю.В. // Иркутск: Изд-во ИГУ 2012. – 147 с.

97. Семко М.Ф. Основы алмазного шлифования / Семко М.Ф., Грабченко А.И., Раб А.Ф., Узунян М.Д., Пивоваров М.С.// Изд-во «Техніка», 1978. – 192 с. с ил.

98. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки /
Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. // Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 215 с.

99. Соколов С.П. Тонкое шлифование и доводка / Соколов С.П. Издательство: МАШГИЗ Ленинградское отделение: 1961. – 89 с. с. ил.

100. Соломин Д.Е. Влияние режимов резания и характеристики кругов на удельную производительность при шлифовании микропористого покрытия / Соломин Д.Е. // В сборнике: Проблемы социального и научно-технического развития в современном мире. Материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых(с международным участием). Рубцовский индустриальный институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». 2017. С. 61-65.

101. Соломин Д.Е. Сравнение индукторов для магнитно-абразивной обработки немагнитных заготовок, / Соломин Д.Е., Леонов С.Л., Иконников А.М. // Ползуновский альманах. 2022. Т. 2. № 2. С. 34-36.

102. Сорокин В.В., Дараган А.Ф. Контроль состояния режущего инструмента в станочных системах // Наука и современность, 2010: с. 272

103. Суслов А.Г. Научные основы технологии машиностроения / Суслов А.Г., Дальский А.М. // М.: Машиностроение, 2002. 684 с. с ил.

104. Сычугова Е.П. Метод конечных элементов для решения уравнения переноса на неструктурированных тетраэдральных сетках. / Сычугова Е.П., Селезнев Е.Ф. // (Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № IBRAE-2014-03) — М. ИБРАЭ РАН, 2014. — 21 с. — Библиогр.: 14 назв. — 102 экз

105. Федоров В.А. Расчёт параметров процесса магнитно-абразивной обработки поверхностей сложного профиля [Текст] / В.А. Федоров, А.М. Иконников // Обработка металлов. – 2003. – № 4. – С. 10 – 11.

106. Физика магнитных материалов и наноструктур / Под ред. В.В. Устинова, Н.В. Мушникова, В.Ю. Ирхина. // Екатеринбург: Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, 2020. – 664 с. : ил.

107. Хомич, Н. С. Работоспособность ферромагнитных абразивов в условиях автоматизированной обработки длинномерных изделий / Н. С. Хомич, М. П. Кульгейко, А. П. Лепший // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1991. – Вып. 19. – С. 49–53

108. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н.С. Хомич. - Мн.; БИТУ, 2006. - 218 с

109. Черепанов Р.С. Проектирование технологического оборудования в САD системе / Черепанов Р.С., Соломин Д.Е. // В книге: Молодежь - Барнаулу. Материалы XXI городской научно-практической конференции молодых ученых. Главный редактор Ю.В. Анохин. 2020. С. 266-267.

110. Черкашин В.И. Профильное шлифование / Черкашин В.И., М., Машиностроение 1971. – 72 стр.

111. Шавва М.А. Анализ взаимосвязи износа круга и сил резания при алмазном шлифовании / Шавва М.А., Грубый С.В. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 11. С. 137-156.

112. Шимановский А.О. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики: учеб.-метод. пособие для студентов технических специальностей / Шимановский А.О., Путято А.В. // М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ 2008 – 61 с.

113. Шулев Г.С. Физико-механические основы обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками [Текст] : Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / АН БССР. Отд-ние физ.техн. наук. - Калининград : [б. и.], 1965. - 22 с. : черт.

114. Щеголев В.А. Эластичные абразивные и алмазные инструменты (теория, конструкции, применение) / Щеголев В.А., Уланова М.Е. // Л., «Машиностроение» (Ленингр.отд-ние), 1977. – 184 с. с ил.

115. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / Якимов А.В. М., Машиностроение, 1975. – 176 с. с ил.

116. Якимов А.В. Прерывистое шлифование / Якимов А.В. Издательское объединение «Вища школа», 1986. – 176 с. с ил.

117. Янюшкин А.С. Исследование работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов/ Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Батаев В.А., Архипов П.В., Медведева О.И.//Системы. Методы. Технологии. 2010. № 7. С. 87-91.

118. Янюшкин А.С. Потеря режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании композиционных материалов / Янюшкин А.С, Лобанов Д.В., Архипов П.В. // ВЕСТНИК СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. АКАДЕМИКА М.Ф. РЕШЕТНЕВА 2013. № 1(43) с 178-183

119. Ящерицын П.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / Ящерицын П.И., Зайцев А.Г., Барботько А.И. // Минск, «Наука и техника», 1976, 328 с.

120. Baljinder Singh, Charanjit Singh Kalra Optimization of magnetic abrasive finishing parameters during finishing of brass tube / International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 02 Issue: 04 / July-2015

121. Bern M. and Eppstein D. Mesh generation and opti- mal triangulation. -Computing in Euclidean Geometry, edited by F. K. Hwang and D.-Z. Du, World Scientific, 1992.

122. Dorri MM, Pascale C, Stephane T, Diego M (2018) Enhancing the barrier properties of a fluorocarbon plasma-deposited coating by producing an Interface of amorphous oxide layer on 316L stainless steel for stent applications. Surface and Coatings Technology 347: 209-216

123. Eggermont P.P., LaRiccia V.N. Maximum Penalized Likelihood Estimation: Volume II: Regression / Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009. - 580p.

124. Harish Kumar, Sehijpal Singh, Pardeep Kumar, "Magnetic Abrasive Finishing- A Review" Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT)Vol. 2 Issue 3, March 2013.

125. Ikonnikov A.M. Analysis of magnetic forces in the working clearance with magnetic-abrasive treatment of inductors on standing magnets. / A.M. Ikonnikov, S.L. Leonov, D.E. Solomin and A.A. Kulakov // В сборнике: Materials Research Proceedings. Cep. "Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment" 2022. C. 176-182.

126. Ming Chang, Fu & Tsai, Tung-Hsien & Han Chiang, Sheng. (2011). Sensitivity Analysis of Magnetic Abrasive Finishing Process Parameters. Advanced Materials Research. 328-330. 868-880. 10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.868.

127. Murat Sarıkaya a, Abdulkadir Güllü, "Taguchi Design And Response Surface Methodology Based Analysis Of Machining Parameters In CNC Turning Under MQL" Journal of Cleaner Production 65 (2014) 604e616.
128. S.J. Owen. A Survey of Unstructured Mesh Generation Technology // Proceedings of 7th International Meshing Roundtable, pp. 239-269, Dearborn, MI, 1998

129. Sunil Jha / Nano-finishing processing methods // Sunil Jha and V.K. Jain. Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Kanpur -208016, INDIA

130. T.C, Kanish & Kuppan, P & Narayanan, Syama & Denis Ashok, S. (2014).
A Fuzzy Logic based Model to Predict the Improvement in Surface Roughness in Magnetic Field Assisted Abrasive Finishing. Procedia Engineering. 97.
10.1016/j.proeng.2014.12.349.

131. Xu, Jiaye, Yanhua Zou, and Huijun Xie. 2021. "Investigation on the Finishing Characteristics of a Magnetic Abrasive Finishing Process with Magnetic Abrasive Slurry Circulation System" Machines 9, no. 9: 195. https://doi.org /10.3390/machines9090195.

132. Zhang, J.; Hu, J.; Wang, H.; Kumar, A.S.; Chaudhari, A. A novel magnetically driven polishing technique for internal surface finishing. Precis. Eng. 2018, 54, 222–232. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.05.001

Приложение А



Приложение Б



Приложение В



Приложение Г



внедрения результатов научно-технических и технологических работ

Мы, ниже подписавшиеся, представители Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (АлтГТУ) кафедры «Технология машиностроения» заведующий кафедрой Балашов Александр Владимирович, профессор Леонов Сергей Леонидович, аспирант Соломин Дмитрий Евгеньевич с одной стороны и представитель ООО «Харвест» главный инженер Юрьев Ян Евгеньевич с другой стороны, составили настоящий акт о том, что в 2023 году в результате проведения научно-технических и технологических работ было выполнено:

1 Разработана общая методика проектирования операции магнитно-абразивной обработки пресс-форм, позволяющая сократить время отделочно-чистовой обработки, обеспечить стабильность качества обработанной поверхности

2. Усовершенствован технологический процесс изготовления пресс-форм путем внедрения в технологический процесс операции магнитно-абразивного полирования

Технико-экономические показатели внедрения

1. Снижена трудоемкость отделочно-чистовой операции на 39% за счет исключения операции ручного полирования и замены ее операцией магнитно-абразивной обработки на станке с ЧПУ с применением индуктора на постоянных магнитах.

2. Снижена себестоимость изготовления пресс-форм на 12%, за счет сокращения времени отделочно-чистовой операции.

3. Обеспечена стабильность качества обработанной поверхности. Колебание шероховатости поверхности по параметру Ra 0,07....0,08 мкм

4. Годовой экономический эффект от внедрения 424000 рублей

Представители АлтГТУ:

Представитель ООО «Харвест»

Юрьев Я. Е.

Балашов А.В. Леонов С.Л. Соломин Д.Е

150

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и инновационной работе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И., Ползунова»



Акт

о внедрении результатов диссертационного исследования

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационного исследования Соломина Дмитрия Евгеньевича «Прогнозирование шероховатости поверхностей пресс-форм и производительности процесса магнитно-абразивной обработки алюминиевых сплавов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5. – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки) в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Разработанная автором математическая модель расчета параметров шероховатости при магнитно-абразивной обработке предлагается для изучения на практических занятиях при обучении студентов дисциплине «Компьютерное моделирование в машиностроении» направления подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

В ходе практических занятий студенты знакомятся с методом магнитно-абразивной обработки, осуществляют расчета параметров шероховатости в зависимости от радиусов скругления режущих вершин, их числа и глубины резания.

Декан факультета специальных технологий к.ф-м.н. доцент

С.Л. Кустов

Заведующий кафедрой «Технология машиностроения» к.т.н. доцент

А.В. Балашов