

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул 2024

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Леонов Сергей Леонидович,

Официальные оппоненты: **Зверовщиков Александр Евгеньевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», кафедра " Технологии и оборудование машиностроения", заведующий;

Ягьяев Эльмар Энверович,
кандидат технических наук, доцент,
ГБОУ ВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова». кафедра «Электромеханики и сварки», заведующий

Ведущая организация ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»

Защита состоится «28» мая 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.282.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», по адресу: 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28, ВолгГТУ, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на сайте: <https://www.vstu.ru>, по ссылке:

<https://www.vstu.ru/upload/iblock/5bc/5bca1ac661012704ba50f068631032cf.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Жданов Алексей Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. 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 магнитно-абразивной 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 пресс-формы, 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 магнитно-абразивной обработки, позволяет прогнозировать интервал шероховатости получаемой поверхности и рассчитать время обработки.

Цель работы. Разработка стохастической модели расчета профиля обработанной поверхности для расчета параметров шероховатости и производительности магнитно-абразивной обработки алюминиевых сплавов (на примере Д16Т).

Для достижения указанной цели необходимо решить **следующие задачи:**

1. Разработать математическую модель профиля шероховатости поверхности деталей из алюминиевого сплава Д16Т с учетом стохастических характеристик взаимодействия вершин зерен с обрабатываемым материалом при магнитно-абразивной обработке.

2. С учетом стохастических характеристик взаимодействия вершин зерен с обрабатываемым материалом определить условия обеспечения заданных параметров шероховатости обработанной поверхности Ra и tr .

3. Разработать методику прогнозирования времени обработки и производительности операции магнитно-абразивной обработки.

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

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

Объектом исследования является процесс магнитно-абразивной обработки

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

Научная новизна. 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.

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 магнитно-абразивной обработки алюминиевых сплавов.

2. Реализованы методики: построения полигонов распределения параметров шероховатости обработанной поверхности при магнитно-абразивной обработке; определения размеров режущих вершин магнитно-абразивного 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»

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

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на международных конференциях «Инновации в машиностроении», г. Барнаул, 2018, г. Кемерово, 2019, г. Бийск, 2020, Новосибирск, 2021.; г. Барнаул, 2022. Всероссийских научно-практических 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 2023г.

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 WebOfScience, получено 3 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы, включающего 132 наименования, 5 приложений. Диссертация изложена на 150 страницах печатного текста, содержит 114 рисунков и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы. Сформулирована цель, поставлены задачи исследований, приведены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ финишных методов обработки сложно-профильных поверхностей. Анализ методов повышения качества поверхностей показал, что традиционные способы обработки (шлифование, полирование, доводка и др.) имеют ряд недостатков, применительно к обработке сложно-профильных поверхностей из алюминиевых сплавов. Наиболее перспективным методом является методы магнитно-абразивная обработка.

Изучением процесса магнитно-абразивной обработки занимались такие исследователи, как Ю.М. Барон, В.В. Гусев, В.И. Жданович, А.М. Иконников, Е.Г. Коновалов, В.С. Майборода, С.П. Приходько, Ф.Ю. Сакулевич, Н.С. Хомич, Г.С. Шулев. Ими отмечается, что магнитно-абразивная обработка объединяет в себе совокупность абразивного резания и использование магнитного поля в зоне обработки. Магнитное поле удерживает порошок на индукторе и обеспечивает гибкую связь между зернами, что особенно важно при обработке фасонных поверхностей, так как позволяет порошку копировать профиль обрабатываемой поверхности.

Одним из основных показателей финишной обработки является шероховатость обработанной поверхности. Поэтому во многих исследованиях по абразивной обработке уделяется особое внимание прогнозированию и обеспечения заданных параметров шероховатости. Как правило, для определения параметров шероховатости используются эмпирические зависимости. Данные 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.

Для расчета составляющих силы резания большинство авторов опирается на величину срезаемого слоя металла и прочностные характеристики обрабатываемого материала. Часто в предлагаемых авторами зависимостях используются коэффициенты, которые трудно определить, или коэффициенты, имеющие различные (случайные) значения для различных зерен. Поправочные коэффициенты затрудняют 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.

Рациональным выглядит применение аналитического описания процесса абразивной обработки, разработанным профессором Новоселовым Ю.К. 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. Одним из важнейших преимуществ разработанных моделей является возможность прогнозирования параметров шероховатости и съема металла в динамике.

Недостатком моделей профессора Новоселова Ю.К. является то, что некоторые особенности магнитно-абразивной обработки не позволяют использовать эти формулы без доработки. Эта доработка выполнена в исследованиях Иконникова А.М., где 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.

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

В этом плане перспективным является подход Иконникова А.М. в сочетании с методикой стохастического моделирования, предложенный профессором Леоновым С.Л. 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.

Вторая глава посвящена разработке имитационной стохастической модели формирования профилограмм обработанной поверхности при МАО.

На основе физической модели процесса магнитно-абразивной обработки разработана структурная модель (рис. 1), которая была положена в основу имитационной математической модели прогнозирования шероховатости при магнитно-абразивной обработке немагнитных материалов.

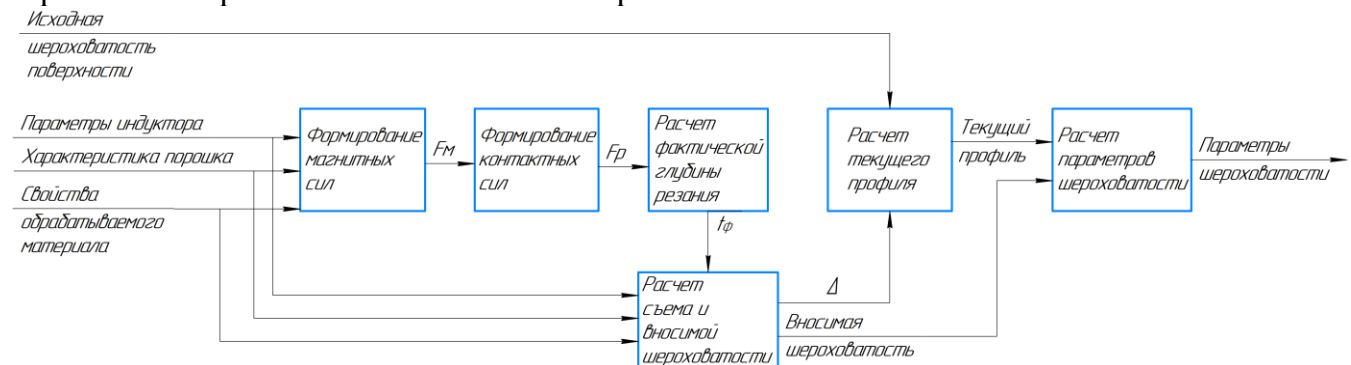


Рис. 1 – Структурная модель прогнозирования шероховатости

Профиль обработанной поверхности определяется массовым взаимодействием режущих вершин магнитно-абразивных зерен, с обрабатываемой поверхностью. Максимальная глубина внедрения вершин (t_f) в основном зависит от размера режущих вершин, характеристик обрабатываемого материала и силы резания. Эта глубина влияет

на величину съема металла и формируемый профиль обработанной поверхности. 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).

Фактически при обработке фрезерованной поверхности формирование шероховатости происходит в два этапа. На первом этапе с вершин рисок исходного профиля снимается металл. Так как вносимая магнитно-абразивной обработкой шероховатость существенно меньше, чем высота исходного профиля, можно полагать, что получаемая профилограмма имеет плоские вершины. При этом шероховатость будет снижаться. Как только она достигнет значения вносимой шероховатости, процесс обработки можно прекращать, так как дальнейшего уменьшения шероховатости не происходит. Этот момент времени определяет производительность операции.

На основе структурной модели был составлен алгоритм имитационного расчета вносимой шероховатости, который позволяет рассчитывать не только среднее значение параметров шероховатости и съема металла, но и их полигоны распределения (рис. 2).

Для выполнения расчетов необходимо получить законы распределения входных параметров.

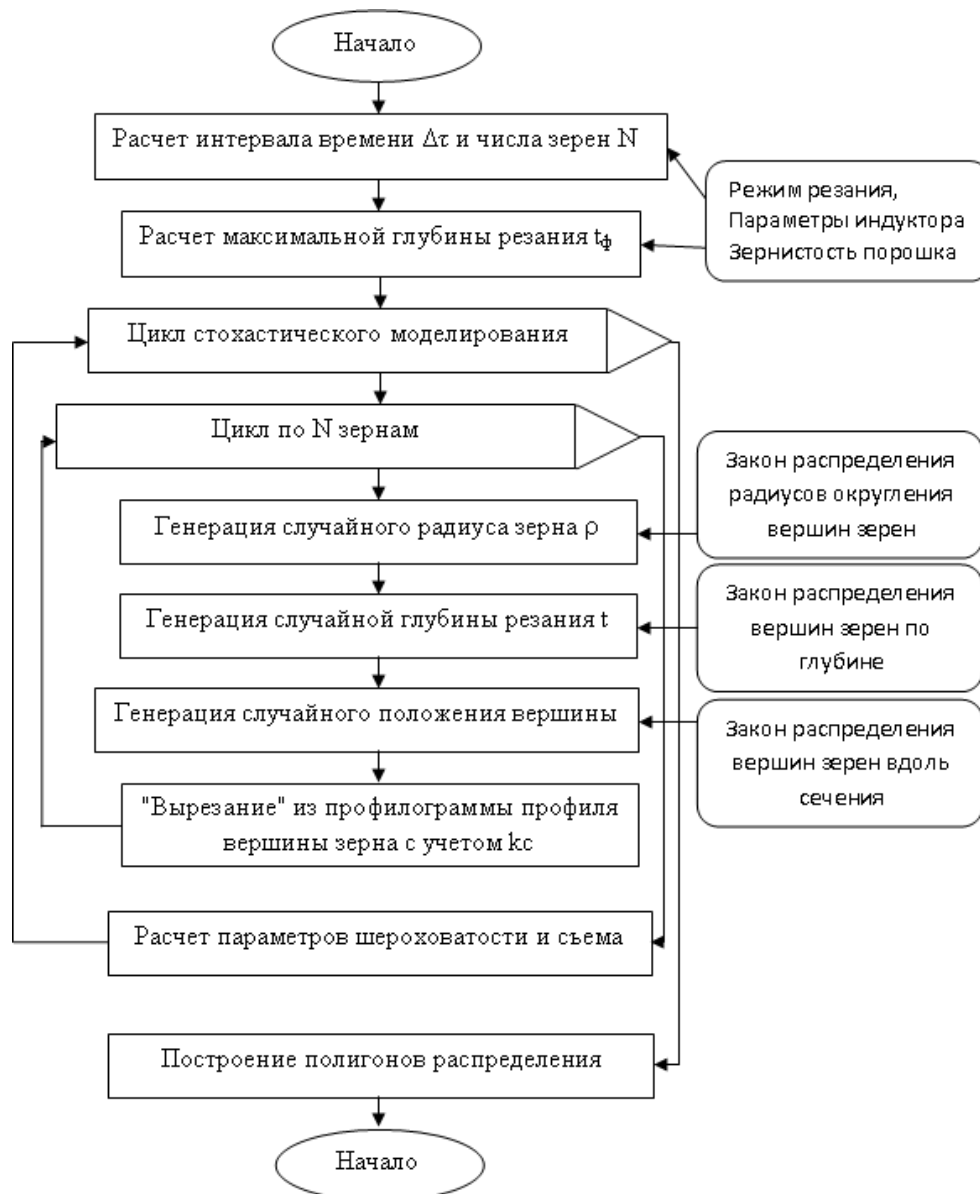


Рис.2 – Алгоритм имитационного расчета шероховатости формируемой магнитно-абразивной обработкой

В третьей главе изложена методика прогнозирования съема металла и формирования шероховатости при обработке сложно-профильных поверхностей зерен N_3 , распределение радиусов скругления режущих вершин зерен.

Исходными данными для расчета шероховатости формируемой магнитно-абразивной обработкой являются: – фактическая глубина резания – t_ϕ , число зерен N_3 , распределение радиусов скругления режущих вершин зерен.

Для определения магнитных сил и сил резания использована методика, разработанная д.т.н. Иконниковым А.М. В ANSYS MAXWELL произвели расчет магнитной индукции и магнитных сил, действующих на зерна в зазоре (рис. 3).

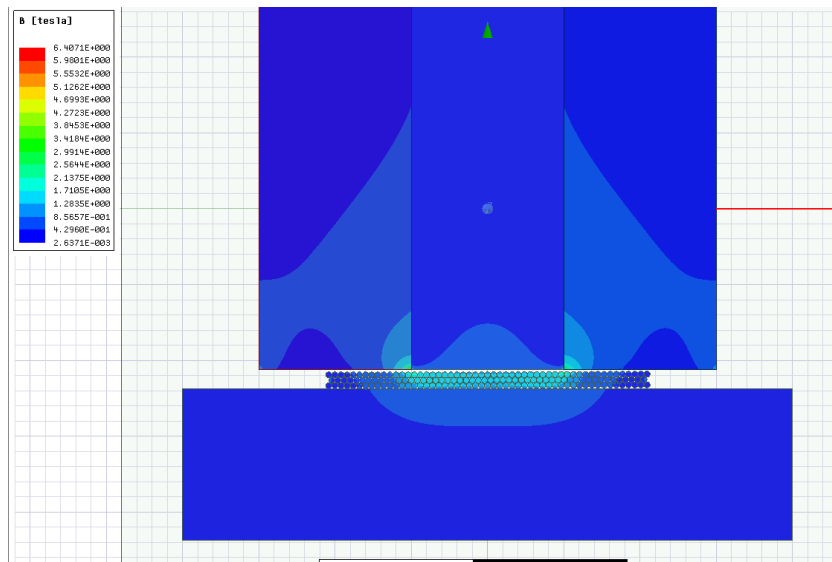


Рис. 3 – Расчет магнитных сил для индуктора

Для расчета механических сил в рабочем зазоре решалась задача статического равновесия сферических зерен в магнитном поле. Алгоритм расчета реализован с помощью MS Excel.

На первый слой зерен (рис. 4), 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 F_{mp} покоя, которая действует на каждое зерно первого слоя. Итого – $m+1$ сил.

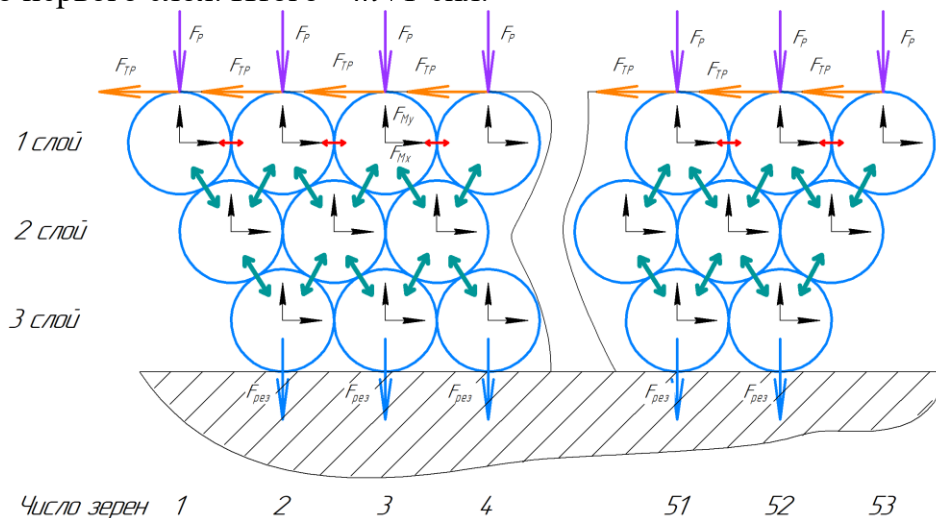


Рис. 4 – Фрагмент схемы сил, действующих на зерна

Между зернами 1-го слоя имеются контактные силы $F_{i,j}$ ($i < j$). Количество этих сил – $m-1$. На зерна 1-го ряда воздействуют зерна второго слоя. Эти силы наклонные: проекция на ось y имеет коэффициент $\sqrt{3}/2$, проекция на ось x имеет коэффициент 0,5.

Количество этих сил учтем при рассмотрении рядов 2 и последующих. Зерна второго и последующих рядов между собой в ряду не контактируют, а имеют контакт только с зернами предыдущего и последующего слоев. Для текущего ряда i количество контактов с предыдущим рядом равно $2(m-i+1)$.

В результате решения получены графики определения контактных сил между зернами для индуктора диаметром 180 мм. (рис. 5):

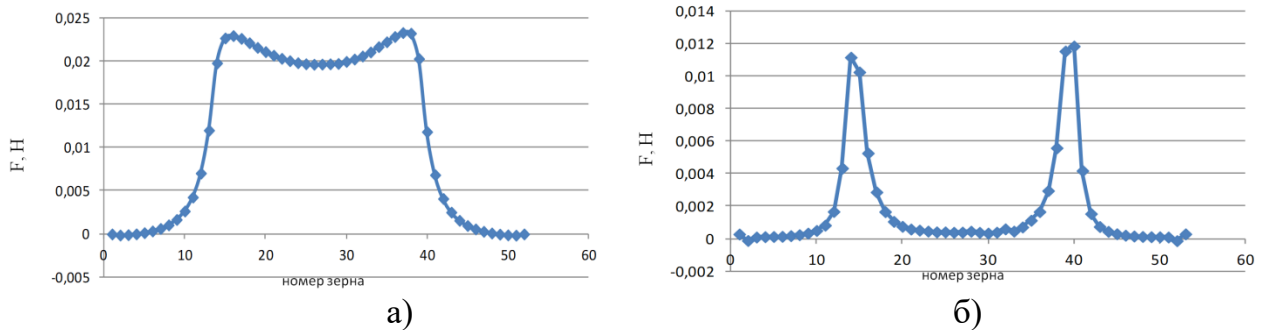


Рис. 5 – Механические силы:

а) силы между зернами верхнего слоя у магнитного индуктора; б) силы, действующие на индуктор

Сила резания определяется состоянием равновесия, На нижний слой зерен в рабочем зазоре действует сила резания, стремящаяся вывести зерна из состояния равновесия. Расчет сил происходит путем подбора $F_{рез}$ для обеспечения нулевой силы между двумя зернами одного слоя порошка. Для индуктора диаметром 180 мм получим значение $F_{рез}=0,02$ Н - это максимальное значения силы. При меньших значениях конфигурация зерен сохраняется, при больших – разрушается: зерна раздвинутся. В дальнейшем, полученная сила будет использована, для расчета максимальной глубины резания.

Для определения числа режущих вершин был проведен эксперимент по определению радиусов скругления. В эксперименте использован магнитно-абразивный порошок зернистостью 630/40 до обработки и после обработки деталей с длительностью 30 мин. При измерении радиусов возможно использование любого материала, обеспечивающего копирование профиля вершин. При использовании дюралюминия требуется большая сила прижима. Было принято решение заменить материал Д16Т на органическое стекло СО-95-К, т.к. магнитная проницаемость материалов практически одинаковая и на стекле остаются глубокие риски, после магнитно-абразивной 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. (рис. 6) Затем производилось перемещение пластины относительно неподвижного инструмента.



Рис. 6 – Образцы с рисками: а) полученными неизношенным магнитно-абразивным порошком; б) полученными после 30 минут работы магнитно-абразивного порошка

Полученные на установке риски (рис. 7) анализировались на профилографе-профилометре HOMMEL TESTER W55 и оптическом профилометре Veeco NT9080

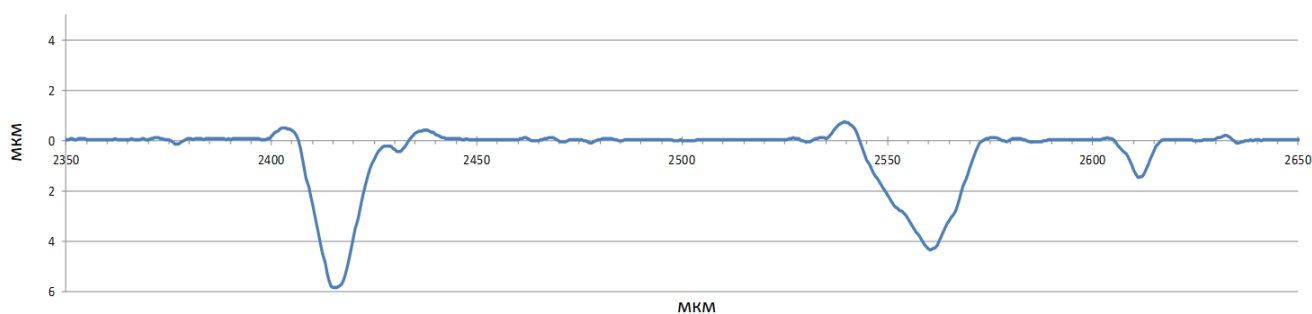


Рис. 7 – Фрагмент профилограммы с рисками

По полученным значениям построены полигоны распределения значений радиусов и в соответствии с критерием χ^2 доказаны принадлежности соответствующих выборок экспоненциальному закону.

На рисунке 8 показан полигон плотности распределения радиусов режущих вершин.

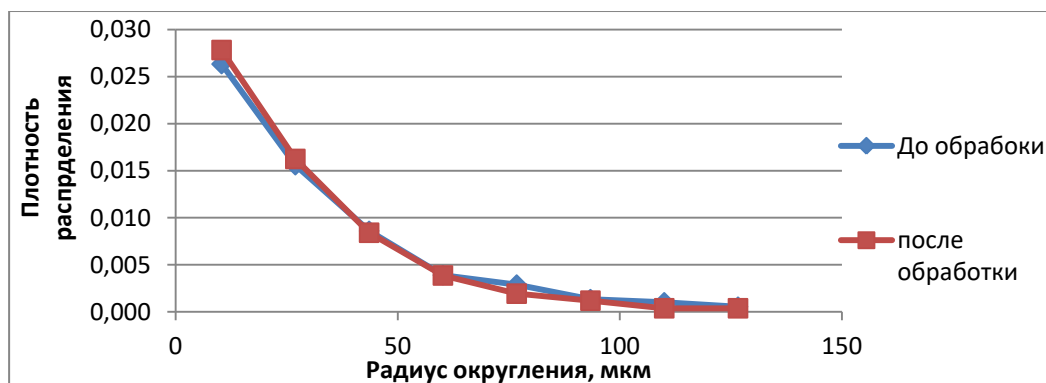


Рис.8 – Полигон распределения радиусов режущих вершин:

Распределение радиусов происходит по экспоненциальному закону. Это свидетельствует о том, что в резании преимущественно участвуют вершины малого радиуса, но выборке имеются риски, оставленные и вершинами с радиусом, сопоставимым с размером самого магнитно-абразивного зерна. На основании экспериментальных данных составлена таблица 1.

Глубина внедрения режущей части зерна в металл зависит от упруго-пластической деформацией обрабатываемого материала и времени воздействия зерна на обрабатываемый материал. В ходе проведения натурального эксперимента выяснить глубину внедрения невозможно из-за малых размеров абразивных зерен, поэтому была сделана попытка использовать математическое моделирование процесса в CAE ANSYS.

Таблица 1 – Параметры распределений радиусов режущих вершин

Параметр	Обозначение	Профилограф-профилометр HOMMEL TESTER W55		Оптический профилометр Veeco NT9080	
		До обработки	После 30 мин работы	До обработки	После 30 мин работы
Минимальный радиус, мкм	ρ_{min}	2,97	3,69	2,04	1,53
Максимальный радиус, мкм	ρ_{max}	123,82	123,82	134,92	128,31
Средний радиус, мкм	ρ_{cp}	30,14	30,90	30,22	26,50
СКО радиуса, мкм	σ_p	24,87	24,91	25,34	22,14
Параметр распределения, 1/мкм	λ	0,036	0,035	0,036	0,041
Значение критерия χ^2	χ^2	10,65	9,19	7,81	10,93

Однократный расчет в САЕ системе ANSYS, в программной среде Workbench, с применением инструмента Explicit Dynamics задачи с приложением скорости резания занимает значительное время, порядка 80 часов (рис.9).

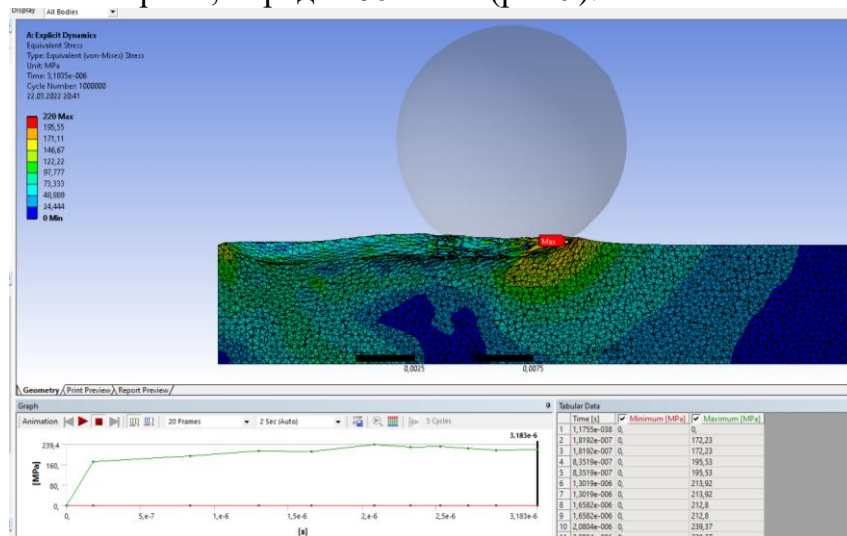


Рис.9 – Решение задачи в динамике

Поэтому, для расчета глубины резания вершинами магнитно-абразивных зерен использована зависимость А.М.Иконникова:

$$t_{\phi} = \frac{0,102Fk_d}{2\pi\rho(HB)} \quad (2)$$

Абразивные вершины зерен с учетом пластической деформации «вырезают» в поверхности заготовки риски. Некоторые из вершин могут попадать в ранее полученные риски и не контактируют с заготовкой, а некоторые только пластически деформируют металл (давящие вершины зерен). За время обработки (около 15 мин) в формировании профилограммы участвует $4,5 \cdot 10^6$ вершин зерен.. Это свидетельствует о возможности применения метода Монте-Карло для формирования профиля обработанной поверхности.

На основе расчета (имитационного моделирования) получаем профилограмму (рис. 10). По данной профилограмме можем рассчитать любой параметр шероховатости и скорость съема материала на этапе технологической подготовки производства.

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). Также имитационная стохастическая модель позволяет на этапе технологической подготовки производства определить время стабилизации параметров шероховатости, которое и характеризует производительность процесса.

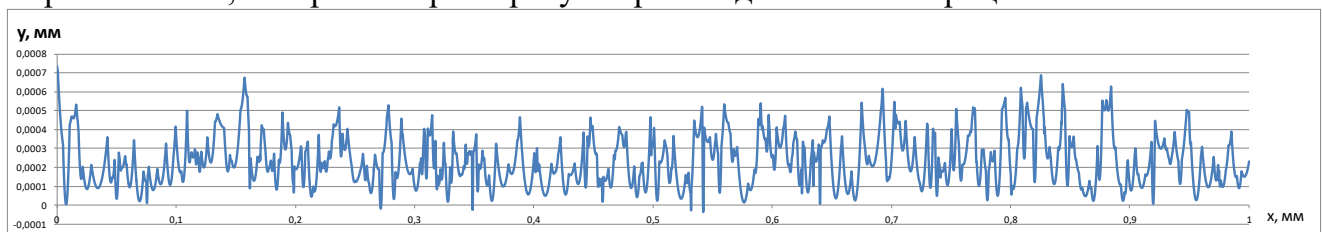


Рис. 10 - Профилограмма, полученная на основе математического моделирования

На основе массива профилограмм, полученных стохастическим моделированием, можно построить полигон распределения любого параметра шероховатости. На рисунке 11 изображен полигон распределения шероховатости по параметру Ra . Точность расчета параметра Ra достаточно высокая: даже при 100 расчетах доверительный интервал на его среднее значение составляет 0,00089 мкм.

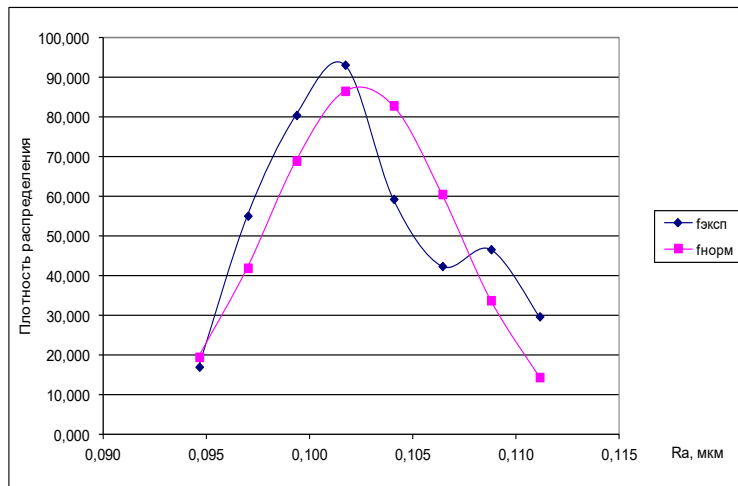


Рис. 11 – Полигон плотности распределения шероховатости

На рисунке 12 показан пример полигона плотности распределения значений относительной опорной длины профиля при $\rho = 0,5$.

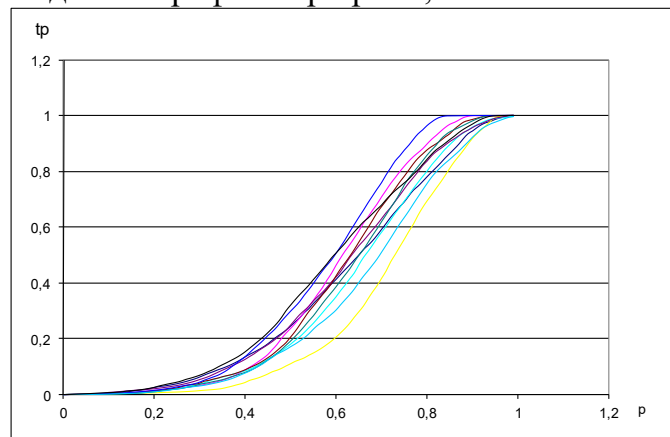


Рисунок 12 – Относительная опорная длина профиля

В четвертой главе приведены результаты проверки адекватности разработанной математической модели.

На станке с ЧПУ ГФ2171С5Ф3 устанавливалась пластина из материала Д16Т. Обработка велась с одной установки. На первом этапе обрабатывали пластину торцевой фрезой, а затем, сферической фрезой был нанесен регулярный профиль. По нанесенному профилю производим магнитно-абразивную обработку свежей порцией порошка 40/16 по поверхности в трех участках (рис. 13). На первом участке, при неизменном зазоре 1 мм., производим обработку длительностью 5 минут, на втором 10 минут и на третьем 15 минут.

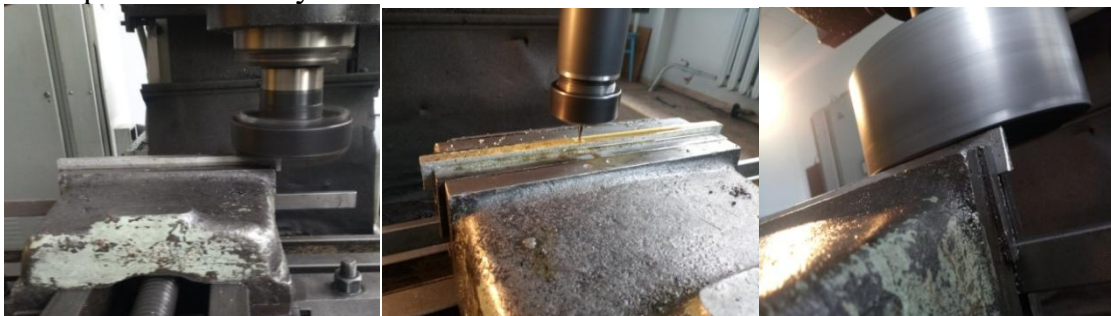


Рис. 13 – Схема обработки

После обработки снимаем заготовку и производим измерения на профилографе-профилометре HOMMEL Tester W55 (рис. 14). Повторяемость эксперимента 5 раз

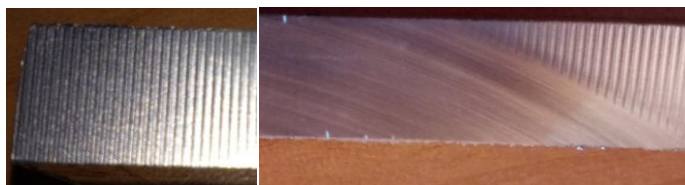


Рис. 14 – Фотографии профиля: а) до обработки б) через 15 минут после обработки

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. На рис. 15 приведен график изменения шероховатости в процессе магнитно-абразивной обработки. Как видим, сначала происходит съём микронеровностей с вершин рисок, съём металла происходит преимущественно с вершин. Через 15 минут работы исходный профиль полностью удален. Магнитно-абразивная обработка нанесла свою шероховатость. В таблице 2 приведены расчетные и экспериментальные значения получаемой в процессе обработки шероховатости. Погрешности при расчете шероховатости вызваны искажениями профиля обработанной поверхности при фрезеровании, связанные с прерывистым резанием и упруго-пластическими деформациями. В целом близкие значения шероховатости обработки доказывают правильность стохастической модели.

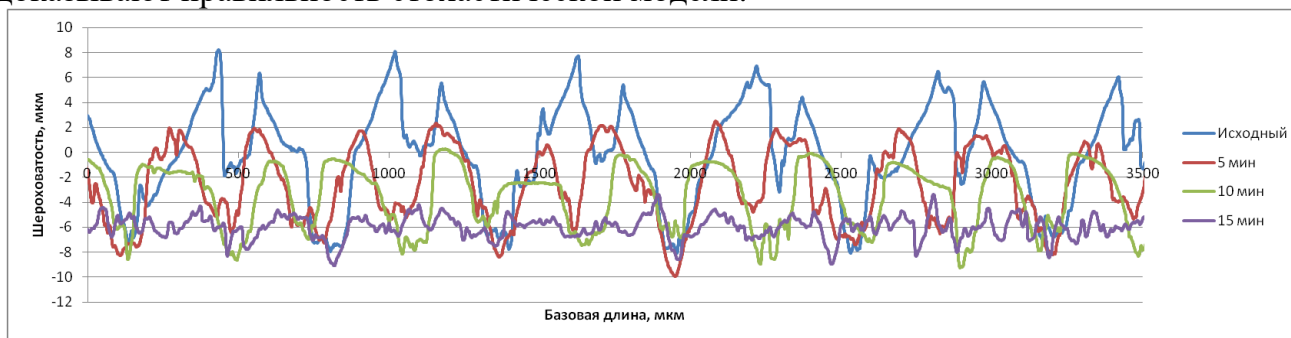


Рис 15 – Наложение профилограмм

Таблица.2 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных

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	

Помимо эксперимента по изменению шероховатости, был произведен эксперимент по определению весового съема. Из ранее указанного материала были изготовлены одинаковые образцы. Каждый образец был предварительно обработан торцовой фрезой, затем измерена его масса и шероховатость исходной поверхности. Масса измерялась на аналитических весах САРТОГОСМ. Магнитно-абразивная обработка производилась порошками с зернистостью 40/16 и 16/0 мкм. Данные после обработки приведены в таблице 3 .

Исходя из данных в таблице 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. Отклонение расчетных значений шероховатости и весового съема металла, около 5%

Таблица 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, рассчитанный 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

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. (рис. 16).



Рис. 16 – Датчик тензометрический

Исследования производились на экспериментальной установке, состоящей из вертикально-фрезерного станка, магнитного индуктора, тензодатчика, тензостанции и компьютера (рис. 17). Данные с тензометра выводились на экран компьютера (рис. 18).

Математическое моделирование показало, нормальная сила резания, действующая на одну режущую вершину, составляет $P_l=0,02$ Н. Сила резания равна 12,8 Н.

Количество режущих вершин (зерен) на площади $95,03 \text{ мм}^2$: $n_{\text{сум}} = 855,3 \text{ 1/мм}^2$ для диаметра образца 11 мм. Эти зерна распределены по глубине в соответствии с функцией распределения:

$$F(x) = x^{1,5} \quad (3)$$

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

Каждое зерно контактирует с металлом в соответствии с вероятностью контакта P_k

$$P_y = \int_0^1 P_l n_{\text{сум}} F(x) P_k(x) dx \quad (4)$$

Вычисляя этот интеграл численным методом, получаем $P_y = 5,89$ Н.

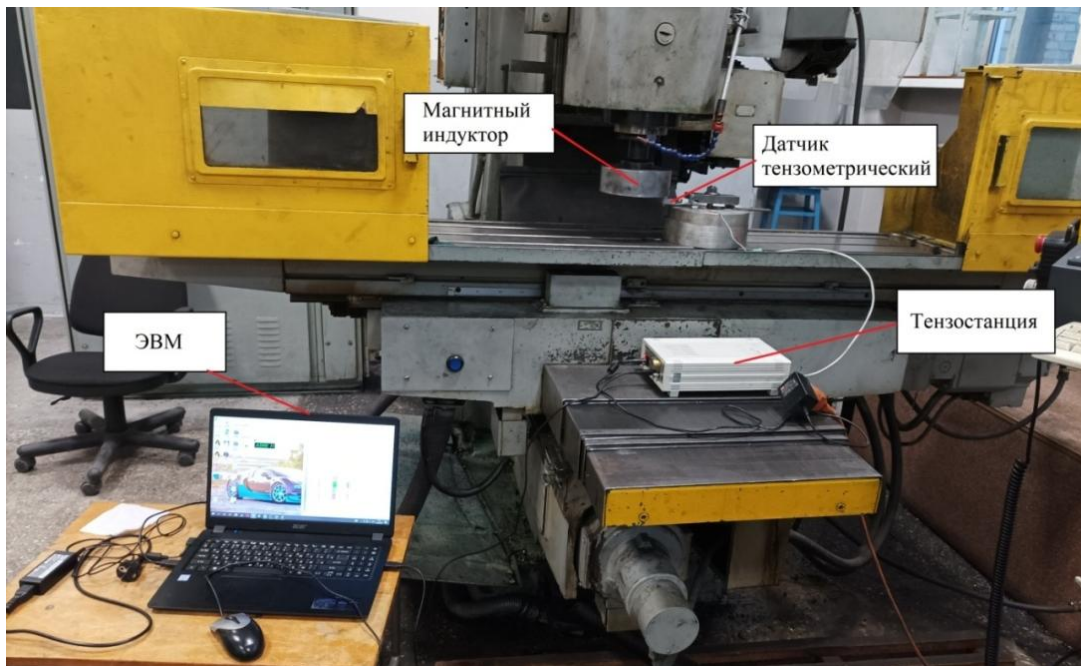


Рис. 17 – Экспериментальная установка для определения сил резания

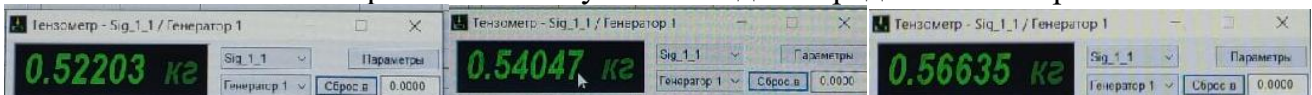


Рис. 18 - Показания тензометрического датчика

Погрешность с экспериментальными исследованиями составляет 9,07%.

Для обработки сложно-профильных поверхностей, индуктор диаметром 180 мм. не обеспечит должную степень обработки сложного контура, поэтому обработку необходимо вести индуктором малого диаметра, позволяющим обрабатывать поверхности сложного профиля. В индукторе диаметром 180 мм. применялись постоянные магниты из SmCo_5 . При расчете индукторов малого диаметра было принято решение использовать постоянные магниты из материала NdFeB , так как они обладают большей магнитной силой. Был выбран диаметр индуктора равный 20 мм. и проведены расчеты магнитной индукции, магнитных сил и сил резания (рис. 19). Значения механических сил действующих на индуктор, показаны на рисунке 20.

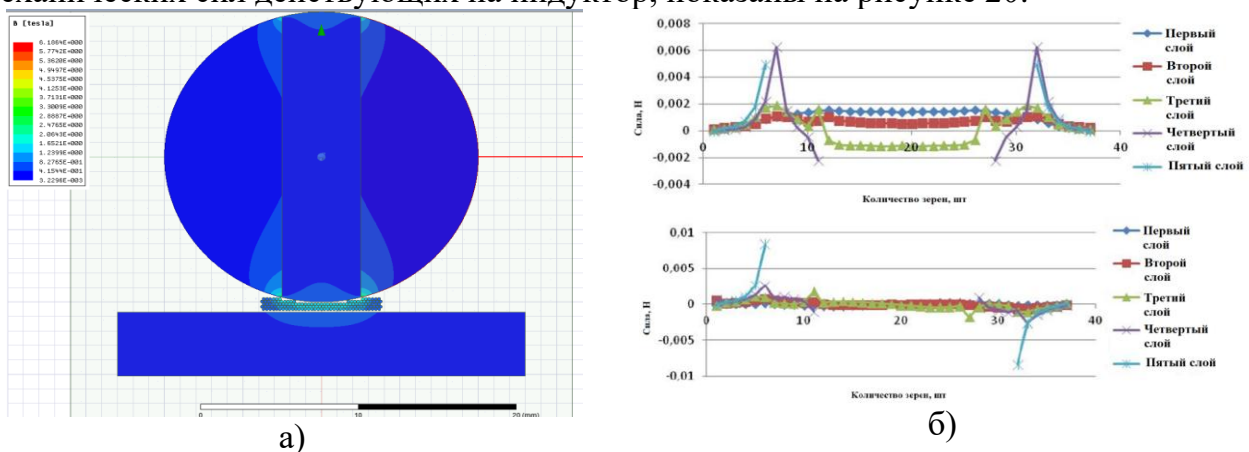


Рис. 19 – Расчет магнитных сил для индуктора диаметром 20 мм.:

а) Магнитные силы в ANSYS MAXWELL; б) проекция магнитных сил по осям Y и X

Как видно из графика горизонтальных сил (рис. 19 а), силы для второго слоя зерен имеют отрицательное значение, что свидетельствует о том, что происходит перемешивание магнитно-абразивного порошка, без взаимодействия с заготовкой.

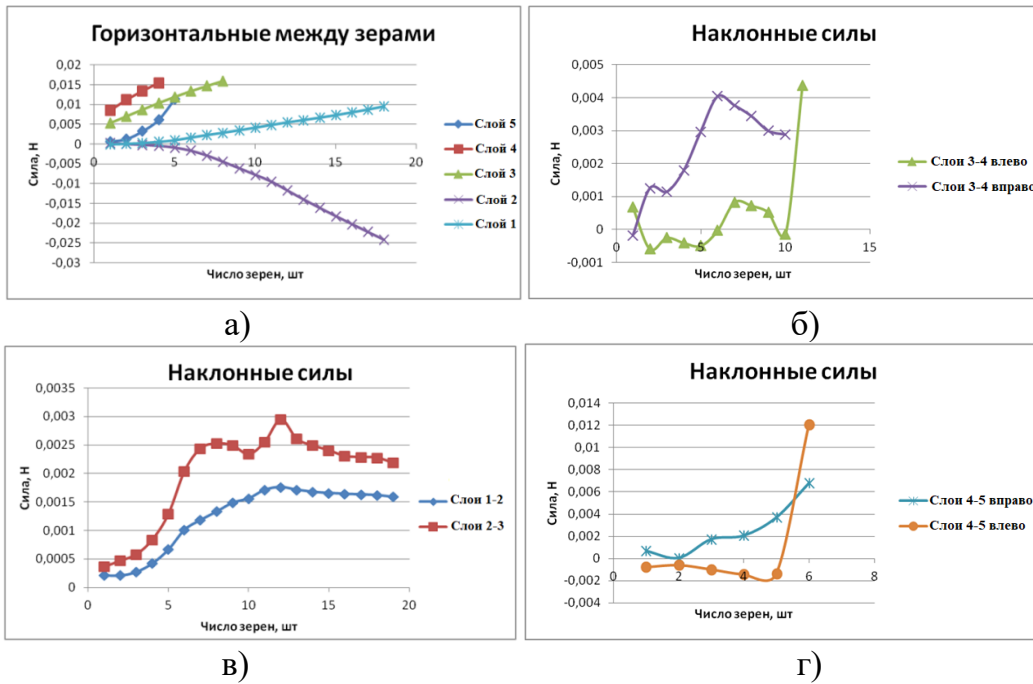


Рис. 20 – Механические силы: а) горизонтальные между зерами; б) наклонные между слоями 3-4); в) наклонные силы между слоями 1, 2, 3; г) наклонные силы между слоями 4-5

В связи с тем, что индуктор диаметром 20 мм не производит обработку немагнитных материалов, определен интервал диаметров индукторов, при котором будет идти процесс обработки. Осуществлен расчет для диаметра приближенного к среднему значению диаметров исследуемых значений. Выбрано значение диаметра равное 80 мм и осуществлен расчет. В индукторе используются постоянные магниты из материала NdFeB размером 40x20x5 мм. На рисунках 21 и 22 представлены магнитные и механические силы.

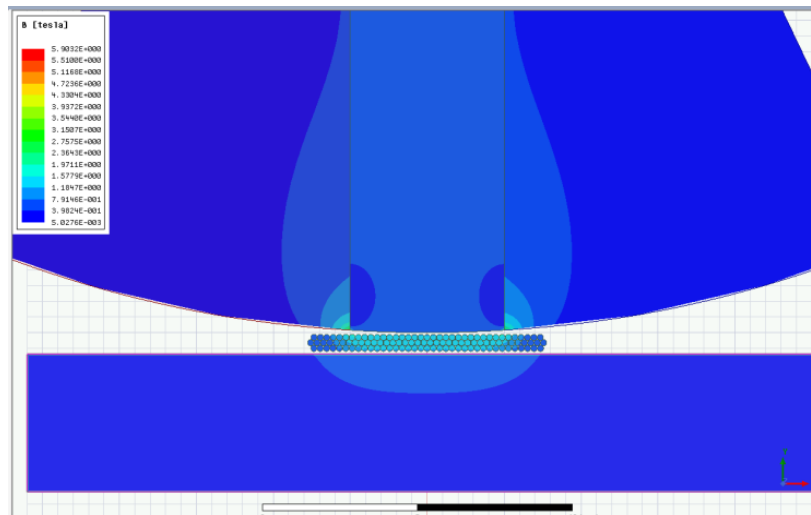


Рис. 21 - Магнитные силы, для индуктора диаметром 80 мм

Как видно на рисунке 22, расслоение порошка не происходит. Крайние зерна плохо удерживаются магнитным полем и «улетают» из зоны обработки. Данный индуктор работает, но имеет также достаточно большой диаметр, для обработки сложно-профильных поверхностей. Максимальная сила резания составляет 0,016 Н

На рисунке 23 показан индуктор диаметром 40 мм и проведен расчет. Из рисунка 23 можно заметить, что магнитное поле слабо удерживает крайние зерна, при пересчете данные зерна исключены из расчета (Рис. 24).

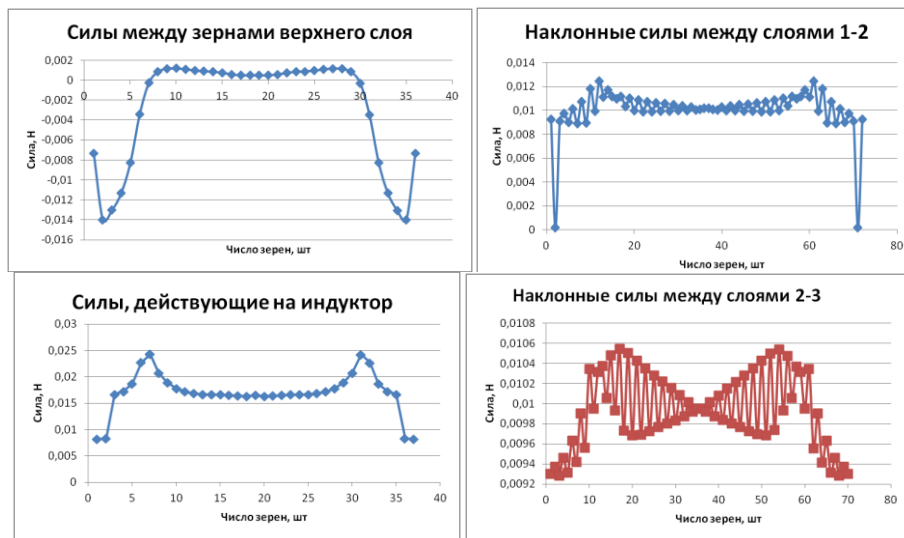


Рис. 22 - Магнитные силы, для индуктора диаметром 80 мм

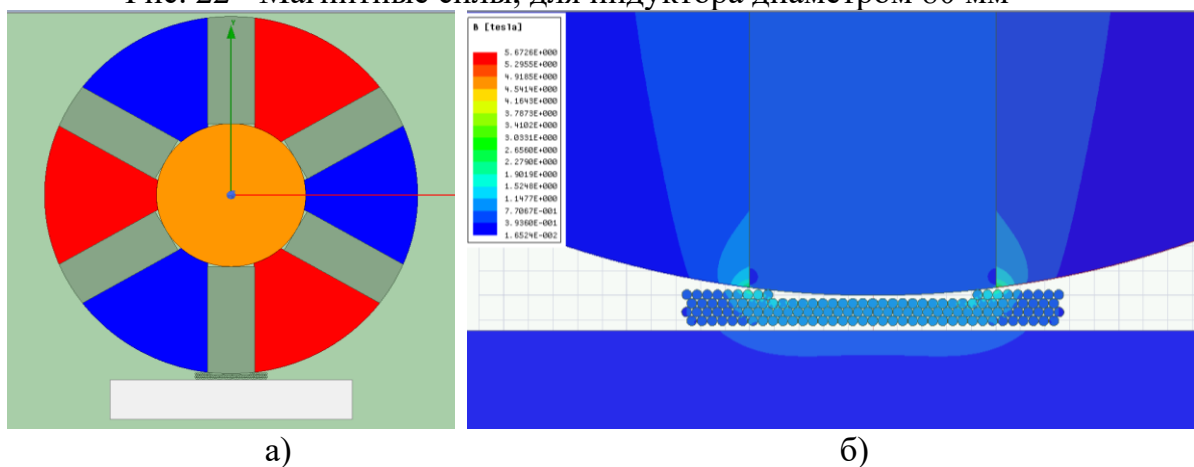


Рис. 23 – Индуктор диаметром 40 мм: а) схема индуктора; б) магнитные силы

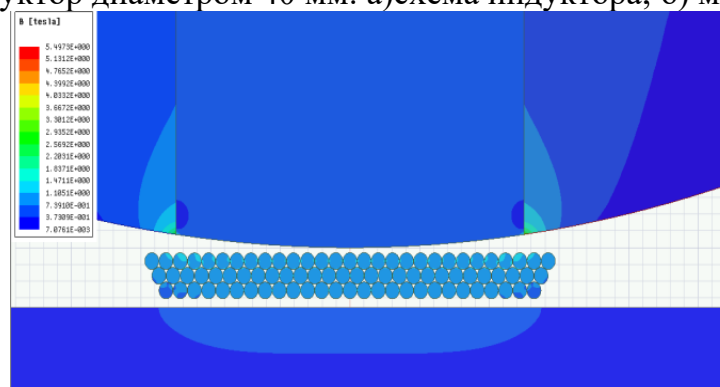


Рис. 24 - Магнитные силы, для индуктора диаметром 40 мм

Произведем сравнение магнитных сил с различным расположением зёрен в рабочем зазоре (Таблица 4).

Сравнение производилось по максимальному значению магнитной силы, по которой в последующем будет определяться максимальная сила резания. Результаты представлены в таблице 4.

Магнитная индукция зависит от количества зёрен 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 зёрен в процессе обработки. Тем самым происходит экономия времени проектирования операции.

Таблица 4 – Сравнение магнитных сил

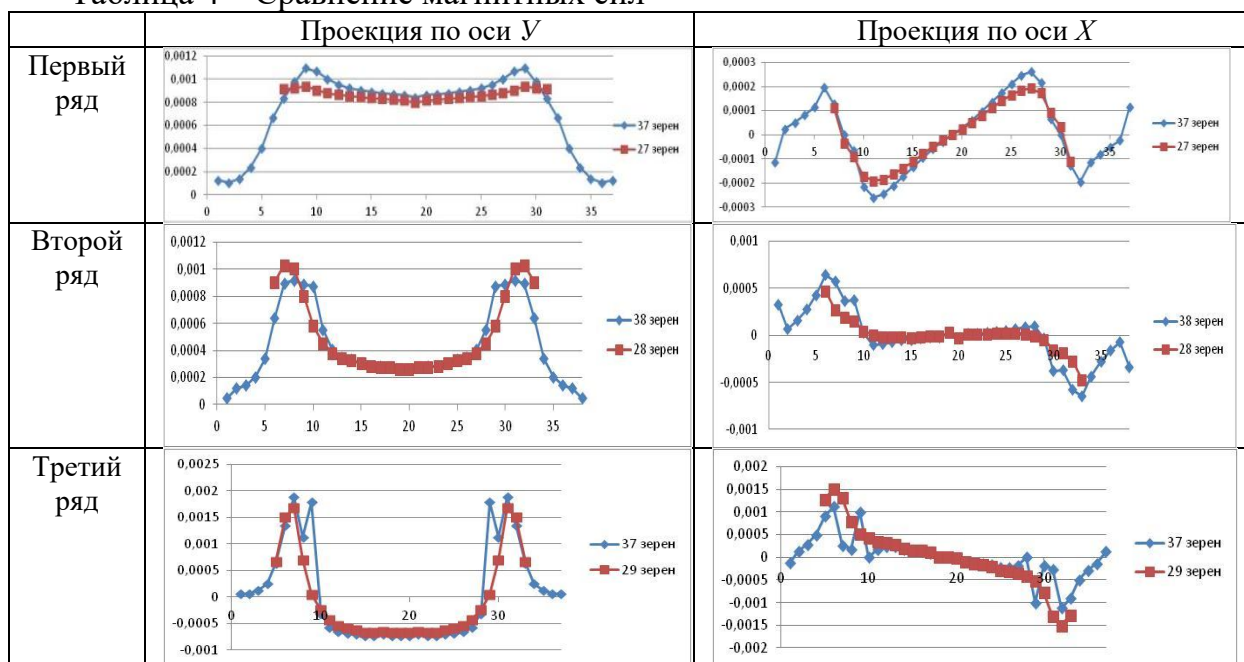


Таблица 4 – Значения магнитных сил, для различного числа зерен в зазоре

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

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.

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 подготовки производства рассчитывать необходимое 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. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на промышленном предприятии ООО «Харвест», экономический эффект от внедрения 424000 руб. 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»

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

Публикации в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. Балашов А.В. Обеспечение качества гравирования буквенно-цифровых 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.

2. Леонов С.Л. Установление параметров распределения радиусов режущих вершин магнитно-абразивных зерен [Текст] / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // Воронежский научно-технический Вестник. 2022. Т. 3. № 3 (41). С. 24-35.

3. Леонов С.Л. Стохастическое моделирование формирования шероховатости при магнитно-абразивной обработке [Текст] / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // Воронежский научно-технический Вестник. 2023 Т 4. № 1 (43). С. 35-44.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и WebOfScience

4. 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. Ser. "Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment" 2022. С. 176-182.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

5. 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.

6. Программа для расчета параметров шероховатости при магнитно-абразивной 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.

7. Программа для определения размеров режущих вершин магнитно-абразивного 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.

Публикации в других изданиях

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

9. Леонов С.Л. Сравнение решателей системы конечно-элементного анализа ANSYS, применительно к магнитно-абразивной обработке. [Текст] / Леонов С.Л.

Иконников А.М Соломин Д.Е. // Вестник современных технологий, 2020, №2 (18), С. 10-13

10. 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 научно-практической конференции (22-23 октября 2020 года, г. Бийск) / Алт.гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2020 С.30-35

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

12. Черепанов Р.С. Проектирование технологического оборудования в САД 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.

13. Формирование шероховатости поверхности при магнитно-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.

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

15. 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.

16. 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.

Соломин Дмитрий Евгеньевич

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

Автореферат

Подписано в печать 26.03.2024. Формат 60x84 1/16. Печать – цифровая. Усл.п.л. 1,16.
Тираж 100 экз. Заказ 2024 – 16. Отпечатано в типографии АлтГТУ, 656038, г. Барнаул,
пр-т Ленина, 46, тел.: 8–(3852) 29–09–48, Лицензия на полиграфическую деятельность
ПЛД №28–35 от 15.07.97 г