

На правах рукописи



МОСТОВАЯ ЯНА ГРИГОРЬЕВНА

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ
ДЕТАЛЕЙ С ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ ПУТЕМ
ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова».

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Ситников Александр Андреевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Радченко Михаил Васильевич
	кандидат технических наук, доцент Щелоков Сергей Вячеславович
Ведущая организация	ОАО ХК «Барнаульский станкостроительный завод» (г. Барнаул)

Защита состоится « 27 » марта 2009 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

Отзывы в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просьба направлять по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.
Факс: (3852)36-79-03, e-mail: yuoshevtsov@mail.ru.

Автореферат разослан « 26 » февраля 2009 года

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н., доцент



Ю.О. Шевцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Одним из перспективных направлений в машиностроении является нанесение покрытий на рабочую поверхность деталей, которое позволяет многократно повысить износостойкость, долговечность, коррозионную стойкость. Из всех существующих методов нанесения покрытий особый интерес представляет газотермическое напыление. Высокая производительность, простота технологии, относительно низкая себестоимость нанесения покрытия, возможность обработки заготовок различной конфигурации и габаритов позволяет использовать этот метод во многих областях техники. Однако существует ряд сложностей в технологии изготовления деталей с покрытиями. Газотермическое напыление на поверхность заготовки приводит к значительным отклонениям формы и высокой шероховатости профиля. Эксплуатация таких деталей в парах трения без последующей механической обработки невозможна. Одним из распространенных методов является алмазно-абразивная обработка, а именно шлифование, которое позволяет обеспечить требуемые размеры и шероховатость при высокой производительности.

Существующие рекомендации по выбору режимов резания и характеристик инструмента для шлифования деталей с покрытиями предлагают разрозненные, противоречивые сведения, и только для ограниченного круга материалов покрытий. Известные математические модели также не всегда позволяют учесть многообразие физико-механических свойств существующих и новых покрытий, кроме этого подобные методики не автоматизированы. При проектировании операции обработки для новых или малоизученных материалов покрытий, необходимым является проведение дополнительных дорогостоящих экспериментов, что неэффективно. Затраты времени на стадии проектирования операции шлифования деталей с покрытиями, связанные с отсутствием методики проектирования, позволяющей автоматизировано выбрать режимы резания и характеристики инструмента, могут составить до 30-40 % от общего времени и, как следствие, приводят к снижению производительности операции обработки.

Для автоматизации выбора технологических параметров операции широко используются методы математического моделирования, а именно, имитационные модели, с помощью которых при небольшом объеме экспериментальных исследований можно выбрать технологические параметры операции с учетом физико-механических свойств материалов покрытий, обеспечивающие требуемую шероховатость поверхности.

Таким образом, исследования, направленные на разработку научно-обоснованной методики проектирования операции шлифования деталей с покрытиями на базе математической модели, позволяющей автоматизировать выбор технологических параметров операции, являются актуальными.

Работа выполнялась в рамках ГК «Проведение проблемно-ориентированных исследований и разработка научно-технологических основ производства прецизионных деталей машиностроения с покрытиями из наноструктурированных композиционных материалов, полученных методами высокотемпературного синтеза при ударно-волновом газотермическом нагреве», шифр «2007-3-1.3-00-04-032».

Цель работы. Обеспечение параметров качества деталей на операциях алмазно-абразивной обработки износостойких покрытий на основе имитационного стохастического моделирования.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились на базе научных основ технологии машиностроения, теории резания металлов, математического моделирования, методов математической статистики. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием методики планирования экспериментов на спроектированном автоматизированном стенде сбора и обработки технологической информации.

Научная новизна.

1. Аналитически установлена взаимосвязь между режимами резания, характеристиками инструмента, физико-механическими свойствами (твердостью, когезионной прочностью, пористостью) и глубиной слоя покрытия, в котором формируется микрорельеф поверхности, позволяющая прогнозировать дефекты (сколы) при шлифовании.

2. Разработана комплексная имитационная стохастическая модель взаимодействия подсистем «инструмент» - «обрабатываемая поверхность», в которой учтено наличие процессов микротрещинообразования и микрорезания-скалывания (копирования профиля инструмента). Результатом моделирования являются съем материала покрытия, высотные и шаговые параметры шероховатости.

3. На основе анализа результатов моделирования и экспериментальных исследований установлено, что распределение среднеарифметического отклонения профиля обработанной поверхности подчиняется нормальному закону.

4. Разработаны классификационные признаки формирования базы данных для автоматизированного проектирования операции алмазно-абразивной обработки, позволяющие сопоставлять альтернативные варианты технологических решений.

Практическая ценность.

1. Разработана методика и комплекс программ для проектирования операций алмазно-абразивной обработки износостойких покрытий, включающий:

- программное обеспечение для расчета операционных размерных цепей (Свидетельство об официальной регистрации программы № 2008615403);
- программное обеспечение для расчета профиля обрабатываемой поверхности (Свидетельство об официальной регистрации программы № 2007613355).

2. Предложено информационное обеспечение в виде базы данных, содержащей сведения о физико-механических свойствах различных материалов покрытий, режимах резания, характеристиках инструмента и параметрах шероховатости (Свидетельство об официальной регистрации базы данных № 2007620232).

Реализация работы. Разработанная методика проектирования алмазно-абразивной операции обработки деталей с износостойкими покрытиями принята к внедрению на этапе технологической подготовки производства в ООО

«Центр развития технологий-Алтай». Ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет около 97 500 рублей в год.

Апробация работы. Основные положения диссертации публиковались и докладывались на международной научно-технической конференции «Современные технологические системы в машиностроении» (Барнаул, 2005-2006), 5-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (Новосибирск, 2005), научно-практической конференции «Молодежь-Барнаулу» (Барнаул, 2006), Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (Барнаул, 2006-2008), 5-й Всероссийской научно-практической конференции «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды» (Бийск, 2007), международной школе-конференции по приоритетным направлениям развития науки и техники с участием молодых ученых, аспирантов и студентов (Москва, 2006), международном научно-техническом сборнике Харьковского политехнического института (2006). Результаты диссертации докладывались на совместных научных семинарах кафедр «Технология автоматизированных производств», «Общая технология машиностроения», «Сельскохозяйственное машиностроение», «Менеджмент технологий» (АлтГТУ, Барнаул) в 2005-2008 годах.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 15 печатных работах. В том числе 3 статьи, из них 1 статья опубликована в издании, рекомендованном ВАК РФ, 9 тезисов докладов, 2 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ и свидетельство об официальной регистрации базы данных.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков, 25 таблиц, список литературы из 132 наименований. Общий объем – 178 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выполненной работы, приводится ее общая характеристика, сформулированы научная новизна и практическая ценность.

В первой главе проведен анализ состояния проблемы, сформулированы цель и задачи исследований.

Современный уровень развития техники характеризуется высокими требованиями к качеству деталей с покрытиями. Их обеспечение затрудняется на стадии выбора режимов обработки и характеристик инструмента из-за отсутствия в научно-технической литературе автоматизированной методики проектирования операции шлифования напыленных материалов, что является причиной низкого качества проектных решений и, соответственно, невысокого качества обработки. Создание подобной методики, в свою очередь, осложняется рядом проблем.

Известно на данный момент большое количество экспериментальных исследований, направленных на анализ влияния характеристик инструмента, ре-

жимов резания на качество обрабатываемой поверхности, которые представлены в работах Анциферова В. Н., Бартенева С. С., Борисова Ю. С., Кречмара Э., Кудинова В. В., Кулагина С. П., Моригаки О., Ситникова А. А., Рыжова Э. В., Усова А. В., Харламова Ю. А., Хасуи А. и др. Однако, несмотря на значительный опыт, накопленный в этой области, существующие эмпирические зависимости и математические модели не позволяют учесть особенности процесса обработки покрытий.

Особенностями обработки напыленных материалов является то что, микрорельеф обработанной поверхности детали с покрытием образуется в результате процессов микротрещинообразования (выкрашивание материала покрытия) и резания-микроскалывания (копирование профиля инструмента на профиль заготовки). Это происходит из-за особенностей строения и физико-механических свойств материала покрытия (наличия пористости, высокой твердости, низкой когезионной прочности) и оказывает значительное влияние на формообразование рабочей поверхности детали. Эту проблему можно решить, используя методы математического моделирования.

Создание имитационной стохастической модели как элемента автоматизированной методики проектирования на основе изучения механизма взаимодействия инструмента и детали с покрытием, позволит спрогнозировать шероховатость обработанной поверхности при выбранных режимах резания и характеристиках инструмента для существующих марок покрытий, а также для новых или малоизученных.

Кроме этого, фактором, усложняющим создание автоматизированной методики, является отсутствие базы данных (БД), систематизирующей известную справочную информацию по выбору технологических параметров операции обработки покрытий и их физико-механических свойств. Такая БД может быть хорошей основой при формировании исходных данных для математической модели.

Результатом проведенного анализа существующих моделей и методик проектирования операции шлифования является формулировка цели и **основных задач исследования:**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить механизм формообразования поверхностного слоя напыленного покрытия в процессе алмазно-абразивной обработки. Установить взаимосвязь между режимами резания, характеристиками инструмента, физико-механическими свойствами и глубиной слоя покрытия, в котором формируется микрорельеф поверхности.

2. Разработать имитационную стохастическую модель формообразования поверхности детали с покрытием в процессе алмазно-абразивной обработки с учетом технологических параметров операции и физико-механических свойств материалов покрытий; выполнить проверку адекватности математической модели реальному процессу.

3. Разработать классификационные признаки формирования базы данных и на их основе выбирать режимы резания, характеристики инструмента, обес-

печивающие требуемые параметры качества обрабатываемой поверхности для широкого круга материалов покрытий.

4. Разработать алгоритм методики автоматизированного проектирования операции алмазно-абразивной обработки деталей с покрытиями, позволяющий назначить режимы резания и характеристики инструмента с учетом физико-механических свойств напыляемого материала, обеспечивающие требуемое качество поверхности.

Вторая глава посвящена разработке имитационной стохастической модели формообразования поверхности детали с покрытием при алмазно-абразивной обработке на основе изучения механизма взаимодействия инструмента и заготовки с учетом технологических параметров операции, особенностей обработки напыленных материалов и их физико-механических свойств.

Для изучения механизма формообразования поверхностного слоя напыленного покрытия в процессе алмазно-абразивной обработки рассмотрены размерные связи при взаимодействии инструмента и заготовки (рис. 1). Размер детали формируется с учетом размера детали на предыдущем проходе и съема материала, для плоского шлифования определяется по зависимости 1, для круглого по зависимости 2:

$$h_n = h_{n-1} - \Delta r_n, \quad (1)$$

где h_n, h_{n-1} – размер заготовки соответственно на рассматриваемом и предыдущем переходах, Δr_n – сьем материала покрытия на рассматриваемом переходе.

$$r_n = r_{n-1} - \Delta r_n, \quad (2)$$

где r_n, r_{n-1} – радиус заготовки соответственно на рассматриваемом и предыдущем переходах.

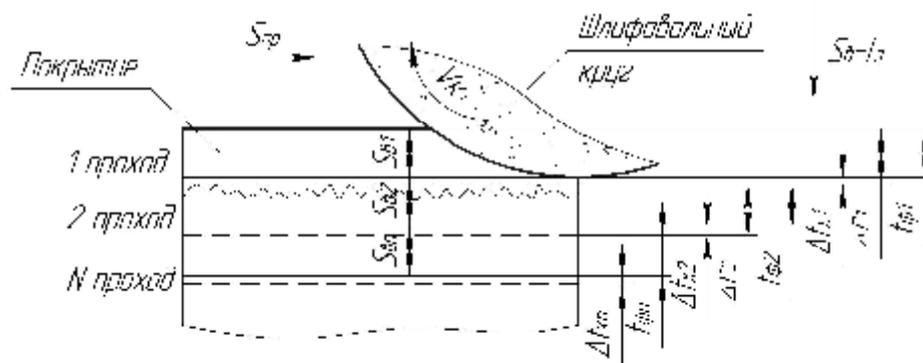


Рисунок 1 – Схема съема материала покрытия в процессе обработки

Съем материала хрупкого покрытия может превышать фактическую глубину резания t_{ϕ} на величину Δt_x (рис. 1), определяется через фактическую глубину резания t_{ϕ} и слой шероховатости $H=R_{\max}$ (формулы 3, 4):

$$\Delta r_n = t_{zn} - \Delta t_{xn-1} + \Delta t_{xn} = t_{\phi n} + \Delta t_{xn}, \quad (3)$$

где t_z – заданная глубина шлифования, $\Delta t_{xn-1}, \Delta t_{xn}$ – приращение съема материала в процессе хрупкого разрушения покрытия при шлифовании соответственно за предыдущий и рассматриваемый проходы (рис. 1).

$$\Delta r_n = t_{\phi n} - H_n. \quad (4)$$

Фактическая глубина резания $t_{\phi n}$ рассчитывается по уравнению баланса перемещений в технологической системе, то есть на основе сравнения текущих размеров круга, заготовки и межцентрового расстояния (круглое шлифование),

расстояния от стола до центра круга (плоское шлифование). Расчет фактической глубины резания представлен в таблице 1.

Таким образом, для расчета размера готовой детали (зависимости 1-2) и ее шероховатости необходимо рассчитать микропрофиль поверхности детали с покрытием при взаимодействии инструмента и заготовки с учетом механизма хрупкого разрушения, в результате которого сьем материала покрытия может превышать фактическую глубину резания t_f на некоторую величину приращення Δt_x .

Из существующих исследований по изучению механизма формирования микрорельефа при шлифовании покрытий, известно, что в зоне контакта при внедрении инструмента в обрабатываемый материал покрытия возникают высокие напряжения, приводящие к развитию микротрещин. Дефекты строения покрытия (поры и различные включения) являются концентраторами напряжений. Профиль обработанной поверхности формируется в результате резания-микроскалывания (копированием профиля инструмента на поверхность заготовки) и микротрещинообразования, которое характеризуется объемным скалыванием между порами материала покрытия в процессе механической обработки. Основываясь на этом, выдвинуто предположение, о том, что микрорельеф обрабатываемой поверхности формируется в результате развития микротрещин между порами покрытия, находящимися в поле действия максимальных напряжений, которые распространяются на определенную глубину Δt . Координаты этих пор удовлетворяют условию (1).

$$R_3 < \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} < R_3 + \Delta t, \quad (5)$$

где R_3 – радиус режущей части зерна; x_i, y_i – координаты поры, участвующей в микротрещинообразовании; x, y – координаты центра зерна; Δt – глубина формирования микрорельефа поверхности.

Таким образом, микротрещины будут развиваться между порами покрытия в пределах глубины Δt , величина которой зависит от ряда факторов (глубины резания t , зернистости Z , твердости HRC, микротвердости H_{μ} , модуля упругости E , когезионной прочности $\sigma_{\text{ког}}$ и др.) (рис. 2). Для доказательства выдвинутой гипотезы, произведен расчет напряженного состояния поверхностного слоя покрытия в процессе алмазно-абразивной обработки методом конечных элементов. Моделирование проводилось с помощью программы COSMOSWorks. Результаты расчета напряжений и их распределение по глубине покрытия подтверждают, что на глубине покрытия превышающей Δt , напряжения стабилизируются и приближаются к нулю.

Полученные результаты хорошо согласуются с существующими исследованиями механизма формообразования поверхности покрытия при шлифовании, а также с выдвинутой гипотезой. Основываясь на этом, была разработана математическая модель формообразования поверхности в процессе алмазно-абразивной обработки, имитационный подход которой заключается в следующем (рис. 2):

– профиль обработанной поверхности детали формируется в процессе резания-микроскалывания (копирования профиля инструмента на поверхность заготовки) и микротрещинообразования (объемного скалывания) в материале покрытия при взаимодействии инструмента и заготовки;

- в процессе объемного скалывания материала покрытия (микротрещинообразования) участвуют макродефекты – поры напыленного слоя, микропрофиль поверхности формируется между порами, находящимися на определенной глубине от траектории внедрения режущих зерен (глубина формирования микрорельефа поверхности Δt);
- координаты пор, участвующих в микротрещинообразовании, удовлетворяют критерию (5);
- в процессе микрорезания-скалывания (непосредственно резания) происходит копирование профилей зерна на исходную поверхность заготовки;
- координаты режущих зерен и их профиль являются случайными параметрами, которые зависят от геометрии зоны контакта, режимов резания и характеристики инструмента;
- координаты пор покрытия являются случайными параметрами и распределяются по заданному закону распределения.

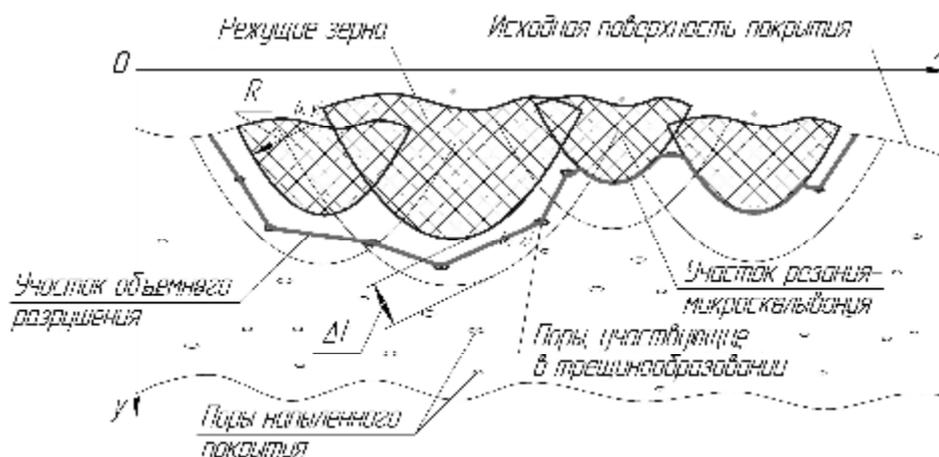


Рисунок 2 – Схема взаимодействия режущих зерен с обрабатываемым материалом покрытия

Расчет параметров зоны контакта для схемы плоского и круглого шлифования представлены в таблице 1. При прохождении заготовкой зоны контакта с режущим кругом глубина резания $t_N = AV$ меняется. Мгновенное значение глубины t_N определяется углом α_N , который изменяется при плоском шлифовании от α до 0, при круглом шлифовании от $-\alpha$ до α . Расчет угловой величины зоны контакта α , а также количества зерен N , находящихся в обработке, зависят от фактической глубины резания t_f (таблица 1). Результатом работы модели является расчет микропрофиля обработанной поверхности, по которому рассчитываются параметры шероховатости и величина съема материала покрытия Δr на каждом проходе.

Глубина формирования микрорельефа поверхности Δt зависит от ряда факторов: технологических параметров операции и физико-механических свойств материала покрытия. В качестве исходных данных для определения регрессионной зависимости использовался опыт, накопленный различными исследователями, в области экспериментальных исследований алмазно-абразивной обработки деталей с покрытиями и их физико-механических свойств, а также результаты моделирования. В результате были построены графики Δt от твердости $\Delta t = f(HRC)$, от микротвердости $\Delta t = f(H_{\mu})$, от модуля упругости $\Delta t = f(E)$, от ко-

гезионной прочности $\Delta t=f(\sigma_{кор})$, от пористости напыленного материала $\Delta t=f(P)$, которые были аппроксимированы методом наименьших квадратов и получены соответствующие зависимости. Далее с помощью методов математической статистики был проведен корреляционный анализ, выявлена независимость факторов – твердости HRC, когезионной прочности, пористости P.

Таблица 1 – Расчет параметров зоны контакта и фактической глубины резания плоского и круглого шлифования

Фактическая глубина резания t_{ϕ} на n-м проходе/обороте	
$t_{\phi n} = h_n + R_n - A_n; \quad (3)$	$t_{\phi n} = r_n + R_n - A_n \quad (13)$
$A_n = A_0 - \sum_{i=1}^n t_{zi} + \sum \Delta_A; \quad (4)$	$A_n = A_0 - \sum_{i=1}^n S_i + \sum \Delta_A; \quad (14)$
$R_n = R_0 - \sum_{i=1}^n \Delta R_i; \quad (5) \quad h_n = h_0 - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta r_i; \quad (6)$	$R_n = R_0 - \sum_{i=1}^n \Delta R_i; \quad (15) \quad r_n = r_0 - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta r_i; \quad (16)$
$t_{\phi n} = t_{zn} - \Delta t_{xn-1} - \sum_{i=1}^n \Delta R_i - \sum \Delta_A, \quad (7)$	$t_{\phi n} = S_{nn} - \Delta t_{xn-1} - \sum_{i=1}^n \Delta R_i - \sum \Delta_A, \quad (17)$
<p>где t_{zi} – глубина резания; S_i – поперечная подача; Δr_i – сьем материала покрытия; ΔR_i – износ шлифовального круга; Δ_A – суммарная погрешность обработки (определяется температурными и упругими деформациями).</p>	
Угол зоны контакта α	
$\text{Cosa} = \frac{OA_1}{OA} = \frac{R - t_{\phi}}{R}, \quad (8)$	$\text{Cosa} = 1 + \frac{t_{\phi}}{r} \cdot \frac{t_{\phi} - 2R}{2(r + R - t_{\phi})}, \quad (18)$
<p>где R – радиус шлифовального круга; t_{ϕ} – фактическая глубина резания; r – радиус заготовки.</p>	
Глубина резания n-ой режущей вершиной зерна t_N	
$t_N = R(\text{Cosa}_N - \text{Cosa}), \quad (9)$	$t_N = \frac{t_{\phi}}{1 - \text{Cosa}} (\text{Cosa}_N - \text{Cosa}), \quad (19)$
<p>где α_N – угол зоны контакта n-ой режущей вершиной зерна, изменяется от 0 до α</p>	<p>где α_N – угол зоны контакта n-ой режущей вершиной зерна, изменяется от $-\alpha$ до α</p>
Количество зерен, находящихся в зоне контакта инструмента и заготовки	
$N = \left[0,06 \frac{R * a^{pad} L_{баз} f_{зер} (1 \pm \frac{S_{np} R}{n_{кр}})}{pd_{зер}^2} \right], \quad (10)$	$N = \left[0,12 \frac{r * a^{pad} L_{баз} f_{зер} (1 + \frac{n_{кр}}{n_3})}{pd_{зер}^2} \right], \quad (20)$
<p>где S_{np} – продольная подача; $V_{кр}$ – скорость вращения круга; $V_з$ – скорость вращения заготовки; $f_{зер}$ – объемное содержание зерен в круге, соответствующее структуре круга, в процентах; $d_{зер}$ – диаметр зерна; $L_{баз}$ – базовая длина; [...] – вычисление целой части числа.</p>	

Для построения регрессионной зависимости использовалось мультипликативное влияние факторов. Методом наименьших квадратов были рассчитаны коэффициенты регрессионной зависимости для чистового и тонкого шлифования в зависимости от зернистости инструмента (таблица 2).

Таблица 2 – Регрессионные зависимости глубины формирования микропрофиля Δt от физико-механических свойств материала покрытия при разных режимах резания

Режимы обработки	З, мкм	Регрессионные зависимости $\Delta t = f(HRC, E, P)$
Чист. шлиф. $t=0,02-0,08$ мм	100/80	$\Delta t = 0,8823e^{0,0075HRC} (1,5089 + 4,3391P - 0,2357P^2) 0,1192s_{\text{коз}}^{0,1275}$
	125/100	$\Delta t = 5,9518e^{0,0031HRC} (1,2936 + 0,9622P - 0,0566P^2) 0,1731s_{\text{коз}}^{0,0037}$
Тонкое $t=0,005-0,01$ мм	100/80	$\Delta t = 5,0152e^{0,0063HRC} (2,6700 + 0,0909P - 0,0059P^2) 0,3236s_{\text{коз}}^{-0,0819}$
	125/100	$\Delta t = 7,0400e^{0,0080HRC} (2,3329 + 0,0794P - 0,0051P^2) 0,2717s_{\text{коз}}^{-0,0900}$

Достоверность аппроксимации была подтверждена критерием Фишера. Среднее относительное отклонение величины Δt составило не более 7 %. Полученные регрессионные зависимости позволяют прогнозировать дефектообразования (сколы) на обрабатываемой поверхности.

Разработанная модель в результате многократных расчетов профилограмм позволяет определить закон распределения, разброс и вероятность обеспечения требуемой шероховатости при заданных технологических параметрах с учетом средних значений шероховатости и доверительных интервалов (рис. 5). Кроме этого по расчетной профилограмме можно определить величину относительной опорной длины профиля, которая влияет на износостойкость рабочей поверхности детали, рассчитать кривую износа и определить относительный износ рабочих поверхностей деталей с покрытиями для разных технологических решений.

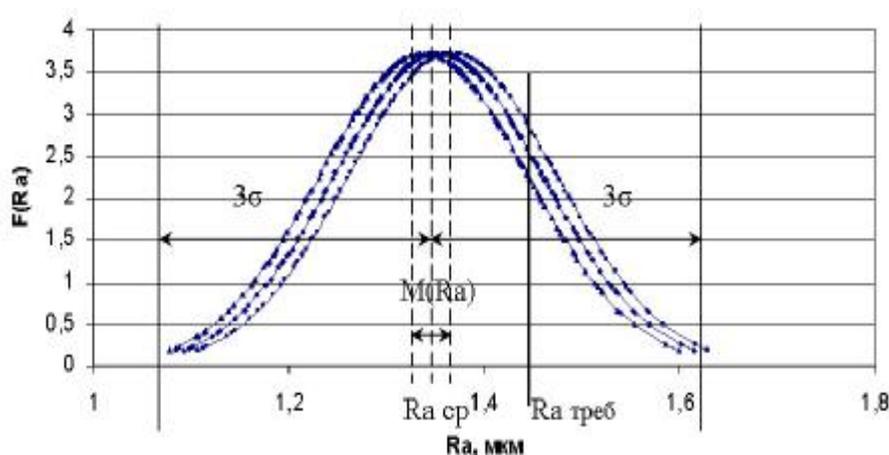


Рисунок 5 – Нормальный закон распределения шероховатости

Третья глава посвящена экспериментальной проверке результатов моделирования. Для оценки адекватности предложенной математической модели был проведен эксперимент. В ходе эксперимента обработаны поверхности образцов при различных режимах резания, характеристиках инструмента и проведена оценка шероховатости, полученной моделированием и эксперименталь-

ным путем. Обоснован выбор экспериментальных образцов, металлорежущего оборудования, режущего инструмента, контрольно-измерительного оборудования и режимов обработки.

На современном этапе развития технологии получения деталей с покрытиями при газотермическом методе напыления, широко применяют керамику. Один из таких материалов – оксид алюминия Al_2O_3 , обладает специфическими физико-механическими свойствами (высокой твердостью, низкой когезионной прочностью), которые являются причиной хрупкости покрытия и оказывают значительное влияние на формирование шероховатости рабочей поверхности детали. Поэтому для экспериментальной проверки результатов моделирования для напыляемого материала покрытия выбран оксид алюминия Al_2O_3 . Метод нанесения покрытия – плазменный. В качестве экспериментальных образцов для проведения исследований взяты образцы высотой $H=14$ мм, шириной $B=30$ мм, длиной $L=60$ мм, материал основы – сталь 30. Для проведения экспериментальных исследований разработан автоматизированный стенд сбора и обработки технологической информации, который в себя включает – шлифовальный станок модели 3E711-B1, алмазный инструмент, профилометр-профилограф 250, многофункциональную плату ввода/вывода (АЦП) ЛА-70М4, компьютер для фиксации и обработки профилограмм.

Алмазный инструмент – шлифовальные круги 1А 200x20x3x76 АС4 40/28 В1 100, АС4 80/63 В1 100, АС4 125/100 В1 100. Режимы резания назначались по существующим рекомендациям. Варьируемыми параметрами является глубина резания $t=0,02...0,2$; зернистость 40...125. Скорость шлифовального круга 35 м/с, продольная подача 5 м/мин, поперечная подача 5 мм/ход. Контролируемым параметром является шероховатость обработанной поверхности R_a .

При сравнении экспериментальных и расчетных значений среднее значение относительной погрешности $\Delta R_a^{отн}$ составило 6,95 %. Максимальное значение ΔR_a не превышает 10 %. Сравнительный эксперимент показал, что результаты, полученные при имитационном моделировании алмазно-абразивной обработки покрытий, согласуются с экспериментальными данными.

Для проверки нормального закона распределения среднеарифметического профиля поверхности R_a на экспериментальных образцах, обработанных на режимах чистового шлифования, были выполнены многократные измерения шероховатости. Анализ данных подтвердил нормальный закон распределения.

Это позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели формирования поверхности детали с покрытием в процессе алмазно-абразивной обработки реальному процессу.

В четвертой главе представлена методика автоматизированного проектирования операции алмазно-абразивной обработки деталей с покрытиями (рис. б) на основе имитационного стохастического моделирования, позволяющая назначить рациональные режимы обработки в зависимости от требуемых параметров шероховатости обработанной поверхности, для широкого круга марок покрытий.

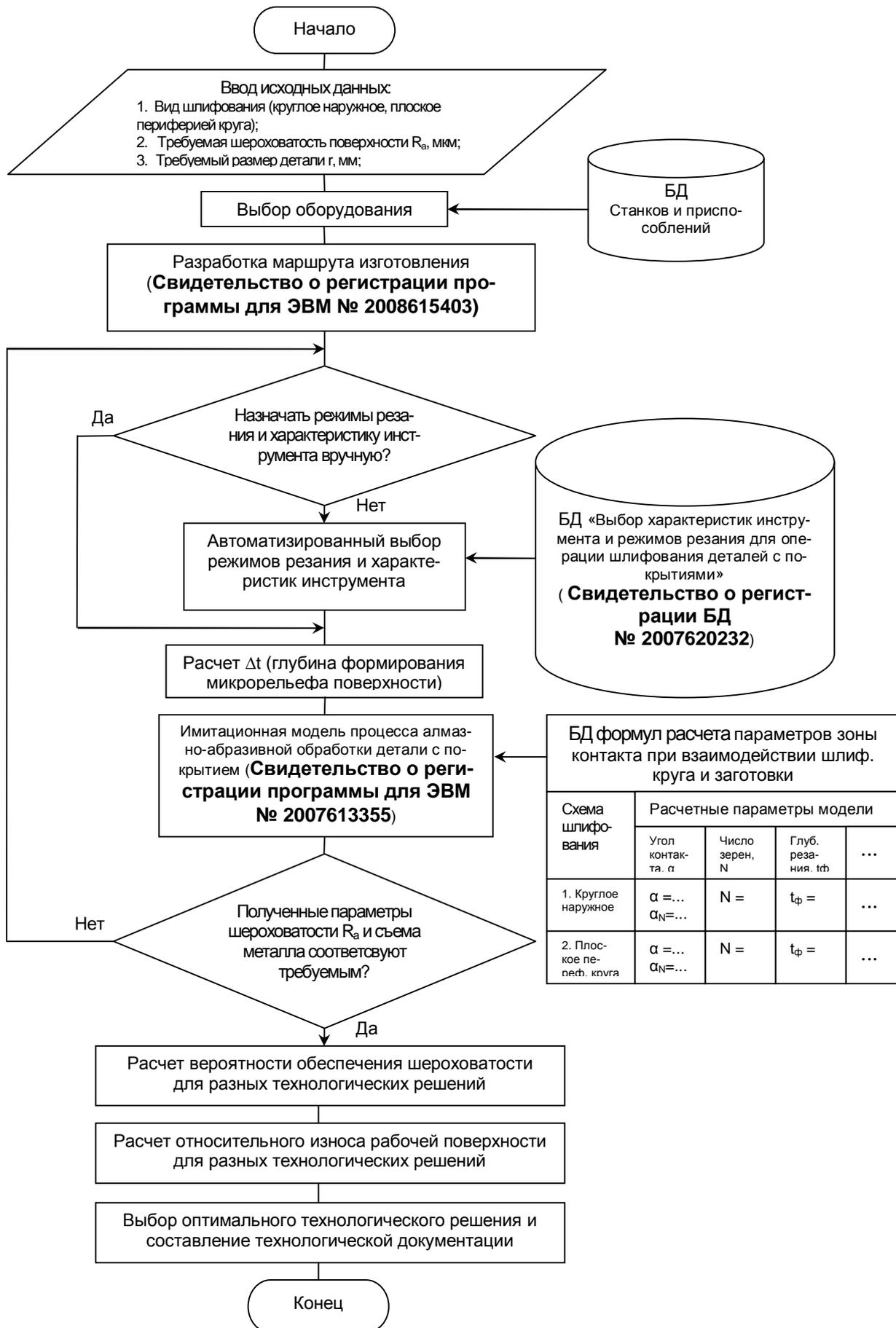


Рисунок 6 – Методика проектирования операции алмазно-абразивной обработки деталей с покрытиями

Для расчета операционных размеров при проектировании операции шлифования деталей с покрытиями разработано программное обеспечение «Расчет операционных размерных цепей для деталей с покрытиями» (Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2008615403).

В результате проведенного обзора научно-технической литературы была создана база данных «Выбор характеристик инструмента и режимов резания для операции шлифования деталей с покрытиями» (Свидетельство об официальной регистрации базы данных № 2007620232).

БД содержит классификационные признаки, включающие справочную информацию о марках напыляемых материалов, области их применения, физико-механических свойствах, технологических параметрах операции обработки и шероховатости обработанной поверхности. БД объединяет существующий экспериментальный опыт по алмазно-абразивной обработке широкого круга материалов покрытий и формирует исходные данные для имитационной модели. Запрос справочной информации по БД для известных материалов покрытий осуществляется по его марке, для новых материалов – по физико-механическим свойствам либо области применения.

Использование имитационной модели в составе методики проектирования позволяет решать задачу выбора оптимальных режимов резания и характеристик инструмента для достижения заданных показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей. Модель производит расчеты с разными технологическими решениями (исходными данными), по результатам которых выбирается рациональное, обеспечивающее требуемую шероховатости поверхности.

Разработанная методика позволяет повысить скорость проектирования операции шлифования деталей с покрытиями за счет автоматизации выбора технологических параметров операции для получения требуемой шероховатости, тем самым сократить затраты на стадии проектирования операции.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Обоснована физическая модель формирования микрорельефа покрытий при алмазно-абразивной обработке, включающая в себя процессы микротрещинообразования напыленного слоя и микрорезания-скалывания, развитие которых определяется физико-механическими свойствами материала покрытия (твердостью, пористостью, когезионной прочностью), режимами резания, характеристиками инструмента.

2. Установлено, что формирование микрорельефа происходит в покрытие между линией профиля зерен инструмента и ее эквидистантой. Расчет полей напряжений в покрытии показал, что микротрещины развиваются по траектории, проходящей через поры напыленного материала в пределах глубины формирования микрорельефа.

3. Параметры шероховатости и съема материала слоя покрытия целесообразно рассчитывать на основе имитационного моделирования формообразования поверхности с учетом стохастического характера процесса шлифования. Алгоритм расчета по разработанной модели позволяет определить высотные и шаговые параметры шероховатости для различных материалов покрытий и ус-

ловий обработки (Свидетельство об официальной регистрации программы № 2007613355). Погрешность моделирования не превышает 10%.

4. Получена расчетная зависимость, устанавливающая взаимосвязь между режимами резания, характеристиками инструмента, физико-механическими свойствами (твердостью, когезионной прочностью, пористостью) и глубиной слоя покрытия, в котором формируется микрорельеф поверхности и позволяющая прогнозировать дефекты (сколы).

5. Установлено, что распределение среднеарифметического отклонения профиля обработанной поверхности Ra подчиняется нормальному закону, что позволяет прогнозировать обеспечение требуемого качества обрабатываемой поверхности.

6. База данных (Свидетельство об официальной регистрации базы данных № 2007620232) объединяет обобщенные экспериментальные данные по исследованию операций алмазно-абразивной обработки широкого круга покрытий, и предназначена для предварительного выбора технологических решений. БД содержит следующие классификационные признаки: материал покрытия, их физико-механические свойства, режимы обработки, характеристики инструмента и параметры шероховатости.

7. Операционные размеры деталей, толщина остаточного слоя покрытия, припуски на механическую обработку и их допуски при проектировании операции шлифования деталей с покрытиями рассчитываются по методике размерного анализа с помощью программного обеспечения (Свидетельство об официальной регистрации программы № 2008615403).

8. Создана методика автоматизированного проектирования операций алмазно-абразивной обработки покрытий, включающая размерный анализ технологического процесса, базу данных, имитационную стохастическую модель формообразования поверхности, расчет съема материала, шероховатости и дефектов.

9. Применение методики автоматизированного проектирования операций алмазно-абразивной обработки позволило разработать рациональную технологию обработки опорных шеек распределительных валов с износостойкими плазменными покрытиями на рабочих поверхностях. Это позволяет сократить брак на 10 %. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения методики на ООО «Центр развития - Алтай» 97500 рублей.

Публикация в издании, рекомендованном ВАК РФ

1. Мостовая, Я. Г. База данных для выбора параметров алмазно-абразивной обработки деталей с покрытиями на этапе технологической подготовки производства // Ползуновский вестник – 2009. – № 4.- С.34-37.

Список опубликованных работ по теме диссертации

2. Мостовая, Я. Г. Математическое моделирование процесса алмазно-абразивной обработки износостойких покрытий / Мостовая Я. Г., Ситников А. А. // Фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направ-

лениям развития науки и техники. Ч.2/ Современные технологические системы в машиностроении: материалы междунар. науч.–техн. конф. / Алт. гос. техн. ун-т им И. И. Ползунова. - Барнаул, 2005. - С.67-68.

3. Мостовая, Я. Г. Имитационное моделирование работы абразивного инструмента при шлифовании / Мостовая Я. Г., Леонов С. Л., Ситников А. А. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2005. – Вып. 11. – С.149-153.

4. Мостовая, Я. Г. Алгоритмы формообразования поверхности при шлифовании деталей с износостойкими покрытиями на основе металлов и оксидов металлов / Мостовая Я. Г., Антонова Е.Е, Ситников А. А. // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 5-й Всерос. науч.-практ. конф., 28 марта 2007 г. / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2005. - С.27-29.

5. Мостовая, Я. Г. Автоматизация проектирования операций механической обработки газотермических покрытий / Мостовая Я. Г., Быканов К. С., Ситников А. А. // Молодежь-Барнаулу: материалы научн.-практ. конф. / Алт. гос. техн. ун-т им И. И. Ползунова. - Барнаул, 2006. - С.364-365.

6. Мостовая, Я. Г. Перспективы применения газотермических методов напыления. / Мостовая Я. Г., Ситников А. А., Антонова Е. Е. // Современные технологические системы в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф. / Алт. гос. техн. ун-т им И. И. Ползунова. - Барнаул, 2006. - С.115-116.

7. Мостовая, Я. Г. Математическое моделирование взаимодействия инструмента и заготовки при шлифовании деталей с покрытиями/ Мостовая Я. Г., Леонов С. Л., Ситников А. А. // Международный научно-технический сборник / Харьковский политехнический институт.- Харьков, 2006.- Вып.70. - С. 310-315.

8. Мостовая, Я. Г. Прогнозирование параметров шероховатости и размеров деталей с покрытиями при алмазно-абразивной обработке / Мостовая Я. Г., Ситников А. А. // Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: материалы 5-й Всерос. науч.-практ. конф. / Бийский технологический институт. - Бийск, 2007. - С.106-108.

9. Мостовая, Я. Г. Автоматизированная технологическая система проектирования операций механической обработки деталей с покрытиями / Мостовая Я. Г., Куранов А. В., Ситников А. А. // Наука и молодежь – 2007: на материалах Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 2007. - С.71-73.

10. Мостовая, Я. Г. Управление качеством при шлифовании деталей с износостойкими покрытиями / Мостовая Я. Г., Ситников А. А. // Управление качеством образования, продукции и окружающей среды: материалы 5-й Всерос. науч.-практ. конф., 5-6 июля 2007 г./ Бийский технологический институт. – Бийск, 2007. - С.140-142.

11. Мостовая, Я. Г. Стохастическое моделирование процесса шлифования деталей с износостойкими покрытиями // Управление качеством образования, продукции и окружающей среды: материалы 2-й Всерос. науч.-практ. конф., 5-6 июля 2007 г. / Бийский технологический институт. – Бийск, 2007. - С.142-145.

12.Свидетельство об официальной регистрации базы данных № 2007620232 «Выбор характеристик инструмента и режимов резания для операции шлифования деталей с покрытиями», 2007

13.Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007613355 «Расчет профилограммы поверхности детали с износостойким покрытием, обработанной шлифованием», 2007

14.Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005611994 «Расчет операционных размерных цепей для деталей с покрытиями (РОРЦДП)», 2008

15.Мостовая, Я.Г. Имитационное моделирование алмазно-абразивной обработки деталей с износостойкими покрытиями / Мостовая Я.Г., Ситников А.А., Леонов С.Л. // Обработка металлов – 2008. - № 2. - С.20-21.