

На правах рукописи



Глинина Гульназ Фидаэловна

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО КАЧЕСТВА ШТАМПОВ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОКОВОК В ПРОЦЕССЕ ЧИСТОВОГО
ФРЕЗЕРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА**

Специальность 2.5.6 – «Технология машиностроения»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена на кафедре конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств Набережночелнинского института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны.

Научный руководитель: **Сафаров Дамир Тамасович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий цифрового машиностроительного производства Набережночелнинского института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны

Официальные оппоненты: **Кугультинов Сергей Данилович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология производства систем вооружения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск

Некрасов Роман Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань

Защита состоится 03 марта 2026 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте <https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/glinina-gulnaz-fidaelovna/index.php>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

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



Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: заготовки коленчатых валов двигателей современных большегрузных автомобилей изготавливаются методом горячей объемной штамповки. Масса поковки составляет от 90 до 135 кг, а длина 850–1200 мм.

Гравюры штампов имеют развитую многоэлементную рабочую поверхность большой площади. Чистовая обработка гравюр ведется на тяжелых трехкоординатных станках с ЧПУ. Длительность непрерывной чистовой обработки концевой сферической фрезой составляет до 40 часов. Контроль геометрической точности выполняется в отдельных сечениях при помощи фасонных шаблонов и щупов. При массе обрабатываемых штампов, от 3-х до 5-ти тонн (рис. 1) корректировать траекторию инструмента на основе постоянных координатных измерений невозможно.

Заказчики поковок – российские двигателестроители и совместные предприятия – требуют повышения их геометрической точности, то есть уменьшения значений отклонений от заданного номинального профиля, а также их стабилизация во всех точках поверхности. Важной задачей является также уменьшение ее шероховатости для снижения трудоемкости финишной ручной доводки штампов.

Таким образом, повышение точности чистового фрезерования поверхностей гравюр является актуальной задачей.

Степень разработанности темы: выявлением технологических факторов, влияющих на геометрическую точность поверхностей, обработанных фрезерованием, занимались Волков Д.И., Кожина С.М., Малышев Е.М., Козлов А.М., Кирющенко Е.В. и др. Методики стойкостных испытаний фрезерного инструмента рассматривалась в работах Иванова В.В., Анцева А.В., Котова Ж.Н., Фомина Е.В., Рябова Е.А. и др. Методики моделирования геометрической точности фрезерованных поверхностей рассмотрены в работах Малютин Г.Е., Тимирязева В.А., Башарова Р.Р., Кудоярова Р.Г., Михайлова М.И., Козлова А.М., Кирющенко Е.В., Кирпичева Е.А., Алейникова Д.П., Лукьянова А.В. и др.

Однако, несмотря на значительное количество публикаций по данной тематике, для управления точностью на современном станке с ЧПУ требуется разработка адекватных моделей взаимосвязей изнашивания чистового фрезерного инструмента с геометрическими характеристиками обрабатываемых поверхностей, включая показатели шероховатости и соответствующих методов экспериментальных исследований.

Объект исследования: штампы крупногабаритных поковок, плоские образцы материала, концевые сферические фрезы диаметром 8 мм различных производителей инструмента с износостойким покрытием на основе TiN.

Предметы исследований: закономерности изнашивания концевых сферических фрез в процессе чистового фрезерования поверхностей плоских образцов материала и гравюр штампов.

Цель работы: обеспечение требуемого качества штампов крупногабаритных поковок в процессе чистового фрезерования за счет коррекции траекторий обработки, компенсирующей систематическую составляющую размерного износа концевых сферических фрез.

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

1. Разработать методику стойкостных испытаний инструмента и найти закономерности изменения отклонений относительного расположения, формы и шероховатости поверхности в периоде стойкости концевых сферических фрез.
2. Разработать методику сравнения результативности применения концевых сферических фрез с учетом функциональной значимости отдельных показателей геометрической точности для обеспечения качества чистового фрезерования поверхностей гравюр штампов.
3. Разработать метод обеспечения требуемого качества чистового фрезерования поверхностей гравюр штампов крупногабаритных поковок концевыми фрезами с учетом закономерностей износа концевых сферических фрез.

Научная новизна работы состоит в следующих результатах:

1. Установлены закономерности изменения отклонений расположения, формы, профиля и шероховатости поверхностей образцов материала штампов в периоде стойкости концевых сферических фрез диаметром 8 мм с износостойким покрытием на основе TiN при различной их угловой ориентации.
2. Разработаны и реализованы количественные критерии сравнения концевых сферических фрез различной заточки диаметром 8 мм с износостойким покрытием на основе TiN в периоде их стойкости при различной угловой ориентации в виде суммарного удельного изменения отклонений геометрических показателей точности с учетом их значимости для обеспечения требуемого качества чистового фрезерования поверхностей гравюр штампов и их стойкости в процессе горячей объемной штамповки.
3. На основе закономерностей приращения износа концевых сферических фрез диаметром 8 мм с износостойким покрытием на основе TiN в периоде их стойкости разработан метод улучшения качества чистового фрезерования поверхностей гравюр штампов горячей объемной штамповки крупногабаритных поковок, компенсирующий систематическую составляющую размерного износа режущих кромок.

Теоретическая значимость заключается в разработке принципов коррекции траекторий чистового фрезерования поверхностей гравюр штампов горячей объемной штамповки крупногабаритных поковок в периоде стойкости концевых сферических фрез диаметром 8 мм, обеспечивающих улучшение стабильности размеров до 1,7 раза по сравнению с фрезерованием, выполненным без коррекции.

Практическая значимость заключается в следующем:

1. Разработан программный модуль расчета коррекции траектории фрез чистового фрезерования штампов крупногабаритных поковок, обеспечивающий повышение геометрической точности.
2. Разработана методика испытаний сферических концевых фрез и исследования закономерностей изменения геометрических отклонений точности на образцах материала штампов, для нахождения математических моделей износа инструмента в периоде их стойкости.

3. Разработана методика оценки результативности применения концевых сферических фрез различных производителей инструмента.

Положения, выносимые на защиту:

- Метод улучшения качества чистового фрезерования поверхностей гравюр штампов горячей объемной штамповки крупногабаритных поковок, компенсирующий систематическую составляющую размерного износа режущих кромок;
- Закономерности изменения отклонений расположения, формы, профиля и шероховатости поверхностей образца материала штампа в периоде стойкости концевых сферических фрез диаметром 8 мм с износостойким покрытием на основе TiN с разными вариантами их заточки;
- Количественные критерии сравнения концевых сферических фрез диаметром 8 мм с износостойким покрытием на основе TiN по суммарному удельному изменению отклонений геометрических показателей точности в периоде их стойкости с учетом их значимости для обеспечения качества чистового фрезерования рабочих поверхностей штампов.

Методология и методы исследований. При решении поставленных задач для теоретических исследований использовались методы аналитической геометрии, теории вероятностей и математической статистики, статистические методы контроля показателей точности.

При проведении экспериментальных исследований использовались сертифицированные методики и оборудование: определение параметров шероховатости поверхности выполнялось профилографом ф. MahrM400, линейные измерения выполнялись на высотомере ф. MahrDigimahr 817 CLM, износ измерялся на стереомикроскопе МБС 2, оснащенный цифровой камерой. Фрезерование выполнялось на пятикоординатном станке с ЧПУ Hedelius RS605 K20. Заводские исследования проводились в инструментальном производстве Кузнечного завода ПАО КамАЗ с использованием действующего производственного оборудования, средств технологического и метрологического оснащения, компьютерной техники.

Достоверность результатов обеспечивается использованием достоверной исходной информации, применением адекватных методов математического моделирования и математической статистики, а также подтверждается количественным соответствием результатов теоретических исследований и экспериментальных данных, полученных при выполнении чистового фрезерования поверхностей гравюр штампа с коррекцией траектории инструмента.

Реализация работы: программный модуль автоматизации расчета математических моделей изменения геометрических отклонений образцов материалов и расчета коррекций рабочих ходов сферических фрез поверхностей гравюр штампов в среде Microsoft Excel, процедура проведения сравнительных стойкостных испытаний концевых фрез альтернативных производителей.

Апробация работы выполнена на межрегиональных научно-практических конференциях:

- «Качество – основа конкурентоспособности современного автопрома», НЧИ КФУ, г.Набережные Челны, 2013 г.
- Наука в видении: от отражения к созданию реальности, филиал КАИ, г. Альметьевск, 2017 г.

Всероссийских международных конференциях:

- «VI Камские чтения», НЧИ К(П)ФУ, г. Набережные Челны, 2014 г.
- ИТММ-2023, ПНИПУ, г. Пермь, 2023 г.

Международных научно-практических конференциях:

- «Технические науки – основа современной инновационной системы», МГУ, г. Йошкар-Ола, 2013 г.
- «Информационные технологии. Автоматизация. Актуализация и решение проблем подготовки высококвалифицированных кадров» (ИТАП-2013), НЧИ КФУ, г. Набережные Челны, 2013 г.

Международных научно-технических конференциях:

- Прогрессивные методы обеспечения работоспособности транспортно-технологических средств, организации автотранспортных услуг и дизайна автомобилей, СГТУ им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, 2013 г.
- «Юность и знания – гарантия успеха», г. Курск, 2014 г.
- «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы», г. Казань, 2016 г., 2017 г.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 22 научные работы, в том числе 7 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 статей, индексируемых в международной базе Scopus.

Соответствие паспорту специальности. По теме и содержанию материалов диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения» в части пункта 4 раздела «Направления исследований» паспорта.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, 4-х глав и выводов, изложена на 183 страницах машинописного текста, в то числе 150 страниц основного текста, содержит 38 таблиц, 88 иллюстраций, 3 приложения на 11 страницах и список литературы из 130 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы повышения геометрической точности при чистовой обработке гравюр штампов крупногабаритных поковок, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, методы исследования, практическая и теоретическая значимость, методы диссертационного исследования, реализация работы, положения, выносимые на защиту, данные об апробации работы, о публикациях, структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе выполнен анализ публикаций по основным причинам брака крупногабаритных поковок. Проанализирована совокупность факторов процесса чистового фрезерования концевыми сферическими фрезами, влияющих на геометрические показатели качества обрабатываемых поверхностей. В многочисленных публикациях приводятся математические зависимости качества обрабатываемых поверхностей деталей от величины шероховатости поверхности, углов наклона фрезы, параметров режимов резания и конструктивных параметров фрез. В ходе стойкостных испытаний инструмента определяется длительность сохранения режущих свойств фрез до момента достижения критического износа, что позволяет обосновывать периодичность смены инструмента. Несмотря на

достаточную изученность факторов процесса чистового фрезерования и изменения отдельных показателей качества в настоящее время отсутствуют комплексные исследования закономерностей изменения комплекса геометрических показателей в периоде стойкости инструмента.

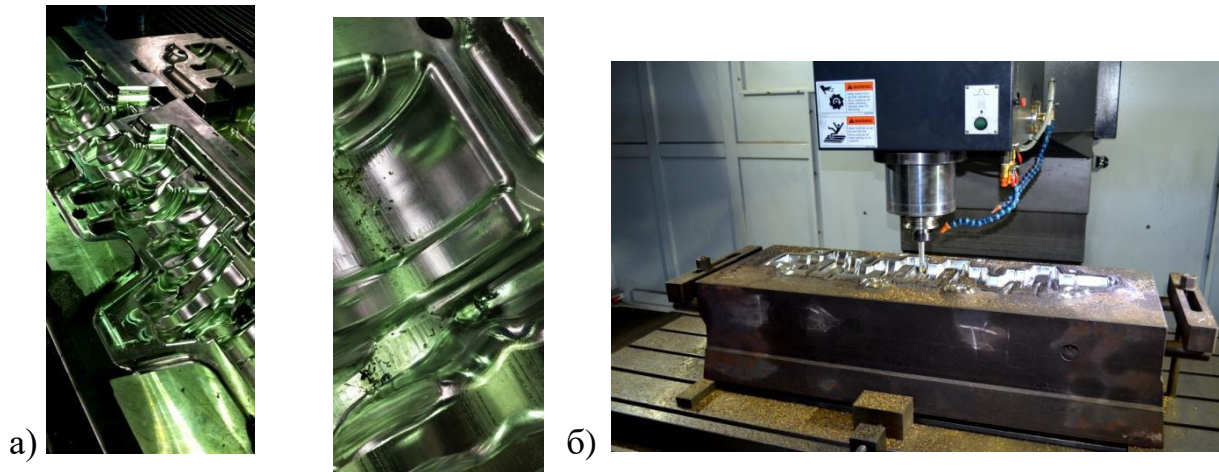


Рисунок 1. а) Поверхности гравюры штампа горячей объемной штамповки коленчатого вала после чистового фрезерования, б) процесс фрезерования гравюр штампа вставки на фрезерном станке с ЧПУ

Сравнения концевых фрез для выполнения чистового фрезерования выполняется в основном по длительности периода стойкости. В некоторых исследованиях регистрируются максимальные значения шероховатости в периоде стойкости фрез, а также данные о достигаемом качестве точности, позволяющий выполнить их сравнение лишь по отдельным показателям. Отсутствуют исследования, которые позволили сравнить результативность концевых сферических фрез по одновременному обеспечению комплекса показателей точности – относительного расположения, отклонений формы поверхностей и профилей, шероховатости как следствие процесса износа концевых сферических фрез.

Выполнен обзор методов прогнозирования геометрической точности и параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей машин в переходах обработки концевым сферическим инструментом с учетом нежесткости инструмента. Имеются различные подходы к улучшению точности чистового фрезерования. Например, метод улучшения точности фрезерования концевыми сферическими фрезами на основе математического моделирования положения точек режущих кромок фрезы с учетом динамических факторов. Он предусматривает глубокое исследование характеристик конкретных фрезерных станочных систем, выполнить которое в реальных условиях затруднительно. Метод покадрового управления процессом чистового фрезерования за счет регулирования подачи фрезерования в зависимости от положения фрезы и глубины резания позволяет уменьшить деформации фрезы и как следствие улучшить точность обработки. Метод не предполагает рассмотрения данных о величине износа фрезы и не позволяет выполнить прогнозирование геометрической точности, что затрудняет ее использование для обеспечения требуемых показателей качества фрезеруемой поверхности.

Таким образом, известные исследования в полной мере не позволяют обеспечить необходимый комплекс количественных характеристик для решения задач улучшения точности чистового фрезерования с учетом закономерностей износа концевых сферических фрез и обоснования результативности их применения для обеспечения требуемого качества фрезерования. На основе данных обзора сформулированы задачи работы.

Во второй главе выделены специальные геометрические характеристики точности, повышение стабильности которых обеспечивает снижение внешнего и внутреннего уровня брака поковок в виде несоответствий размерных характеристик, а также завышенному дисбалансу коленчатых валов после механической обработки. Представлена методика изучения закономерностей изнашивания инструмента для моделирования отклонений геометрической точности концевыми сферическими фрезами и последующей их компенсации.

Для гравюр штампа горячей объемной штамповки более важными является обеспечение размерной точности по отклонениям от настроечного размера, поскольку этот показатель задает будущие размерные показатели отштампованных поковок. Также является важным высотный показатель шероховатости R_a , поскольку от его значений зависит количество съёмов годных поковок. Остальные отклонения имеют меньшее значение (таблица 1).

Таблица 1 Коэффициенты значимости единичных отклонений показателей точности обрабатываемой поверхности гравюр штампов горячей объемной штамповки крупногабаритных поковок

R_a	S_m	Откл. прям-ти вдоль РХ $\Delta_{\text{прод}}$	Откл. прям-ти перп. РХ $\Delta_{\text{пр попер.}}$	Откл. от пл-ти $\Delta_{\text{откл.пл.}}$	Откл. от настр. размера $\Delta_{\text{настр.}}$
0,3	0,05	0,1	0,1	0,15	0,3

Исследования проведены на образцах материала прямоугольной формы размерами 250 x 100 x 40 мм из стали 4Х5МФС в состоянии поставки с измеренной твердостью 177–187 НВ. Обработка выполнена на пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ Nedelius RS605 K20. SandvikCoromant 8RR0823618 R216.42-08030-AK16G 1610. Диаметр концевой твердосплавной сферической фрезы 8 мм. Вылет фрезы 70 мм. Закрепление фрез производилось в патрон Shunk TENDO E Compact. Биение инструмента, измеренное на станке, составило величину в 2–4 мкм. Параметры перехода фрезерования соответствуют заводским режимам $n = 7900$ об/мин; $S = 2000$ мм/мин; $S_z = 0,12$ мм/зуб. Глубина фрезерования выбрана исходя из условий чистового фрезерования 0,15 мм. В качестве смазочно-охлаждающего средства применялся сжатый воздух ($P = 6$ атм.). Принят критерий износа по задней поверхности сферической фрезы при обработке под углом в 45° в 0,25 мм.

У сферической концевой фрезы значительно различаются геометрические параметры режущих клиньев по длине главной режущей кромки зубьев инструмента. В зоне, близкой к участку режущей кромки с нулевой скоростью резания, условия срезания припуска затруднены. Наиболее благоприятные условия обеспечиваются на удалении от участка кромки с нулевой скоростью кромки.

Поэтому испытания в периоде стойкости было решено провести на двух участках главной режущей кромки, соответствующим углам наклона фрезы 15° , 45° путем послойного снятия материала образца с толщинами, соответствующим принятым параметрам обработки гравюр штампа (рис. 2).

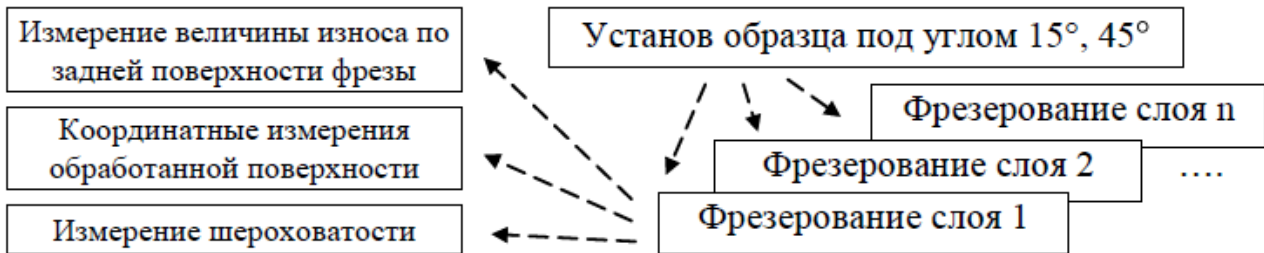


Рисунок 2. Схема проведения стойкостных испытаний сферической концевой фрезой получения исходных данных для моделей

На рисунке 3 приведена схема базирования образцов материала в процессе испытаний сферических концевых фрез в стандартных машинных тисках. После снятия каждого слоя материала выполнены измерения высотных параметров образца в заданных точках (рис. 4а). Разработанная схема расчета отклонений формы обрабатываемой поверхности позволяет исключить угловые погрешности и погрешности базирования при выявлении закономерностей износа фрезы на отклонения геометрических показателей точности, что позволяет учитывать погрешности индивидуальные погрешности станочных систем, на которых выполняется обработка гравюр штампов. Для построения математических моделей минимально достаточно девяти точек измерения. Координатные измерения выполнены высотомером ф. Mahr Digimahr 817 CLM.

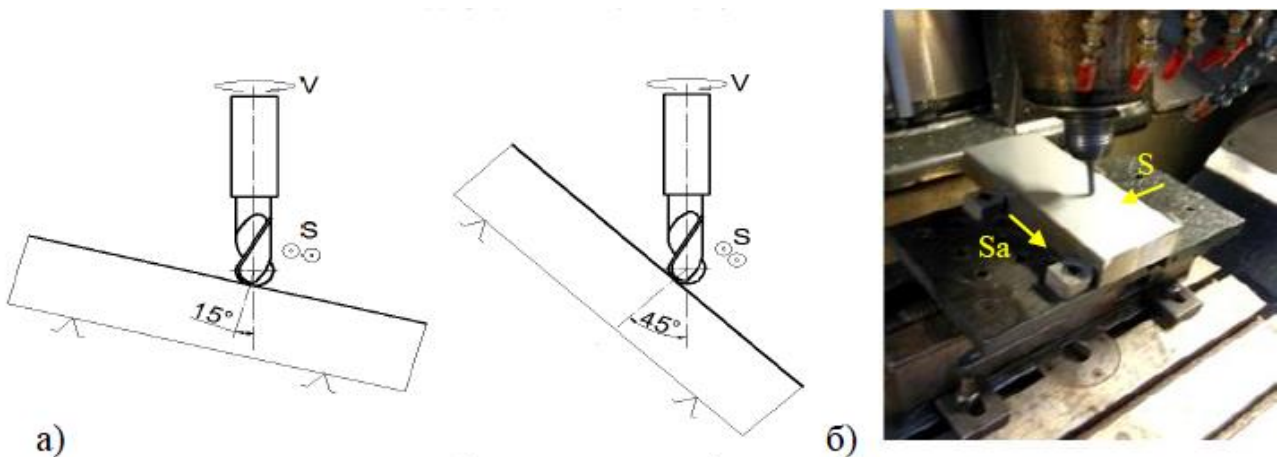


Рисунок 3. а) Схема базирования образца материала при изучении изнашивания инструмента, б) обработка образца материала (образец установлен под углом 15°)

Находятся следующие виды отклонений:

а) от настроечного размера. Находится как расстояние от размера выхода инструмента по программе обработки с ЧПУ по координате Z относительно нижней плоскости образца $L_{Н.Р.}$ до положения базовой плоскости $L_{П.}$:

$$\Delta_{Н.Р.} = L_{П.} - L_{Н.Р.} \quad (1)$$

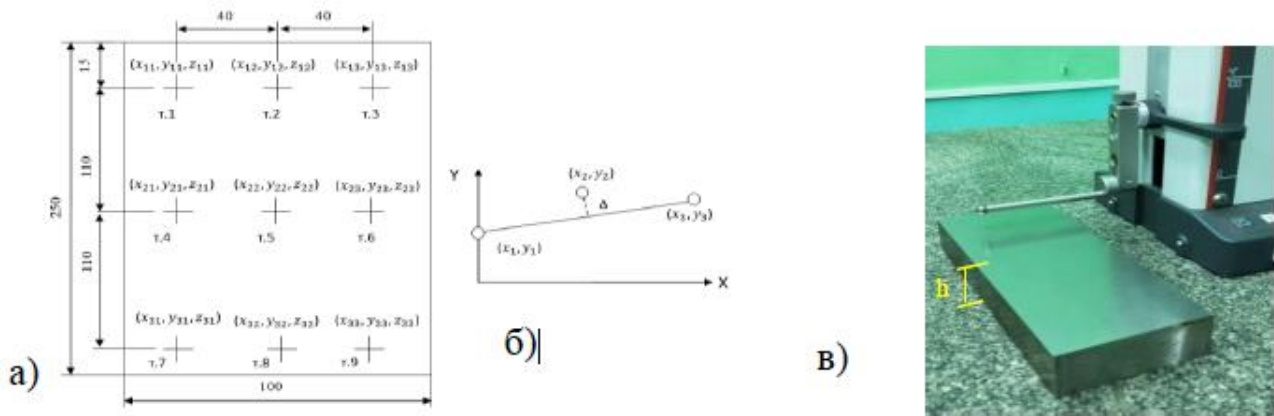


Рисунок 4. а) Схема расположения точек измерения, б) схема контрольных точек образца, в) схема нахождения отклонений от прямолинейности, в) измерение высотных размеров

б) от плоскостности. Находится как размах наибольших расстояний от найденного положения базовой плоскости до каждой измеренной точки обработанного образца:

$$\Delta_{\text{откл. пл.}} = \frac{Ax_{ij} + By_{ij} + Cz_{ij} + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2)$$

где A, B, C, D – коэффициенты уравнений плоскостей по данным координат измеренных точек определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} A &= y_{31}(z_{12} - z_{33}) + y_{12}(z_{33} - z_{31}) + y_{33}(z_{31} - z_{12}) \\ B &= z_{31}(x_{12} - x_{33}) + z_{12}(x_{33} - x_{31}) + z_{33}(x_{31} - x_{12}) \\ C &= x_{31}(y_{12} - y_{33}) + x_{12}(y_{33} - y_{31}) + x_{33}(y_{31} - y_{12}) \\ D &= -x_{31}(y_{12}z_{33} - y_{33}z_{12}) - x_{12}(y_{33}z_{31} - y_{31}z_{33}) \\ &\quad - x_{33}(y_{31}z_{12} - y_{12}z_{31}) \end{aligned} \quad (3)$$

а) от прямолинейности в направлении, параллельном рабочему ходу. Рассчитывается в направлении рабочего хода инструмента $\Delta_{\text{прод.}}$ для трех профилей в точках (1, 2, 3), (4, 5, 6), (7, 8, 9):

$$\Delta = \frac{Ax_2 + By_2 + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (4)$$

где A, B, C – коэффициенты уравнений прямых находятся по данным значений координат измеренных точек по следующим зависимостям:

$$A = \frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1}; B = -1; C = y_1 \quad (5)$$

б) от прямолинейности в направлении, перпендикулярном рабочему ходу $\Delta_{\text{перп.}}$. Рассчитывается в точках (1, 4, 7), (2, 5, 8), (3, 6, 9) находится по формуле (4).

Измерение шероховатости высотных параметров R_a, R_z и шаговых S, S_m выполнено в средней части образца вдоль и поперек траектории рабочего хода. Измерения параметров шероховатости выполнены профилографом М 400 ф. Mahr. Измерение фасок износа выполнялось, в программном пакте цифровой камеры Левенгук фотоизображений со стереомикроскопа МБС 2 (рис. 5а).

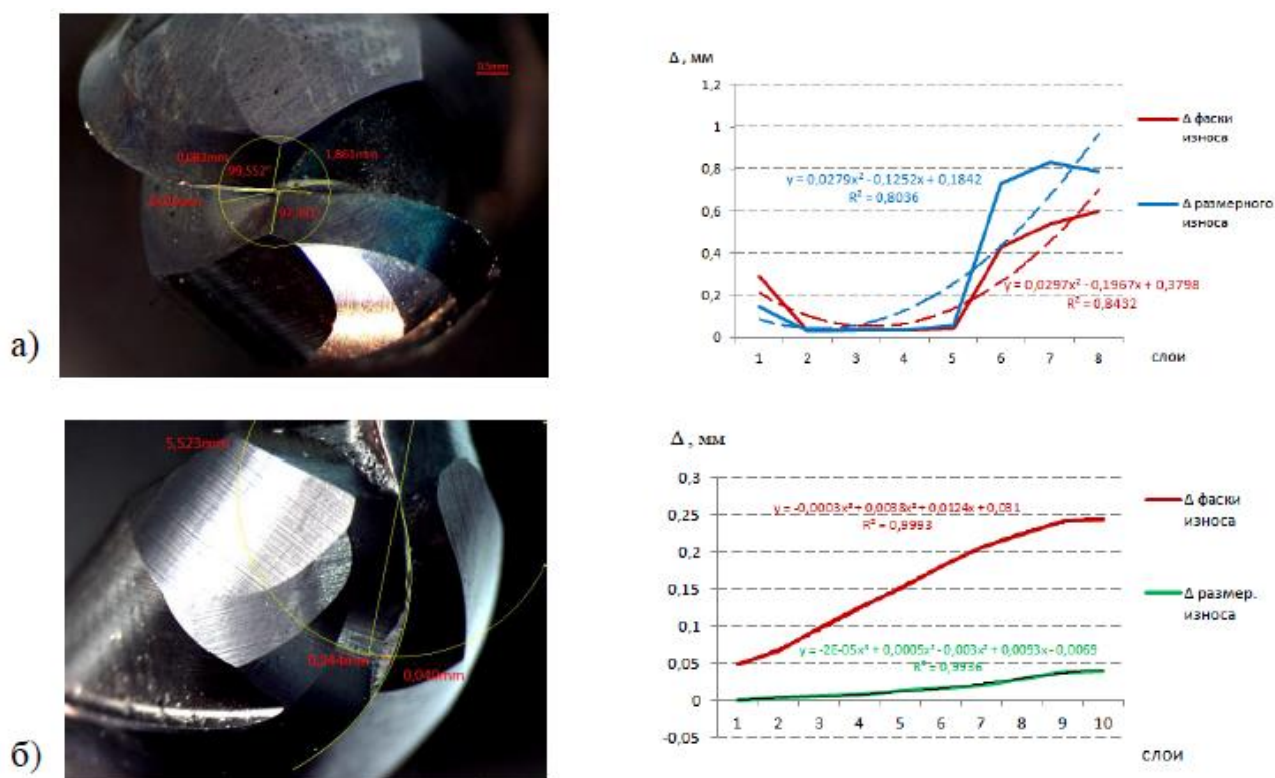


Рисунок 5. Фаски износа по задней поверхности сферических концевых фрез и зависимости износа от количества обработанных слоев материала после обработки под углом а) 15°, б) 45°

Далее приведены результаты испытаний фрезы, заточенной на пятикоординатном заточном станке с ЧПУ. На рис. 6–8 приведена аппроксимация графиков геометрических отклонений показателей точности и параметров шероховатости. Отклонения от плоскостности аппроксимируется полиномами третьей степени, отклонения от настроечного размера, отклонения от прямолинейности, а также изменение параметров шероховатости аппроксимируется линейными функциями. На основании аппроксимирующих функций разработаны регрессионные модели изменения геометрических показателей в периоде стойкости показателей точности (таблица 2). Приведенные в таблице зависимости применяются для расчета значений коррекции управляющей программы.

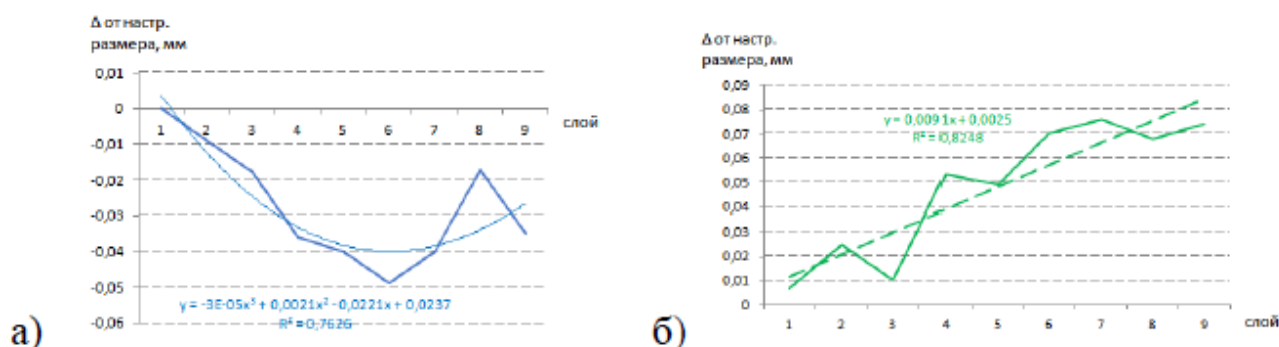


Рисунок 6. Графики изменения отклонений от настроечного размера при обработке образца материала: а) под углом 15°, б) под углом 45°

Износ фрезы приводит к отклонениям к концу периода стойкости при обработке образца под углом 15° от настроечного размера в пределах $0,05$ мм (см. рис. 6а). При обработке образца под углом 45° мм из-за увеличения податливости сферической фрезы вследствие износа режущей кромки фрезы и увеличения сил резания отклонение достигает величины в $0,08$ мм (см. рис. 6б). Компенсация данного вида отклонения в ходе обработки сферической концевой фрезой наиболее эффективна для улучшения точности обработанной поверхности гравюр штампа.

На рис. 7 приведены графики отклонений формы обработанной поверхности. Обработка образцов под углом 15° и 45° обеспечивает отклонения от плоскостности до $0,04$ мм. При обработке под углом 15° с увеличением износа фрезы отклонение от плоскостности уменьшается до величины $0,02$ мм (см. рис. 7а). при обработке под углом 45° после снятия восьмого слоя материала образца величина катастрофически увеличивается до $0,16$ мм после обработки 10-го слоя (см. рис. 7б).

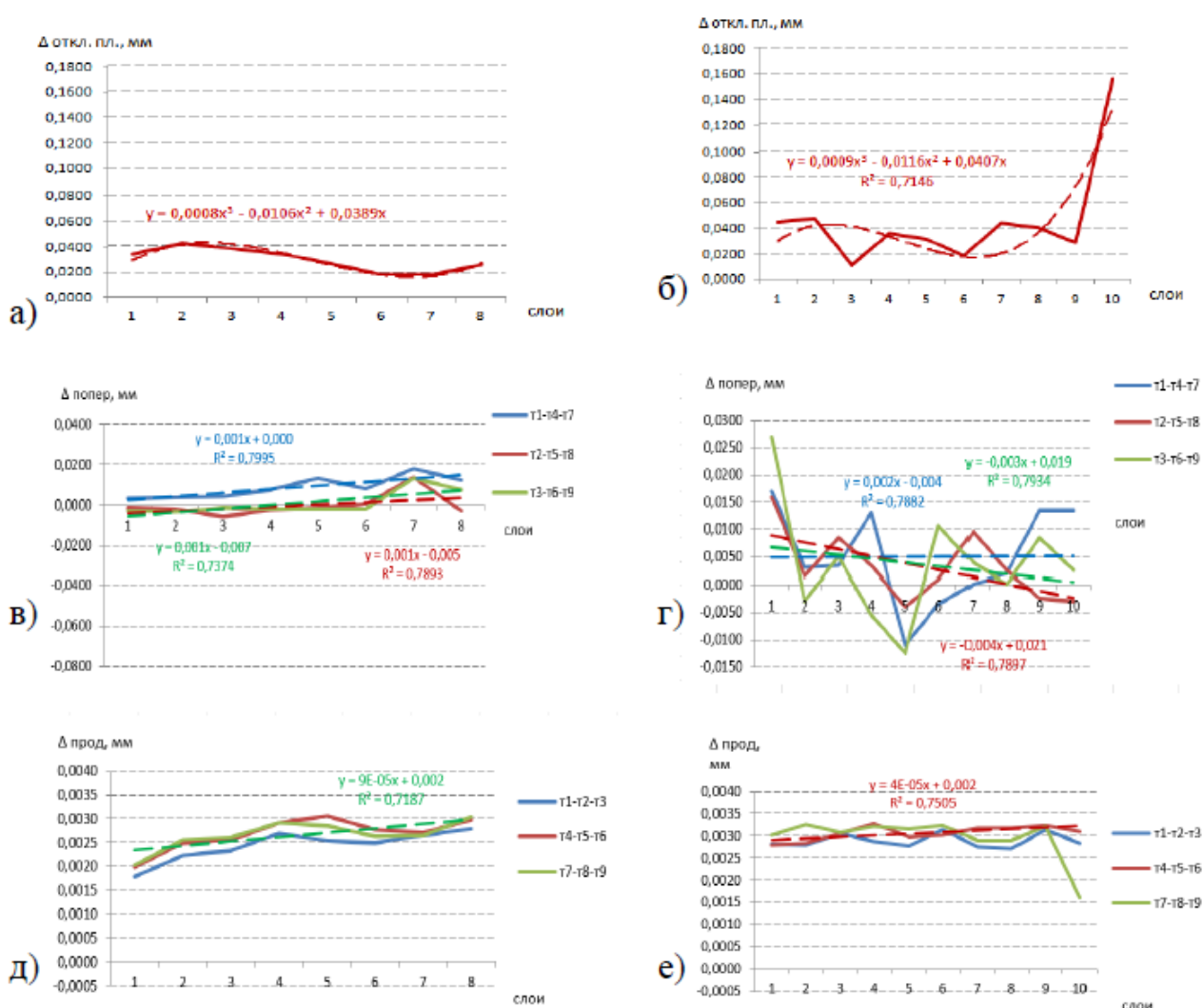


Рисунок 7. Графики изменение отклонений от плоскостности и прямолинейности при обработке образца материала: а, в, д) под углом 15° , б, г, е) под углом 45°

Для нахождения адекватных требований геометрической точности гравюр штампа на основании статистических данных геометрических параметров поковки, определены требования к предельному их положению. Исходя из условий снижения

изменчивости размеров поволоков установлен диапазон расположения профиля по разным элементам гравюр коренных и шатунных шеек, а также противовесов в пределах от 0,26 до 0,34 мм.

Аналогичные изменения графиков проявляются и при формировании отклонений от прямолинейности профиля в поперечном и продольном направлении (рис. 7в,г). Обеспечивается величина отклонений до 0,02 мм при обработке под углом 15° и до 0,06 мм при обработке под углом 45°. Как по рабочему ходу фрезы, так и в перпендикулярном направлении обеспечивается отклонение от прямолинейности до 0,03 мм. Для обеспечения минимальных отклонений от плоскостности необходимо ограничить сьем материала восемью слоями обработанной поверхности образца материала.

Таблица 2. Регрессионные модели изменения геометрических показателей и величины износа в периоде стойкости сферической концевой фрезы, заточенной на пятикоординатном заточном станке с ЧПУ

Геометрические показатели точности	Установ образца материала штампа под углами:	
	15°	45°
Отклонение от настроечного размера $\Delta_{настр.}$, мм.	$\Delta_{настр.} = -3E-05X^3 + 0,0021X^2 - 0,0221X + 0,0237$ $R^2 = 0,7626$	$\Delta_{настр.} = 0,0091X + 0,0025$ $R^2 = 0,8248$
Отклонение от плоскостности $\Delta_{откл.пл.}$, мм	$\Delta_{откл.пл.} = 0,0008X^3 - 0,0106X^2 + 0,0389X$ $R^2 = 0,93$	$\Delta_{откл.пл.} = 0,0009X^3 - 0,0116X^2 + 0,0407X$ $R^2 = 0,71$
Отклонение от прямолинейности вдоль РХ $\Delta_{пр.попер.}$, мм	$\Delta_{пр.попер.} = 0,0011 * X - 0,005$ $R^2 = 0,71$	$\Delta_{пр.попер.} = 0,0024 * X - 0,004$ $R^2 = 0,75$
Отклонение от прямолинейности перпендикулярно РХ $\Delta_{пр.прод.}$, мм	$\Delta_{пр.прод.} = 0,00009 * X + 0,0023$ $R^2 = 0,79$	$\Delta_{пр.прод.} = 0,00004 * X + 0,0029$ $R^2 = 0,80$
Параметры шероховатости		
Rz, мкм	$Rz = 1,2052 * X + 4,9401$ $R^2 = 0,78$	$Rz = 0,2251 * X + 2,6803$ $R^2 = 0,78$
Ra (Lc=0,8), мкм	$Ra = 0,0179 * X + 2,116$ $R^2 = 0,71$	$Ra = 0,0546 * X + 0,4453$ $R^2 = 0,77$
Sm, мкм	$Sm = -43,029 * X + 657,66$ $R^2 = 0,76$	$Sm = 20,139 * X + 222,33$ $R^2 = 0,70$
Параметры износа инструмента		
Фаска износа по задней поверхности $\Delta_{зп.}$, мм	$\Delta_{зп.} = -0,0279x^2 - 0,1252x + 0,1842$ $R^2 = 0,80$	$\Delta_{зп.} = -0,0003x^3 + 0,0038x^2 + 0,0124x + 0,031$ $R^2 = 0,99$
Размерный износ режущей кромки $\Delta_{р.и.}$, мм	$\Delta_{р.и.} = -0,0297x^2 - 0,1967x + 0,3798$ $R^2 = 0,84$	$\Delta_{р.и.} = -0,00005x^3 + 0,0007x^2 - 0,0008x + 0,0009$ $R^2 = 0,98$

где x – номер слоя, в слое $l_{рез.} = 166$ м.

Шероховатость поверхности (рис. 8) при установке образца под углом 15° Ra незначительно изменяется в периоде смены инструмента с 2 мкм до 2,5 мкм. При

обработке под углом 45° Ra изменяется от 0,5 мкм до 1 мкм. Уменьшение величины шероховатости связано с ухудшением процесса резания и лучшей геометрией режущего клина. Для минимизации значений Ra необходимо обрабатывать с большими углами установки образца материала. Путь резания режущей кромки составил величину 1666 м. Время резания для удаления 10-ти слоев составило 878,7 мин.

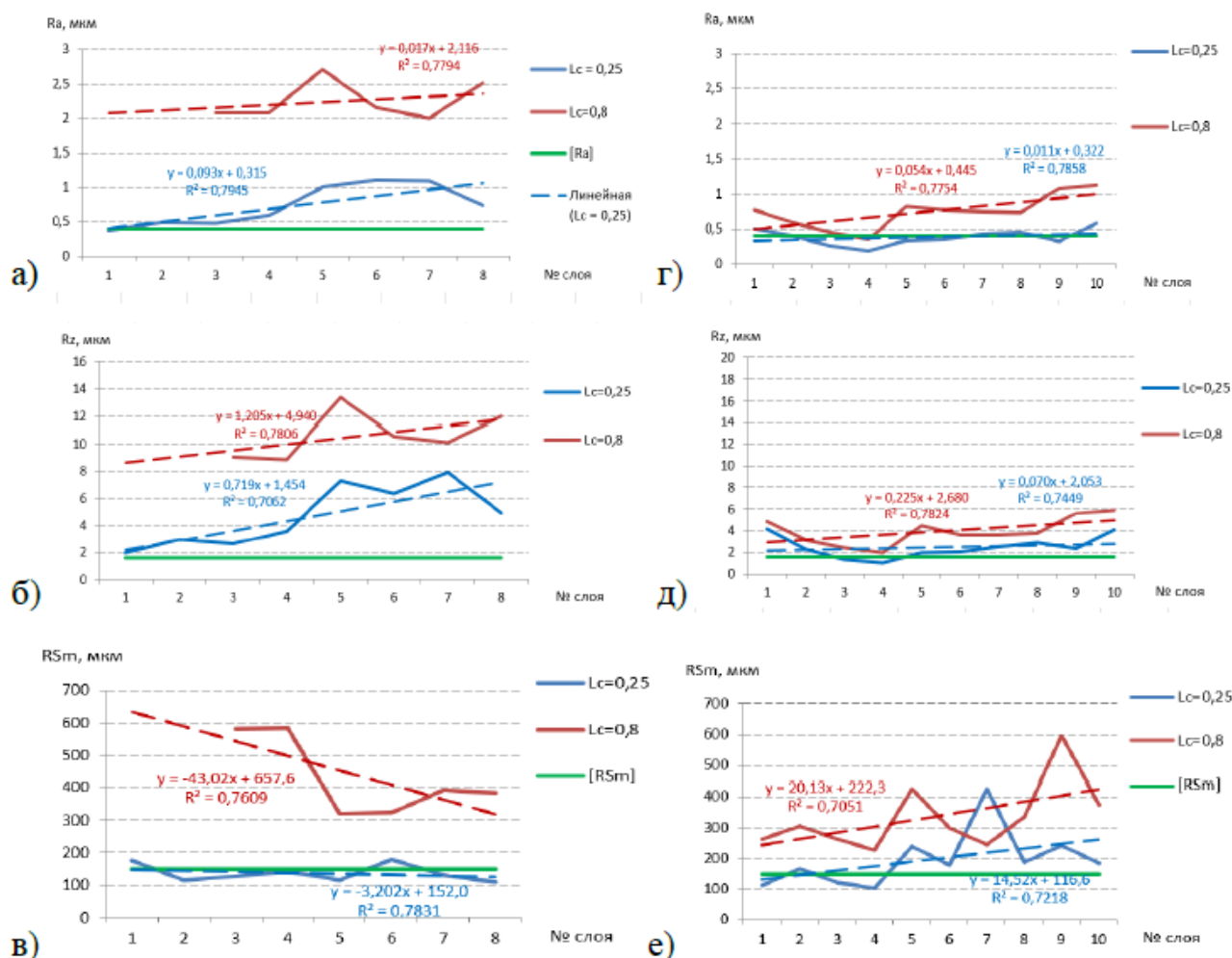


Рисунок 8 Графики изменения высотных и шаговых параметров шероховатости, полученные при обработке образца материала: а, б, в) под углом 15° , г, д, е) под углом 45°

Выявленные закономерности изменения геометрических отклонений в периоде стойкости инструмента используются для количественного сравнения инструментов различных производителей и расчета коррекций траекторий режущего инструмента.

В третьей главе согласно предложенной схеме на образцах материала штампа выполнены сравнительные стойкостные испытания различных концевых сфероцилиндрической фрез, заточенных на:

- специализированных заточных пятикоординатных станках с ЧПУ;
- подготовленных для заточки осевых инструментов пятикоординатных фрезерных станках с ЧПУ;
- заточных универсальных станках.

Приведена методика сравнения концевых сферических фрез по удельному изменению отклонений геометрических показателей точности, который характеризует минимальную изменчивость рассматриваемого отклонения геометрической точности. Удельное изменение находится как отношение величины изменения отклонений показателей точности к площади обработанной поверхности образца материала, либо длины пути резания.

Сравнение инструментов выполнено по всему комплексу показателей точности обрабатываемой поверхности заготовки. Дальнейшие формулы расчета удельного изменения отклонений приведены по отношению к обработанной площади образца материала.

Расчет показателя в периоде стойкости начинается с изменения начального $K_{Нр}$ и в периоде стойкости инструмента $K_{Тр}$. Оно рассчитано после работы инструмента в течение 0,05 от периода стойкости инструмента. Данное условие необходимо для обеспечения приработки инструмента и достижения им начальных стабильных условий резания.

$$K_{Нр} = \frac{\Delta_H}{S} \quad (6)$$

где Δ_H – начальное значение отклонения в периоде стойкости инструмента, мм.

S – площадь обработанной поверхности, m^2 .

$$K_{Тр} = \frac{\Delta_T}{S} \quad (7)$$

где S – площадь обработанной поверхности, m^2 ;

Δ_T – изменение отклонения в периоде стойкости инструмента, мм.

$$\Delta_T = \Delta_{Тн} - \Delta_{Тк} \quad (8)$$

где $\Delta_{Тн}$ – отклонение показателя в начале периода стойкости инструмента мм;

$\Delta_{Тк}$ – отклонение показателя в конце периода стойкости инструмента, мм.

Для показателей удельного изменения отклонений $K_{Нр\Sigma}$ в начальный период стойкости инструмента значение определяется по следующей зависимости:

$$K_{Нр\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Нрi} \cdot b_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (9)$$

где b_i – коэффициенты значимости геометрических показателей точности для обеспечения лучшей функции назначения сопряжения.

Для показателей удельного изменения отклонений показателей качества в периоде стойкости инструмента $K_{Тр\Sigma}$ значение находится по следующей зависимости:

$$K_{Тр\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Трi} \cdot b_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (10)$$

где b_i – коэффициент значимости единичного показателя точности для обеспечения лучшей функции обрабатываемой поверхности гравюры штампа;

n – количество отклонений геометрической точности.

Суммарное удельное изменение отклонений показателей качества $K_{\Sigma РК}$ находится по следующей формуле:

$$K_{\Sigma РК} = K_{Нр\Sigma} + K_{Тр\Sigma} \quad (11)$$

где $K_{Нр\Sigma}$ – суммарное начальное удельное изменение отклонений в периоде стойкости фрезы:

$$K_{Нр\Sigma} = \sum_{i=1}^n K_{Нрi} \quad (12)$$

$K_{Тр\Sigma}$ – суммарное удельное изменение отклонений в периоде стойкости фрезы:

$$K_{Тр\Sigma} = \sum_{i=1}^n K_{Тр\Sigma} \quad (13)$$

Чем меньше этот показатель, тем инструмент обеспечивает меньшую изменчивость отклонений, и как следствие более высокую точность обрабатываемой поверхности деталей.

Испытания инструментов для их сравнения могут быть совмещены с обработкой заготовок на рабочих местах, либо в результате испытаний на заранее изготовленных образцах из материала по приведенной выше методике. В работе показаны результаты сравнения концевых фрез, заточенных на заточном и подготовленном для заточки фрезерном пятикоординатном станках с ЧПУ, а также универсально-заточных станках. Сравнение выполнено по данным стойкостных испытаний инструментов.

На рис. 9 приведены диаграммы удельного изменения отклонений геометрических показателей по начальным значениям. Для различных отклонений показателей точности предпочтительность применения того или иного инструмента различная. Например, по начальным значениям удельных отклонений от настроечного размера фрезы ф. Sandvik, заточенной на пятикоординатном заточном станке с ЧПУ превосходит фрезы, перетачиваемые на специально подготовленном пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ и на универсальном оборудовании. В периоде стойкости изменение отклонений фрезы Sandvik и фрезы переточенной на пятикоординатном станке с ЧПУ выравниваются, а отклонения геометрических показателей образцов, обработанных фрезой, заточенной на универсальном оборудовании значительно выше.

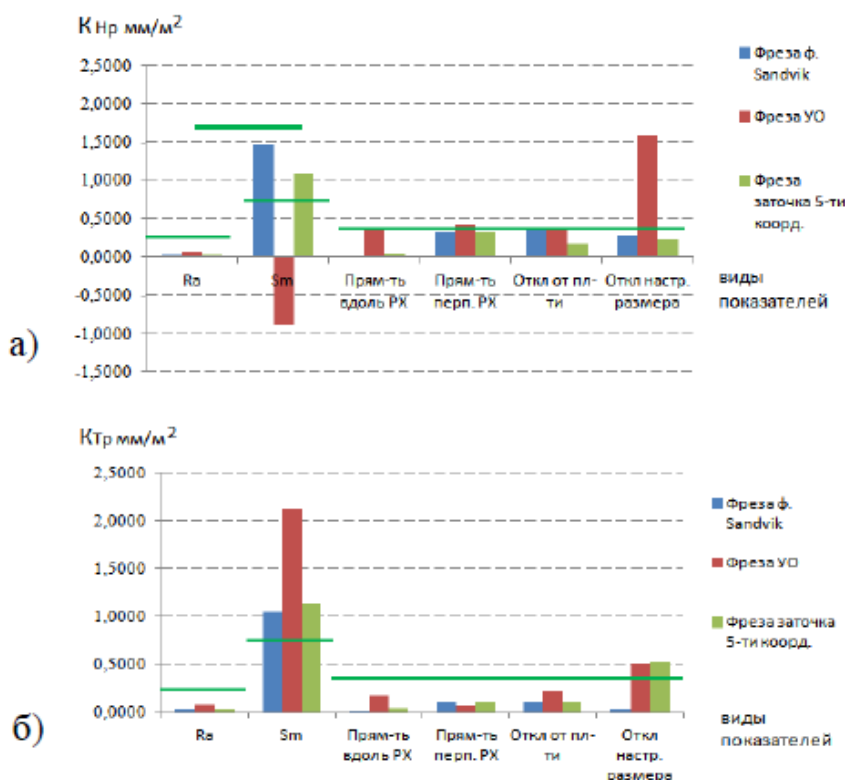


Рисунок 9. Гистограммы значений удельного изменения отклонений в периоде стойкости концевых сферических фрез: а) начальные, б) в периоде стойкости

По начальным значениям шагового параметра шероховатости S_m фрезы ф. Sandvik и переточенная на специально подготовленном пятикоординатном станке равнозначны, значительно уступает им фреза, заточенная на универсальном оборудовании, но в периоде стойкости износ фрезы, заточенной на универсальном оборудовании, приводит к уменьшению шагового параметра, при нарастании этого параметра по другим сравниваемым фрезам.

Для окончательного выбора того или иного инструмента необходимо обеспечить суммирование удельного изменения отклонений с учетом их значимости в обеспечении функционального назначения гравюр штампов. На рис. 10 приводится гистограмма суммарного удельного изменения отклонений показателей точности. В результате по суммарному удельному отклонению лидирует фреза ф. Sandvik с удельным суммарным изменением отклонений показателей в $0,35 \text{ мм/м}^2$. С небольшим отрывом далее следует фреза без покрытия, заточенная на фрезерном пятикоординатном станке с ЧПУ с суммарным удельным изменением отклонений показателей точности $0,44 \text{ мм/м}^2$. Наименее результативной признана фреза, заточенная на универсальном заточном оборудовании с удельным суммарным изменением отклонений показателей точности в $0,93 \text{ мм/м}^2$.

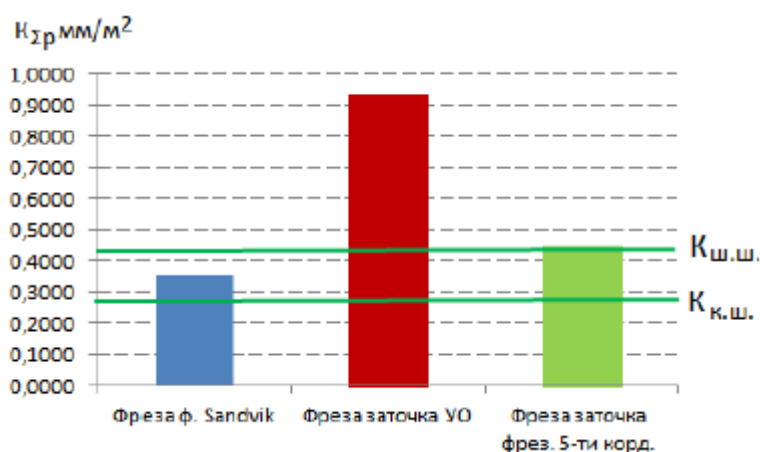


Рисунок 10. Гистограммы суммарных значений удельного изменения отклонений в периоде стойкости концевых сферических фрез

С учетом затрат на переточку сферических фрез для чистового фрезерования более предпочтительной является фреза, заточенная в цеховых условиях на специально подготовленном пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ.

В четвертой главе приведена методика управления качеством чистового фрезерования поверхностей гравюр крупногабаритных штампов на основе найденных закономерностей геометрических отклонений, полученных в ходе стойкостных испытаний инструмента.

В процессе обработки гравюры вследствие упругих отжатий рабочая часть фрезы отклоняется от начального положения, соответствующего запрограммированной координате рабочего хода. В дальнейшем по мере увеличения износа участков режущих кромок нарастают силы резания, изменяются упругие отжатия, а также отклонения, связанные с вибрациями. Изменяются и параметры шероховатости обработанной поверхности (рис. 11а). Регулирование

геометрической точности реализовано путем нахождения координат наиболее вероятного профиля обрабатываемых гравюр штампа. При таком подходе определяются вероятные максимальные и минимальные значения координат положения профиля.

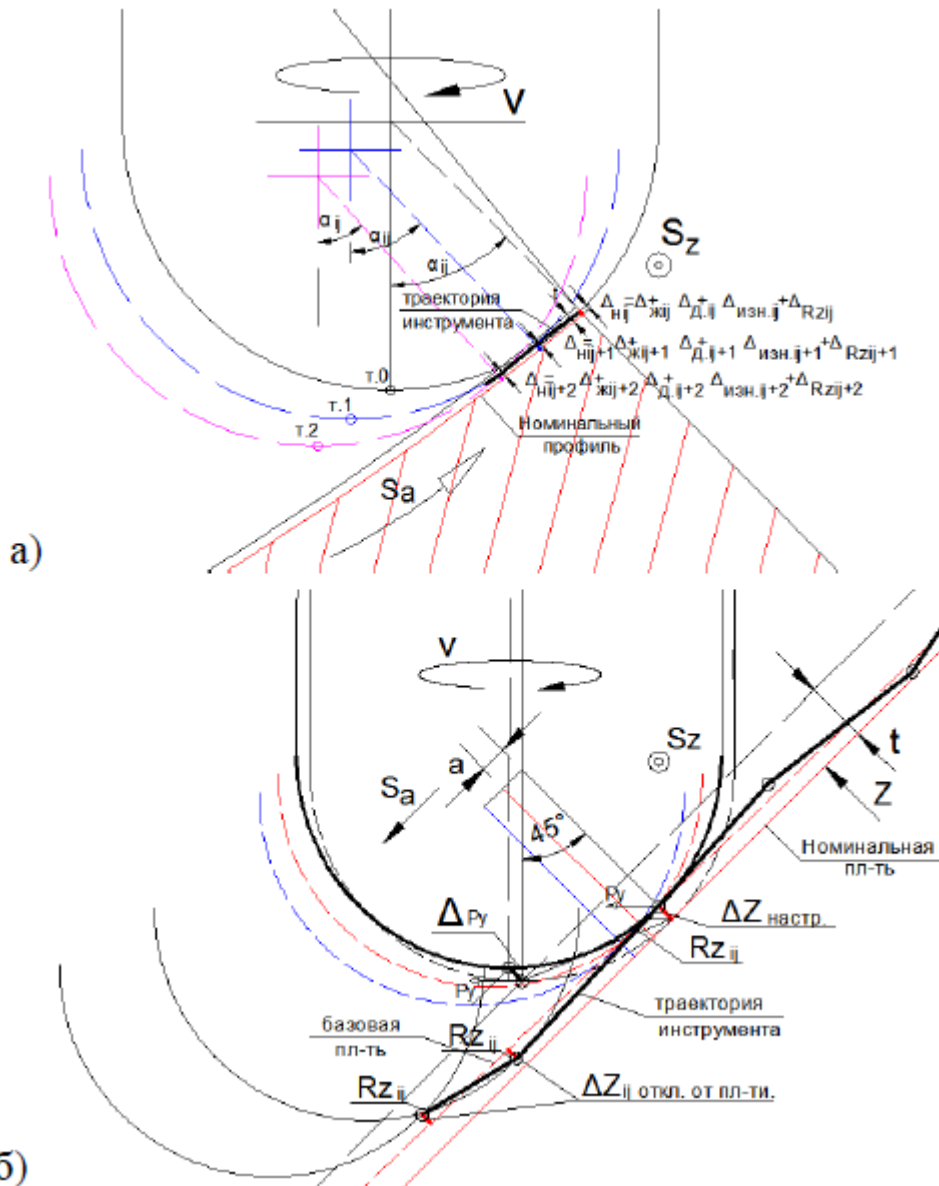


Рисунок 11. а) Схема отклонений процесса фрезеровании гравюры штампа, б) схема образования геометрических отклонений обрабатываемого образца материала

Максимальная граница рассчитываются для точки по длине пути резания, по следующей математической зависимости:

$$Z_{ij \text{ макс.}} = Z_{настр.} + f(l, \Delta_{станкаij}) + f(l, \Delta Z_{настр.ij}) + f\left(l, \frac{\Delta_{откл.от пл-тиij}}{2}\right) + fl(Rz_{ij}) \quad (14)$$

где i – номер точки вдоль рабочего хода;

j – номер строки рабочего хода;

$\Delta_{станкаij}$ – погрешность станочных модулей, мм;

$Z_{настр.ij}$ – настроечный размер, мм;

$\Delta Z_{\text{настр.}ij}$ – отклонение от настроечного размера, мм;

$\Delta_{\text{откл.от пл-ти } ij}$ – отклонение от плоскостности, мм;

Rz_{ij} – отклонение профиля шероховатости, мм.

Минимальная граница положения точек профиля находится по следующей зависимости:

$$Z_{ij \text{ мин.}} = Z_{\text{настр.}} + f(l, \Delta_{\text{станка}ij}) - f(l, \Delta Z_{\text{настр.}ij}) - f\left(l, \frac{\Delta_{\text{откл.от пл-ти}ij}}{2}\right) - fl(Rz_{ij}) \quad (15)$$

Чтобы адекватно рассчитать величину коррекции, необходима еще математическая зависимость изменения координат положения профиля от погрешностей станочных модулей $f(l, \Delta_{\text{станка}})$. Эта зависимость может быть найдена в результате систематического диагностирования точности модулей станочной системы. Указанные выше геометрические отклонения образца являются следствием строго определенных факторов процесса. Причинами отклонения настроечного размера $\Delta Z_{\text{настр.}ij}$ являются отклонения, связанные с податливостью фрезы, отклонения $\mp\left(\frac{\Delta_{\text{откл.от пл-ти}ij}}{2} + Rz_{ij}\right)$ являются следствием вибраций и износа фрезы (рис. 11б). Методика позволяет учесть погрешности станочной системы $\Delta_{\text{станка } ij}$. Погрешность станочных модулей по пути резания $f(l, \Delta_{\text{станка}ij})$ находится путем периодического диагностирования геометрической точности станка.

Координаты положения базовой плоскости на участке поверхности гравюры штамповых вставок находится по следующей формуле:

$$\Delta_{Hij} = \frac{f(l, Z_{ij \text{ макс.}})_{\alpha \text{ макс.}} - f(l, Z_{ij \text{ мин.}})_{\alpha \text{ мин.}}}{2} \quad (16)$$

где $(Z_{ij \text{ макс.}})_{\alpha \text{ макс.}}$ – отклонения профиля при обработке образца материала с максимальным углом наклона концевой фрезы;

$(Z_{ij \text{ мин.}})_{\alpha \text{ мин.}}$ – отклонения профиля при обработке образца материала с минимальным углом наклона концевой фрезы.

В приведенном выше примере $(Z_{ij \text{ макс.}})_{\alpha \text{ макс.}}$ соответствует обработке при угле наклона фрезы (образца) в 45° , $(Z_{ij \text{ мин.}})_{\alpha \text{ мин.}}$ в 15° .

Согласно требованиям потребителя у поковок коленчатого вала ужесточаются требования к ним относится поверхность коренных и шатунных шеек и наружная поверхность противовесов. Применительно к гравюрам по коренным и шатунным шейкам необходимо обеспечить допуск на радиальный размер в 0,3 мм.

Лучшим способом фрезерной обработки гравюр штампов является способ, исключаящий в процессе срезания припуска контакт участка режущей кромки фрезы с нулевой скоростью резания. Рассмотрим пример обработки гравюр коленчатого вала с поворотом обрабатываемой штамповой вставки с угла 45° до 15° на четырех координатном станке с ЧПУ.

На рис. 12 приведены границы положения точек профиля при различных углах наклона фрезы при обработке плоских образцов материала, найденные по формулам (14), (15) и (16). При обработке образца под углом 45° преобладают упругие отжатия фрезы, приводящие к отклонениям в положительной зоне относительно номинального положения профиля. Максимальная величина отклонений составляет величину до 0,15 мм на длине 1600 м. Отклонения в

зоне обработки периферийной кромки в меньшей степени связано с упругими отжатыми фрезы. В этой зоне преобладает износ режущей кромки, приводящий к отклонениям преимущественно в зоне отрицательных значений. Величина отклонений составляет до 0,07 мм на длине пути резания 1666 м. В результате обеспечение допуска на положение профиля по всей поверхности гравюр штампа в 0,3 мм невозможно. Прямолинейность перемещений суппортов станка не превышает по координатам X и Y 0,005 мм/100 мм и не вносит заметный вклад в найденные закономерности износа.

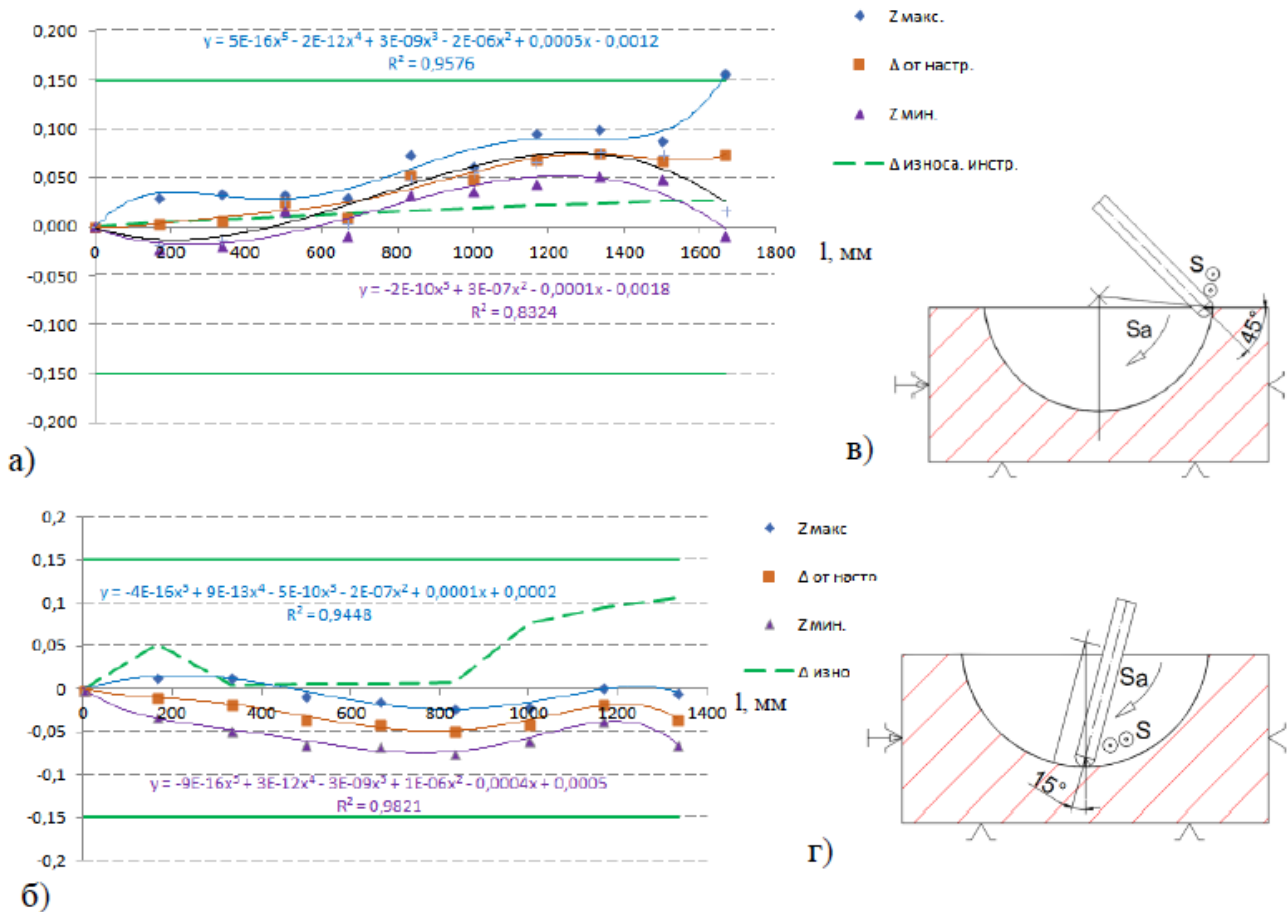


Рисунок 12. Отклонения размеров плоского образца материала при обработке концевой сферической фрезой под углом: а) 45° и б) 15°, положение концевой фрезы при обработке гравюры штампа: в) 45° и г) 15°

В таблице 3 приведены степенные формулы для нахождения границ отклонений профиля гравюр штамп и отклонений базовой поверхности. При обработке плоского образца материала изнашивается один участок фрезы. Обработка поверхностей гравюры штампа осуществляется переменным взаимодействием различных участков режущей кромки с припуском, поэтому путь резания, найденный в результате исследования износа фрез на плоских образцах необходимо скорректировать в большую сторону. При обработке коренных и шатунных шеек каждая точка кромки на участке режущей кромки изнашивается равномерно, следовательно, увеличение пути резания можно определить по соотношению изнашиваемой и не изнашиваемой задней поверхности фрезы:

$$L = L_{\text{прин.}} * K_{\text{п.р.}} \quad (17)$$

где $L_{\text{прин.}}$ – принятое значение пути резания по данным стойкостных испытаний плоских образцов материала, м;

$K_{\text{п.р.}}$ – коэффициент коррекции пути резания в условиях переменности резания участками режущей кромки:

$$K_{\text{п.р.}} = \frac{S_{\text{уч-ка з.п.}}}{S_{\text{з.п. } \alpha \text{ макс.}} + S_{\text{з.п. } \alpha \text{ мин.}}} \quad (18)$$

где $S_{\text{уч-ка з.п.}}$ – площадь участка задней поверхности, участвующей в процессе срезания припуска, мм².

$S_{\text{з.п. } \alpha \text{ макс}}$ – площадь очага износа по задней поверхности на максимальном угле наклона образца материала, мм².

$S_{\text{з.п. } \alpha \text{ мин}}$ – площадь очага износа по задней поверхности на минимальном угле наклона образца материала, мм².

Таблица 3. Формулы нахождения максимальных и минимальных границ отклонений поверхности плоского образца материала и базовой плоскости по пути резания концевой сферической фрезы $\varnothing 8$ мм с покрытием на основе TiN

Границы отклонений профиля	Угол наклона фрезы	Степенная зависимость	Надежность аппроксимации
Минимальная	45°	$Z_{\text{мин.}} = -2\text{E-}10L^3 + 3\text{E-}07L^2 - 0,0001L - 0,0018$	$R^2 = 0,8324$
	15°	$Z_{\text{мин.}} = -9\text{E-}16L^5 + 3\text{E-}12L^4 - 3\text{E-}09L^3 + 1\text{E-}06L^2 - 0,0004L + 0,0005$	$R^2 = 0,9821$
Максимальная	45°	$Z_{\text{макс.}} = 5\text{E-}16L^5 - 2\text{E-}12L^4 + 3\text{E-}09L^3 - 2\text{E-}06L^2 + 0,0005L - 0,0012$	$R^2 = 0,9576$
	15°	$Z_{\text{макс.}} = -4\text{E-}16L^5 + 9\text{E-}13L^4 - 5\text{E-}10L^3 - 2\text{E-}07L^2 + 0,0001L + 0,0002$	$R^2 = 0,9448$
Базовой плоскости	45°-15°	$\Delta_{\text{Н}} = 5\text{E-}23 L^6 - 7\text{E-}18 L^5 + 2\text{E-}14 L^4 + 2\text{E-}11 L^3 - 6\text{E-}08 L^2 + 2\text{E-}05 L - 6\text{E-}05$	$R^2 = 1$

Для рассматриваемого примера обработки сферической концевой фрезой $K_{\text{п.р.}}=2,03$. Компенсация отклонений базовой плоскости позволяет обеспечить улучшение геометрической точности обрабатываемой поверхности гравюры штампа. Для этого можно применить следующие варианты коррекции программы с ЧПУ на величину отклонений базовой поверхности, применительно:

- к штампу;
- отдельным поверхностям гравюр штампа;
- для каждого рабочего хода инструмента.

По найденным регрессионным моделям минимальных и максимальных границ нахождения профиля по формуле (16) и (17) рассчитаны значения отклонений профиля от угла наклона фрезы по длине пути резания концевой сферической фрезы. Полученные поверхности приведены на рис. 13. На рис. 14 приведена поверхность и двухмерный график положения базовой плоскости на участке режущей кромки от 15° до 45°.

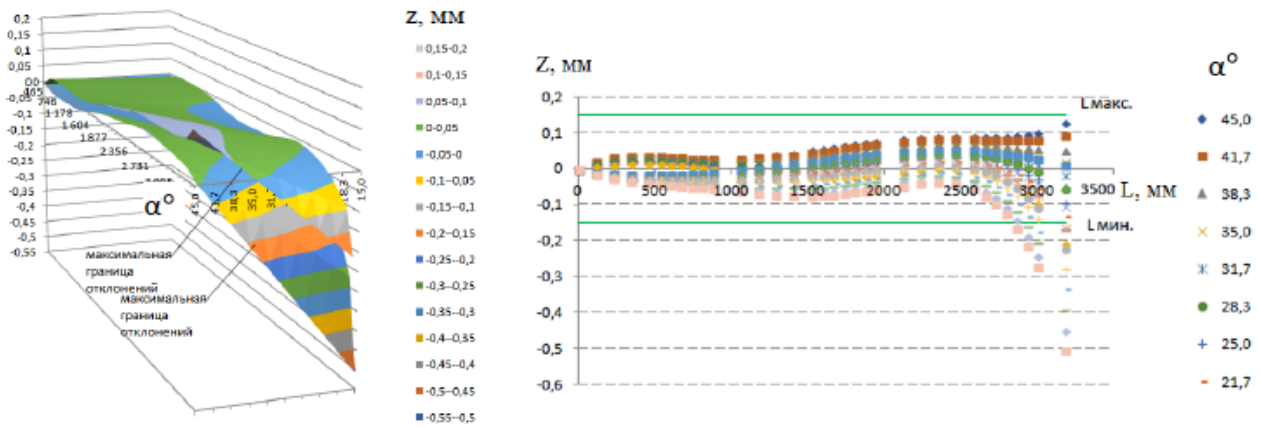


Рисунок 13. Поверхность (слева) и график (справа) максимальных и минимальных отклонений поверхности гравюры штамповой вставки в зависимости от угла наклона концевой сферической фрезы в интервале от 15° до 45°

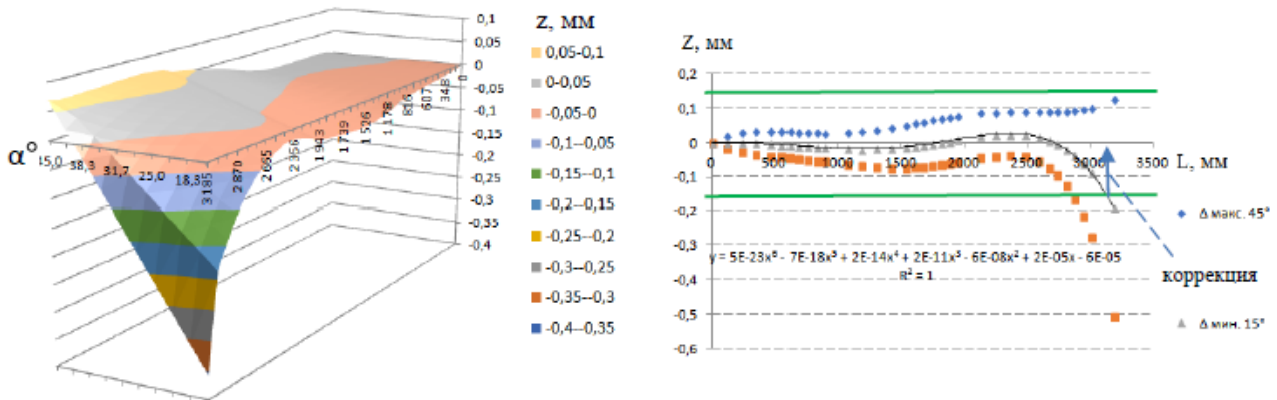


Рисунок 14. Поверхность отклонений базовой плоскости гравюры штамповой вставки (слева) и график вероятного положения профиля гравюры штампа при угле 15° и 45° (справа)

По этим границам находятся значения отклонений базовой плоскости от номинального положения обрабатываемой поверхности гравюры штампа, график и уравнение степенной функции, аппроксимирующей график. Для расчета значений коррекций для каждой поверхности гравюры штампа рассчитан путь резания, необходимый для их обработки, после чего для каждой гравюры по пути резания до достижения предельного их значения рассчитаны значения коррекции траектории концевой фрезы (рис. 15б).

Для подтверждения результативности коррекций траектории инструмента при фрезеровании гравюр штампов концевыми сферическими фрезами была выполнена экспериментальная обработка образцов гравюр коренных и шатунных шеек штампов на пятикоординатном станке с ЧПУ с последующим их измерением и обработкой данных измерений. Найденные отклонения положения профилей гравюр, обработанных образцов, отличаются от рассчитанных теоретически не более, чем на 15 %. Коррекция по штампам эффективна при малых изменениях отклонений базовых поверхностей до 2700 м пути резания и 5 обработанных штампов.

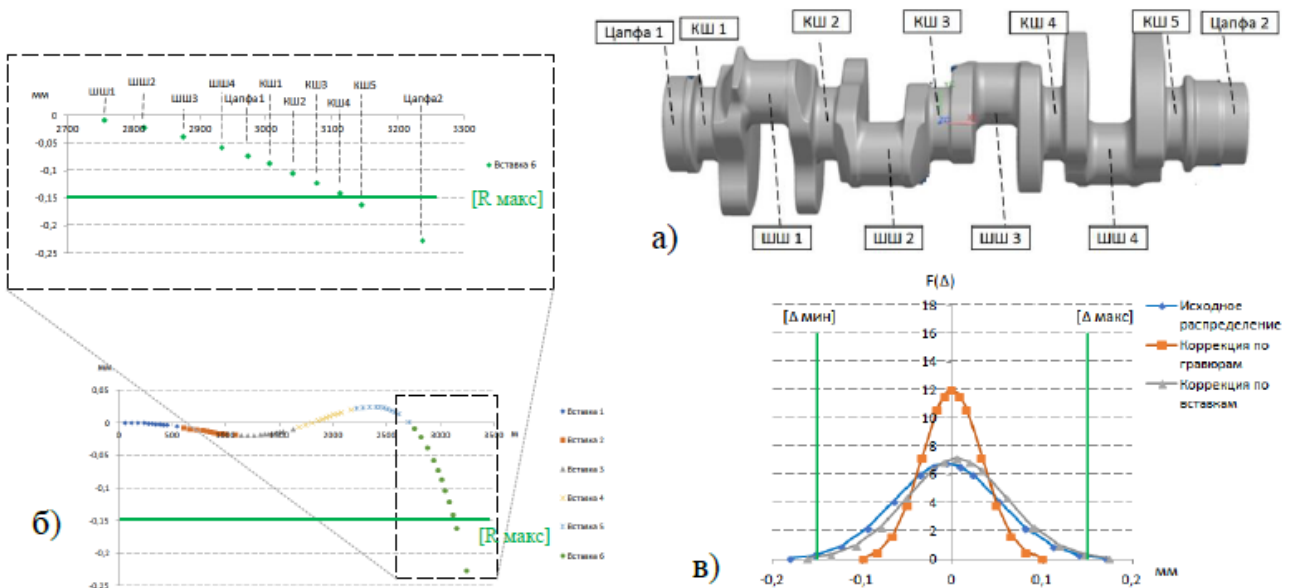


Рисунок 15. Элементы поковки коленчатого вала (а), графики коррекции по гравюрам штампа (б), нормальное распределение при различных вариантах коррекции (в)

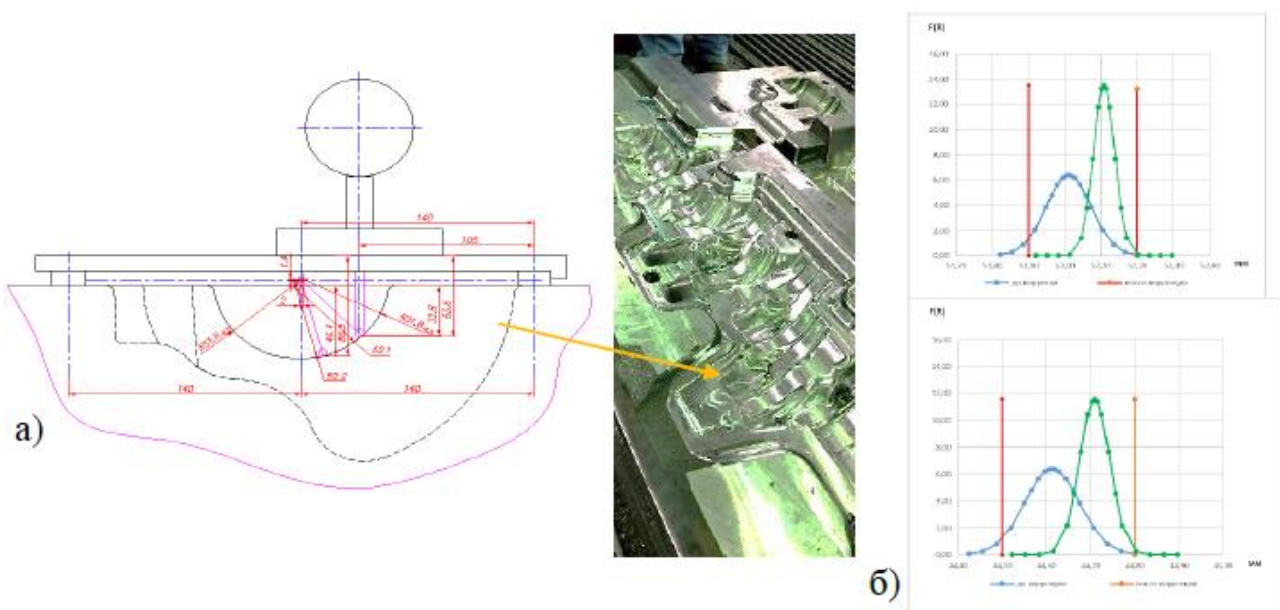


Рисунок 16. Улучшение качества чистового фрезерования поверхности гравюр штампа: а) схема измерений по гравюре коренной шейки, б) нормальное распределение до и после коррекции программы с ЧПУ обработки гравюр коренных и шатунных шеек

Для подтверждения результативности коррекций траектории инструмента при фрезеровании гравюр штампов концевыми сферическими фрезами была выполнена экспериментальная обработка образцов гравюр коренных и шатунных шеек штампов на пятикоординатном станке с ЧПУ с последующим их измерением и обработкой данных измерений. Найденные отклонения положения профилей гравюр, обработанных образцов, отличаются от рассчитанных теоретически не более, чем на 15 %. Коррекция по штампам эффективна при малых изменениях

отклонений базовых поверхностей до 2700 м пути резания и 5 обработанных штампов.

Коррекция по отдельным поверхностям гравюр коренных и шатунных шеек штампа благодаря компенсации систематической погрешности износа обеспечивает двукратное улучшение геометрической точности (рис. 15в) как по стабильности (индекс стабильности C_p увеличивается с 0,85 до 1,5), так и настроенности (C_{pk1} увеличивается с 0,88 до 1,51, C_{pk2} увеличивается с 0,82 до 1,51). Геометрическая точность обеспечивается во всем периоде стойкости инструмента. При этом может быть обработано до 6 штампов. Статистическая обработка данных измерений поверхностей гравюр штампов (рис. 16б), обработанных в штампово-инструментальном корпусе разработанным контрольным приспособлением, подтвердила результативность выполненной коррекции.

Для автоматизации расчета разработан программный модуль в среде Microsoft Excel, позволяющий на основе данных измерений образцов материала рассчитать математические полиномы расчета коррекций гравюр штампа.

Испытание различных сферических концевых фрез по разработанной методике выполняется персоналом лаборатории резания Кузнечного завода ПАО КАМАЗ. Коррекция применяется при обработке на фрезерных обрабатывающих центрах с ЧПУ в штампово-инструментальном корпусе гравюр цапф, коренных и шатунных шеек штампов горячей объемной штамповки 5-ти типов поковок коленчатых валов шестицилиндровых двигателей большегрузных автомобилей мощностью от 260 до 460 л.с. Годовой объем выпуска составляет около 65 тыс. поковок. Экономический эффект от улучшения точности поковок составил величину в 2,5 млн. руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании решена важная научная задача – разработан метод повышения качества чистовой фрезерной обработки рабочих поверхностей штампов горячей объемной штамповки крупногабаритных поковок. В результате выполненных исследований получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. Разработана экспериментальная методика получения на плоских образцах материала штампа закономерностей изменения геометрических показателей обрабатываемых поверхностей в периоде стойкости концевых сферических фрез. Она позволяет найти наиболее вероятные границы положения профиля обрабатываемых гравюр штампов для последующего расчета значений корректирующих смещений рабочих ходов, улучшающих точность чистового фрезерования.

2. Стойкостные испытания концевых сферических фрез диаметром 8 мм с износостойким покрытием на основе TiN установили, что для обеспечения допуска чистового фрезерования поверхностей гравюр коренных и шатунных шеек штампов в 0,3 мм путь резания составил 3300 м, для фрез, заточенных на пятикоординатном заточном станке путь резания, 2700 м для фрез, заточенных на специально подготовленном пятикоординатном станке и 1200 м для фрез, заточенных на универсальном заточном оборудовании.

3. В результате размерных стойкостных испытаний инструмента установлено влияние изменения угла ориентации концевых фрез диаметром 8 мм с

шероховатость поверхности, обработанной чистовым фрезерованием. Увеличение угла наклона фрезы с 15° до 45° на пути резания в 3100 м приводят к увеличению отклонений от плоскостности с 0,04 мм до 0,08 мм. Отклонений профиля в направлении перпендикулярном направлению подачи с 0,02 до 0,04 мм, и их неизменности в направлении подачи на уровне 0,003 мм, уменьшению высотного параметра шероховатости Ra с 2,5 мкм до 1 мкм.

4. Систематизированы и экспертно проранжированы характеристики точности гравюр штампа. Наиболее значимыми для геометрической точности поковок являются отклонения базовой поверхности от настроечного размера (коэффициент значимости 0,3) и отклонение от плоскостности (коэффициент значимости 0,15), шероховатость поверхности (коэффициент значимости 0,3) – обеспечивающая стойкость штампа.

5. Разработана методика количественного сравнения концевых сферических фрез для обеспечения точности и стойкости штампов с учетом значимости отдельных показателей точности для обеспечения качества чистового фрезерования поверхности гравюр штампа, позволяющая выбрать оптимальную концевую сферическую фрезу, обеспечивающую улучшение точности диаметральных размеров поковок до 1,2 раза.

6. Выполнено сравнение концевых сферических фрез диаметром 8 мм с износостойким покрытием на основе TiN, заточенных на пятикоординатном заточном станке с ЧПУ, специально подготовленным для заточки концевого инструмента пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ и универсальном заточном оборудовании по критерию суммарного удельного изменения износа с учетом значимости единичных геометрических показателей точности. Найденные значения суммарного удельного изменения износа фрез $0,35 \text{ мм/м}^2$, $0,44 \text{ мм/м}^2$ и $0,93 \text{ мм/м}^2$ свидетельствуют о приемлемости геометрической точности фрез, заточенных в цеховых условиях на специально подготовленном для заточки концевого инструмента фрезерном пятикоординатном станке с ЧПУ.

7. Разработан метод улучшения качества чистового фрезерования концевыми сферическими фрезами диаметрального размера 8 мм с износостойким покрытием на основе TiN гравюр штампов горячей объемной штамповки крупногабаритных поковок, компенсирующая систематическую погрешность износа фрез. Достигнуто увеличение индекса C_p с 0,85 до 1,5, C_{pk} с 0,88 до 1,51, что свидетельствует об улучшении геометрической точности гравюр штампа до 1,7 раза по сравнению с чистовым фрезерованием без компенсации износа инструмента.

8. Результаты исследования используются в образовательном процессе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета» и лаборатории резания Автомобильного завода для сравнения концевых фрез различных производителей инструмент.

9. Программный модуль используется в инструментальном производстве Кузнечного завода ПАО КамАЗ в операциях механической обработки гравюр штампов горячей объемной штамповки тяжелых поковок коленчатых валов 5-ти типов поковок коленчатых валов шести и восьмицилиндровых дизельных двигателей большегрузных автомобилей мощностью от 260 до 460 л.с. Годовой

объем выпуска составляет около 65 тыс. поковок. Экономический эффект от улучшения геометрической точности поковок составил 1,5 млн. руб. в год.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

Журналы, включенные в перечень ведущих рецензируемых журналов и научных изданий, утвержденных президиумом ВАК

1. Сафарова, Л.Р. Затраты времени как основа расчета объемов попутных продуктов, отходов и выбросов в операциях формообразования / Л.Р. Сафарова, **Г.Ф. Глинина** // Вестник СГТУ. – 2013. – № 2(71). – С. 95-97.
2. Сафарова, Л.Р. Планирование энергетических затрат в производственных заданиях обработки деталей на станках с ЧПУ / Л.Р. Сафарова, А.Г. Кондрашов, Д.Т. Сафаров, **Г.Ф. Глинина** // СТИН. – 2017. – № 4. – С. 27-35.
3. Кондрашов, А.Г. Обработка косозубых цилиндрических колес концевыми фрезами на четырехкоординатных фрезерных станках с ЧПУ / А.Г. Кондрашов, Д.Т. Сафаров, Р.Р. Казаргельдинов, **Г.Ф. Глинина** // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2021. – № 3(77). – С. 38-44.
4. Сафаров, Д.Т. Получение экспериментальных данных для моделирования геометрической точности гравюр штампов горячей объемной штамповки поковок / Д.Т. Сафаров, **Г.Ф. Глинина**, А.Г. Кондрашов // Вестник машиностроения. – 2023. – № 9. – С. 770-775.
5. Сафаров, Д.Т. Сравнение концевых сферических фрез по показателям точности обработки / Д.Т. Сафаров, **Г.Ф. Глинина**, Л.Р. Сафарова // Вестник машиностроения. – 2023. – № 12. – С. 1017-1021.
6. Сафаров, Д.Т. Повышение точности фрезерования гравюр штампов крупногабаритных поковок деталей большегрузных автомобилей / Д.Т. Сафаров, **Г.Ф. Глинина**, С.В. Касьянов // Вестник машиностроения. – 2024. – Т.103, № 6. – С. 489-496.
7. Сафаров, Д.Т. Улучшение геометрической точности гравюр штампов коленчатых валов по данным исследований закономерностей износа концевых сферических фрез / Д.Т. Сафаров, **Г.Ф. Глинина** // Вестник машиностроения. – 2025. – Т.104, № 2. – С. 140-148.

Публикации Scopus и Web of Science

8. Safarov D.T., Kondrashov A.G., Safarova L.R., **Glinina G.F.** Energy planning in production shops with numerically controlled machine tools // Russian Engineering Research. 2017. V. 37(9). P. 827-834.
9. Safarov D.T., Kondrashov A.G., **Glinina G.F.**, Safarova L.R. Algorithm of calculation of energy consumption on the basis of differential model of the production task performed on machines with computer numeric control (CNC) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 240(1). doi: 10.1088/1757-899X/240/1/012060.
10. Safarov D.T., Kondrashov A.G., **Glinina G.F.** Geometric Accuracy of Die Engraving: Experimental Data and Modeling // Russian Engineering Research. 2023. V. 43(11). P. 1400-1407.
11. Safarov D.T., Safarova L.R., **Glinina G.F.** Comparing Spherical End Mills in Terms of Machining Precision // Russian Engineering Research. 2024. V. 44(2). P. 211-215.
12. Safarov D.T., **Glinina G.F.**, Kasyanov S.V. Improving the Accuracy of Die Impression Milling for Large-Size Forgings of Heavy-Duty Vehicle Parts // Russian Engineering Research. 2024. V. 44(8). P. 1128-1136.
13. Safarov D.T., **Glinina G.F.** Improving geometric accuracy of crankshaft forging die impressions based on research data on wear patterns of ball end mills // Russian Engineering Research. 2025. V. 45(4). P. 491-499.

Другие публикации

14. Сафарова, Л.Р. Моделирование содержания производственного задания на станках с ЧПУ для расчета планового объема попутных продуктов, отходов и выбросов / Л.Р. Сафарова, **Г.Ф. Глинина** // «Технические науки – основа современной инновационной системы».

- II Международная научно-практическая конференция. Йошкар-Ола: Приволжский научно-издательский центр – Йошкар-Ола: Коллоквиум. - 2013. – С.26-31.
15. Кондрашов, А.Г. Современные требования к подготовке специалистов для машиностроительных предприятий / А.Г. Кондрашов, **Г.Ф. Глинина** // Сб. трудов Международной научно-практической конференции «Информационные технологии. Автоматизация. Актуализация и решение проблем подготовки высококвалифицированных кадров» (ИТАП-2013) Наб. Челны изд-во Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВПО К(П)ФУ. – 2013. – С. 75-77.
16. Кондрашов, А.Г. Диагностический мониторинг точности в операциях обработки резанием деталей автокомпонентов / А.Г. Кондрашов, **Г.Ф. Глинина** // Юность и знания – гарантия успеха. Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции. Курск. – 2014. – С. 164-167.
17. Сафарова, Л.Р. Планирование расхода энергоресурсов на рабочих местах производства автокомпонентов / Л.Р. Сафарова, **Г.Ф. Глинина** // «VI Камские чтения»: Всероссийская научно-техническая конференция (2014 г. Набережные Челны) в 3-х частях Часть 1. / сб. докл. Набережные Челны: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института КФУ. – 2014. – С. 41-44.
18. Сафаров, Д.Т. Алгоритм расчета энергопотребления на основе дифференциальной модели производственного задания, выполняемого на станках с ЧПУ / Д.Т. Сафаров, А.Г. Кондрашов, **Г.Ф. Глинина**, Л.Р. Сафарова // Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2016» (МНТК «ИМТОМ–2016»). Ч. 1 – Казань. – 2016. – С. 137-141.
19. Сафаров, Д.Т. Дифференциальный расчет и оптимизация потребления электроэнергии при проектировании операций обработки деталей на станках с ЧПУ / Д.Т. Сафаров, **Г.Ф. Глинина** // Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2017» (МНТК «ИМТОМ–2017»). Ч. 2. – Казань. – 2017. – С. 242-246.
20. Сафаров, Д.Т. Проблема адекватности математических моделей потребления электроэнергии на этапе технологического проектирования / Д.Т. Сафаров, **Г.Ф. Глинина** // Наука в движении: от отражения к созданию реальности. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2017. – С. 48-52.
21. Биктимиров, Р.Д. Моделирование геометрической точности обработки штампов крупногабаритных поковок / Р.Д. Биктимиров, **Г.Ф. Глинина** // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Пермь. – 2023. – С. 77-81.
22. Сафаров, Д.Т. Обеспечение геометрической точности обработки штампов крупногабаритных поковок / Д.Т. Сафаров, **Г.Ф. Глинина** // Материалы международной научно-практической конференции старшеклассников, студентов и аспирантов. Нижний Тагил. – 2023. – С. 17-20.

Научное издание

Глинина Гульназ Фидаэловна

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО КАЧЕСТВА ШТАМПОВ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОКОВОК В ПРОЦЕССЕ
ЧИСТОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ИЗНОСА
ИНСТРУМЕНТА**

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Цифровая печать. усл. печ. л. 1,8 Тираж 100 экз. Заказ 023
Отпечатано в Издательстве НЧИ К(П)ФУ
423810, г. Набережные Челны, Новый город, проспект Мира, 13
тел./факс (8552) 39-66-27 e-mail:ic@kampi.ru