

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского)
федерального университета

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент, Сафаров Д.Т.

Набережные Челны - 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СТОЙКОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ИНСТРУМЕНТОВ И УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЧИСТОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	11
1.1 Обзор современных требования к поковкам габаритных деталей.....	11
1.2 Факторы, влияющие на геометрическую точность обработки резанием деталей машин и штамповой оснастки.....	17
1.3 Методы испытаний концевого фрезерного инструмента для улучшения точности изготовления штампов крупногабаритных поковок.....	24
1.4 Методы сравнения режущих инструментов альтернативных производителей инструмента.....	28
1.5 Моделирование и улучшение геометрической точности изделий, обработанных концевыми фрезами.....	32
1.6 Выводы по 1 главе.....	40
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ В ПЕРИОДЕ СТОЙКОСТИ КОНЦЕВЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ФРЕЗ.....	42
2.1 Методика испытаний сферических концевых фрез для формирования базы данных изменения отклонений геометрической точности.....	42
2.2 Разработка математических моделей изменения геометрической точности образцов материала штампа обработанных фрезой, заточенной на пятикоординатном заточном станке с ЧПУ.....	47
2.2.1 Анализ параметров шероховатости.....	50
2.2.2 Изменение отклонений формы и профиля поверхности.....	52
2.3 Разработка математических моделей изменения геометрической точности образца материала штампа, обработанного сферической концевой фрезой, заточенной на универсальном заточном оборудовании.....	58
2.3.1 Анализ параметров шероховатости.....	60
2.3.2 Изменение отклонений формы и профиля поверхности.....	63

2.4 Разработка математических моделей изменения геометрической точности образца материала штампа обработанного сферической концевой фрезой, заточенной на специально подготовленном пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ.....	66
2.4.1 Анализ параметров шероховатости.....	68
2.4.2 Изменение отклонений формы и профиля поверхности.....	69
2.5 Выводы по 2 главе.....	74

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА СРАВНЕНИЯ КОНЦЕВЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ФРЕЗ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ УДЕЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ.....76

3.1 Методика сравнения концевых сферических фрез по показателям удельного изменения в периоде стойкости.....	76
3.2 Сравнение режущих способностей концевых сферических фрез различной геометрии.....	78
3.3 Моделирование геометрической точности и регулирование координат положения профиля поверхности образца материала по данным износа инструмента.....	86
3.4 Нахождение корректирующих смещений для улучшения точности обработки гравюр штампов по данным обработки образцов материала.....	92
3.5 Выводы по 3 главе.....	100

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЧИСТОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГРАВЮР ШТАМПОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОКОВОК.....101

4.1 Обоснование требований к точности расположения профилей гравюр штампа.....	101
4.2 Методика моделирования геометрической точности обработки гравюр штампов с использованием математических моделей изменения геометрической точности в периодах стойкости фрез.....	104
4.3 Расчет величин коррекции траектории рабочих ходов концевой сферической фрезы на примере обработки гравюр коренных и шатунных шеек штамповых вставок.....	112
4.4 Статистический анализ точности чистового фрезерования рабочих поверхностей штампов, обработанных с коррекцией износа концевых сферических фрез.....	123
4.4.1 Последовательность статистической обработки экспериментальных данных.....	130

4.4.2 Анализ данных измерений радиальных размеров поверхности гравюр коренных и шатунных шеек, обработанных участком режущей кромки ориентированной под углом 45° к оси фрезы.....	132
4.4.3 Анализ данных измерений радиальных размеров поверхности гравюр коренных и шатунных шеек, обработанных участком режущей кромки ориентированной под углом 15° к оси фрезы.....	141
4.5 Выводы по 4 главе.....	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Данные измерений образцов материала и величины износа концевых сферических фрез ф. Сандвик-Коромант, полученные в результате стойкостных испытаний.....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Данные расчета значений границ положения профиля гравюр штампа.....	173
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	182

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В производстве большегрузных автомобилей особые требования предъявляются к качеству крупногабаритных поковок сложной формы, например, коленчатого вала длиной 850-1200 мм при массе от 90 до 120 кг. Точность серийных поковок во многом зависит от геометрической точности поверхностей гравюр штампа и направляющих колонок.

Гравюры штампов имеют значительную площадь обрабатываемой поверхности. Требования к размерным показателям и шероховатости необходимо обеспечить во всех точках ее поверхности. Окончательно характеристики точности формируется в переходах обработки сферическими концевыми фрезами. Длительность процесса непрерывной обработки гравюры в одном установе до 40-ка часов. Контроль геометрической точности обработанных гравюр выполняется в отдельных сечениях при помощи фасонных шаблонов и щупов, что позволяет обеспечить годность. Различия изменения размеров гравюр штампа в периодах смены инструмента остается значительным.

Операция выполняется на тяжелых трехкоординатных фрезерных станках с ЧПУ. При массе обрабатываемых штампов, от 3-х до 5-ти тонн (рисунок 2) в процессе обработки обеспечить достаточно точные координатные измерения геометрических характеристик для коррекции траекторий инструмента невозможно. Значительно повысить количество съемов со штампа годных поковок позволяет полирование наиболее нагруженных участков гравюры.

Таким образом, повышение геометрической точности фрезерования гравюры штампа, а также уменьшение высотных параметров шероховатости для снижения трудоемкости полирования является актуальной задачей в производстве штампов.

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., Кознова 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 1,8 раза по сравнению с фрезерованием, выполненным без коррекции.

Практическая значимость заключается в следующем:

1. Разработан программный модуль расчета коррекции траектории фрез чистового фрезерования штамповой оснастки 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 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 ф. Mahr Digimahr 817 CLM, износ измерялся на стереомикроскопе МБС 2, оснащенным 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» г. НЧИ КФУ Набережные Челны 2013г.
- Наука в видении: от отражения к созданию реальности филиал КАИ г. Альметьевск 2017г.

Всероссийских международных конференциях:

- «VI Камские чтения» г. Набережные Челны НЧИ К(П)ФУ 2014г.

– ИТММ-2023 г. Пермь ПНИПУ 2023г.

Международных научно-практических конференциях:

– «Технические науки – основа современной инновационной системы» МГУ (г. Йошкар-Ола), 2013г.

– «Информационные технологии. Автоматизация. Актуализация и решение проблем подготовки высококвалифицированных кадров» НЧИ КФУ (ИТАП-2013) г. Набережные Челны 2013г.

Международных научно-технических конференциях:

– Прогрессивные методы обеспечения работоспособности транспортно-технологических средств, организации автотранспортных услуг и дизайна автомобилей. СГТУ им. Гагарина Ю.А.(г. Саратов) 2013 г.

– «Юность и знания – гарантия успеха» г. Курск 2014г.

– «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы –г. Казань 2016г., 2017г.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 6 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 статьи, 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 п. 4 и 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СТОЙКОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ИНСТРУМЕНТОВ И УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЧИСТОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1.1 Обзор современных требования к поковкам габаритных деталей

Наиболее сложными поковками с комплексными требованиями к качеству их изготовления являются поковки коленчатых валов большегрузных автомобилей.

В кузнечном производстве принято разделение возникающего брака поковок на внутренний и внешний. Внутренний брак выявляется на автоматической линии в процессе штамповки поковок. К этому виду брака относят поковки с дефектами поверхностей, возникшими из-за несоблюдения режимов процесса штамповки, несоответствий материала вследствие отклонений термообработки, а также несоответствию размеров отдельных элементов поковки вследствие износа гравюр штампа [133, 134].

Таблица 1 – Данные годового брака поковок коленчатых валов по признаку
«не выдержан размер»

№ п./п.	Обозначение поковки	Отштамповано, шт	Реализовано, шт	Статус брака	Кол-во брака, шт.	Брак по признаку «не выдержан размер»	Потери, руб.
1	740.11-1005020	13150	12959	внутренний	115	32	1246098
				внешний	353	353	4608473
2	740.50-1005020	25257	25086	внутренний	92	58	996885
				внешний	241	241	3067064
							9818520

Внешний брак проявляется у потребителя, в процессе механической обработки поковок. Основным видом внешнего брака является «несоответствие» геометрических размеров поковки, которая приводит к образованию «черноты» на шатунных и коренных шейках валов (рисунок 1.1). Этот вид брака появляется

вследствие неблагоприятного сочетания отдельных отклонений геометрических показателей точности конструктивных элементов поковок коленчатых валов [126, 134]. Причиной отклонений геометрических показателей являются наладочные отклонения прессового оборудования, а также износ гравюр штампа в критических точках течения металла [112].

Также внешний брак проявляется в виде невозможности балансировки поковок после механической обработки. Причиной этого вида брака является неравномерный износ гравюр штампа или размерное несоответствие элементов поковок на участках не подвергающихся обработке резанием. Таким образом повышение размерной точности гравюр штампа является актуальной задачей, позволяющей снизить уровень как внешнего, так и внутреннего брака процесса горячей объемной штамповки.

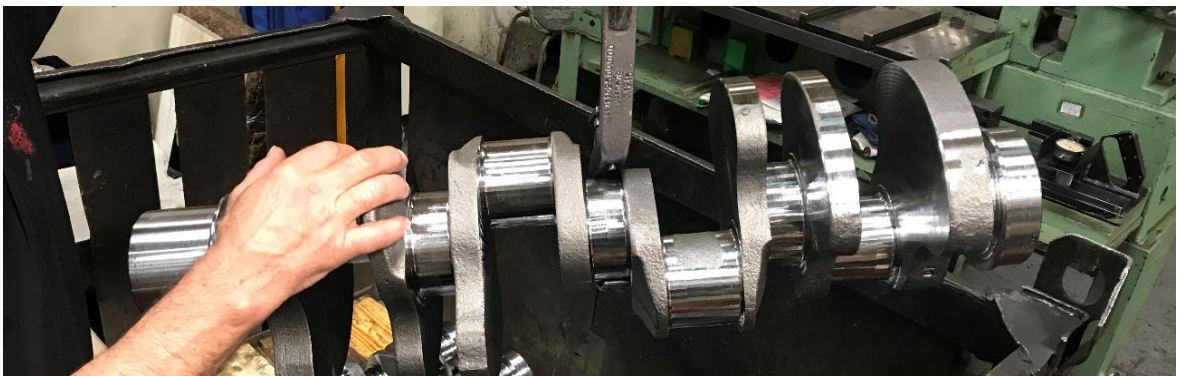


Рисунок 1.1 – «Чернота» на обрабатываемых поверхностях вала 740.11-1005020

Согласно требованиям [5] у автокомпонентов должны быть определены специальные характеристики, влияющие на безопасность функционирования автокомпонента в составе узла, процессы потребителя и на функцию назначения. Это же требование относится и к поковкам деталей автокомпонентов.

Чертежные требования к поковкам включают требования к размерам и относительному расположению коренных и шатунных шеек, а также противовесов (рисунок 1.1). К качеству поковок согласно требованиям чертежа предъявляются требования по ГОСТ 7505-89[40]. В чертеже указан класс точности поковки Т5 – изготовление методом открытой (облойной) штамповки. При проектировании чертежа поковки припуски на обрабатываемые

поверхности, допускаемые отклонения на линейные размеры и на изменение формы геометрии вследствие особенностей процесса горячей объемной штамповки устанавливаются поставщиком полуфабрикатов согласно ГОСТ 7505-89[40].

Дополнительных ключевых параметров, имеющих отношение к геометрии полуфабриката, на чертеже детали не обозначено. Изготавливаются валы из одной марки стали 42ХМФА ТУ-14-1-5083-91. На рисунках 1.2-1.3 приведены фрагменты основных надписей чертежа поковки коленчатого вала. Помимо требований выполнения диаметральных и линейных размеров геометрических элементов к поковке устанавливается ряд требований по обеспечению относительного расположения элементов поковки, а также соблюдению необходимой геометрии уклонов и радиусов закруглений в переходных зонах для обеспечения заданных условий течения металла.

Отличительной особенностью поковок коленчатых валов является уменьшенные до $1-2^\circ$ штамповочные уклоны на противовесах. Это обусловлено необходимостью, с одной стороны, уменьшением фактического припуска для механической обработки по линии разъёма штампов (требование потребителя) и улучшения заполняемости гравюры штампа (чем меньше штамповочный уклон, тем меньше сопротивление заполнению гравюры штампа) [62].

Следует отметить, в отличие от других крупногабаритных поковок к поковкам коленчатых валов предъявляются дополнительные требования по обеспечению балансировки (пункт 17 технических требований) чертежа поковки (рисунок 1.2). Геометрические параметры поверхностей поковки и их границы значений, позволяющие обеспечить выполнение требований по балансировки не определены.

Жёсткое ограничение ключевых параметров поковок и процесса ГОШ в производстве не только обеспечивает равномерность припусков при механической обработке, но и значительно уменьшает радиус рассеивания дисбаланса в партии поковок, что и позволяет настроить первые операции

механической обработки (торцовка и центровка) таким образом, чтобы обеспечивалась последующая успешная балансировка [83].

1. Гр. III ГОСТ 8479-70.
2. 248...286 НВ; σ_b не менее 735 МПа (75 кгс/мм²); δ_s не менее 14%; σ_T не менее 590 МПа (60 кгс/мм²); ψ не менее 45%; КСЧ не менее $59 \cdot 10^4$ Дж/м² (6 кгс*м/см²). Объем контроля – один коленчатый вал от партии 5000 штук.
3. Остальные технические требования к поковке и неуказанные пред. откл. поковки по классу точности Т₅ ГОСТ 7505-89.
4. Смещение по линии разъема штампа не более 2 мм.
5. Неуказанные радиусы закруглений в поковке 8 мм.
6. Неуказанные штампобочные уклоны 4°.
7. Заусенцы по периметру среза не более 2,5 мм.
8. Допускается правка только поковки вала с последующей термообработкой.
9. Допуск симметричности размеров Н (см. А-А, Лист 2) относительно общей оси крайних коренных шеек К₁, К₂) – 6,3 мм.
10. Необработанные поверхности вала должны быть чистыми, без окалины, закатов, плен, раскатанных пузырей, расслоений, волосябин и трещин. На щеках вала механические повреждения – забоины, вмятины и раковины от окалины допускаются глубиной не более 1,5 мм с полукруглой эллиптической

Таблица 1.

Обозначение	Рис.	H _г , мм	Масса, кг	п. 11 ТТ
740.50-1005020	1	781,1	69,5	Азотировать. Твердость на поверхности не менее 600HV _s . На расстоянии 0,25 мм. от поверхности твердость должна быть не менее 500HV _{0,3} . Общая толщина слоя h=0,6...0,8 мм. – расстояние от поверхности до зоны с твердостью 50HV _{0,3} выше твердости сердцевины. Твердость сердцевины определяется замером твердости на расстоянии 6...10 мм. от поверхности.

25. На поверхностях галтелей и шеек вала не допускаются трещины, раскатанные пузыри и неметаллические включения. Допускаемые дефекты материала и их расположение на шейках и галтелях вала, выявляемых методом магнитной дефектоскопии, определяются контрольными образцами.
26. Выявление дефектов материала вала производить методом магнитного контроля при приложенном магнитном поле и силе тока 1500 А.
27. Вал должен быть размагничен. Остаточная намагниченность не более 635 А/м.
29. Допускается наличие черноты от поковки и занижение шероховатости по боковым поверхностям E₂ (см. главный вид) и радиусу E₃ (см. А-А, Лист 2) противобесов P₁, P₂, P₃, P₆, P₇, P₈.
30. Заусенцы не допускаются. Острые кромки не допускаются – притупить фаской или радиусом 0,1...0,3 мм.

Рисунок 1.2 – Фрагменты из чертежа детали 740.50-1005020, содержащие основные технологические параметры, применяемые к поковке

1. Закалить 248...286НВ, гр. III ГОСТ 8479–70.
2. Класс точности Т5, группа стали М2, степень сложности С4 исходный индекс 21 по ГОСТ 7505–89
3. Неуказанные радиусы закругления внутреннего угла 8мм, наружного угла 4мм.
4. Неуказанные штамповочные уклоны 2°
5. Допускаемая величина смещения по поверхности разреза штампов до 1.5мм.
6. Допускаемая величина остаточного облоя до 1.5мм.
7. Допускаются внешние дефекты на обрабатываемых поверхностях следы разгарных трещин штампов, следы от выталкивателей, вмятины, забоины, раковины от окалины, складки металла высотой до 2.0 мм. (исключая базовые поверхности) и глубиной не более 50% фактического одностороннего припуска. Необрабатываемые поверхности должны быть чистыми, без окалины, закатов, плен, расслоений, раскатных пузырей, трещин. Механические повреждения – забоины, вмятины и раковины от окалины допускаются глубиной не более 1.5 мм. с полой зачисткой острых кромок
8. Заусенец по периметру среза не более 2,5мм.
9. Допускаемое биение коренных шеек относительно общей оси поверхностей Н и Н1 для шейки 3 до 3мм, для шеек 1, 2, 4 и 5 до 2мм.
10. Маркировать год и месяц выпуска поковки. Убозначение месяца для первых 9 месяцев производить порядковой цифрой, а для последующих месяцев буквами О, Н, Д Шрифт 10–Пр3 ГОСТ 26.008–85 вогнутый.
11. Маркировать товарный знак завода изготовителя и номер детали 740. –1005020– . Шрифт 8–Пр3 ГОСТ 26.008–85 вогнутый.
12. Маркировать условный номер плавки буквами, исключая буквы О, Н, Д Шрифт 10–Пр3 ГОСТ 26.008–85 вогнутый. Повторение одного знака для разных поставок металла в течении одного месяца не допускается.
13. Маркировать сменное клеймо цифрами I, II, III. Шрифт 10–Пр3 ГОСТ 26.008–85 вогнутый.
14. Маркировка осуществляется при обрезке облоя и должна быть отчетливо видима; сохраняться до конца службы вала и не влиять на эксплуатационную надежность.
15. Дополнительные технические требования по ГОСТ 8479–70.
16. Допускается заварка незаполненных участков по вершинам противовесов и на поверхностях переднего и заднего фланцев вала согласно инструкции ИТ 37.104.52.172–95.
17. Поковка должна обеспечивать заданный дисбаланс обработанного коленвала согласно чертежу детали. Подтверждает заказчик
18. Размеры образца для испытаний в соответствии с ГОСТ 1497–84, ГОСТ 9454–78.
 $\sigma_b \geq 735 \text{ МПа (75 кгс/мм}^2\text{)}$; $\sigma_s \geq 14\%$; $\sigma_t \geq 590 \text{ МПа (60 кгс/мм}^2\text{)}$;
 $\psi \geq 45\%$; $KCU \geq 59 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^2 \text{ (6,0 кгс*м/см}^2\text{)}$
 Объем контроля – один коленчатый вал от партии 5000штук
19. Допускается правка в холодном состоянии с последующей термообработкой.
20. П – плоскость, проходящая через оси крайних коренных шеек и ось шатунной шейки I.
21. * Размеры ,обеспечиваемые инструментом.
22. Поковка используется для изготовления детали 740.13–1005020, 7401–1005020–20, 740.30–1005020.

Рисунок 1.3 – Фрагменты из чертежа детали 740.50-1005020, содержащие основные технологические параметры, применяемые к поковке

На рисунке 1.4 приведены специальные геометрические показатели точности поковки, по которым осуществляется управление их геометрической точностью.

Таблица 1. Ключевые параметры геометрии поковки

Обозначение	Характеристика	Примечание
K1	$\varnothing 102 \pm 0,6$	Диаметр коренных шеек
K2	$\varnothing 38 \pm 0,6$	Диаметр шатунных шеек
K3	Изогнутость	Пункт 2 тех. требований
K4	$90^\circ \pm 1,5^\circ$	угол между осями I и II ш ш
K5	$90^\circ \pm 1,5^\circ$	угол между осями I и III ш ш
K6	$180^\circ \pm 1,5^\circ$	угол между осями I и IV ш ш
K7	$105 \pm 1,5$	Высота 1-го противовеса относительно его оси
K8	$105 \pm 1,5$	Высота 1-го противовеса относительно его оси
K9	$85 \pm 1,5$	Высота 3-го противовеса относительно его оси
K10	$85 \pm 1,5$	Высота 3-го противовеса относительно его оси
K11	$85 \pm 1,5$	Высота 6-го противовеса относительно его оси
K12	$85 \pm 1,5$	Высота 6-го противовеса относительно его оси
K13	$105 \pm 1,5$	Высота 8-го противовеса относительно его оси
K14	$105 \pm 1,5$	Высота 8-го противовеса относительно его оси

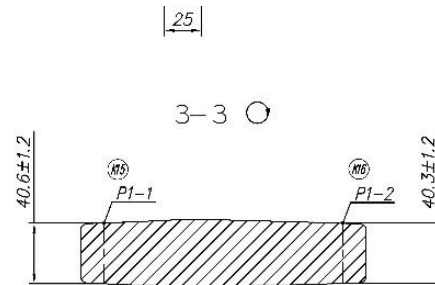


Таблица 2. Ключевые параметры геометрии поковки

Обозначение	Толщина щеки по линии контрольной точки (P) Допуск $\pm 1,2$	Точки 1/2	Расстояние от оси поковки до контрольной точки (P) Отклонение $+1/-2,5$
K15	40,6	Щека 1, P1-1	265,3
K16	40,3	Щека 1, P1-2	265,4
K17	30,3	Щека 3, P3	109,6
K18	30	Щека 6, P6	109,8
K19	40,6	Щека 8, P8-1	265,5
K20	40,2	Щека 8, P8-2	265,6

Рисунок 1.4 – Указание специальных показателей геометрической точности в чертеже поковки коленчатого вала

Для обеспечения процесса улучшения качества поковок у поковок следует обеспечить следующие специальные характеристики:

- Геометрические параметры в пределах допусков согласно стандартным требованиям к размерам, обеспечение равномерного припуска для механической обработки и отсутствия «черноты» на обрабатываемых поверхностях детали;
- Заданный уровень дисбаланса детали при механической обработке в автоматическом режиме;
- Механические свойства и обрабатываемость материала поковки.

Повышение точности изготовления гравюр штампа на штамповочной операции решает задачу обеспечения специальных геометрических характеристик поковок, а также обеспечению заданного уровня дисбаланса коленчатого вала после механической обработки на автоматической линии.

1.2 Факторы, влияющие на геометрическую точность обработки резанием деталей машин и штамповой оснастки

Исследованиями [134, 79] установлена важность обеспечения высокой точности обработанных рабочих поверхностей для качества поковок и уменьшения шероховатости поверхности для повышения стойкости штамповой оснастки.

В процессе горячей объемной штамповки металл в штампе, деформируясь, воздействует на гравюры штампа с различным удельным давлением. Наибольшее давление возникает на гравюрах штампа в процессе формирования протяженных и узких элементов поковок. Улучшение шероховатости поверхности в местах больших удельных давлений металла значительно увеличивает количество съёмов годных поковок (до 50%). Поэтому их приходится полировать вручную после чистовой фрезерной обработки. Основным чистовым методом формообразования гравюр штампа является фрезерование концевыми фрезами на обрабатывающих центрах с ЧПУ. Факторы технологического процесса, влияющие на показатели качества в процессах фрезерования, рассматриваются во многих работах.

В [60] приводится анализ вклада в обеспечение точности погрешностей станочной системы в переходах обработки концевых фрез (рисунок 1.5). Наиболее значимыми факторами отклонений геометрических показателей обрабатываемых поверхностей являются упругие деформации. Далее по значимости следуют погрешности износа фрезы и настройки инструмента. Оставшиеся погрешности влияют примерно одинаково.

В [56] представлен теоретический расчет величин изгиба инструмента под действием сил резания. Величина изгиба инструмента при этом сопоставляется с величиной поля допуска квалитетов точности. В [76] приводятся формулы расчета деформаций стандартных сечений фрез без примеров расчета самих величин деформаций. В [50] приведены математические модели проектного

подбора фрез по минимальному диаметру с учетом длины обрабатываемой поверхности и параметров перехода. Решение этих частных задач не позволяет прогнозировать комплекс отклонений точности обработанных поверхностей.

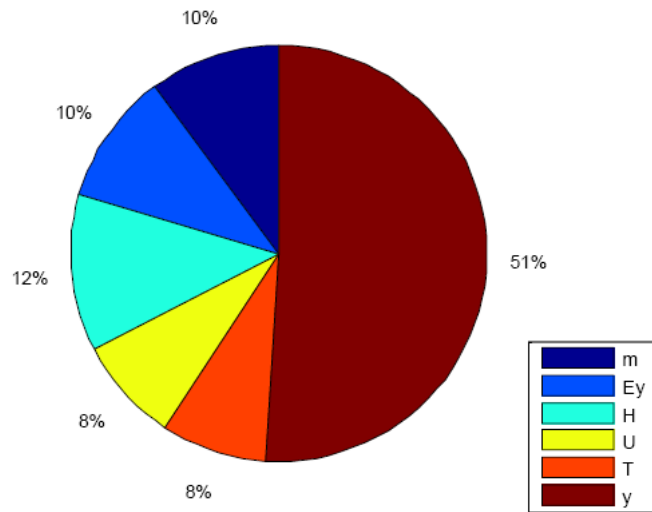


Рисунок 1.5 – Диаграмма распределения погрешностей технологической системы[60]: m – погрешность от геометрических неточностей станка, E_y – погрешность установки заготовки, H – погрешность настройки, U – погрешность от размерного износа инструмента, T – погрешность от температурных деформаций, y – погрешность от упругих деформаций

Отдельные публикации обобщают заводской опыт [98] в виде рекомендаций по эмпирическому заданию глубины резания от вылета фрезы во избежание затягивания фрезы и формирования дополнительных угловых погрешностей обработки плоских поверхностей (рисунок 1.6).

В [87] исследованы факторы жесткости обрабатываемой заготовки на примере обработке кронштейнов обработкой концевыми фрезами. Авторами подразумевается отрицательное влияние деформации под действием сил резания на деформации заготовки в направлении координаты Y (рисунок 1.7) на показатели точности, однако данных по изменению значений показателей не приводится. В [49] рассматриваются факторы влияния угла наклона режущей кромки на качество обрабатываемой поверхности фрезерованием концевыми сферическими фрезами. Авторы приводят логические связывающие уменьшение угла наклона винтовой канавки и улучшением параметров шероховатости, не

подтверждая их экспериментально. Другие авторы обращают внимание на важность изменение кинематических углов в процессе фрезерования. Отмечается, что обеспечение положительных значений кинематических углов (рисунок 1.8) в процессах попутного и продольного фрезерования является важнейшим для обеспечения работоспособности фрез [55, 132], однако исследование их влияния на параметры обрабатываемых поверхностей не приводят.

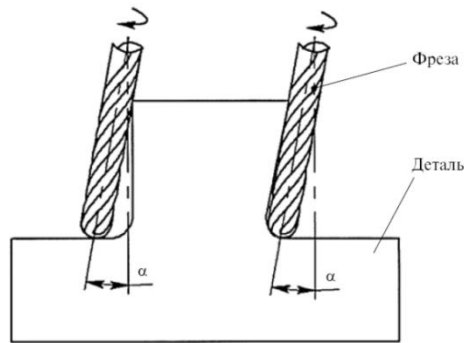


Рисунок 1.6 – Схема отталкивания и затягивания фрезы малой жесткости при фрезеровании [98]

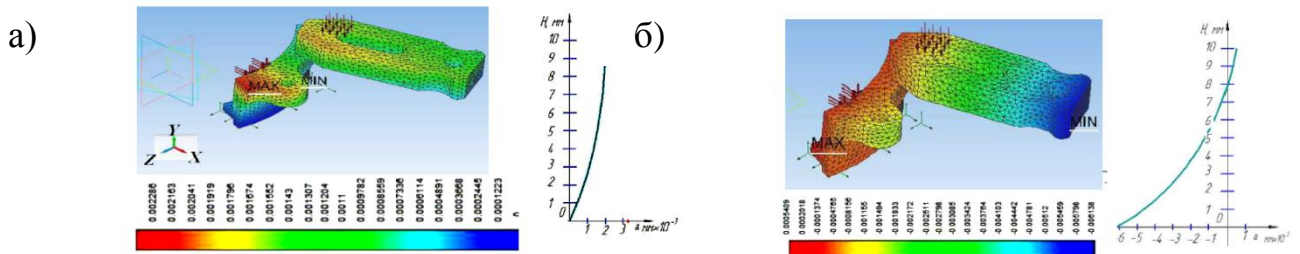


Рисунок 1.7 – Деформации от действия сил резания при различных способах обработки заготовок кронштейнов с а) симметричным и б) несимметричным расположением зубьев фрезы [87]

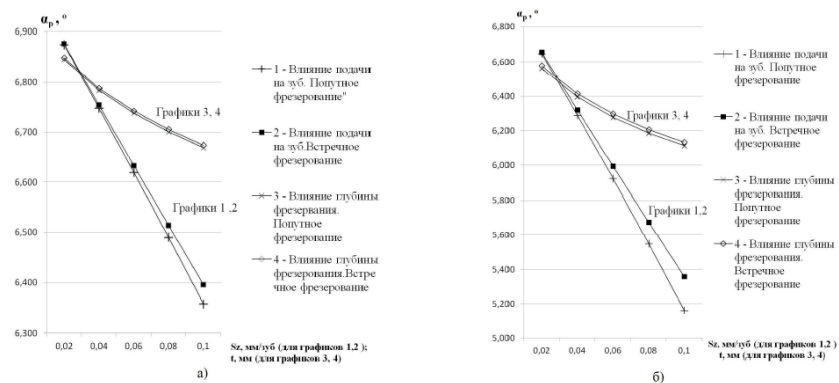


Рисунок 1.8 – Зависимости кинематических углов от глубины и подачи [55]

Авторы [37] выполнили анализ вклада различных факторов процесса в параметры шероховатости поверхности (рисунок 1.9). При различных углах наклона баланс факторов отличается. С увеличением угла наклона нарастает значимость подачи и кинематических факторов, что необходимо учитывать для регулирования качества поверхности.



Рисунок 1.9 – Факторы, влияющие на величину шероховатости поверхности с учетом наклона фрезы [37]

В [37] приведено исследования влияния угла наклона фрезы в процессе фрезерования на шероховатость поверхности образцов, изготовленных из стали 20 фрезой радиусом 5 мм. (рисунок 1.10). Авторы приводят следующую формулу для нахождения профиля:

$$\Delta y = \frac{(R \cdot \cos \alpha + l - R) \cdot \sqrt{(\Delta d^2 + (l - R)^2) \cdot \cos \alpha + (R - l) \cdot \cos \alpha + \Delta d \cdot \sin \alpha}}{\sqrt{\Delta d^2 + (l - R)^2}} \quad (1.1)$$

где l – вылет инструмента, мм.

α – угол наклона фрезы;

R – радиус фрезы;

Δd – биение фрезы, мм.

Зависимости значительно отличаются от результатов, полученных в ходе обработки титанового сплава.

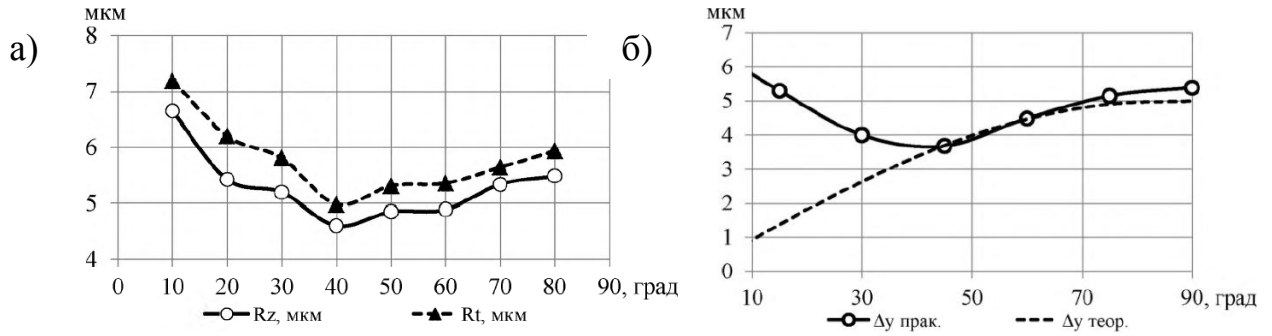


Рисунок 1.10 – а) графики изменения Ra и Rz от угла наклона концевой сферической фрезы, б) теоретическая и экспериментальная погрешности, вызванные смещением инструмента для различных углов наклона поверхности [37]

В [102] экспериментально показано значительное влияние углов наклона концевой сферической фрезы на величину шероховатости (рисунок 1.11) в направлении рабочего хода фрезы и изменении угла наклона концевой сферической фрезы (пятикоординатная обработка).

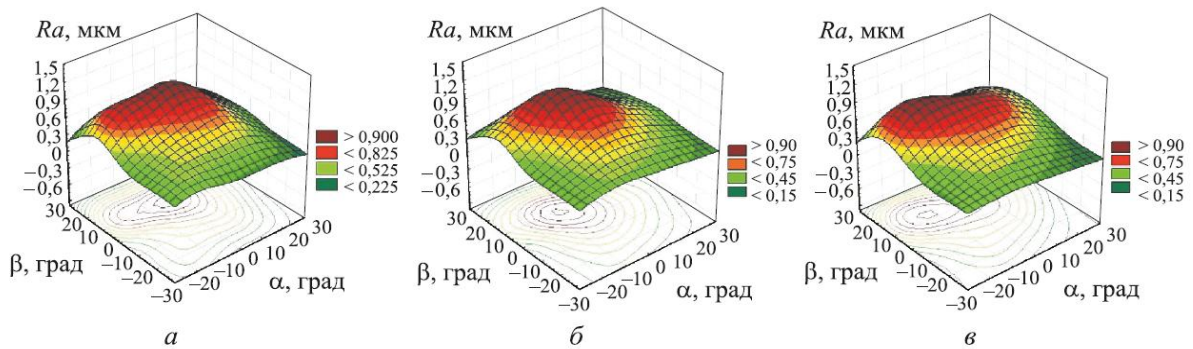


Рисунок 1.11 – Зависимости параметра шероховатости Ra , измеренного в центре (а), правой (б) и левой (в) частях канавки, от углов наклона α и опережения β двузубой КФС с подачей на зуб $Sz = 0,02$ мм/зуб [102]

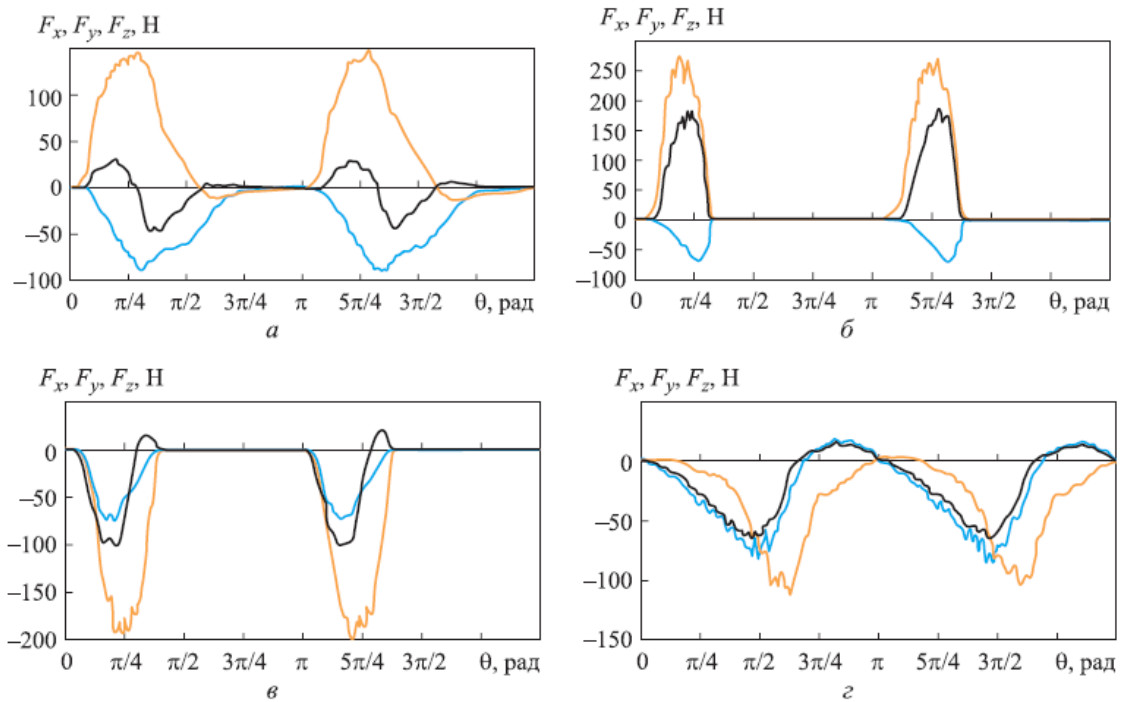


Рисунок 1.12 – Зависимости проекций силы резания F_x (оранжевый) F_y (голубой), F_z (черный) от угла поворота инструмента θ при фрезеровании с углом наклона $\alpha=30$ (а), 60 (б), 300 (в) и 330° (г) [103]

В [103, 100, 101] проведены исследования влияния изменения угла наклона фрезы на силы резания при пятикоординатной обработки с ЧПУ сферическими концевыми фрезами. Установлено значительное влияние углов на составляющие силы резания (рисунок 1.12), но работа не развивается до расчета значений изгиба фрезы и влияния их изменений на значения геометрических отклонений точности. В [33] приведены результаты обработки титанового сплава ВТ-3 концевой сферической фрезы радиусом 5 мм параметров шероховатости при угле ее наклона фрезы 10° . В результате получена степенная зависимость вида:

$$Ra = 2,52 \left(\frac{S_Z}{S_{Z0}} \right)^{0,15+0,02 \cdot \ln\left(\frac{V_p}{V_{p0}}\right)} \left(\frac{V_p}{V_{p0}} \right)^{-0,12} \cdot \left(\frac{b_c}{b_{c0}} \right)^{0,45} \quad (1.2)$$

Как видим на величину шероховатости влияет подача, скорость резания и ширина строчки при фрезеровании (рисунок 1.13).

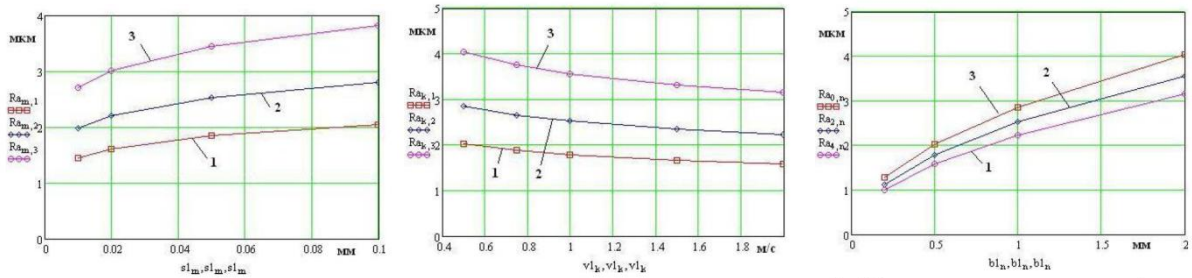


Рисунок 1.13 – Влияние параметров режимов резания на величину шероховатости при угле наклона сферической коническо-цилиндрической фрезы 10°. а) от подачи на зуб S_z , б) от скорости резания V , в) от величины подачи на строчку [33]

В [48, 88, 49] проанализированы факторы пластической деформации и микротвердости обработанной поверхности. Авторы полагают, что изнашивание инструмента определяется конкурирующим воздействием процессов упрочнения вследствие пластической деформации изнашиваемой поверхности и разупрочнения из-за температурного фактора. Данное исследование носит теоретический характер.

Зарубежные исследования направлены в основном на глубокое исследование отдельных технологических факторов процесса фрезерования, на отдельные показатели обрабатываемой поверхности. Например, в [7] исследуется влияние сил резания при различных скоростях резания, подачах и углах подъема винтовой линии фрезы на отклонения от перпендикулярности и шероховатость поверхности, в [2] исследуется влияние различных углов наклона фрез на отдельные параметры точности. В [8] приводятся данные оптимизации параметров фрезерования для обеспечения размерных характеристик. В [10] исследуются влияние конструктивные параметры концевых фрез с волнистой формой боковых режущих кромок и частоты вращения шпинделя на параметры вибраций и шероховатость поверхности.

В ряде работ зарубежных авторов исследуются только параметры процесса фрезерования, без анализа изменения параметров точности обработанных поверхностей деталей. Например, в [9] на основе методов планирования

экспериментов приведены математические модели, связывающие амплитуды вибраций, геометрических параметров и параметров концевых фрез. В [1] исследуются зависимости между углами наклона фрезы и параметрами вибрации концевых сферических фрез, в [6] исследуется изменение сил резания в процессе фрезерования концевой фрезой с учетом деформации заготовки, в [4] исследуется влияние на вибрации фрезы радиуса скругления режущей кромки и шага винтовой линии. Встречаются и теоретические исследования механизмов, вызывающих вибрации концевых фрез [3]. Эти исследования направлены лишь косвенно на улучшение качества обрабатываемой поверхностей тонкостенных деталей.

Таким образом, многочисленные публикации исследуют влияние различных технологических факторов процесса фрезерования. На характеристики точности обрабатываемых поверхностей деталей, однако, в должной мере данные о степени износа режущих кромок концевых фрез не учитываются. Из показателей качества деталей рассматриваются исключительно параметры шероховатости поверхности, что делает невозможным моделирование геометрической точности обработанных поверхностей деталей в периоде стойкости инструмента.

1.3 Методы испытаний концевой фрезерного инструмента для улучшения точности изготовления штампов крупногабаритных поковок

Концевые фрезы разных производителей в производственных условиях обеспечивают различную степень точности обрабатываемых поверхностей деталей. Основным методом оценки качеств инструментов являются стойкостные испытания инструмента.

К испытаниям фрез согласно требований [1] предъявляются следующие требования – соблюдение постоянных частот вращения шпинделя, подачи, марки обрабатываемого материала. Длина пути фрезерования во время

проведения стойкостных испытаний для фрез до $\varnothing 10$ мм не менее 3000 мм, а также предельные значения на вклад отклонений формы и расположения конструктивных элементов фрезы составляет величине не более 25%, должны быть обеспечены и параметры шероховатости. Основным требованием оценки работоспособности фрез является отсутствие на режущих кромках следов притупления и выкрашивания.

Исследование особенностей изнашивания инструментов выполняется в процессах стойкостных испытаний. Целью стойкостных исследований является нахождение длительности сохранения режущих свойств фрез до момента достижения или критического износа. Период смены инструментов должен обеспечивать оптимальные параметры организации инструментообеспечения [34].

Во многих научных публикациях исследуются закономерности износа концевых фрез. В [29, 28, 74, 133, 108]. Приводятся графические зависимости величин фасок износа по задней поверхности и анализ особенностей износа режущих кромок. В [29, 12, 13, 14] приводятся графики изменения фаски износа инструмента (рисунок 1.13), при этом авторы приводят график изменения размеров паза и ограничиваются выводами о нарастании уклонов обработанных боковых поверхностей. Других данных, необходимых для сравнения инструментов, например величин шероховатости R_a , отклонению от симметричности паза, прямолинейности боковых сторон не приводится.

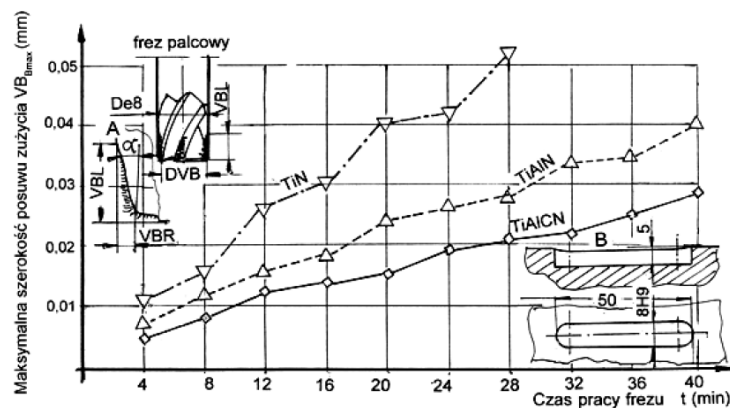


Рисунок 1.14 – Максимальная ширина фаски износа фрезы с покрытиями из TiN , $TiAlCN$ и $TiAlN$: А – форма изношенной кромки фрезы; В – форма

шлицевого паза типа «А» согласно PN. Условия эксперимента: заготовка – сталь 4SHNMF (40-44 HRC); скорость резания $VC = 168$ м/мин, подача $f_2 = 0,035$ мм/зуб., диаметр фрезы De_8 8мм, угол наклона винтовой канавки $w = 550$

Исследования [28, 74, 133] являются типовым примером стойкостных исследований, целью которых является нахождение зависимостей между параметрами переходов обработки резанием и периодов стойкости с применением методов планирования эксперимента.

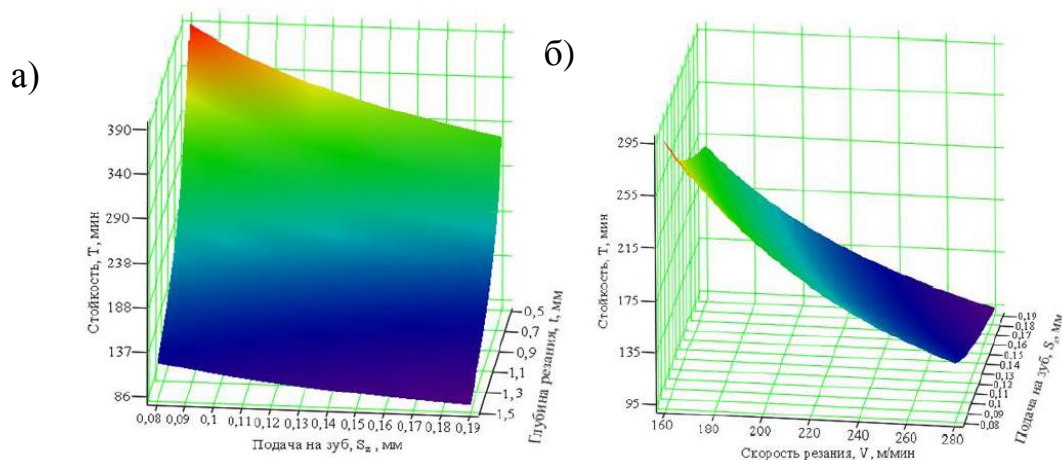


Рисунок 1.15 – а) Влияние глубины резания и подачи на зуб на стойкость фрезы, б) влияние скорости резания и подачи на зуб на стойкость фрезы [28]

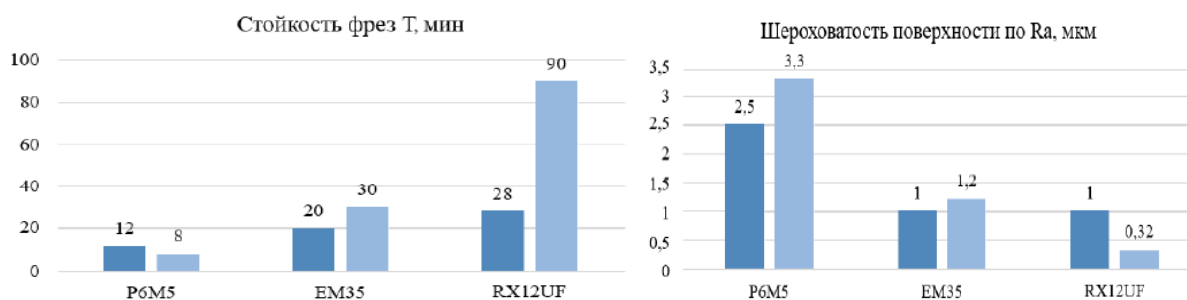


Рисунок 1.16 – а) диаграмма стойкости инструмента, б) диаграмма шероховатости обработанной поверхности [74]

В этих работах образцы обработанных изделий измеряются для получения максимальных значений шероховатости и данные о достигнутом качестве точности, или максимальной величине шероховатости (рисунок 1.14).

Использовать данные исследований для целей моделирования обработки невозможно.

Более детально точность обработанных образцов исследуется в работе [108]. В ней приводятся графики изменения среднеарифметического отклонения профиля шероховатости R_a , а также максимальное значение величины отклонений от плоскостности для максимально изношенной фрезы (рисунок 1.15). Но и в этом исследовании отсутствуют численные модели изменения отдельных геометрических показателей точности, формируемых в процессе обработки резанием.

В [5] предлагается метод ускоренного испытания инструментов на специально изготовленных образцах, из сталей 45 и X18H9T до достижения фаски износа по передней поверхности инструмента до величины 0,5 мм. Метод позволяет получить данные об износе режущей части инструмента ускоренно, но режимы будут отличаться от рабочих. Метод испытаний более приемлем для инструментов, выполняющих черновые переходы. Показатели точности не предполагается регистрировать.

Встречаются работы по моделированию стойкости инструмента без проведения стойкостных испытаний. Например, в [132] по справочным данным период стойкости износ инструмента и время резания при переменных значениях глубины резания и подачи с учетом ограничений по силе резания рассчитывается. Использование данного подхода к моделированию невозможно вследствие отсутствия современных справочных данных.

Таким образом, исследования стойкости концевых фрез сопровождаются регистрацией максимум значений шероховатости. В отдельных исследованиях имеются данные о достигаемом качестве точности. Отсутствуют публикации, которые рассматривали ли бы изменение комплекса показателей точности (относительного расположения, отклонений формы поверхностей и профилей), а также параметров шероховатости в процессе фрезерования.

1.4 Методы сравнения режущих инструментов альтернативных производителей инструмента

Современные машиностроительные предприятия могут уверенно развиваться только при условии изготовления высококачественной и конкурентоспособной продукции с минимальной себестоимостью [5, 42]. Качество продукции, во многом зависит от правильно выбранного режущего инструмента. В настоящее время для каждого индекса инструмента имеется значительное количество альтернативных производителей. Задача обоснованного выбора технологами и специалистами инструментальных отделов инструмента, обеспечивающего заданные показатели точности, обрабатываемых деталей является актуальной.

Обычно сравнение инструментов выполняется на основе обработки данных стойкостных испытаний [19, 128, 91, 53], рассмотренных в предыдущем разделе, целью которых является нахождение зависимости величин износа инструмента по задней поверхности в периоде стойкости.

Характерным исследованием является исследование [53, 54]. В нем сравниваются пластины из твердых сплавов отечественных и зарубежных производителей. Сравнивалась величина и характер износа при одном и том же пути резания и режимах резания, а также форма стружки. Инструмент с меньшими признаками износа принимается за более предпочтительный.

В [20, 22, 95, 21] рассматривается методика сравнения инструмента на основе анализа вариабельности стойкости инструмента. Для лабораторных исследований авторы рекомендуют использовать дробно-факторный метод планирования эксперимента. В случае отсутствия возможности лабораторного исследования авторы рекомендуют применение контрольных карт Шухарта по параметру величин стойкости инструмента (рисунок 1.17).

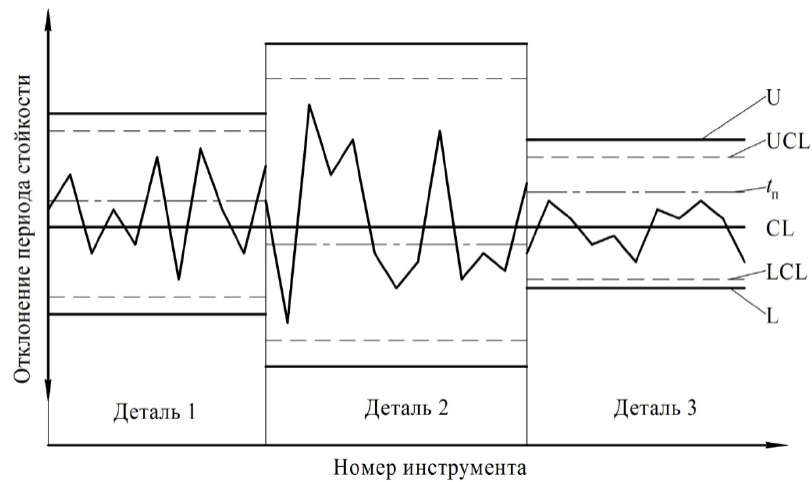


Рисунок 1.17 – Пример контрольной карты периода стойкости режущего инструмента с переменными границами [20]

Метод предполагает закупки и апробации значительного количества сравниваемых видов инструментов, что приемлемо для сравнения имеющихся в производстве инструментов, но не вновь закупаемых. Дополнительно авторы предлагают выполнять оптимизацию режимов резания с поиском целевой функции. В функцию удельных затрат на инструмент, в которую входят параметры процесса, величина износа по задней поверхности высотный параметр шероховатости R_z , мощность и момент резания. Лучшим принимается инструмент, у которого удельные затраты минимальны. Для современных инструментов производители обычно рекомендуют параметры процесса резания в очень узких границах, но данный метод возможен к применению и при значительных вариациях режимов резания. Отдельные авторы ранжируют предпочтительность применения сменных многогранных пластин экспертным методом по мощности, прочности, склонности к вибрациям, универсальности и степени отвода тепла [16, 17]. Определяется балльная значимость каждого критерия (рисунок 1.17), по которому выполняется выбор инструмента. Лучшим считается инструмент, набравший большее количество баллов. Методика не включает критериев износа пластин и обеспечиваемых ими геометрических параметров точности.

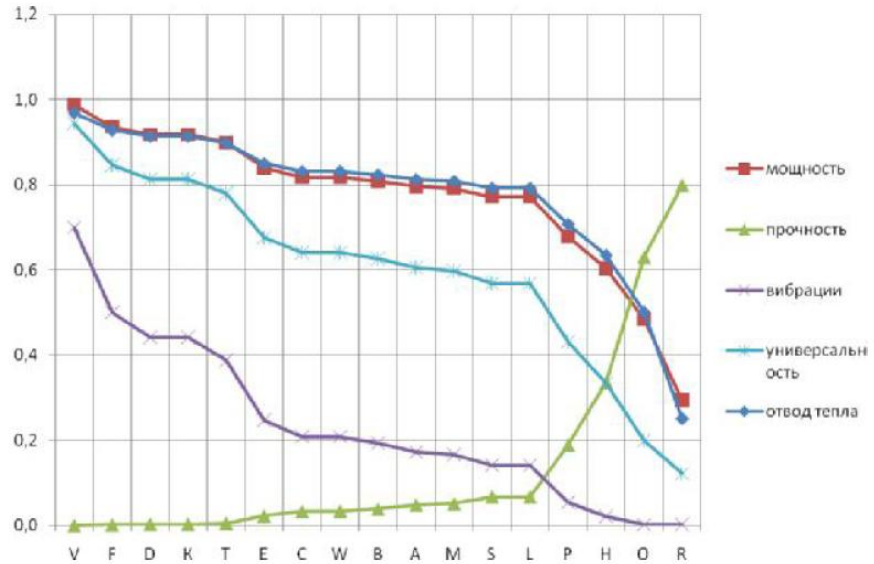


Рисунок 1.18 – Множество оценок форм пластин с учетом относительной важности критериев [16]

В [116] приводится сравнение фрез и резцов с учетом марки смазочно-охлаждающей жидкости, марки инструментального материала, вариаций величины стойкости (рисунок 15), а также скорости резания. Сравнение инструментов выполняется по значениям периодов стойкости инструментов и максимальному износу по задней поверхности.

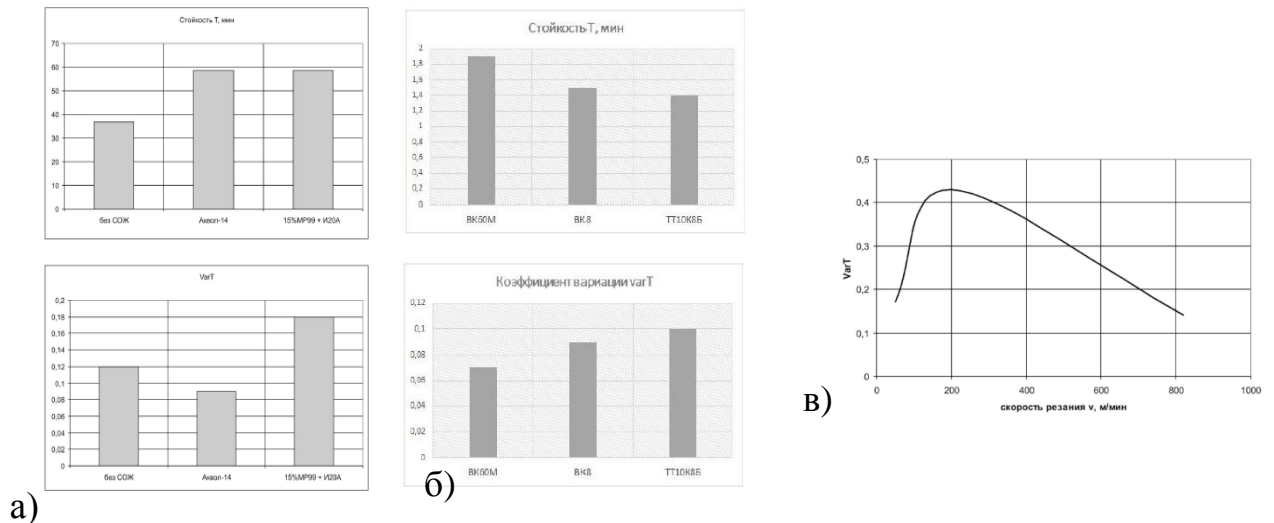


Рисунок 1.19 – Диаграммы сравнения концевых фрез по показателям надежности в зависимости от а) марки материала, б) применяемой смазочно-охлаждающей жидкости, в) скорости резания [116]

Встречаются исследования по сравнению инструментов на основе обеспечения минимальных отклонений геометрических отклонений. Например, в [97, 96] приводятся исследования зависимостей погрешностей расположения осей обрабатываемых поверхностей от подачи и частоты вращения. В статье не рассматриваются другие показатели точности обрабатываемого отверстия, не ставится задача исследования изменения расположения осей в периоде стойкости инструмента.

Отдельные авторы предлагают экспресс методы сравнения концевых фрез методом скрабирования [89,106] при которой ширина полоса скрабирования связана с показателями вязкости разрушения (рисунок 1.19) или акустической эмиссии [85]. Метод пригоден для оценки преимуществ марок материала, но не учитывает геометрические особенности инструмента и принципиально не может быть применен для прогнозирования геометрической точности обрабатываемой поверхности.

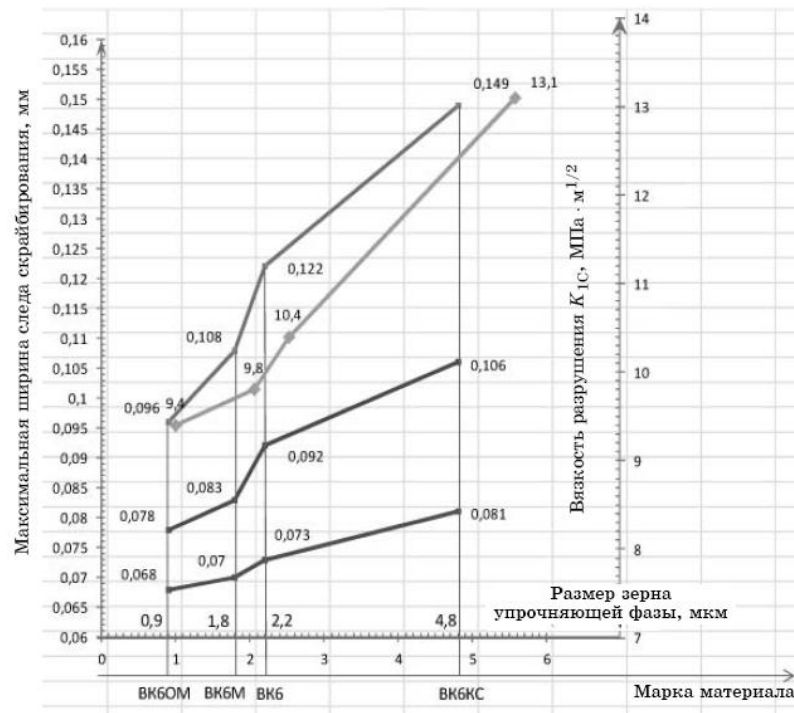


Рисунок 1.20 – Зависимость при различных значениях ширины полосы скрабирования с вязкостью разрушения различных марок инструментального материала [89]

Наиболее распространены исследования, результатом которых является математические модели, связывающие отдельные показатели инструмента с показателями обрабатываемого изделия. В [11] радиус фрезы с кривизной обработанной поверхности, в [7, 2] угол подъема винтовой линии с силами резания и отклонениями от перпендикулярности и шероховатости боковых поверхностей шпоночного паза, в [10] параметры волнистости боковой поверхности с параметрами вибраций, шероховатости поверхности, частота вращения шпинделя. Использовать целесообразно методики на этапе проектирования процесса. Действительно приобретенные фрезы могут свои отклонения в геометрии, состоянии материала, покрытии и т.д.

Примером зарубежного исследования, сравнивающего эффективность концевых фрез является работа [15]. В ней предлагается оценивать эффективность фрезерования по показателям $\text{см}^3/\text{мин}$, Ra, отклонений размеров, величине износа после фрезерования специально выполненных образцов изделий. И эта методика также не предполагает оценки эффективности например по показателям относительного расположения или отклонений формы.

1.5 Моделирование и улучшение геометрической точности изделий, обработанных концевыми фрезами

В [73, 72] приводятся математические зависимости отдельных геометрических показателей концевых твердосплавных фрез и общие упоминания о достигнутых значениях показателей точности обработки. Данные исследования можно использовать только как справочные, но не для целей моделирования геометрической точности. В [29, 12, 13, 14] приводятся данные изменения размера паза в зависимости от времени работы концевой фрезы. Авторы не дают схему измерений контролируемого размера, без которой

невозможно интерпретировать полученные экспериментальные данные для целей моделирования геометрической точности.

В [43, 31, 99] приводится методика расчета сил резания и даются рекомендации по выбору геометрических параметров процесса, данные могут использоваться для улучшения условий срезания припуска, но не для моделирования геометрической точности обработанной поверхности.

Для экспериментального подтверждения действия факторов необходимы исследования с применением современных динамометров [93], позволяющих в реальном времени регистрировать значения сил резания и упругих отжатий во фрезерной системе (рисунок 1.20). Согласно исследованиям [93] для эффективной регистрации изменения сил резания не каждый динамометр можно применять. В процессах чистового фрезерования гравюр штампов данный способ аппаратного моделирования невозможно применить вследствие их значительной массы и условий обработки.

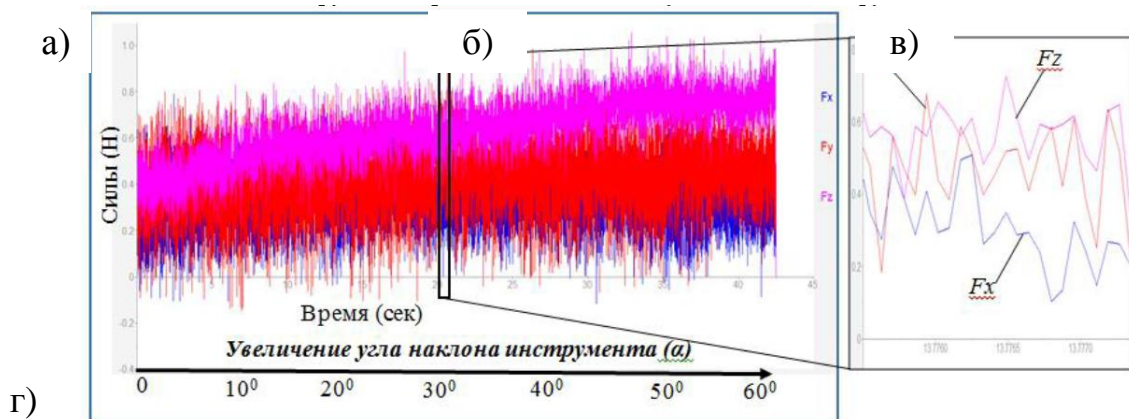
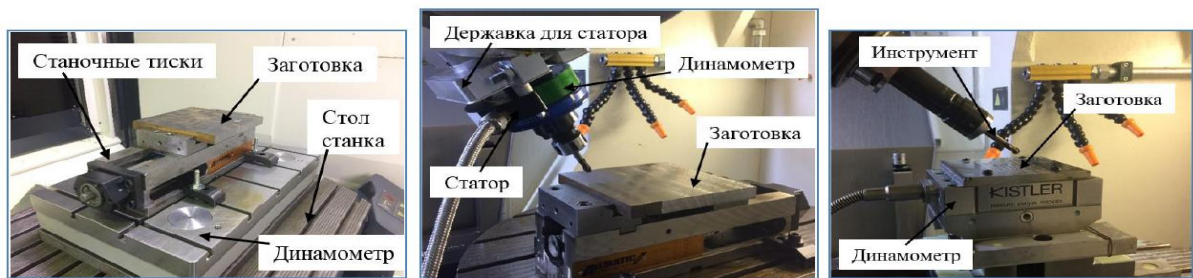


Рисунок 1.21 – Динамометры фирмы Kistler: а - стационарный динамометр 9253B23; б - ротационный динамометр 9123CQ05; в - динамометрический комплекс 9129AA, г) изменение сил резания при различном наклоне фрезы [93]

В [36] исследуется влияние параметров режимов резания и конструктивных параметров концевых фрез на величину виброскорости в результате авторами приведена номограмма выбора режимов резания (рисунок 1.21). Данных о значениях геометрической точности обработанных поверхностей авторы не приводят.

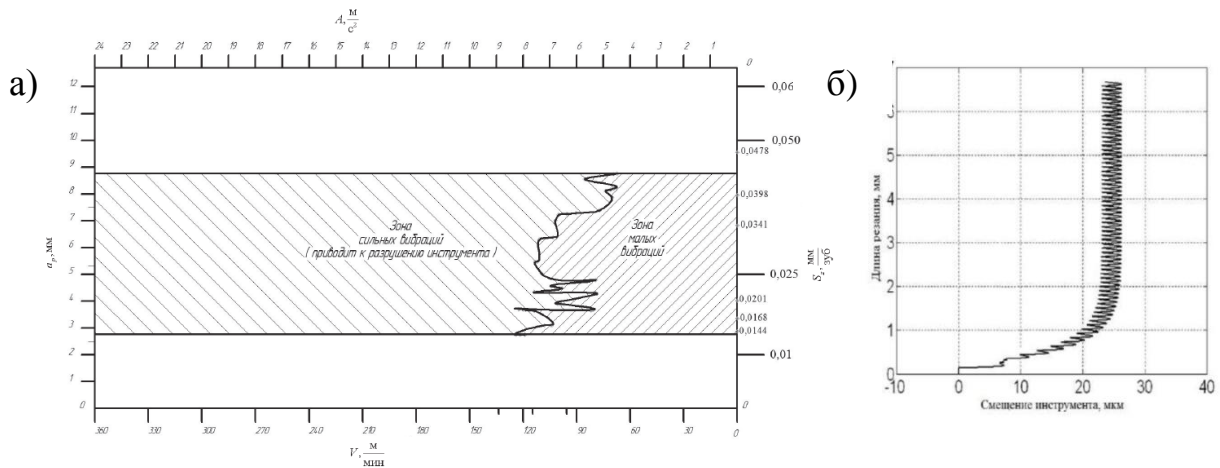


Рисунок 1.22 – Номограмма для определения оптимальных условий работы инструмента при различных глубинах резания a_p ($a_e=3$ мм –const)[36], траектории смещения (отжим концевой фрезы при обработке) [57]

В [57] также приведены данные измерений траектории смещения фрез с равномерным и неравномерным окружным шагом винтовых канавок на крайне малой длине резания. Утверждается [105] об улучшении точности на 18%. Но авторы [57] не разъясняют выбор длины резания, не приводят данные о параметрах режима резания. Отсутствуют эскизы перехода фрезерования.

В части повышения качества обработки более ценная информация в отношении предыдущих публикаций содержится в [19, 81].

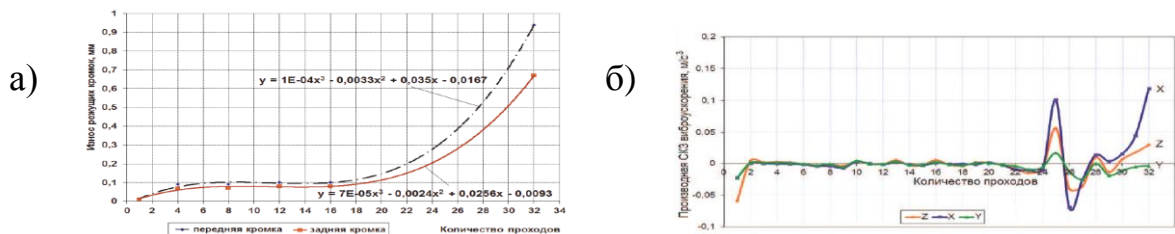


Рисунок 1.23 – а) Графики износа и б) виброускорений в периоде стойкости концевой фрезы, измеренные на шпинделе [19]

В них приводятся данные нарастания износа по задней поверхности ленточек и изменения виброускорений на шпинделе в зоне крепления фрезы в периоде стойкости (рисунок 1.22). При условии наличия системы измерений вибраций на шпинделе данные можно было бы использовать в производстве для обеспечения своевременной смены фрезы, но предельных значений виброускорений не приводят.

В [93, 92, 94] приведены математические моделирование сферической концевой фрезы по нормали к каждой точке криволинейной обрабатываемой поверхности на пятикоординатном станке с ЧПУ. Задача регулирования ориентации фрезы в процессе обработки для регулирования геометрических параметров обработанных поверхностей авторами не ставится. В [130, 107] рассмотрен алгоритм проектирования пятикоординатной обработки лопаток двигателей. Выбор режимов резания и предельных углов наклона фрезы выполняется из значений технологических параметров, таких как диаметр фрезы, номинальная высота шероховатостей R_a , собственных частот лопатки. Проектирование обработки не предусматривает процедур коррекции программы с ЧПУ для повышения геометрической точности обрабатываемой поверхности

В [18] рассматривают возможность аппаратного управления геометрической точностью на станках с ЧПУ за счет смещения настройки инструмента с учетом погрешностей измерительного контактного датчика, погрешностей базирования инструмента и данных измерений обрабатываемой поверхности детали. При соответствующей адаптации подход может быть использован для улучшения точности фрезерования гравюр штампов только при условии обеспечения достаточно высокой точности измерений контактным датчиком станка.

В [86] реализован метод прогнозирования геометрической точности обработки осевой обработки на основе анализа размерных связей кондуктора и анализа суммарной погрешности сверления. Реализация метода требуется организация координатных измерений звеньев, входящих в размерную цепь, а также трудоемких исследований составляющих суммарной погрешности процесса обработки.

В [65, 71, 61] предлагается управлять геометрической точностью непосредственного в процессе торцевого фрезерования. Управление осуществляется по данным трех бесконтактных датчиков, встроенных в инструментальную оправку (рисунок 1.23). Системой с ЧПУ по данным датчиков компенсируются как угловые, так и линейные отклонения плоскости. Данный метод компенсирует погрешности в процессе фрезерования и применяется только в процессах торцевого фрезерования. Для фрезерования концевыми сферическими фрезами из конструктивных ограничений его применение невозможно.

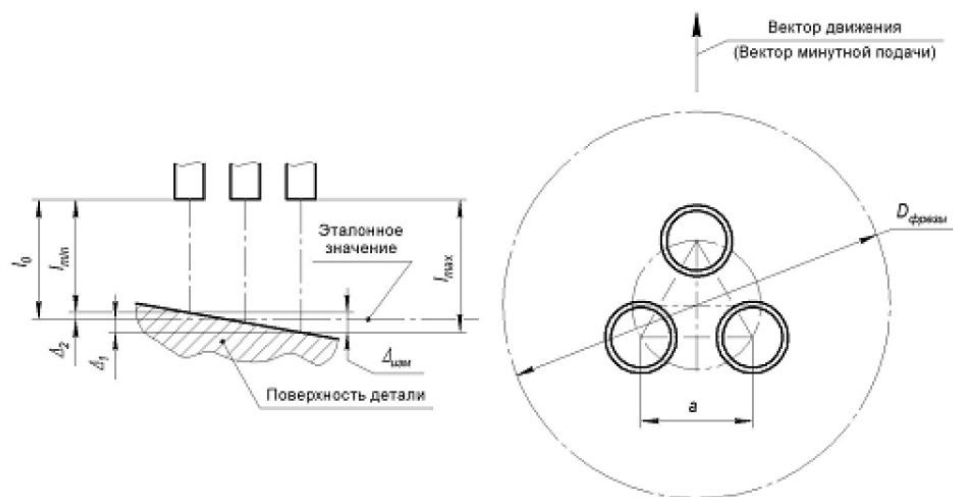


Рисунок 1.24 – Схема работы системы контроля [65]

Метод повышения точности фрезерной обработки на основе моделирования положения точек режущих кромок фрезы (рисунок 1.24) с учетом динамических факторов реализуется на основе глубокой идентификации конкретных фрезерных станочных систем [25, 78, 26]. Но методика такой паспортизации оборудования не приводится. Метод затруднительно применить в действующем инструментальном производстве.

В [52] авторы моделируют величину упругих деформаций торцевой части концевой фрезы при фрезеровании, но найденные значения деформаций далее никак не используются.

Стандартные функции САМ систем (NX, Адем, Спрут и др.) не предусматривают возможностей коррекции координат траекторий перемещений инструмента [47, 129, 51Ошибка! Источник ссылки не найден.], хотя отдельные исследования направлены на расширение их возможностей повышать точности обработки концевыми фрезами.

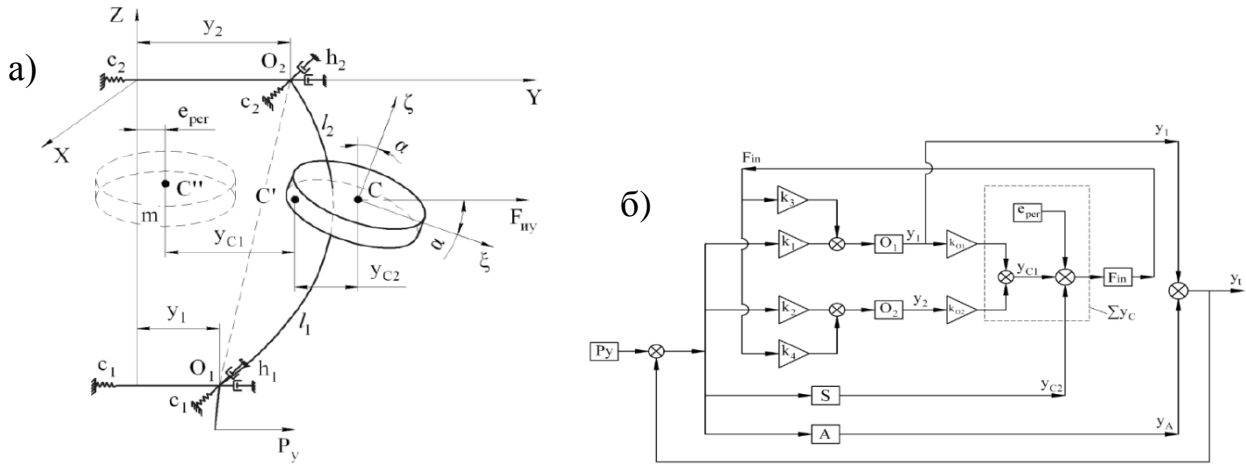


Рисунок 1.25 – а) Упругие смещения электрошпинделя в процессе работы: y_1, y_2 – смещение шпинделя в передней и задней опорах; y_{c1} – смещение центра масс шпинделя из-за смещений в опорах; y_{c2} – смещения центра масс из-за прогиба шпинделя, в) структурная схема алгоритма расчета траектории движения инструмента при фрезеровании

В [134] рассматривается идея компенсации погрешностей процесса фрезерования пазов концевыми шпоночными фрезами внесением суммарной коррекции в размер статической настройки. Величина суммарной коррекции находится по следующей зависимости:

$$\Delta_{с\sigma} = \Delta_p(\tau) + \Delta_T(\tau) + \Delta_d(\tau) \quad (1.3)$$

где $\Delta_p(\tau)$ – размерный износ инструмент;

$\Delta_T(\tau)$ - температурные деформации;

$\Delta_d(\tau)$ – дополнительные деформации от затупления инструмента.

В статье рассмотрены максимальные значения изменения приведенных составляющих в процессе фрезерования пазов и изложена общая концепция возможной компенсации, но не приведены математические модели изменения

размерного износа инструмента, температурных деформации и деформаций инструмента. Отсутствуют экспериментальные данные применения предлагаемого способа. Рассматривается геометрически простой объект обработки.

Более доступным методом улучшения геометрической точности является метод покадрового управления процессом обработки [68, 63, 64, 67, 88, 68]. Он обеспечивает переменность режимов резания, обеспечивая уменьшение деформаций фрезы как на участках с постоянным припуском, так и на участках со ступенчатым припуском, оставшимся после получистовых фрезерных переходов (рисунок 1.25). Авторы отмечают значительное повышение производительности обработки, а также уменьшение числа участков, обработанной поверхности штампа, не входящих в поле допуска.

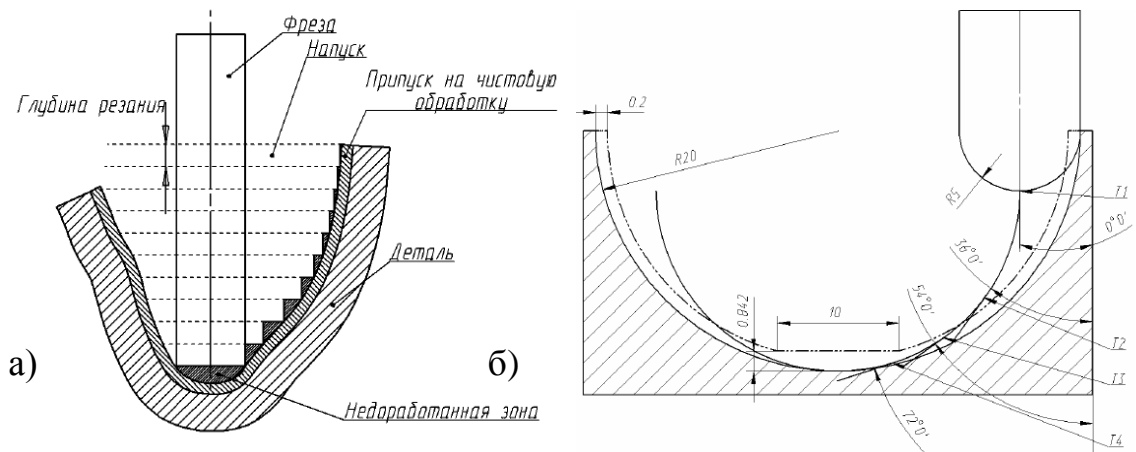


Рисунок 1.26 – Схема послойного черного снятия припуска, схема обработки криволинейной поверхности концевой сферической фрезой [68]

В [70] предлагается выполнять управление процессом фрезерования концевыми сферическими фрезами за счет коррекции величины подачи (рисунок 1.26, 1.27) по длине рабочего хода.

$$F_{i=F_3,0,18N} R_{\text{фр.}}^{-1,3} \ln \left(\frac{\Delta T}{2} + \frac{L^2}{8\Delta T} + R_{\text{фр.}} \right) \quad (1.4)$$

где $R_{\text{фр.}}$ - радиус фрезы

$L, \Delta T$ – показатели траектории перемещения фрезы

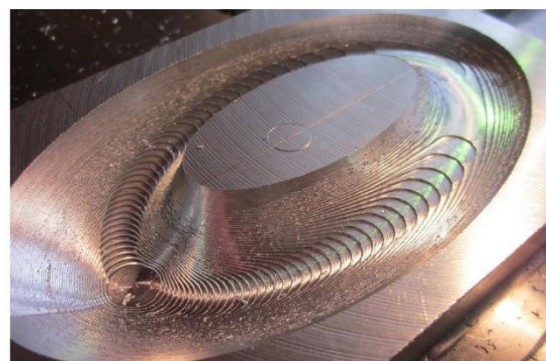
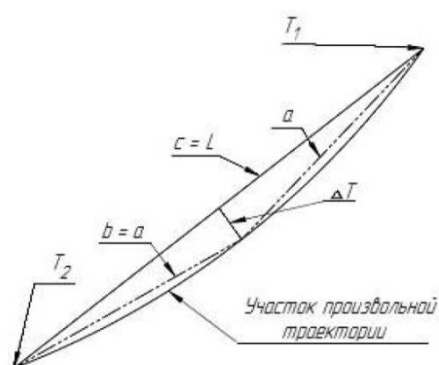
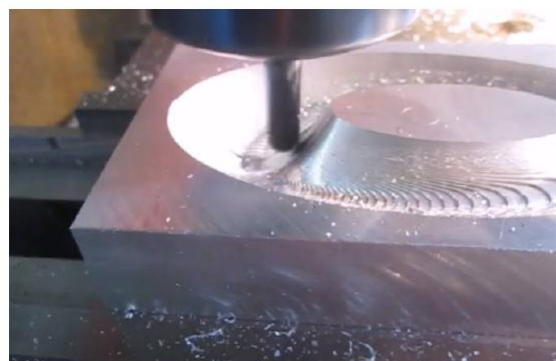
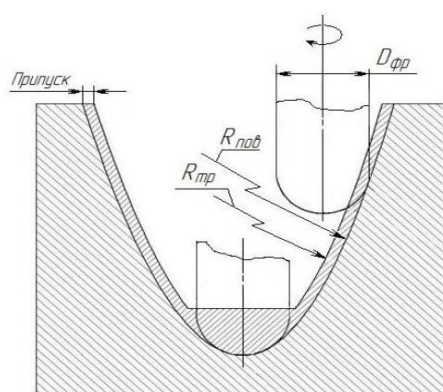


Рисунок 1.27 – а) Схема определения радиуса участка произвольной траектории, б) схема образования припуска на чистовую обработку вогнутой поверхности [70]



а) б)
Рисунок 1.28 – а) Схема чистовой обработки вогнутой поверхности, б) чистовое фрезерование детали с вогнутой поверхностью сложной формы [70]

По данным авторов корректировка величины подачи повысила производительность на 15-20% и снизила вероятность поломки инструмента. Данные об улучшении параметров шероховатости и других отклонений геометрических параметров отсутствуют. Метод не учитывает влияния износа фрезы на отклонения геометрических показателей точности.

Метод моделирования на основе конечных элементов с использованием соответствующих программных продуктов пригоден для управления обработкой. Авторы публикации [133] заявили о намерениях использования одновременно нескольких программных пакетов для моделирования процесса обработки с целью назначения оптимальных параметров обработки, других конкретных данных результативного применения заявленной методики не приводится.

1.6 Выводы по 1 главе

1. Недостаточна экспериментальная информация, полученная в результате обработки металла штампов. Исследования не содержат данных о фактическом износе режущих кромок фрезы в процессе регистрации экспериментальных данных. Недостаточны экспериментальные данные по одновременному изменению совокупности геометрических показателей в периоде стойкости исследуемых фрез. На основе имеющихся исследований невозможно выполнить прогнозирование отклонений формы поверхностей штампов по мере затупления инструмента в периоде стойкости.

2. Большинство имеющихся методик обеспечивают сравнение концевых фрез по методикам общепринятых стойкостных испытаний только по длительности периода стойкости. Целью других методов испытаний инструментов, например, экспресс методов, является сравнение их работоспособности. Как следствие, отсутствует возможность оценки инструментов по критериям одновременного обеспечения всего комплекса геометрических показателей точности. Таким образом, современные методики оценки и выбора оптимальных инструментов различных производителей не годятся для обеспечения современных требований к обеспечению качества обрабатываемых поверхностей деталей машин.

3. Выполнен обзор методов прогнозирования геометрической точности обрабатываемых поверхностей деталей машин концевым сферическим инструментом в переходах обработки резанием с учетом как правило нежесткости инструмента на параметры шероховатости поверхности. Таким образом, имеются исследования, решающие частные задачи моделирования геометрических показателей точности. По результатам исследований разных авторов можно спрогнозировать отдельные показатели точности фрезы, показатели процесса фрезерования или геометрических показателей точности обработанной поверхности. Необходимо разработать метод улучшения точности

чистового фрезерования поверхностей гравюр штампа концевыми фрезами по математическим моделям износа инструмента в периоде их стойкости.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ В ПЕРИОДЕ СТОЙКОСТИ КОНЦЕВЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ФРЕЗ

2.1 Методика испытаний сферических концевых фрез для формирования базы данных отклонений геометрической точности

Обработка штампов крупногабаритных поковок выполняется сферическими концевыми фрезами на трехкоординатных станках с ЧПУ (рисунок 2.1). Возможность поворота оси фрезы отсутствует. В процессе перемещения фрезы при обработке гравюр штампа сложной конфигурации припуск снимается любым участком режущей кромки.

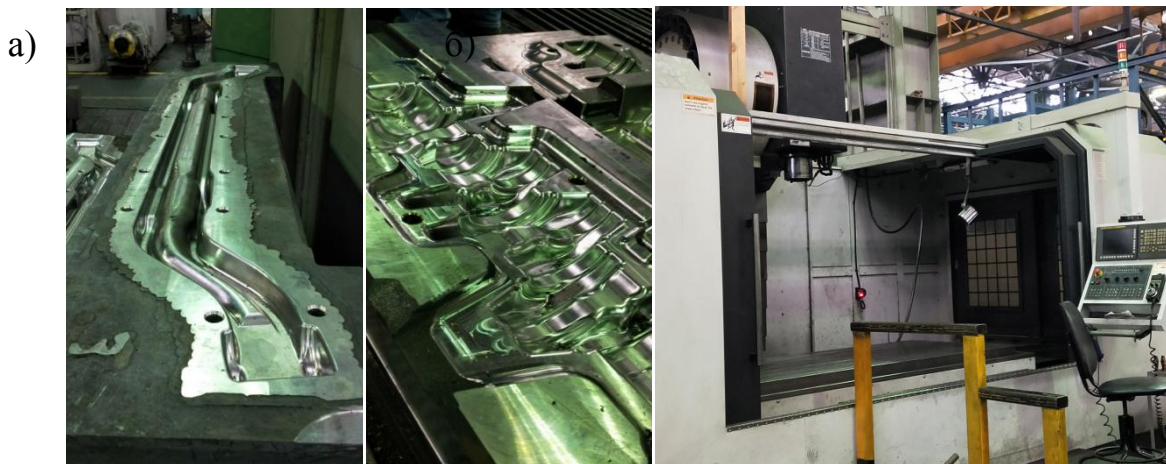


Рисунок 2.1 – Гравюры штамповой оснастки а) поковки балки, б) поковки коленчатого вала, в) трехкоординатный станок с ЧПУ

У сферической концевой фрезы значительно различаются геометрические параметры режущих клиньев по длине главной режущей кромки зубьев инструмента, поэтому для условий трехкоординатной обработки необходимо обеспечить испытания инструмента как минимум в трех зонах по длине режущей кромки инструмента.

- Поперечной режущей кромкой. Условия резания материала поперечной кромкой наиболее неблагоприятны из-за наличия участка кромки с нулевой скоростью резания.
- Кромкой в зоне, близкой к поперечной режущей кромке. В этой зоне условия резания затруднены вследствие неоптимальных геометрических параметров режущего клина инструмента.



Рисунок 2.2 – Схема проведения стойкостных испытаний сферической концевой фрезой образца материала штампа горячей объемной штамповки

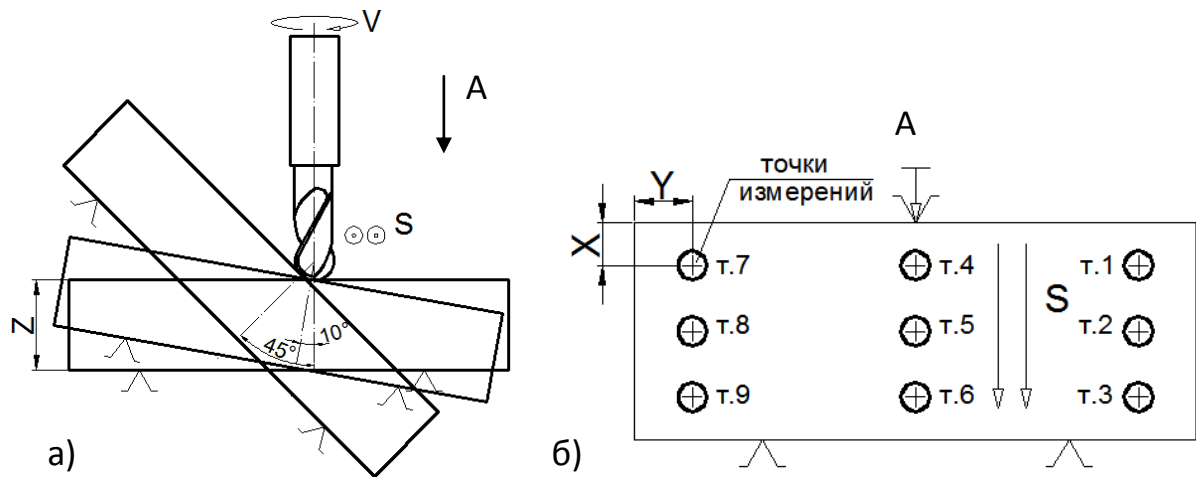


Рисунок 2.3 – а) Схема базирования при обработке, б) точки координатных измерений.

– Кромкой на удалении от поперечной режущей кромки. В этой зоне режущая кромка фрезы имеет благоприятные условия срезания припуска из-за оптимальных геометрических параметров, а также скорости резания.

В таблице 2.1 приведены углы ориентации обрабатываемого образца изделия в зависимости от вида обрабатывающего образца изделия. При обработке на четырех или пятикоординатном станке при составлении управляющей программы поперечная режущая кромка как правило не задействуется для снятия припуска.

Испытания инструмента каждым участком режущей кромки проводятся путем послойного снятия материала образца с толщинами, соответствующим принятым в производстве режимам резания обработки поверхностей гравюр штампа – S_z подаче на зуб фрезы мм/зуб, частоте вращения фрезы – n об/мин и глубине резания t , мм.

Таблица 2.1 – Углы ориентации призматического образца

Станок с ЧПУ, обрабатывающий гравюры штампа	Изнашиваемые режущие кромки		
	Поперечная кромка	В зоне поперечной кромки	В зоне, удаленной от поперечной кромки
Трехкоординатный	+	---	---
Четырехкоординатный	+	+	+
Пятикоординатный	+	+	+
	0°	$10^\circ-15^\circ$	$40^\circ-55^\circ$
Углы ориентации образца изделия			

Схема проведения испытаний инструмента приведена на рисунке 2.2. Обработка образцов может выполняться в наклонных машинных тисках если обработка выполняется на 3-х координатном фрезерном станке с ЧПУ или на 4-х или 5-ти координатных станках в обычных станочных тисках [115].

На рисунке 2.3 приведена схема базирования образцов материала в процессе испытаний сферических концевых фрез. После снятия каждого слоя материала выполняются координатные измерения высотных параметров образца в девяти точках (рисунок 2.4 б), а также параметры шероховатости.

По значениям координатных измерений для каждого слоя рассчитываются величины следующих отклонений геометрических показателей точности:

- от настроенного размера;
- от плоскостности;
- от прямолинейности в направлении, параллельном рабочему ходу;
- от прямолинейности в направлении, перпендикулярном рабочему ходу.

Отклонение от настроенного размера находится как расстояние от плоскости размера выхода инструмента по программе обработки с ЧПУ по координате $Z_{L_{H.P.}}$ до найденного положения прилегающей поверхности $L_{П.}$:

$$\Delta_{H.P.} = L_{П.} - L_{H.P.} \quad (2.1)$$

Нахождение отклонений от плоскостности выполняется по следующей зависимости:

$$\Delta_{\text{откл. пл.}} = \frac{|Ax_{ij} + By_{ij} + Cz_{ij} + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2.2)$$

где: i – столбец, j – строка.

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

$$\begin{aligned} A &= y_{31}(z_{12} - z_{33}) + y_{12}(z_{33} - z_{31}) + y_{33}(z_{31} - z_{12}) \\ B &= z_{31}(x_{12} - x_{33}) + z_{12}(x_{33} - x_{31}) + z_{33}(x_{31} - x_{12}) \\ C &= x_{31}(y_{12} - y_{33}) + x_{12}(y_{33} - y_{31}) + x_{33}(y_{31} - y_{12}) \\ D &= -x_{31}(y_{12}z_{33} - y_{33}z_{12}) - x_{12}(y_{33}z_{31} - y_{31}z_{33}) \\ &\quad - x_{33}(y_{31}z_{12} - y_{12}z_{31}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

За отклонение от плоскостности принимается размах наибольших расстояний от найденного положения плоскости до каждой измеренной точки обработанного образца. Координаты расположения точек для расчета отклонений от плоскостности и прямолинейности приведены на рисунке 2.4.

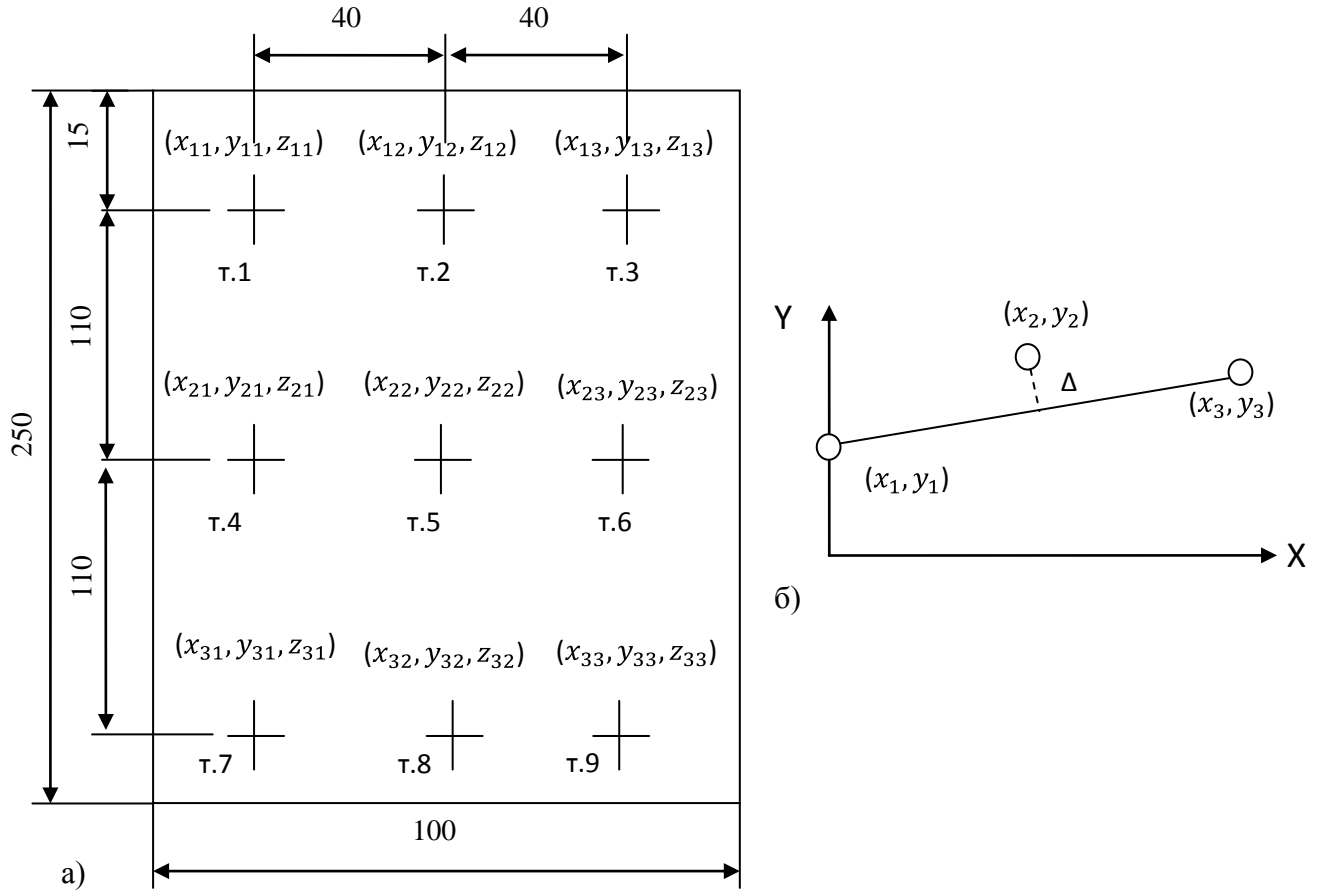


Рисунок 2.4 – а) Схема расположения точек измерения, б) схема нахождения отклонений от прямолинейности по контрольным точкам образца материала

Отклонение от прямолинейности находится в направлении рабочего хода инструмента $\Delta_{\text{ПРОД}}$ для трех профилей в точках (1, 2, 3), (4, 5, 6), (7, 8, 9) и перпендикулярно направлению рабочего хода $\Delta_{\text{ПЕРП}}$ в точках (1, 4, 7), (2, 5, 8), (3, 6, 9) находится по следующей формуле:

$$\Delta = \frac{|Ax_2 + By_2 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (2.4)$$

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

Измерение шероховатости высотных параметров Ra, Rz а также шаговых S, Sm выполняется вдоль и поперек траектории рабочего хода по мере износа по задней поверхности инструмента и размерного износа профилографом. Координатные измерения должны выполняться на координатно-измерительной машине или в случае ее отсутствия на высокоточном приборе измерения высот с ценой деления 1 мкм.

По найденным значениям отклонений геометрических показателей выполняется построение графиков их изменения в периоде стойкости инструмента, графики аппроксимируются линейными или степенными функциями. Данные графиков в дальнейшем используются для прогнозирования точности в период обработки сферической концевой фрезой и расчета корректирующих смещений управляющей программы станка с ЧПУ, обрабатывающей гравюры штампа.

2.2 Разработка математических моделей изменения геометрической точности образцов материала штампа обработанных фрезой, заточенной на пятикоординатном заточном станке с ЧПУ

Исследование характеристик точности в периоде стойкости концевой сфероцилиндрической фрезы на образцах материала штампа выполнены на пятикоординатном станке с ЧПУ Hedelius RS605 K20 (рисунок 2.5). Испытания проведены на образцах материала прямоугольной формы размерами 250x100x40 мм из стали 4X5МФС в состоянии поставки с измеренной твердостью 177-187 НВ. Испытывалась фреза диаметром 8 мм ф. Sandvik Coromant 8RR0823618 R216.42-08030-AK16G 1610. Параметры перехода фрезерования: n - 7900 об/мин; S =2000 мм/мин; Sz=0,12 мм/зуб. Эффективный диаметр режущей части фрезы находится по следующей формуле:

$$D_{эф} = 2 \cdot R \cdot \cos (90^\circ - \alpha)$$

где R – радиус сферической фрезы, мм

α - угол наклона фрезы

В результате величина эффективного диаметра для угла наклона в $45^\circ D_{\text{эф } 45^\circ} = 5,65$ мм, Скорость резания, рассчитанная с учетом значения эффективного диаметра $V_{\text{эф.45}} = 140,1$ м/мин.

Для угла наклона $15^\circ D_{\text{эф } 15^\circ} = 2,07$, скорость резания $V_{\text{эф.15}} = 51,34$ м/мин. Площадь обрабатываемой поверхности $0,025$ м². Глубина фрезерования выбрана исходя из условий чистового фрезерования $0,15$ мм. Вылет фрезы 70 мм.

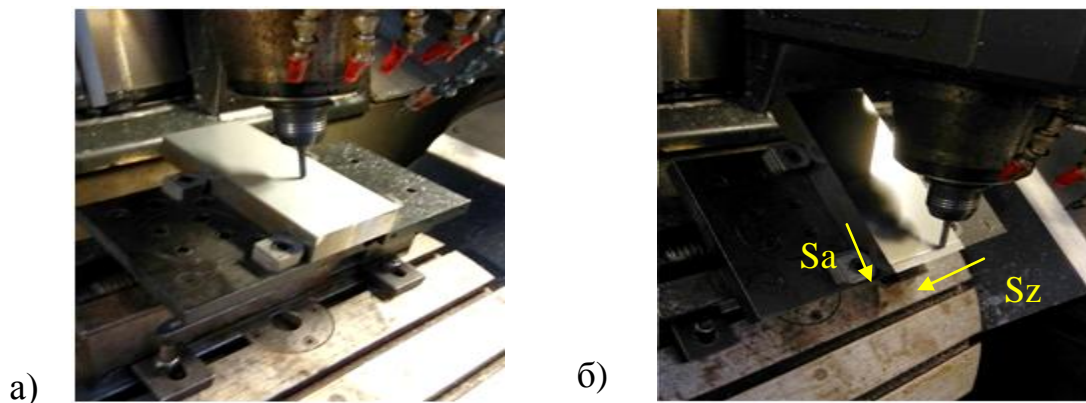


Рисунок 2.5 – Обработка на пятикоординатном станке с ЧПУ Nedelius RS605 K20 при различных углах наклона образцов материала

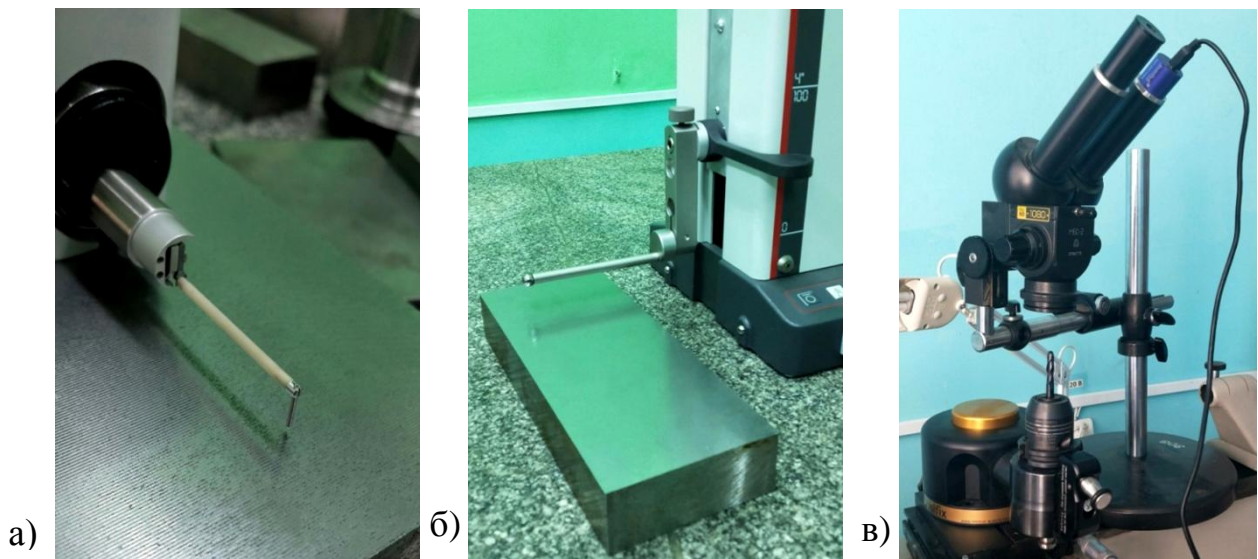


Рисунок 2.6 – Измерение а) параметров шероховатости, б) высотных размеров образцов материала, в) съемка очагов износа режущим кромкам концевых сферических фрез

Закрепление фрез производилось в патрон Shunk TENDO E Compact. Биение инструмента в патроне составило 2-4 мкм. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости применялся сжатый воздух (P=6 атм.). Измерения шероховатости проводились профилографом М 400 ф. Mahr, координатные измерения в заданных точках образца выполнены высотомером ф. MahrDigimahr 817 CM (рисунок 2.6). Величина износа измерялась по фотографиям при помощи программного продукте Левенгук, выполненным окулярной камерой стереомикроскопа МБС 2 при увеличении в 0,6 раз.

На рисунке 2.7 приведены фотографии и графики нарастания фаски износа по задней поверхности и размерного износа и в периоде стойкости фрезы при установке образца материала по углом 15°. Фаска износа после снятия первого слоя нарастает с 0,029 мм до 0,083 после восьмого слоя. На рисунке 2.8 под углом 45°. После снятия первого слоя материала величина износа составила величину в 0,048 мм. После снятия 10-ти слоев материала наибольшая величина фаски износа по задней поверхности составила величину в 0,244 мм. Величина размерного износа сферической режущей кромки составила величину 0,042 мм.

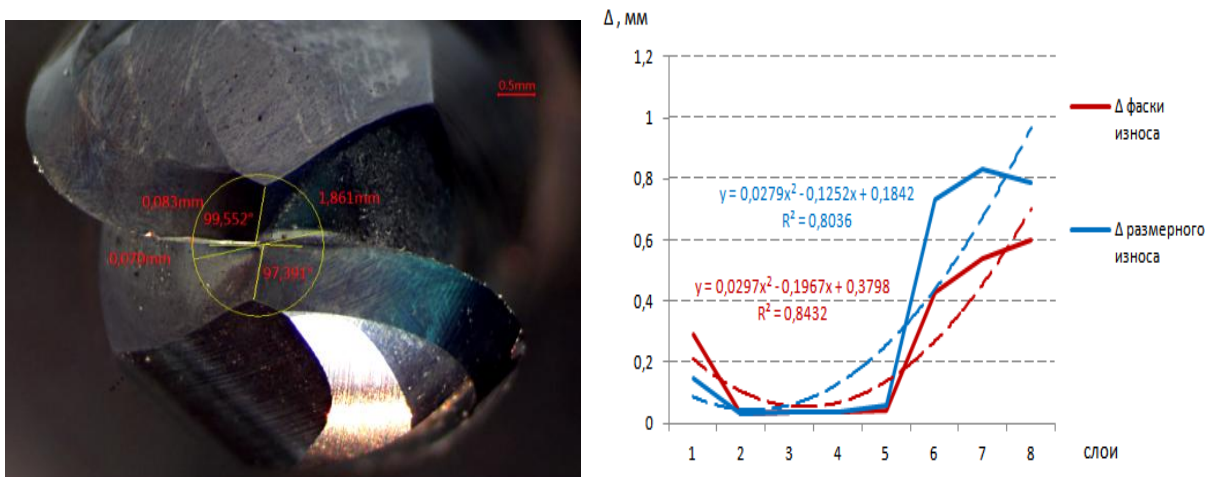


Рисунок 2.7 – Фаски износа по задней поверхности сферических концевых фрез после обработке образца материала под углом 15°

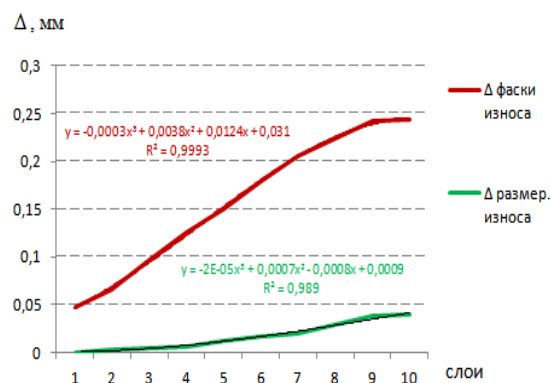
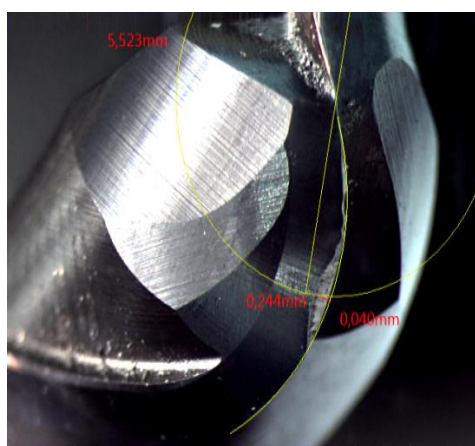


Рисунок 2.8 – Фаски износа по задней поверхности сферических концевых фрез после обработке образца материала под углом 45°

Наличие графиков износа позволяет построить математическую модель изменения величин геометрических параметров обрабатываемых поверхностей гравюр в периоде стойкости фрезы.

2.2.1 Анализ параметров шероховатости

Величина шероховатости обрабатываемой поверхности зависит от параметров фрезерования. При угле наклона фрезы в 0° и наличия радиального биения ее величина находится по следующей формуле[37]:

$$Ra = \frac{(S_z + \Delta d)^2}{4D} \quad (2.5)$$

где S_z - подача на зуб фрезы, мм

Δd – радиальное биение, мм

D – диаметральный размер фрезы, мм

$$Ra = \frac{(S_z + \Delta d)^2}{4D} = \frac{(0,12 + 0,004)^2}{4 \cdot 8} = 0,00048 \text{ мм.} \quad (2.6)$$

Наклонное фрезерование значительно увеличивает величину шероховатости. По данным [37] величина микронеровностей при 45° составляет величину половины величины биения фрезы. При 4 мкм. ориентировочная величина шероховатости 2 мкм.

На рисунке 2.9 приведены графики изменения высотных и шаговых показателей шероховатости в периоде стойкости концевой сферической фрезы. Приведены данные на различных длинах трассировки в процессе измерения шероховатости. При длине трассировки 0,8 мм профилограмма включает кинематическую шероховатость, при уменьшении длины трассировки до 0,25 мм профилограмма состоит из микронеровностей на поверхности кинематической шероховатости.

При обработке образца, установленным под углом наклона 15° изнашивание режущей кромки приводит к незначительному нарастанию значений шероховатости R_a с 2 мкм до 2,5 мкм. При этом более значителен рост значений R_z с 6 мкм до 16 мкм для длины трассировки в 0,8 мм. Износ в значительной мере влияет на величину R_z шероховатости, рассчитанной по 10-ти максимальным значениям. Износ сопровождается уменьшением среднего шага значений неровностей. График их изменений приведен на рисунке 2.14 Величина шага R_{Sm} уменьшается с 600 мкм до 300 мкм. В процессе изнашивания режущей кромки срезание припуска, частично переходит в процесс смятия микронеровностей.

При установке образца под углом 45° износ режущей кромки фрезы сопровождается увеличением величины шероховатости. R_a возрастает в два раза с 0,5 мкм до 1 мкм. R_z также увеличивается с 3 мкм до 5 мкм. Величина шероховатости при работе центральной зоной главной режущей кромки в два раза меньше, чем при работе периферийной зоной в области поперечных режущих кромок. В отличие от обработки периферийной кромкой в области поперечных режущих кромок, притупление режущих кромок приводит к увеличению среднего шага шероховатости с 250 мкм до 420-ти мкм, следовательно процесс резания не сопровождается значительной пластической деформацией обрабатываемого материала и связан с изменением геометрии профиля режущей кромки инструмента.

Требования чертежа к рабочей поверхности гравюр штампа R_a 3,2 мм в периоде стойкости обеспечиваются. Риск выхода за пределы рекомендуемых

значений выше при обработке режущей кромкой, расположенной ближе к поперечной режущей кромке фрезы. Для уменьшения шероховатости поверхности следует задействовать режущие кромки, удаленные от поперечной режущей кромки, что позволит уменьшить значения R_a в два раза.

В таблице 2.2 и 2.3 приведены данные измерения высотных размеров при угле обработки заготовки в 15° и 45° по этим данным по формулам 2.1-2.5 выполняются расчеты отклонений формы и профиля, а также отклонений от настроечного размера.

2.2.2 Изменение отклонений формы и профиля поверхности

На рисунке 2.10 приведены графики изменения отклонений от настроечного размера. При обработке образца материала фрезой с углом наклона в 15° в периоде стойкости износ фрезы приводит к отклонениям от настроечного размера в пределах 0,02 мм. При обработке образца под углом 45° отклонение достигает величины в 0,08 мм, что связано с увеличением податливости сферической фрезы, нарастанием износа режущей кромки фрезы и увеличения сил резания. Компенсация данного вида отклонения в ходе обработки сферической концевой фрезы наиболее эффективна для улучшения точности обработанной поверхности гравюр штампа.

На рисунке 2.11 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 (рисунок 2.11 а). при обработке под углом 45° после снятия восьмого слоя материала образца величина катастрофически увеличивается с 0,04 мм до 0,16 мм при снятии последующих 2-х слоев (рисунок 2.11 б). Аналогичные факторы проявляются при формировании отклонений от прямолинейности профиля в поперечном и продольном направлении (рисунок 2.11 б, д). Обеспечивается

величина отклонений до 0,02 мм при обработке под углом 15° и до 0,06 мм при обработке под углом 45° . Как по направлению рабочего хода фрезы, так и в перпендикулярном ему отклонение от прямолинейности составляет до 0,03 мм.

Для обеспечения минимальных отклонений от плоскостности необходимо ограничить съём фрезой материала 0,2 м² обработанной поверхности образца материала. Путь резания режущей кромки составил величину 1333 м, а время резания 704 мин.

Таблица 2.2 – Высотные размеры образца материала, измеренные в заданных точках образца материала при угле базирования заготовки в 15°

Слой	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6	Точка 7	Точка 8	Точка 9	Размах	Корреляция по слоям
Слой 2	39,239	39,315	39,418	39,283	39,37	39,482	39,335	39,421	39,539	0,3	0,300
Слой 3	39,048	39,129	39,234	39,109	39,205	39,313	39,179	39,27	39,389	0,341	0,341
Слой 4	38,881	38,975	39,096	38,945	39,055	39,179	39,024	39,13	39,258	0,377	0,377
Слой 5	38,716	38,816	38,918	38,779	38,901	39,024	38,869	38,983	39,097	0,381	0,381
Слой 6	38,578	38,675	38,777	38,643	38,747	38,865	38,724	38,82	38,935	0,357	0,357
Слой 7	38,441	38,548	38,653	38,498	38,608	38,715	38,591	38,696	38,804	0,363	0,363
Слой 8	38,275	38,38	38,498	38,334	38,462	38,572	38,418	38,538	38,661	0,386	0,386
Размах	0,964	0,935	0,92	0,949	0,908	0,91	0,917	0,883	0,878		
Корреляция по точкам	0,999929	0,999722	0,999583	0,99967	0,999771	0,999333	0,999688	0,999805			

Таблица 2.3 – Высотные размеры образца материала, измеренные в заданных точках образца материала при угле базирования заготовки в 45°

Слой	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6	Точка 7	Точка 8	Точка 9	Размах	Корреляция по слоям
Слой 2	37,625	37,727	37,851	37,674	37,782	37,898	37,757	37,869	37,999	0,374	37,625
Слой 3	37,47	37,584	37,694	37,568	37,666	37,795	37,629	37,751	37,89	0,420	37,47
Слой 4	37,325	37,452	37,57	37,404	37,521	37,648	37,49	37,607	37,736	0,411	37,325
Слой 5	37,188	37,287	37,418	37,259	37,379	37,521	37,356	37,478	37,613	0,425	37,188
Слой 6	37,075	37,18	37,297	37,162	37,266	37,401	37,227	37,344	37,48	0,405	37,075
Слой 7	36,902	37,026	37,153	36,994	37,113	37,235	37,079	37,202	37,338	0,436	36,902
Слой 8	36,803	36,897	37,023	36,845	36,972	37,1	36,953	37,066	37,185	0,382	36,803
Слой 9	36,658	36,753	36,875	36,699	36,828	36,953	36,8	36,908	37,031	0,373	36,658
Слой 10	36,48	36,595	36,731	36,548	36,678	36,807	36,643	36,756	36,9	0,420	36,48
Размах	36,358	36,451	36,585	36,421	36,542	36,669	36,511	36,511	36,64	0,311	36,358
Корреляция по точкам	1,267	1,276	1,266	1,253	1,24	1,229	1,246	1,358	1,359		1,267

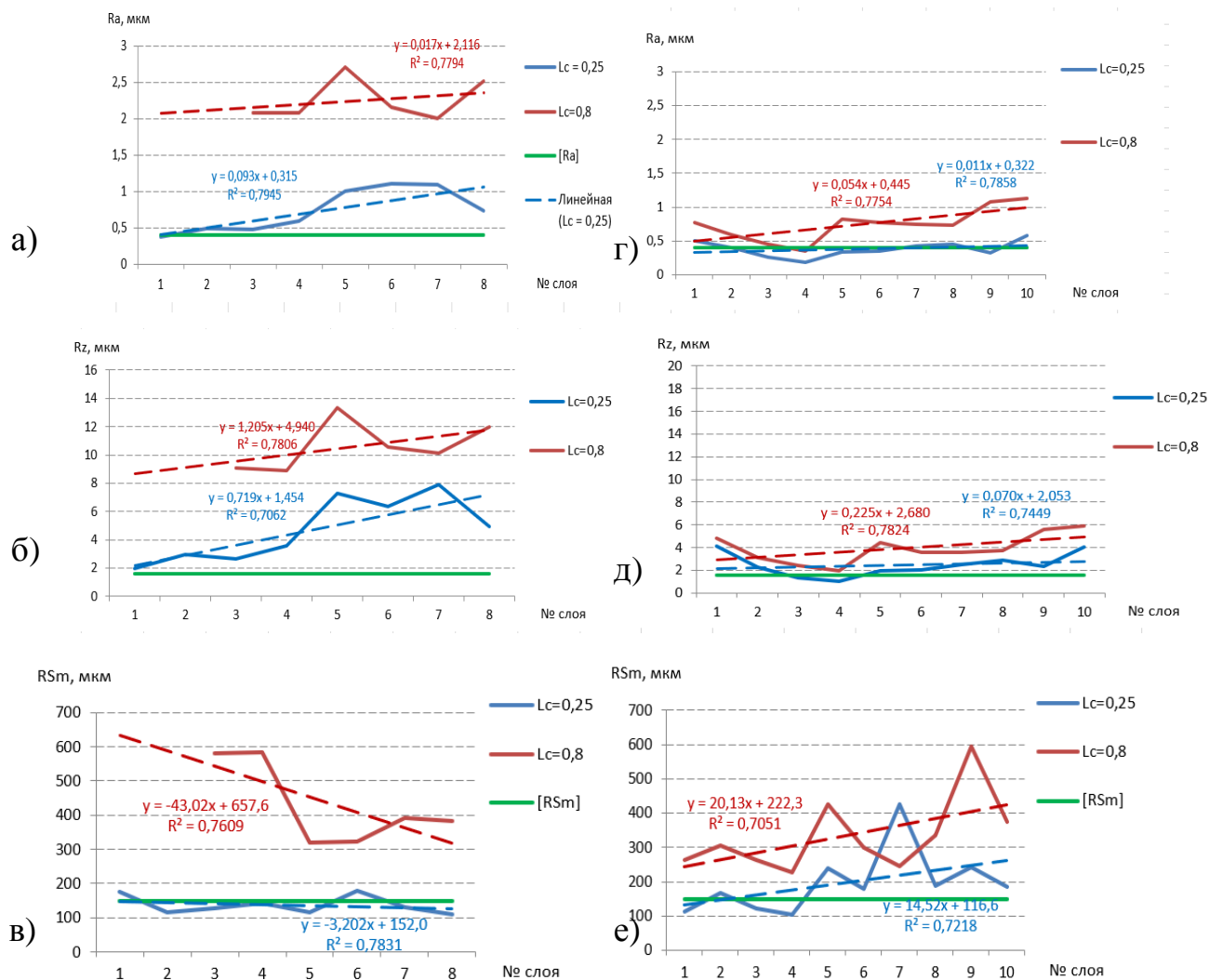


Рисунок 2.9 – Графики изменения высотных Ra, Rz и шаговых Sm параметров шероховатости полученные при установке образца материала а, б, в) под углом 15°, г, д, е) под углом 45°

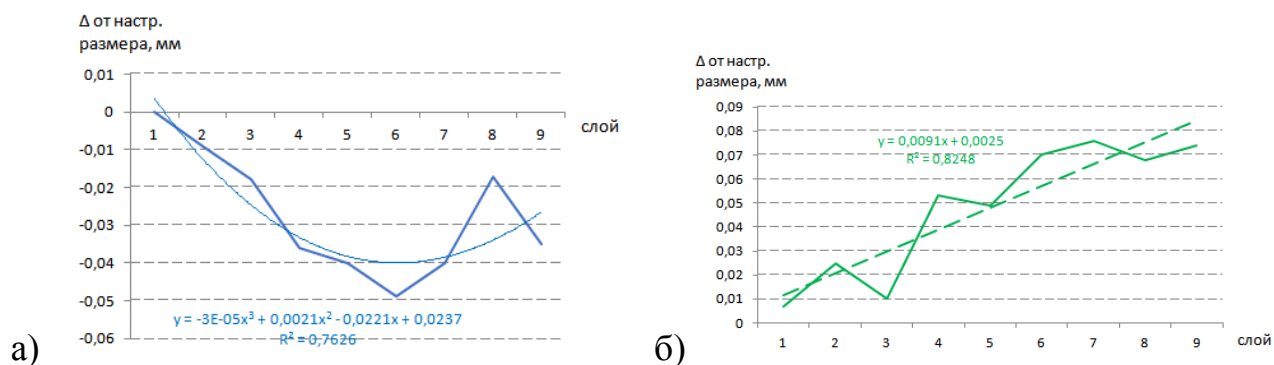


Рисунок 2.10 – Графики изменения отклонений базовой плоскости от настроечного размера при установке образца материала а) под углом 15°, б) под углом 45°

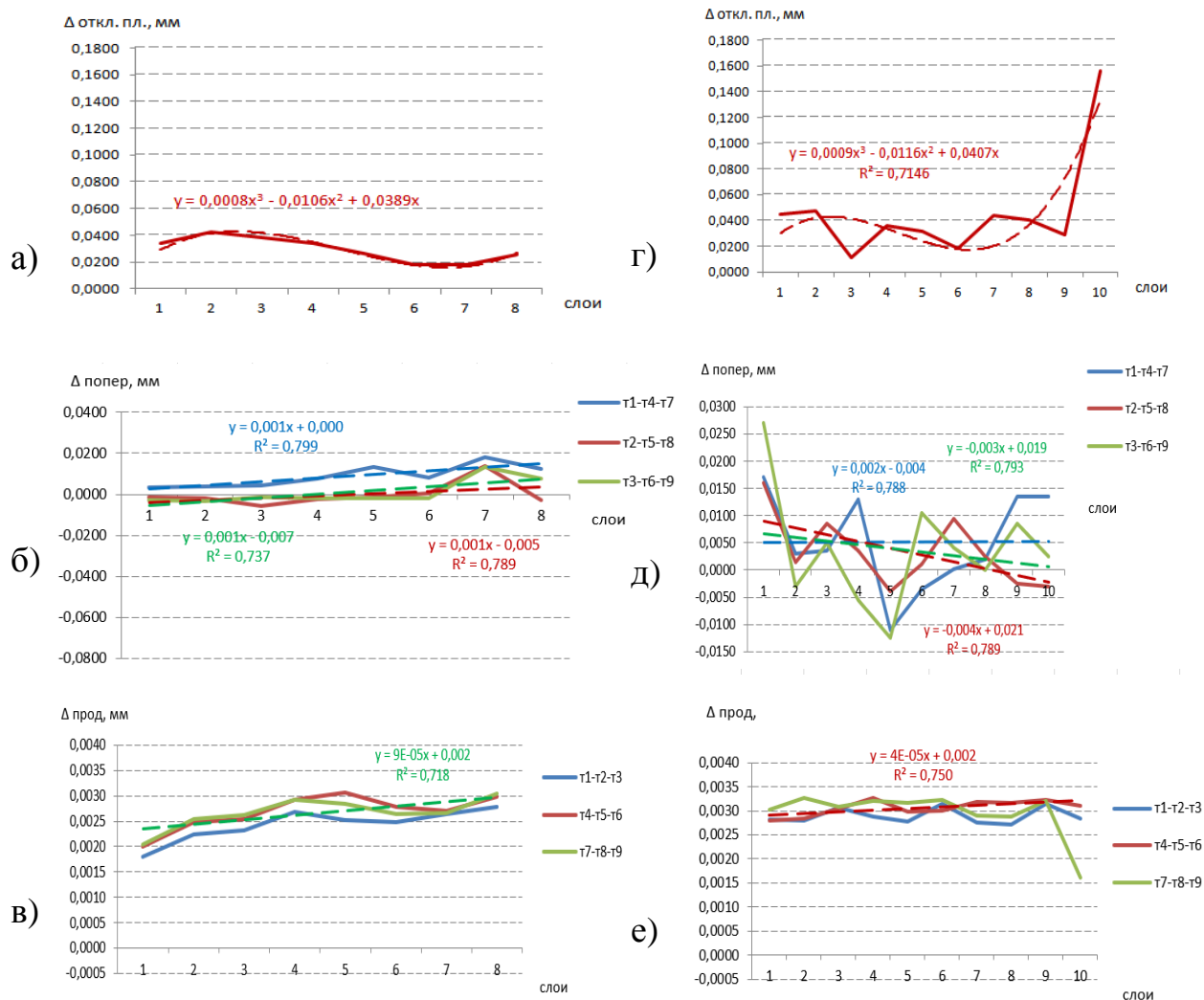


Рисунок 2.11 – Графики изменения отклонений от плоскостности и прямолинейности при установке образца материала а, б, в) под углом 15° , г, д, е) под углом 45°

Имея информацию об изменении отклонений настроечного размера в периоде стойкости фрезы можно рассчитать ориентировочную силу резания в процессе чистового фрезерования.

$$Y = -\frac{P_y \cdot l^3}{3EJ}$$

где P_y - сила резания в направлении нормальном оси фрезы, Н

l – вылет фрезы, мм

E – модуль упругости для стали $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$

J – момент инерции сечения фрезы приведенного диаметра $J = 82 \text{ мм}^4$ [76] для шпоночной фрезы диаметром 8 мм. ГОСТ 9140-78. приведенный диаметр составляет величину 6,39 мм. [76].

Изменение максимального отжатия фрезы в периоде стойкости составляет величину до 0,08 мм, следовательно изменение силы резания $\Delta P_y = 12,04 \text{ Н}$.

Таблица 2.4 – Регрессионные модели изменения высотных и шаговых параметров шероховатости в периоде стойкости сферической концевой фрезы, переточенной на пятикоординатном заточном станке с ЧПУ

Геометрические показатели точности	Установ образца материала штампа под углом:	
	15°	45°
Отклонение от базовой плоскости настроечного размера $\Delta_{\text{настр.}}$, мм.	$\Delta_{\text{настр.}} = -3 \cdot 10^{-5} l^3 + 0,0021 l^2 - 0,0221 l + 0,0237$ $R^2 = 0,7626$	$\Delta_{\text{настр.}} = 0,0091 l + 0,0025$ $R^2 = 0,8248$
Отклонение от плоскостности $\Delta_{\text{откл.пл.}}$, мм	$\Delta_{\text{откл.пл.}} = 0,0008 l^3 - 0,0106 l^2 + 0,0389 l$ $R^2 = 0,93$	$\Delta_{\text{откл.пл.}} = 0,0009 l^3 - 0,0116 l^2 + 0,0407 l$ $R^2 = 0,71$
Отклонение от прямолинейности вдоль РХ $\Delta_{\text{пр.попер.}}$, мм	$\Delta_{\text{пр.попер.}} = 0,0011 l - 0,005$ $R^2 = 0,71$	$\Delta_{\text{пр.попер.}} = 0,0024 l - 0,004$ $R^2 = 0,75$
Отклонение от прямолинейности перпендикулярно РХ $\Delta_{\text{прод.}}$, мм	$\Delta_{\text{прод.}} = 0,00009 l + 0,0023$ $R^2 = 0,79$	$\Delta_{\text{прод.}} = 0,00004 l + 0,0029$ $R^2 = 0,80$
Параметры шероховатости	под углом 15°	под углом 45°
Rz, мкм	$Rz = 1,2052 l + 4,9401$ $R^2 = 0,78$	$Rz = 0,2251 l + 2,6803$ $R^2 = 0,78$
Ra (Lc=0,8), мкм	$Ra = 0,0179 l + 2,116$ $R^2 = 0,71$	$Ra = 0,0546 l + 0,4453$ $R^2 = 0,77$
Sm, мкм	$Sm = -43,029 l + 657,66$ $R^2 = 0,76$	$Sm = 20,139 l + 222,33$ $R^2 = 0,70$
Износ режущих кромок фрезы	под углом 15°	под углом 45°
Фаска износа по задней поверхности, мм	$\Phi И = -0,0279 l^3 - 0,1252 l + 0,1842$ $R^2 = 0,80$	$\Phi И = -0,0003 l^3 + 0,0038 l^2 + 0,0124 l + 0,031$ $R^2 = 0,99$
Размерный износ режущей кромки, мм	$\Pi И = -0,0297 l^2 - 0,1967 l + 0,3798$ $R^2 = 0,84$	$\Pi И = -0,00005 l^3 + 0,0007 l^2 - 0,0008 l + 0,0009$ $R^2 = 0,98$

В слое $l_{\text{рез.}} = 166 \text{ м}$.

Для расчета регрессий использован готовый программный продукт Microsoft Excel.

В таблице 2.4 приведены итоговые регрессионные математические модели изменения высотных и шаговых параметров шероховатости в периоде стойкости сферической концевой фрезы, полученные по данным графиков (рисунок 2.9, 2.10, 2.11). Модели используются для расчета значений параметров шероховатости в процессе моделирования геометрической точности процесса чистового фрезерования.

2.3 Разработка математических моделей изменения геометрической точности образца материала штампа, обработанного сферической концевой фрезой, заточенной на универсальном заточном оборудовании

Изношенные после обработки гравюр штампа фрезы отправляются на участок переточки, оснащенный универсальным заточным оборудованием (рисунок 2.12а). Участок находится в шаговой доступности и позволяет оперативно восстанавливать режущую способность инструмента. Переточка по задней поверхности выполняется на универсально-заточном станке, после чего на ручном профиле заточном станке формируется радиусный профиль рабочей части фрезы.

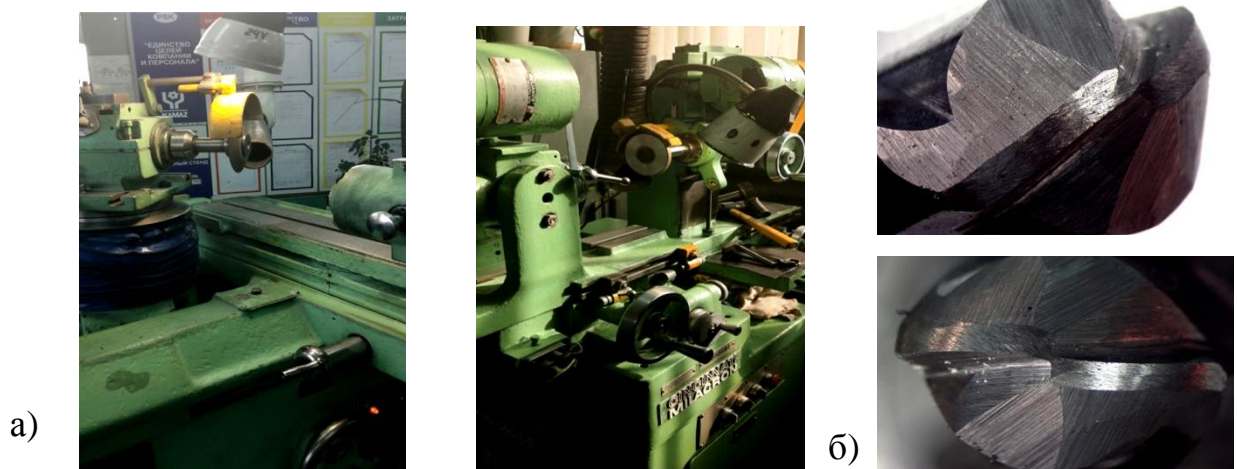


Рисунок 2.12 – а) Универсально-заточные станки переточки концевых сферических фрез, б) рабочая часть заточенной фрезы

В результате не удается обеспечить затылование по задней поверхности фрезы (рисунок 2.12б). Переточенные фрезы используются для получистой обработки гравюр штампа и реже для чистовой обработки гравюр штампа. Фреза испытана по той же методике, что и заточенная на заточном пяти-координатном станке с ЧПУ.

На рисунке 2.13 приведены фотографии и графики нарастания фаски износа по задней поверхности и размерного износа и в периоде стойкости фрезы при установке образца материала под углом 15° .

При обработке материала под углом зоне поперечной режущей кромки износ выражен в виде сколов. После удаления 1-го слоя сколы составили величину в 0,2 мм, после снятия 3-го слоя величина сколов увеличилась до 0,6 мм. Исследование влияния износа фрезы на геометрические параметры фрезы решено остановить.

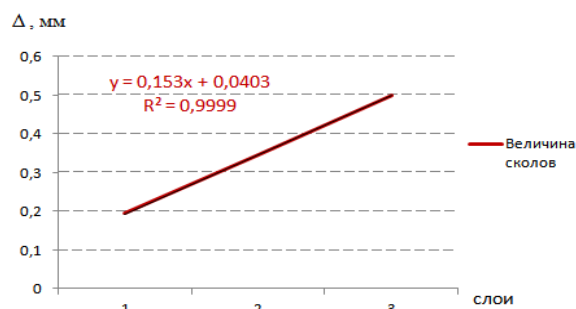
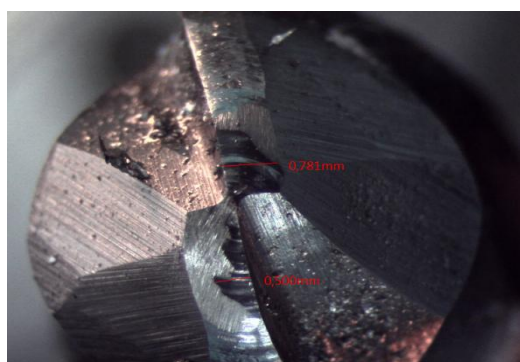


Рисунок 2.13 – Износ в виде сколов по задней поверхности сферических концевых фрез после обработке образца материала под углом 15°

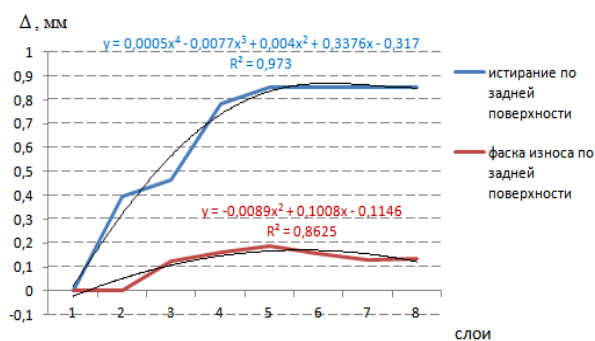
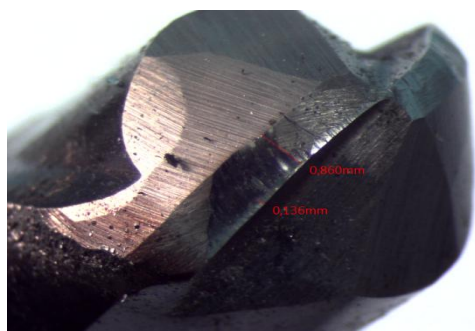


Рисунок 2.14 – Фаски износа в виде затираания и притупления режущей кромки по задней поверхности сферических концевых фрез после обработки образца материала под углом 45°

При обработке материала под углом 45° наблюдается значительное затираание по задней поверхности. Сначала локальное, затем после снятия четвертого слоя до величины 0,4 мм, затем затираание распространяется по всей площади контакта с припуском до величины 0,8 мм. Одновременно происходит формирование интенсивное истирание режущей кромки в виде притупления режущей кромки по задней поверхности до величины в 0,2 мм не изменяющейся по периоду стойкости инструмента.

2.3.1 Анализ параметров шероховатости

На рисунке 2.15 приведены графики изменений R_a и R_z в периоде стойкости концевой фрезы со сферической режущей частью.

При обработке образца, установленного под углом наклона 15° изнашивание режущей кромки также приводит к незначительному нарастанию значений шероховатости R_a с 1 мкм до 2,2 мкм. При этом также более значителен рост значений R_z с 15 мкм до 25 мкм для длины трассировки в 0,8 мм. Износ фрезы в значительной мере влияет на величину R_z шероховатости, рассчитанной по 10-ти максимальным и минимальным значениям.

Износ фрезы сопровождается уменьшением среднего шага значений неровностей. График их изменений приведен на рисунке 2.15. Величина шага R_{Sm} уменьшается с 600 мкм до 500 мкм при установке образца в 15° . В процессе изнашивания режущей кромки срезание припуска, частично переходит в процесс смятия микронеровностей.

При установки образца по углом 45° износ режущей кромки фрезы сопровождается незначительным увеличением величины шероховатости. R_a возрастает в два раза с 0,8 мкм до 1,1 мкм. R_z также увеличивается с 5 мкм до 8 мкм.

В отличие от обработки периферийной кромкой в области поперечных режущих кромок, притупление режущих кромок приводит к увеличению

среднего шага шероховатости с 200 мкм до 300-ти мкм, следовательно процесс резания не сопровождается значительной пластической деформацией обрабатываемого материала и связан с изменением геометрии профиля режущей кромки инструмента.

Требования чертежа к рабочей поверхности гравюр штампа Ra 3,2 мкм в периоде стойкости не обеспечиваются. Для уменьшения шероховатости поверхности следует задействовать режущие кромки, удаленные от поперечной режущей кромки, что позволит уменьшить значения Ra в три раза.

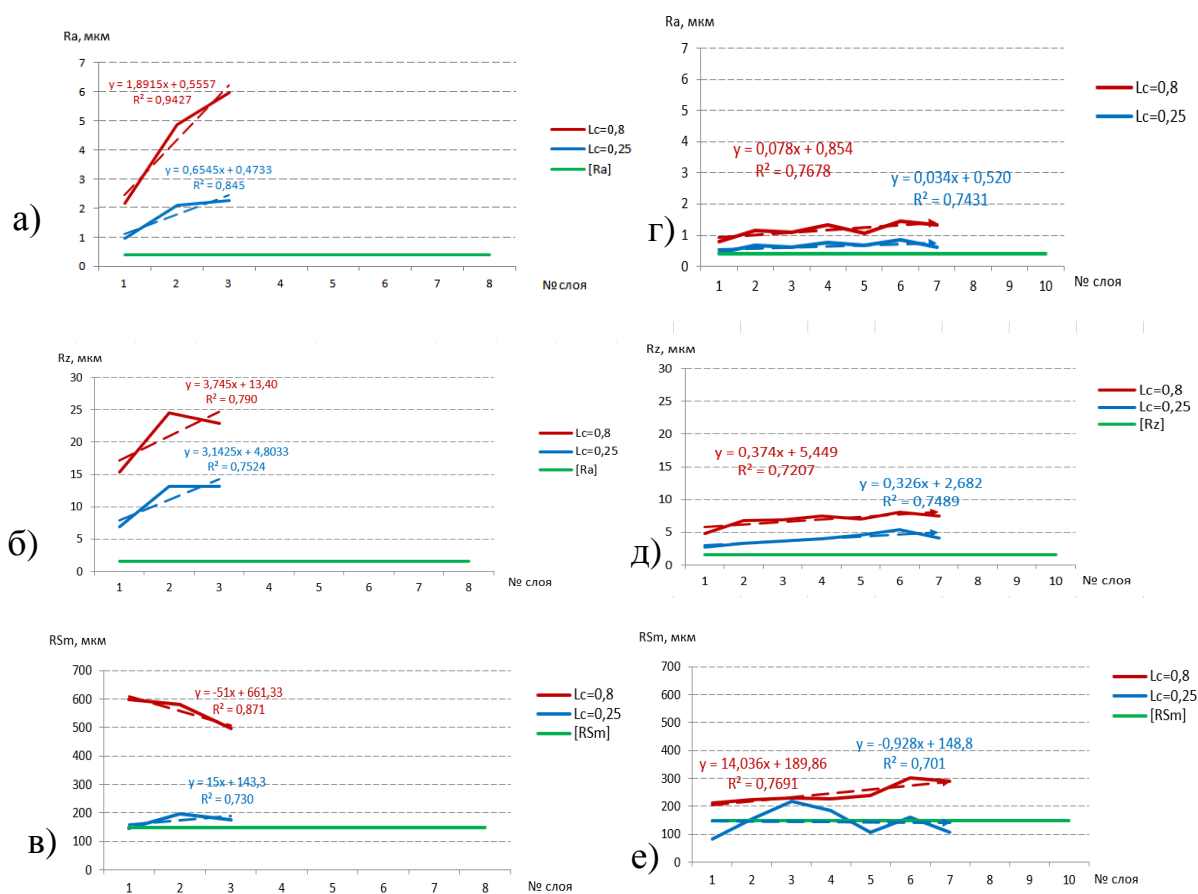
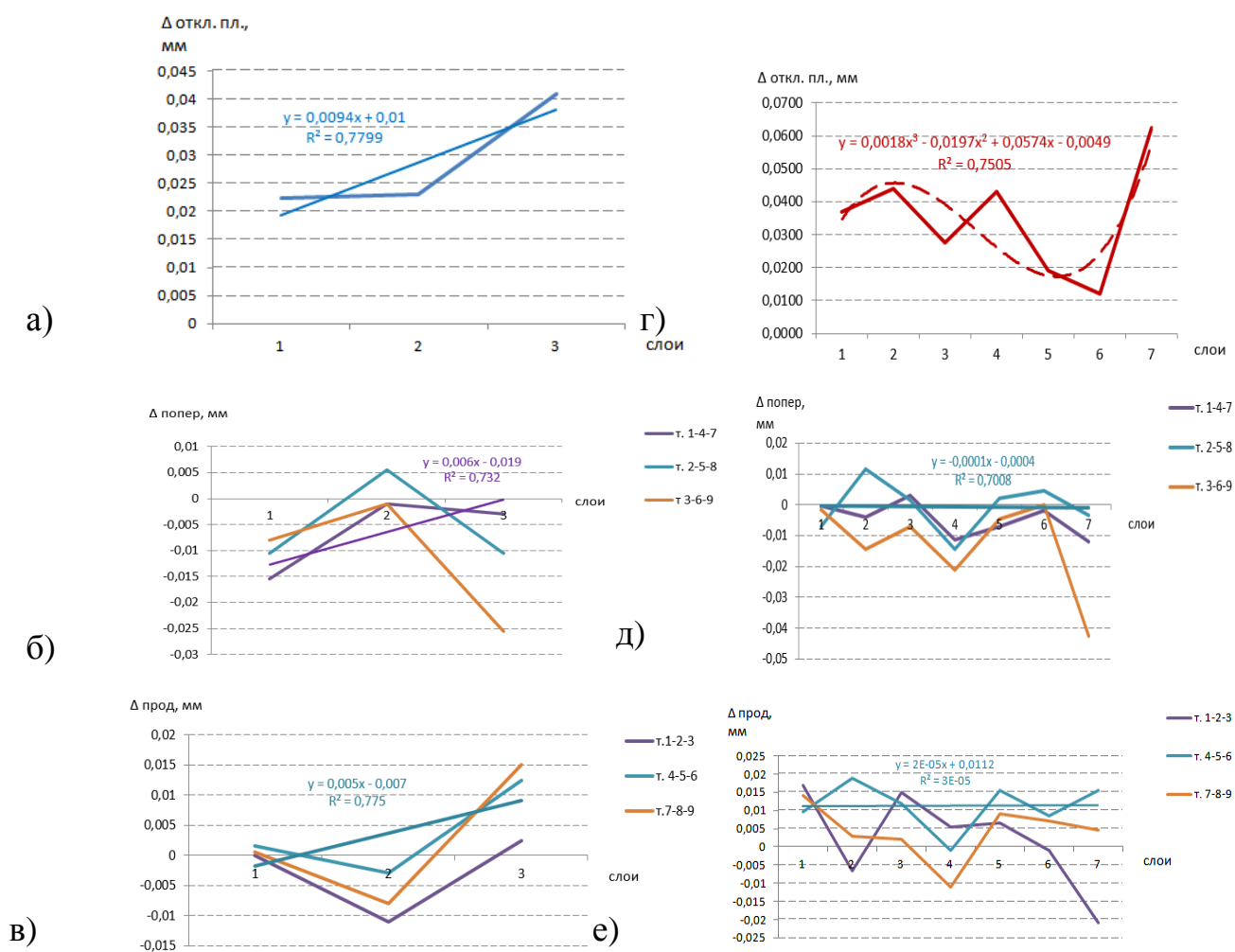
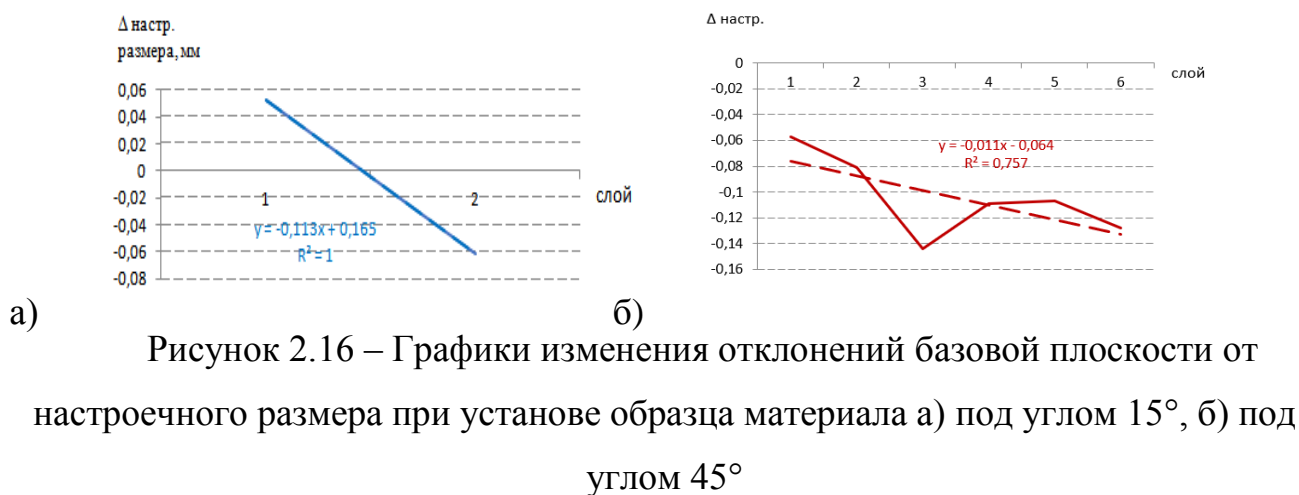


Рисунок 2.15 – Графики изменения высотных Ra, Rz и шаговых Sm параметров шероховатости полученные при установке образца материала а, б, в) под углом 15°, г, д, е) под углом 45°



2.3.2 Изменение отклонений формы и профиля поверхности

В таблицах 2.5 и 2.6 приведены данные измерения высотных размеров при угле обработке заготовки в 15° и 45° . По этим данным по формулам 2.1-2.5 выполняются расчеты отклонений формы и профиля, а также отклонений от настроечного размера.

На рисунке 2.16 приведены графики изменения отклонений от настроечного размера. При обработке под углом в 15° в периоде стойкости износ фрезы приводит к отклонениям от настроечного размера в пределах в диапазоне от 0,04 до -0,06 мм. При обработке образца под углом 45° отклонение достигает величины от -0,06 до -0,1 мм.

При обработке под углом 15° значительно нарастает износ режущей кромки фрезы, что приводит к увеличению сил резания и податливости фрезы по сравнению с обработкой под углом 45° . Компенсация данного вида отклонения в ходе обработки сферической концевой фрезы наиболее эффективна для улучшения размерной точности обработанной поверхности гравюр штампа.

На рисунке 2.17 приведены графики отклонений формы обработанной поверхности. Обработка образцов под углом 15° и 45° обеспечивает отклонения от плоскостности до 0,04-0,05 мм. При обработке под углом 15° с увеличением износа фрезы отклонение от плоскостности увеличивается с 0,02 до 0,04 мм (рисунок 2.17а). При обработке под углом 45° после снятия шестого слоя материала образца отклонение от плоскостности катастрофически увеличивается до 0,06 мм (рисунок 2.17б).

Аналогичные факторы проявляются при формировании отклонений от прямолинейности профиля в поперечном и продольном направлении (рисунок 2.17 б, д). Обеспечивается величина отклонений до 0,02 мм при обработке под углом 15° и до 0,06 мм при обработке под углом 45° . Как по направлению рабочего хода фрезы, так и в перпендикулярном ему отклонение от прямолинейности составляет до 0,03 мм.

Таблица 2.5 – Высотные размеры образца материала, измеренные в заданных точках образца материала при угле базирования заготовки в 10°

Слои	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6	Точка 7	Точка 8	Точка 9	Размах	Корреляция по слоям
Слой 1	35,012	35,126	35,24	34,954	35,065	35,179	34,865	34,983	35,102	0,375	0,375
Слой 2	34,663	34,803	34,921	34,763	34,897	35,025	34,861	35,002	35,127	0,464	0,464
Слой 3	34,78	34,879	34,983	34,706	34,807	34,933	34,626	34,714	34,832	0,357	0,357
Размах	0,349	0,323	0,319	0,248	0,258	0,246	0,239	0,288	0,295		
Корреляция по точкам	0,994104	0,999091	0,918893	0,991616	0,999599	0,793973	0,997291	0,999847			

Таблица 2.6 – Высотные размеры образца материала, измеренные в заданных точках образца материала при угле базирования заготовки в 45°

Слои	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6	Точка 7	Точка 8	Точка 9	Размах	Корреляция по слоям
Слой 1	35,966	36,071	36,21	35,882	35,992	36,121	35,797	35,899	36,029	0,413	0,413
Слой 2	35,846	35,981	36,103	35,776	35,882	36,026	35,698	35,806	35,92	0,405	0,405
Слой 3	35,749	35,841	35,963	35,654	35,759	35,888	35,565	35,68	35,799	0,398	0,398
Слой 4	35,601	35,724	35,858	35,547	35,673	35,797	35,47	35,593	35,694	0,388	0,388
Слой 5	35,288	35,408	35,541	35,369	35,477	35,616	35,436	35,55	35,682	0,394	0,394
Слой 6	35,133	35,256	35,377	35,198	35,313	35,445	35,259	35,379	35,513	0,38	0,380
Слой 7	35,127	35,241	35,313	35,089	35,191	35,324	35,027	35,134	35,25	0,297	0,297
Размах	0,839	0,83	0,897	0,793	0,801	0,797	0,77	0,765	0,779		
Корреляция по точкам	0,999212	0,998645	0,9944	0,999632	0,999743	0,97849	0,999619	0,99895	0,907659		

Для обеспечения минимальных отклонений от плоскостности необходимо ограничить съём фрезой материала $0,075\text{ м}^2$ при обработке под углом 15° . При обработке под углом 45° эта величина составляет $0,15\text{ м}^2$ обработанной поверхности образца материала. Следует отметить, что обработка данной формой возможна преимущественно от 25° до 60° . За пределами этих углов наклона образца или фрезы фреза показывает низкую величину стойкости.

Путь резания режущей кромки в рекомендуемом интервале углов наклона фрезы составляет величину 1000 м , а время резания 500 мин .

Таблица 2.7 – Регрессионные модели изменения высотных и шаговых параметров шероховатости в периоде стойкости сферической концевой фрезы, переточенной на универсальном заточном оборудовании

Геометрические показатели точности	Установ образца материала штампа под углом:	
	15°	45°
Отклонение базовой плоскости от настроечного размера $\Delta_{\text{настр.}}$, мм.	$\Delta_{\text{настр.}} = 0,026 l - 0,115$ $R^2 = 1$	$\Delta_{\text{настр.}} = -0,0138 l - 0,0534$ $R^2 = 0,7425$
Отклонение от плоскостности $\Delta_{\text{откл.пл.}}$, мм	$\Delta_{\text{откл.пл.}} = 0,0094 l + 0,01$ $R^2 = 0,78$	$\Delta_{\text{откл.пл.}} = 0,0018 l^3 - 0,0197 l^2 + 0,0574 l - 0,0049$ $R^2 = 0,75$
Отклонение от прямолинейности вдоль РХ $\Delta_{\text{пр.попер.}}$, мм	$\Delta_{\text{пр.попер.}} = 0,0055 l - 0,073$ $R^2 = 0,77$	$\Delta_{\text{пр.попер.}} = 0,0112$ $R^2 = 0,70$
Отклонение от прямолинейности перпендикулярно РХ $\Delta_{\text{прод.}}$, мм	$\Delta_{\text{прод.}} = 0,0062 l - 0,019$ $R^2 = 0,73$	$\Delta_{\text{прод.}} = -0,0001 l - 0,0004$ $R^2 = 0,70$
Параметры шероховатости	под углом 15°	под углом 45°
Rz, мкм	$Rz = 3,745 l + 13,407$ $R^2 = 0,79$	$Rz = 0,3749 l + 5,4497$ $R^2 = 0,72$
Ra (Lc=0,8), мкм	$Ra = 1,8915 l + 0,5557$ $R^2 = 0,94$	$Ra = 0,0788 l + 0,8543$ $R^2 = 0,7678$
Sm, мкм	$Sm = -51 l + 661,33$ $R^2 = 0,871$	$Sm = 14,036 l + 189,86$ $R^2 = 0,769$
Износ режущих кромок фрезы	под углом 15°	под углом 45°
Фаска износа по задней поверхности, мм	$\Phi И = 0,153 l + 0,0403$ $R^2 = 0,99$	$\Phi И = 0,0005 l^4 - 0,0077 l^3 + 0,004 l^2 + 0,3376 l - 0,317$ $R^2 = 0,973$
Размерный износ режущей кромки, мм	---	$\Pi И = -0,0089 l^2 + 0,1008 l - 0,1146$ $R^2 = 0,8625$

В слое $l_{\text{рез.}} = 166\text{ м}$

2.4 Разработка математических моделей изменения геометрической точности образца материала штампа обработанного сферической концевой фрезой, заточенной на специально подготовленном пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ

В инструментальном производстве имеется пятикоординатный станок с ЧПУ Hedelius RS605 K20. Он применяется для обработки негабаритных штамповых вставок со сложной геометрией поверхности гравюр поковок и не предназначен для заточки режущего инструмента. Переточка сферической режущей части концевых фрез на универсальном заточном оборудовании не обеспечивает оптимальных геометрических параметров. Кинематика станка позволяет заточить основные виды сферических концевых фрез, что позволяет выполнить оперативную заточку инструмента на участке в свободное от основного процесса фрезерования гравюр штампов. Разработана технология заточки сферических фрез в заводских условиях при условиях специальной подготовки фрезерного станка для обеспечения заточки фрезы.

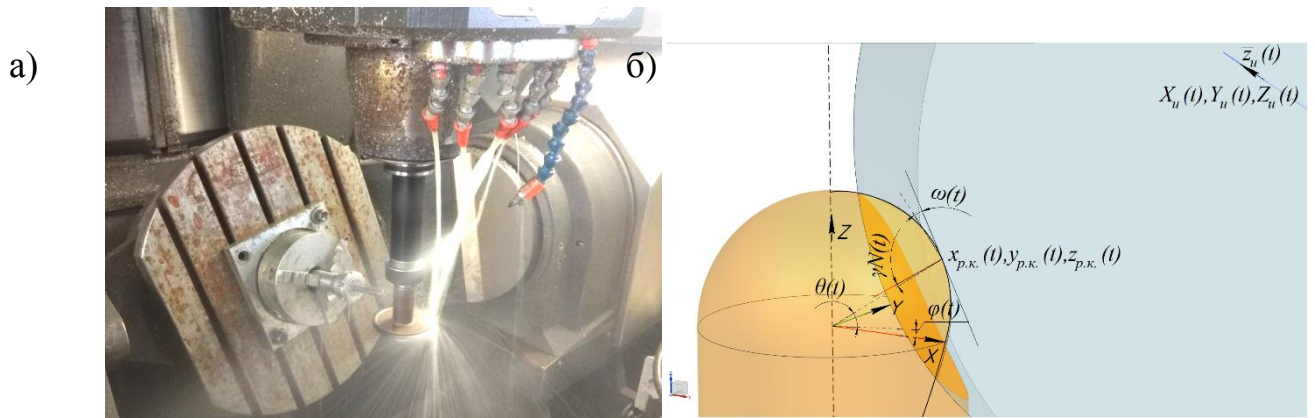


Рисунок 2.18 – а) Заточка и б) моделирование процесса формообразования шлифовальным кругом концевой сферической фрезы на пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ Hedelius RS605 K20

Технология заточки на подготовленном пятикоординатном станке позволяет оперативно перетачивать изношенные сферические фрезы на участке обработки штамповой оснастки, что значительно сокращает длительность восстановления инструмента.

На рисунке 2.18 приведен процесс заточки концевой сферической фрезы. Для заточки применялся круг 1А1 80х6х3х20 АС4 100/80 100% В2-01. Скорость вращения $V=25$ м/с, продольная подача $S=1,5$ м/мин, подача на двойной ход 0,03 мм.

В результате заточки на станке обеспечена геометрия сферической части фрезы, близкие к геометрическим параметрам фрез, заточенных на специализированных шлифовальных станках с ЧПУ. В таблице 2.8 приведены геометрические параметры концевой сферической фрезы, измеренные по 3D моделям (рисунок 2.19) и по данным сканирования передней и задней поверхности на видео измерительной координатной машине.

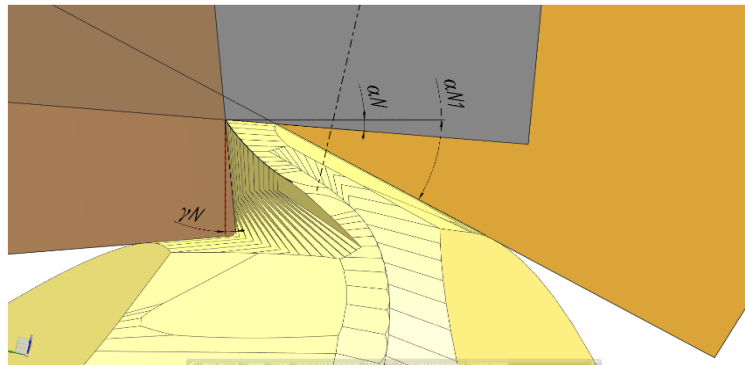


Рисунок 2.19 – Передний γ_N и задний α_N угол в нормальном сечении в контакте с шлифовальными кругами ПП

Таблица 2.8 – Значения переднего и заднего угла в нормальном сечении

№ п/п	Z, мм	R, мм	γ_N , град		α_N , град	
			Факт	Модель	Факт	Модель
1	0	4.998	5.05	5.278074	4.5	4.534463
2	0.5	4.982	3.15	3.226714	4.5	4.597763
3	1	4.904	1	1.091328	4.85	4.696477
4	1.5	4.784	-0.75	-1.1356	4.6	4.693344
5	2	4.581	-3.85	-3.51565	5.15	5.282978
6	2.5	4.335	-5.8	-6.13799	5.65	6.0508
7	3	3.999	-9	-9.13576	6	6.198195
8	3.5	3.563	-10.2	-10.6183	6.25	6.327957
9	4	3.017	-13.85	-13.2724	8.15	8.153013
10	4.5	2.22	-17.45	-16.9595	11.05	10.7016
11	4.95	0.746	-19.15	-20.1864	33.35	35.19316

Геометрические данные таблицы необходимы для расчета размерного износа на исследуемых участках режущих кромок сферической фрезы.

2.4.1 Анализ параметров шероховатости

На рисунке 2.20 приведены графики изменения высотных и шаговых показателей шероховатости в периоде стойкости концевой сферической фрезы, заточенной на специально подготовленном для переточки фрез фрезерном пятикоординатном станке с ЧПУ.

На рисунке 2.20 а, б, г, д приведены графики изменений R_a и R_z в периоде стойкости концевой фрезы со сферической режущей частью.

При обработке образца, установленным под углом наклона 15° изнашивание режущей кромки приводит к нарастанию значений шероховатости R_a с 0,5 мкм до 1,5 мкм. Более значителен рост значений R_z для длины трассировки в 0,8 мм с 10 мкм до 20 мкм, что является следствием нарастания износа режущей кромки. Износ сопровождается уменьшением среднего шага значений неровностей при угле наклона фрезы в 15° . График их изменений приведен на рисунке 2.20 в. Величина шага R_{Sm} уменьшается с 600 мкм до 200 мкм, поскольку процесс резания к концу периода стойкости, частично переходит в процесс смятия микронеровностей.

При установке образца под углом 45° износ режущей кромки фрезы сопровождается увеличением величины шероховатости. R_a возрастает в два раза с 0,5 мкм до 1,5 мкм. R_z также увеличивается с 5 мкм до 7 мкм. В отличие от обработки периферийной кромкой в области поперечных режущих кромок, притупление режущих кромок приводит к увеличению среднего шага шероховатости с 250 мкм до 500-ти мкм, следовательно процесс резания в конце периода стойкости не сопровождается смятием микронеровностей.

Требования чертежа к рабочей поверхности гравюр штампа R_a 3,2 мкм в периоде стойкости обеспечиваются на пределе при обработке под углом 15° . Для уменьшения шероховатости поверхности следует задействовать режущие кромки, удаленные от поперечной режущей кромки, что позволит уменьшить значения R_a в два раза.

В таблице 2.9 и 2.10 приведены данные измерения высотных размеров при угле обработке заготовки в 15° и 45° по этим данным по формулам 2.1-2.5 выполняются расчеты отклонений формы и профиля, а также отклонений от настроечного размера.

2.4.2 Изменение отклонений формы и профиля поверхности

На рисунке 2.21 приведены графики изменения отклонений от настроечного размера. При обработке образца материала фрезой с углом наклона в 15° . В периоде стойкости износ фрезы приводит к отклонениям базовой поверхности от настроечного размера в пределах 0,04 мм. При обработке образца под углом 45° отклонение достигает величины в 0,05 мм, что связано с увеличением податливости сферической фрезы, нарастанием износа режущей кромки фрезы и увеличения сил резания. Компенсация данного вида отклонения в ходе обработки сферической концевой фрезы наиболее эффективна для улучшения точности обработанной поверхности гравюр штампа.

На рисунке 2.22 приведены графики отклонений формы обработанной поверхности. Обработка образцов под углом 15° и 45° обеспечивает отклонения от плоскостности до 0,06 мм. При обработке под углом 15° с увеличением износа фрезы отклонение от плоскостности увеличивается до величины 0,07 мм (рисунок 2.22 а). при обработке под углом 45° после снятия восьмого слоя материала образца величина увеличивается с 0,04 мм до 0,08 мм при снятии последующих 2-х слоев (рисунок 2.22 г).

При формировании отклонений от прямолинейности профиля при обработке под углом 15° в продольном направлении (рисунок 2.22 б) обеспечивается величина отклонений до 0,007 мм. При обработке под углом 45° в продольном направлении величина отклонений от прямолинейности составляет величину 0,02 мм.

Таблица 2.9 – Высотные размеры образца материала, измеренные в заданных точках образца материала при угле базирования образца материала в 15°

Слои	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6	Точка 7	Точка 8	Точка 9	Размах	Корреляция по слоям
Слой 1	34,755	34,855	34,962	34,82	34,914	35,021	34,879	34,968	35,065	0,31	0,993
Слой 2	34,551	34,6597	34,77248	34,64252	34,738	34,84693	34,71988	34,80945	34,905	0,354	0,9997
Слой 3	34,375	34,498	34,63034	34,47524	34,586	34,70891	34,56178	34,66245	34,77	0,395	0,9969
Слой 4	34,22	34,33105	34,447	34,30592	34,423	34,54926	34,40368	34,5081	34,62	0,4	0,9984
Слой 5	34,085	34,183	34,29	34,1672	34,269	34,38549	34,25578	34,33695	34,427	0,342	0,9939
Слой 6	33,935	34,04965	34,17405	34,0193	34,117	34,23099	34,12012	34,20675	34,3	0,365	0,9978
Слой 7	33,74	33,87325	34,0144	33,85202	33,96	34,0837	33,94366	34,04085	34,145	0,405	
Размах	1,015	0,98175	0,9476	0,96798	0,954	0,9373	0,93534	0,92715	0,92		
Корреляция по точкам	0,9996	0,9995	0,9993	0,9997	0,9998	0,9993	0,9997	0,9997	0,9996		

Таблица 2.10 – Высотные размеры образца материала, измеренные в заданных точках образца материала при угле базирования образца материала в 45°

Слои	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6	Точка 7	Точка 8	Точка 9	Размах	Корреляция по слоям
Слой 1	33,505	33,607	33,731	33,554	33,66	33,778	33,637	33,749	33,879	0,374	0,9965
Слой 2	33,21	33,3265	33,44438	33,2786	33,39578	33,523	33,36466	33,48176	33,605	0,395	0,9976
Слой 3	33,045	33,1582	33,28934	33,1307	33,25094	33,39346	33,22798	33,35018	33,48528	0,44028	0,9979
Слой 4	32,944	33,04906	33,16592	33,03176	33,14	33,27106	33,0964	33,2135	33,34962	0,40562	0,9967
Слой 5	32,76754	32,89198	33,01904	32,8604	32,968	33,10174	32,94544	33,06866	33,20478	0,43724	0,9977
Слой 6	32,64	32,7604	32,88644	32,70842	32,827	32,96404	32,81692	32,92994	33,04872	0,40872	0,9986
Слой 7	32,51	32,61352	32,73548	32,5595	32,67	32,8141	32,66086	32,76878	32,89164	0,38164	0,999
Слой 8	32,3371	32,45236	32,5886	32,40548	32,52	32,66518	32,50072	32,61374	32,75802	0,42092	0,7566
Слой 9	32,19	32,30548	32,43968	32,27594	32,39	32,52442	32,36608	32,36384	32,37	0,33442	0,9996
Слой 10	32,043	32,157	32,291	32,12594	32,243	32,37442	32,214	32,211	32,226	0,33142	
Корреляция по точкам	0,901	0,89206	0,87492	0,90582	0,897	0,89664	0,8824	1,0025	1,12362		

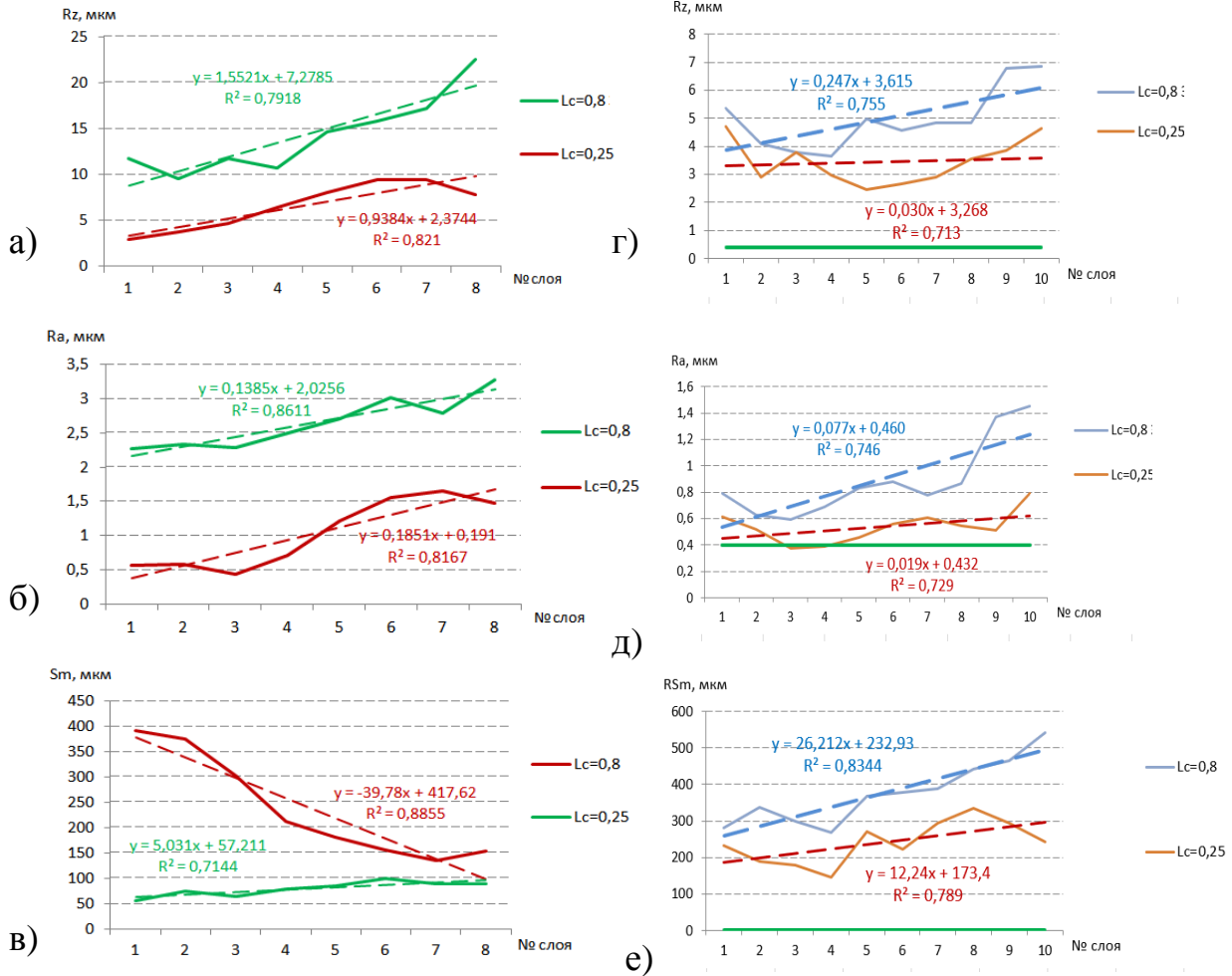


Рисунок 2.20 – Графики изменения высотных Ra, Rz и шаговых Sm параметров шероховатости полученные при установке образца материала а, б, в) под углом 15°, г, д, е) под углом 45°

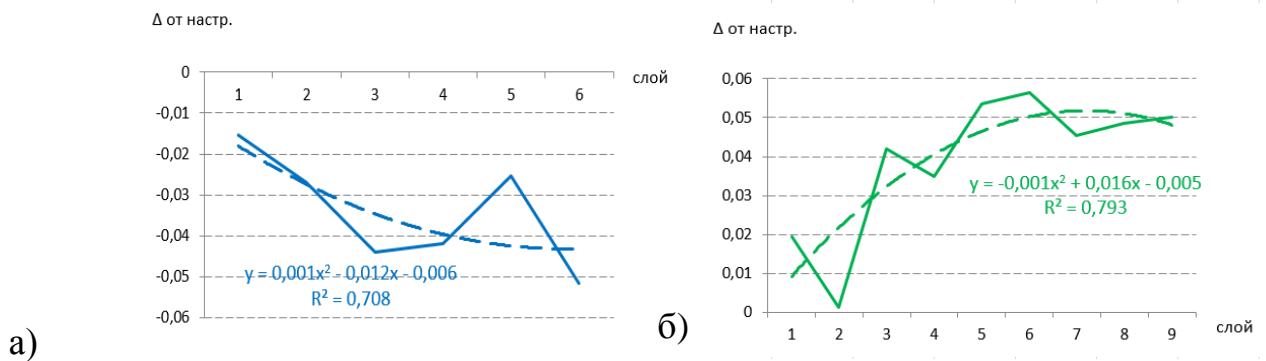


Рисунок 2.21 – Графики изменения отклонений базовой плоскости от настроечного размера при установке образца материала: а) под углом 15°, б) под углом 45°



Рисунок 2.22 – Графики изменения отклонений от плоскостности и прямолинейности при установке образца материала: а, б, в) под углом 15° , г, д, е) под углом 45°

Таблица 2.11 – Регрессионные модели изменения высотных и шаговых параметров шероховатости в периоде стойкости сферической концевой фрезы, переточенной на специально подготовленном пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ

Геометрические показатели точности	Установ образца материала штампа под углом:	
	15°	45°
Отклонение базовой плоскости от настроечного размера $\Delta_{\text{настр.}}$, мм.	$\Delta_{\text{настр.}} = 0,0011l^2 - 0,0126l - 0,0065$ $R^2 = 0,7082$	$\Delta_{\text{настр.}} = -0,0011l^2 + 0,016l - 0,0057$ $R^2 = 0,7934$
Отклонение от плоскостности $\Delta_{\text{откл.пл.}}$, мм	$\Delta_{\text{откл.пл.}} = 0,0071l + 0,0093$ $R^2 = 0,8128$	$\Delta_{\text{откл.пл.}} = -0,374l + 5,449$ $R^2 = 0,7207$
Отклонение от прямолинейности вдоль РХ $\Delta_{\text{пр.попер.}}$, мм	$\Delta_{\text{пр.попер.}} = 0,0003l + 0,0051$ $R^2 = 0,7078$	$\Delta_{\text{пр.попер.}} = 0,0011l + 0,0058$ $R^2 = 0,7719$
Отклонение от прямолинейности перпендикулярно РХ $\Delta_{\text{прод.}}$, мм	$\Delta_{\text{прод.}} = 0,0006l - 0,0048$ $R^2 = 0,7551$	$\Delta_{\text{прод.}} = -0,0026l + 0,0184$ $R^2 = 0,7329$
Параметры шероховатости		
Rz, мкм	$Rz = 1,5521l + 7,2785$ $R^2 = 0,7918$	$Rz = 0,2474l + 3,615$ $R^2 = 0,7553$
Ra (Lc=0,8), мкм	$Ra = 0,1385l + 2,0256$ $R^2 = 0,8611$	$Ra = 0,0776l + 0,4605$ $R^2 = 0,7464$
Sm, мкм	$Sm = -39,78l + 417,62$ $R^2 = 0,8855$	$Sm = 26,212l + 232,93$ $R^2 = 0,8344$
Износ режущих кромок фрезы	под углом 15°	под углом 45°
Фаска износа по задней поверхности, мм	$\PhiИ = 0,153l + 0,0403$ $R^2 = 0,99$	$\PhiИ = 0,0005l^4 - 0,0077l^3 + 0,004l^2 + 0,3376l - 0,317$ $R^2 = 0,973$
Размерный износ режущей кромки, мм	---	$\PiИ = -0,0089l^2 + 0,1008l - 0,1146$ $R^2 = 0,8625$

В слое $l_{\text{рез.}} = 166$ м.

В поперечном направлении отклонение от прямолинейности для обоих углов обработки принимает колеблется в интервале от -0,01 мм до 0,01 мм.

Найденные зависимости изменения отклонений в периоде стойкости концевых сферических фрез используются для сравнения режущих

инструментов, математического моделирования геометрической точности, определения принудительной периодичности смены инструмента, а также выявления действия погрешностей различных факторов технологической системы.

2.5 Выводы по 2 главе

1. Разработана экспериментальная методика получения на плоских образцах материала математических моделей изменения геометрических показателей обрабатываемых поверхностей в периоде стойкости концевых сферических фрез, позволяющая найти наиболее вероятные границы положения профиля обрабатываемых гравюр штампов для последующего расчета значений корректирующих смещений концевых сферических фрез, улучшающих точность чистового фрезерования.
2. Исследование изменения отдельных групп геометрических показателей в периоде стойкости позволяет выявить действие различных факторов технологического процесса в геометрическую точность поверхности гравюры штампа. По идентификации различных групп отклонений можно выделить влияние следующих групп производственных факторов:
 - Отклонение настроечного размера базовой плоскости является следствием начальной податливости фрезы Δ_j при увеличении силы резания в периоде стойкости инструмента.
 - Изменение отклонений профиля является следствием погрешностей станочных модулей $\Delta_{ст.}$.
 - Изменение отклонений от плоскостности является следствием изменения податливости фрезы в периоде стойкости фрезы Δ_j , а также вибраций фрезы $\Delta_{в.}$

– Нарастание величины шероховатости в периоде стойкости связано с нарастанием износа режущего клина $\Delta_{и.и.}$ исследуемого участка режущей кромки.

3. Анализ структуры изменения отклонений позволяет на более глубоком уровне ранжировать факторы технологической точности штампов, а также улучшать геометрическую точность деталей машин и штампов.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СРАВНЕНИЯ КОНЦЕВЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ФРЕЗ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ УДЕЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ

3.1 Методика сравнения концевых сферических фрез по показателям удельного изменения в периоде стойкости

Критерием результативности инструмента в периоде их стойкости предлагается считать способность обеспечивать минимальную изменчивость заданного комплекса показателей точности обработанной поверхности заготовки. Численно результативность оценивается по удельному изменению отклонений показателей качества в периоде стойкости инструмента. Удельное изменение находится как отношение величины изменения отклонений показателей точности к площади обработанной поверхности образца материала, либо длине пути резания. Дальнейшие формулы и расчеты приведены для площади обработанного образца материала.

Изменение показателя в периоде стойкости состоит из двух составляющих – начального и изменения в периоде стойкости инструмента. Под начальной величиной подразумевается отклонение, полученное после работы инструмента не менее 0,05 от периода стойкости. Данное условие необходимо для достижения ими стабильных условий резания после приработки. Начальное удельное изменение отклонения может быть найдено по следующей зависимости:

$$K_{Нр} = \frac{\Delta_H}{S} \quad (3.1)$$

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

S – площадь обработанной поверхности, m^2 .

Удельные изменения отклонений в периоде стойкости инструмента находятся по следующей зависимости:

$$K_{Tp} = \frac{\Delta_T}{S} \quad (3.2)$$

где S – площадь обработанной поверхности, m^2 ;

Δ_T – изменение отклонения в периоде стойкости инструмента, мм.

$$\Delta_T = \Delta_{Tн} - \Delta_{Tк} \quad (3.3)$$

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

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

Количественная оценка результативности обработки резанием по различным отклонениям точности выполняется с учетом различной значимости единичных показателей точности.

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

$$K_{Нр\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Нрi} \cdot b_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (3.4)$$

где b_i - коэффициенты значимости единичных 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:

$$K_{Тр\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Трi} \cdot b_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (3.5)$$

где b_i - коэффициент значимости единичного показателя точности для обеспечения лучшей функции назначения сопряжения;

n – количество отклонений показателей качества.

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

$$K_{\Sigma PK} = K_{Нр\Sigma} + K_{Тр\Sigma} \quad (3.6)$$

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

$$K_{Нр\Sigma} = \sum_{i=1}^n K_{Нр\Sigma} \quad (3.7)$$

$K_{Тр\Sigma}$ – суммарное удельное изменение отклонений в периоде стойкости инструмента.

$$K_{Тр\Sigma} = \sum_{i=1}^n K_{Тр\Sigma} \quad (3.8)$$

Чем меньше суммарное удельное изменение отклонений показателей, тем меньшее колебание показателей качества обеспечивает инструмент.

Для реализации методики необходимо организовать проведение стойкостных испытаний инструмента с последующим измерением заданного комплекса геометрических показателей точности в ходе затупления. Испытания могут быть проведены на производственных рабочих местах, либо при обработке заранее изготовленных образцов из материала обрабатываемых изделий.

3.2 Сравнение режущих способностей концевых сферических фрез различной геометрии

В таблицах 3.2-3.5 приведены результаты расчета значений удельного изменения всего комплекса приведенных выше отклонений. В таблице 3.1 приведены коэффициенты значимости единичных отклонений показателей.

Таблица 3.1 – Коэффициенты значимости единичных отклонений показателей точности обрабатываемой поверхности гравюр штампов горячей объемной штамповки крупногабаритных поковок

Ra	Sm	Откл. прям-ти вдоль РХ $\Delta_{пр.прод.}$	Откл. прям-ти перп. РХ $\Delta_{пр.перп.}$	Откл от пл-ти $\Delta_{откл.пл.}$	Откл. от настр. размера $\Delta_{настр.}$
0,3	0,05	0,10	0,10	0,15	0,30

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

На рисунке 3.1 приведены диаграммы удельного изменения отклонений по начальным значениям. Для различных отклонений показателей точности предпочтительность применения того или иного инструмента различная. Например, по начальным значениям удельных отклонений от настроечного размера фреза ф. Sandvik значительно превосходит фрезы затачиваемые на универсальном оборудовании и переточенные на пятикоординатном станке с ЧПУ, в периоде стойкости изменение отклонений по фрезе Sandvik и переточенной на пятикоординатном станке с ЧПУ выравниваются. Отклонение по фрезе, затаченной на универсальном оборудовании значительно хуже. По начальным значениям шагового параметра шероховатости S_m фрезы ф. Sandvik и переточенная на пятикоординатном фрезерном станке равнозначны. Значительно уступает им фреза, затаченная на универсальном оборудовании, но в периоде стойкости износ фрезы, затаченной на универсальном оборудовании приводит к уменьшению шагового параметра, при нарастании этого параметра по другим сравниваемым фрезам. Как видим, данные диаграмм дают еще и дополнительную аналитическую информацию для совершенствования процесса чистовой обработки и выявляют действие различных факторов.

Для окончательного принятия решения о предпочтительности того или иного инструмента необходимо обеспечить суммирование удельного изменения отклонений с учетом их значимости в обеспечении функционального назначения гравюр штампов горячей объемной штамповки, а также нанести на гистограмму заданные границы предельных значений показателей точности. Например, для сферических концевых фрез,

обрабатывающих гравюры штампа коленчатого вала установлен допуск на положение профилей гравюр по коренным шейкам до 0,075 мм, по шатунным шейкам 0,085 мм. По этим значениям найдено соответствующее предельное изменение показателя точности от $K_{к.ш.} = 0,375 \text{ мм/м}^2$ до $K_{ш.ш.} = 0,425 \text{ мм/м}^2$. Необходимо, чтобы удельная изменчивость по отклонениям положений была меньше или близко к найденному уровню необходимой точности. Результаты работы также позволяют прогнозировать эффективность того или иного варианта фрезы, если закуплен именно он.

На рисунке 3.4 приведена суммарная диаграмма удельного изменения отклонений показателей точности. В результате по суммарному удельному отклонению лидирует фреза, заточенная на пятикоординатном шлифовальном станке ф. Sandvik с удельным суммарным изменением отклонений показателей в $0,35 \text{ мм/м}^2$.

С небольшим отрывом следует фреза, заточенная на фрезерном пятикоординатном станке с ЧПУ с суммарным удельным изменением отклонений показателей точности $0,44 \text{ мм/м}^2$, что объясняется ее более низкой точностью.

Со значительным отрывом, как наименее результативную, следует признать фрезу, заточенную на универсальном заточном оборудовании с удельным суммарным изменением отклонений показателей точности в $0,93 \text{ мм/м}^2$ из-за невозможности универсальных заточных станков обеспечить приемлемую геометрию рабочей части инструмента.

Аналогичное сравнение выполнено и для режущих кромок концевых сферических фрезы обработки образца материала под углом 15° . В таблицах 3.4 и 3.5 приведены значения результаты расчета значений удельного изменения всего комплекса приведенных выше отклонений, рассчитанные для участка режущей кромки, обрабатывающего материал штампа под углом 15° . Удельное суммарное изменение отклонений фрезы, заточенной на пятикоординатном заточном станке $0,23 \text{ мм/м}^2$, фрезы заточенной на универсальном заточном

станке $1,25\text{мм/м}^2$, фрезы заточенной на пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ $0,28\text{ мм/м}^2$. Удельное суммарное изменение отклонений фрезы, заточенной на универсальных заточных станках увеличилось. У фрез, заточенных на пятикоординатных станках с ЧПУ наблюдалась обратное изменение показателя.

В целом приоритетность применения фрез сохранилась и на участке фрезы, обрабатывающего образец материала под углом 15° . С учетом затрат на закупку и заточку предпочтительной в данном случае является фреза, заточенная на пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ.

Таблица 3.2 – Значения начальных удельных изменений отклонений в периоде стойкости концевых сферических фрез, (обработка образца материал под углом 45°)

Фрезы	Кол-во слев	Площадь слоя	Ra	Sm	Прям-ть вдоль РХ	Прям-ть перп. РХ	Откл от пл-ти	Откл настр размера	Значения удельного изменения отклонений $K_{Нр}$, мм/м ²					
		м ²	мм/100	мм/1000	мм	мм	мм	мм	Ra	Sm	Прям-ть вдоль РХ	Прям-ть перп. РХ	Откл от пл-ти	Откл настр. размера
Фреза ф. Sandvik	10	0,025	0,00771	0,369	0,0017	0,0835	0,0912	0,069	0,0308	1,4760	0,0066	0,3340	0,3650	0,2760
Фреза заточка УО	4	0,025	0,00682	-0,088	0,0380	0,0425	0,0370	0,16	0,0773	-0,8800	0,3800	0,4250	0,3700	1,6000
Фреза заточка фр. 5-ти корд.	10	0,025	0,0086	0,273	0,0127	0,0835	0,0435	0,05532	0,0312	1,0920	0,0510	0,3340	0,1741	0,2213

Таблица 3.3 – Значения удельного изменений отклонений в периоде стойкости концевых сферических фрез(обработка образца материал под углом 45°)

Фрезы	Кол-во слев	Площадь слоя	Ra	Sm	Прям-ть вдоль РХ	Прям-ть перп. РХ	Откл от пл-ти	Откл настр размера	Значения удельного изменения отклонений $K_{Тр}$, мм/м ²					
		м ²	мм/100	мм/1000	мм	мм	мм	мм	Ra	Sm	Прям-ть вдоль РХ	Прям-ть перп. РХ	Откл от пл-ти	Откл настр. размера
Фреза ф. Sandvik	10	0,025	0,00773	0,264	0,0030	0,0270	0,0255	0,007	0,0309	1,0560	0,0121	0,1080	0,1020	0,0280
Фреза заточка УО	4	0,025	0,00781	0,213	0,0170	0,0070	0,0230	0,051	0,0781	2,1300	0,1700	0,0700	0,2300	0,5100
Фреза заточка фр. 5-ти корд.	10	0,025	0,0079	0,282	0,0110	0,0270	0,0255	0,1305	0,0316	1,1280	0,0440	0,1080	0,1020	0,5220

Таблица 3.4 – Значения начальных удельных изменений отклонений в периоде стойкости концевых сферических фрез, (обработка образца материал под углом 15°)

Фрезы	Кол-во слев	Площадь слоя	Ra	Sm	Прям-ть вдоль РХ	Прям-ть перп. РХ	Откл от пл-ти	Откл настр размера	Значения удельного изменения отклонений $K_{Нр}$, мм/м ²					
		м ²	мм/100	мм/1000	мм	мм	мм	мм	Ra	Sm	Прям-ть вдоль РХ	Прям-ть перп. РХ	Откл от пл-ти	Откл настр. размера
Фреза ф. Sandvik	8	0,025	0,00733	0,07	0,0006	0,0300	0,0260	0,032	0,0367	0,3500	0,0029	0,1500	0,1300	0,1600
Фреза заточка УО	3	0,025	0,01309	-0,052	0,0230	0,0245	0,0180	0,15	0,1745	-0,6933	0,3067	0,3267	0,2400	2,0000
Фреза заточка фр. 5-ти корд.	8	0,025	0,01218	0,1421	0,0036	0,0202	0,0260	0,03645	0,0609	0,7105	0,0178	0,1011	0,1299	0,1823

Таблица 3.5 – Значения удельного изменения отклонений в периоде стойкости концевых сферических фрез (обработка образца материал под углом 15°)

Фрезы	Кол-во слев	Площадь слоя	Ra	Sm	Прям-ть вдоль РХ	Прям-ть перп. РХ	Откл от пл-ти	Откл настр размера	Значения удельного изменения отклонений $K_{Тр}$, мм/м ²					
		м ²	мм/100	мм/1000	мм	мм	мм	мм	Ra	Sm	Прям-ть вдоль РХ	Прям-ть перп. РХ	Откл от пл-ти	Откл настр. размера
Фреза ф. Sandvik	8	0,025	0,0208	0,0582	0,0020	0,0032	0,0208	0,036	0,1040	0,2910	0,0102	0,0160	0,1040	0,1800
Фреза заточка УО	3	0,025	0,02178	0,0599	0,0015	0,0155	0,0177	0,088	0,2904	0,7987	0,0200	0,2067	0,2367	1,1733
Фреза заточка фр. 5-ти корд.	8	0,025	0,02274	0,103545	0,0052	0,0060	0,0116	0,0453	0,1137	0,5177	0,0260	0,0300	0,0580	0,2265

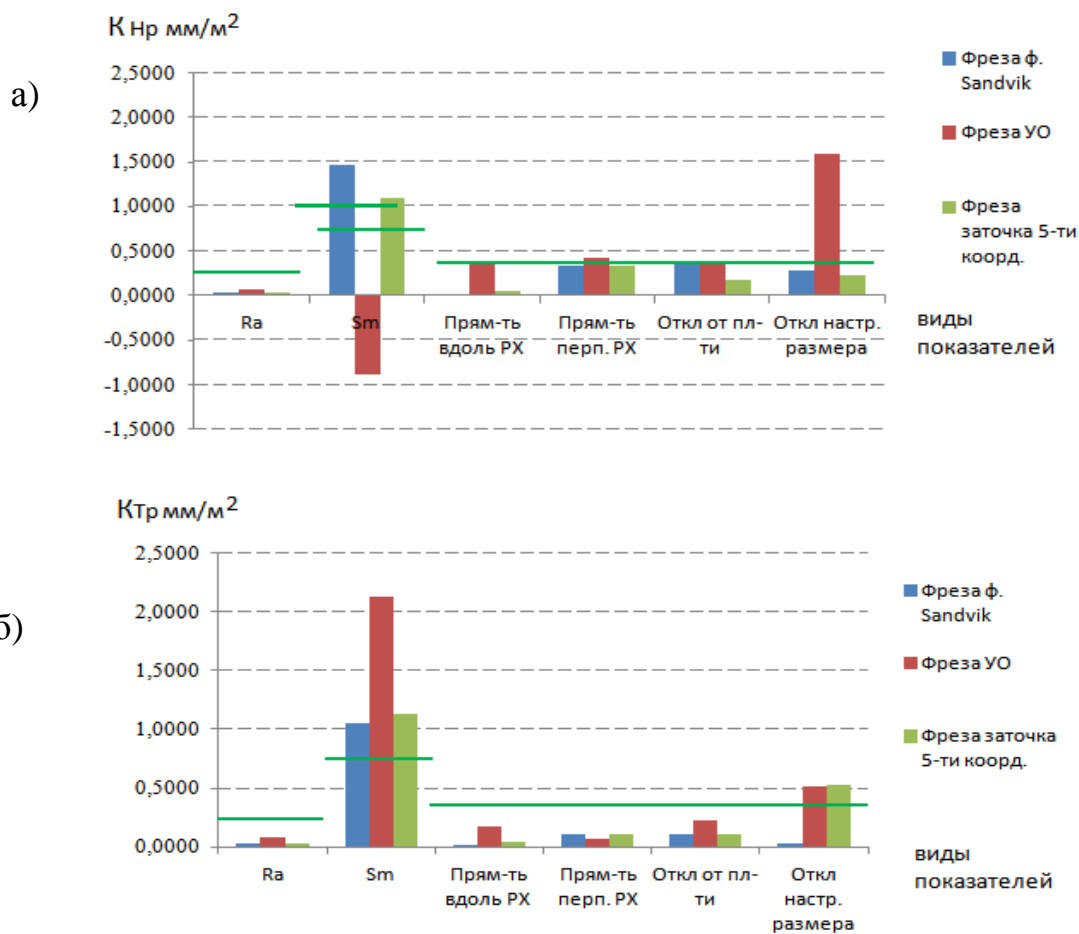


Рисунок 3.1 – Гистограммы значений удельного изменения отклонений в периоде стойкости концевых сферических фрез, обрабатывающих образец материала под углом 45° а) начальные, б) в периоде стойкости

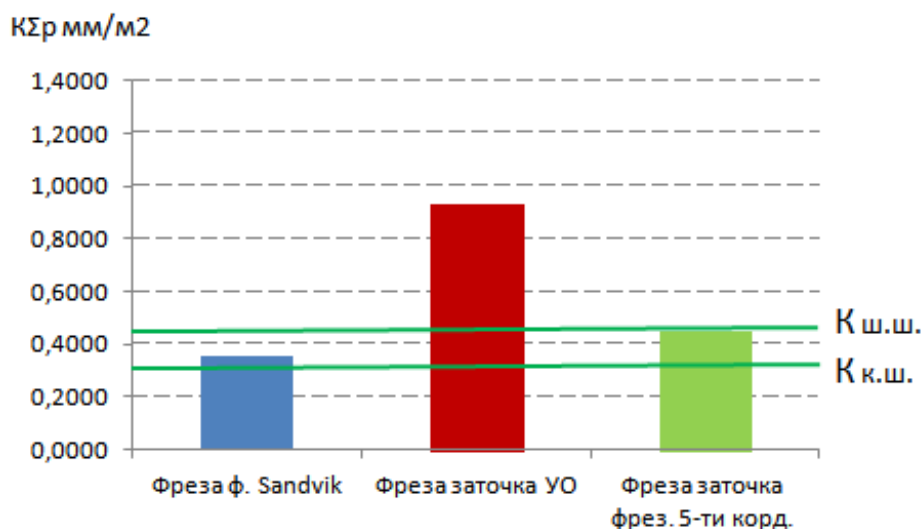


Рисунок 3.2 – Гистограммы значений удельного изменения отклонений в периоде стойкости концевых сферических фрез, обрабатывающих образец материала под углом 45°

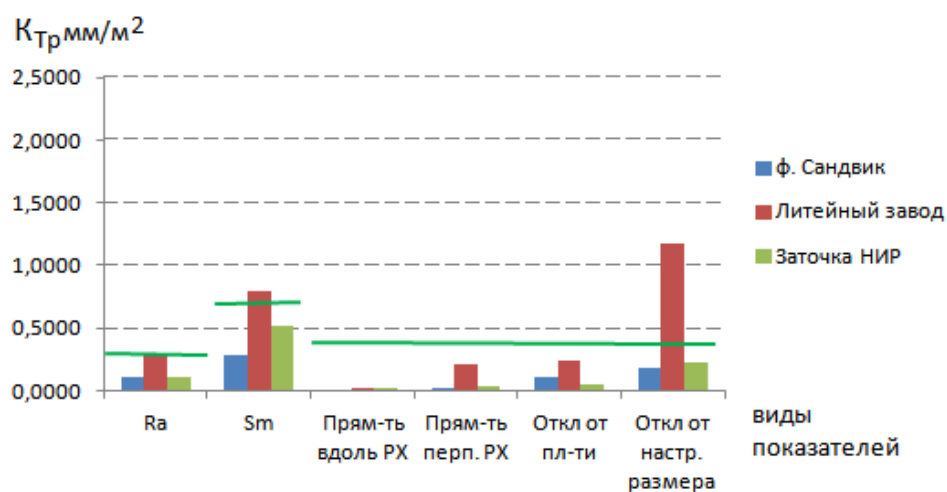
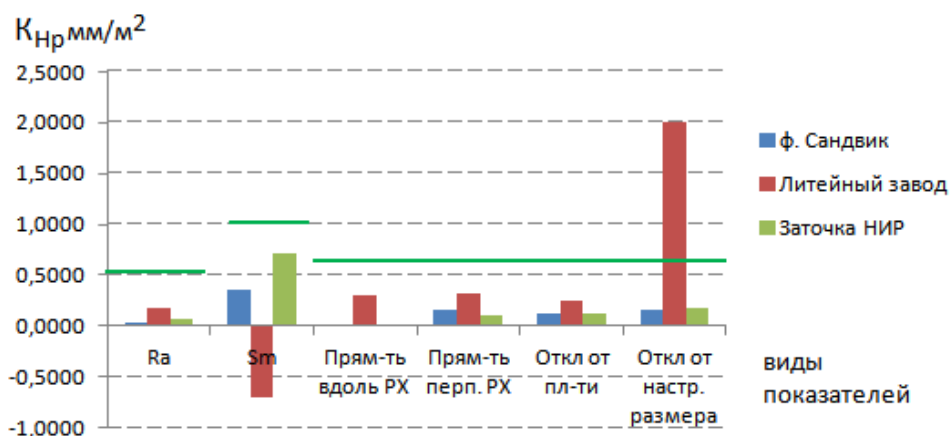


Рисунок 3.3 – Гистограммы значений удельного изменения отклонений в периоде стойкости концевых сферических фрез, обрабатывающих образец материала под углом 45° а) начальные, б) в периоде стойкости

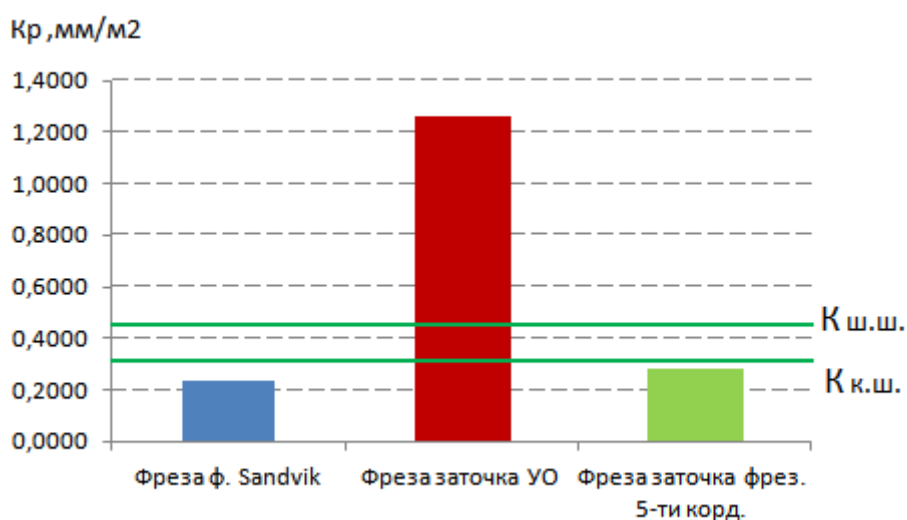


Рисунок 3.4 – Гистограммы значений удельного изменения отклонений в периоде стойкости концевых сферических фрез, обрабатывающих образец материала под углом 15°

3.3 Моделирование геометрической точности и регулирование координат положения профиля поверхности образца материала по данным износа инструмента

Чтобы гарантированно обеспечить геометрическую точность, а также точность балансировки крупных поковок важно максимально точно обработать участки рабочих поверхностей на участках гравюр штампов. Поэтому при чистовом фрезеровании концевой сферической фрезой важно не только получить размер близко к середине поля допуска, но и минимизировать отклонения профиля и формы. Однако, если при программировании траектории настроиться на середину поля допуска, то из-за износа и деформации фрезы эти отклонения будут находиться в неоправданно широком диапазоне. Чтобы не допустить этого, на практике наладчик задает начальную координату траектории инструмента по нижней границе поля допуска. Величина занижения размера определяется субъективно, так что риск выхода размеров обработанной поверхности за пределы допуска значителен.

Гарантировать требуемую точность возможно путем получения экспериментальных данных и построения модели износа концевой фрезы.

По ней, при известном значении координаты настроечного размера, спрогнозировать все ее характеристики точности при необходимости проанализировать на каких именно участках поверхности гравюры есть риск несоблюдения требований. Формообразующий элемент концевой сферической фрезы при обработке плоской поверхности заготовки находится на ее сферической части. Если ось фрезы примерно перпендикулярна поверхности заготовки, то его образует привершинные участки режущих кромок. Если же угол наклона фрезы достаточно большой, то поверхность формируют отстоящие от оси участки режущих кромок. Обработанная поверхность в любом случае будет линейчатой, то есть представлять собой ряд фрезерованных строчек, каждая из которых имеет индивидуальные значения координаты Z . Для получения объективных исходных данных важно выполнить

измерения значений размеров строго по поверхности этих строчек, обеспечив соответствующую форму измерительного наконечника.

В результате изнашивания кромок фрезы (рисунок 3.5) в начальной точке рабочего хода формообразующий элемент имеет значение размера по координате Z. Под действием радиальной силы резания фреза отклоняется по си Y от этого начального до величины настроечного размера $\Delta Z_{настр.ij}$. Далее в процессе обработки поверхности образца из-за износа и вибраций положение точки контакта фрезы а, следовательно, и профиля обрабатываемой поверхности изменяется в пределах значений $\mp \left(\frac{\Delta_{откл.отпл-тиj}}{2} + Rz_{ij} \right)$.

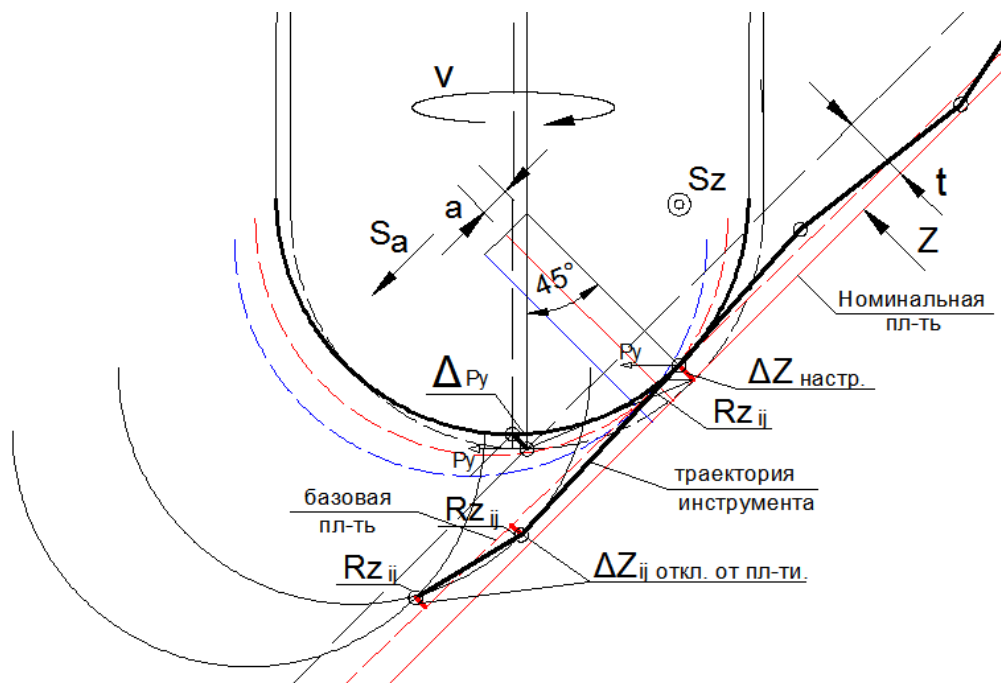


Рисунок 3.5 – Схема формирования геометрических отклонений обрабатываемой поверхности образца материала

Поскольку нахождение профиля в дальнейшей обработке вероятно, находятся его максимальные и минимальные координаты его расположения. Максимальная граница нахождения точек профиля рассчитывается для каждой измеренной точки координат профиля по следующей математической зависимости:

$$Z_{ij \text{ макс.}} = Z_{настр.} + fl(\Delta Z_{настр.ij}) + fl\left(\frac{\Delta_{откл.отпл-тиj}}{2}\right) + fl(Rz_{ij}) \quad (3.9)$$

Где i – номер точки;

j – номер строчки рабочего хода;

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

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

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

Rz_{ij} – отклонение профиля шероховатости, мм.

Минимальная граница нахождения профиля находится по следующей зависимости:

$$Z_{ij \text{ мин.}} = Z_{\text{настр.}} - fl(\Delta Z_{\text{настр.}ij}) - fl\left(\frac{\Delta_{\text{откл.отпл-ти}ij}}{2}\right) - fl(Rz_{ij}) \quad (3.10)$$

В результате вместо номинальной горизонтальной поверхности формируется наклонная поверхность одновременно по координатам X и Y с отклонениями настроечного размера в сторону увеличения размеров по координате Z (рисунок 3.6)

Использование только найденных математических моделей износа инструмента не позволяет найти величину коррекции. Необходима математическая зависимость изменения координат положения профиля от погрешностей станочных модулей $fl(\Delta_{\text{станка}})$.

Эта зависимость может быть найдена в результате диагностирования точности модулей станочной системы. С учетом погрешностей модулей станочной системы границы нахождения профиля находятся по следующим формулам:

$$Z_{ij \text{ макс.}} = Z_{\text{настр.}} + fl(\Delta_{\text{станка}}) + fl(\Delta Z_{\text{настр.}ij}) + fl\left(\frac{\Delta_{\text{откл.отпл-ти}ij}}{2}\right) + fl(Rz_{ij}) \quad (3.11)$$

$$Z_{ij \text{ мин.}} = Z_{\text{настр.}} + fl(\Delta_{\text{станка}}) - fl(\Delta Z_{\text{настр.}ij}) - fl\left(\frac{\Delta_{\text{откл.отпл-ти}ij}}{2}\right) - fl(Rz_{ij}) \quad (3.12)$$

Улучшить точность можно за счет принудительного смещения настройки инструмента в рабочих ходах обработки фрезеруемой поверхности образца материала. Смещение инструмента компенсирует его износ и отклонения, связанные с податливостью фрезы (рисунок 3.7)

Минимальные и максимальные координаты положения точек профиля сравниваются со значениями контрольных границ. За величину коррекции принимается максимальное из двух расчетных значений:

$$\Delta_{\text{В.настр.}} = USL - Z_i \quad (3.13)$$

$$\Delta_{\text{Н.настр.}} = Z_i - LSL \quad (3.14)$$

Алгоритм предусматривает нахождение координат профиля и длины резания по предельному значению среднеарифметического значения шероховатости для принудительной смены инструмента. Также обеспечивается выдача рекомендаций о замене инструмента при достижении предельно допустимой длины резания если критерий смены по шероховатости не будет реализован.

Применение алгоритма расчета предельных границ положения координат положения профиля позволяет сгенерировать программу управления станком с ЧПУ с учетом необходимых корректирующих смещений по координате Z , которые выполняются наладчиком в процессе доработки программы на рабочем месте, а также обоснованно выполнить смену инструмента по достижении предельно допустимой длины резания.

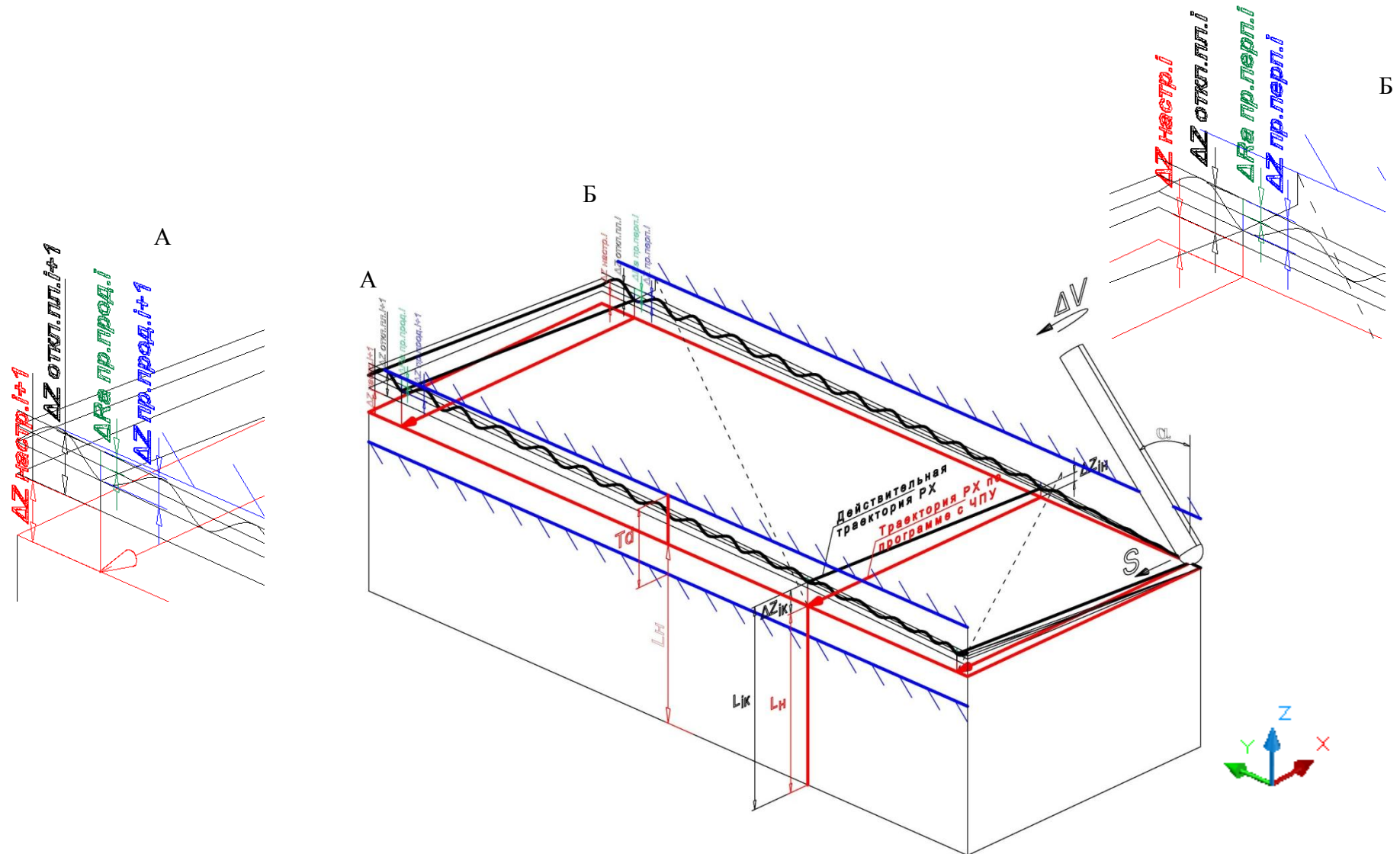


Рисунок 3.6 – Изменение геометрических параметров образца материала штампа вследствие износа концевой сферической фрезы

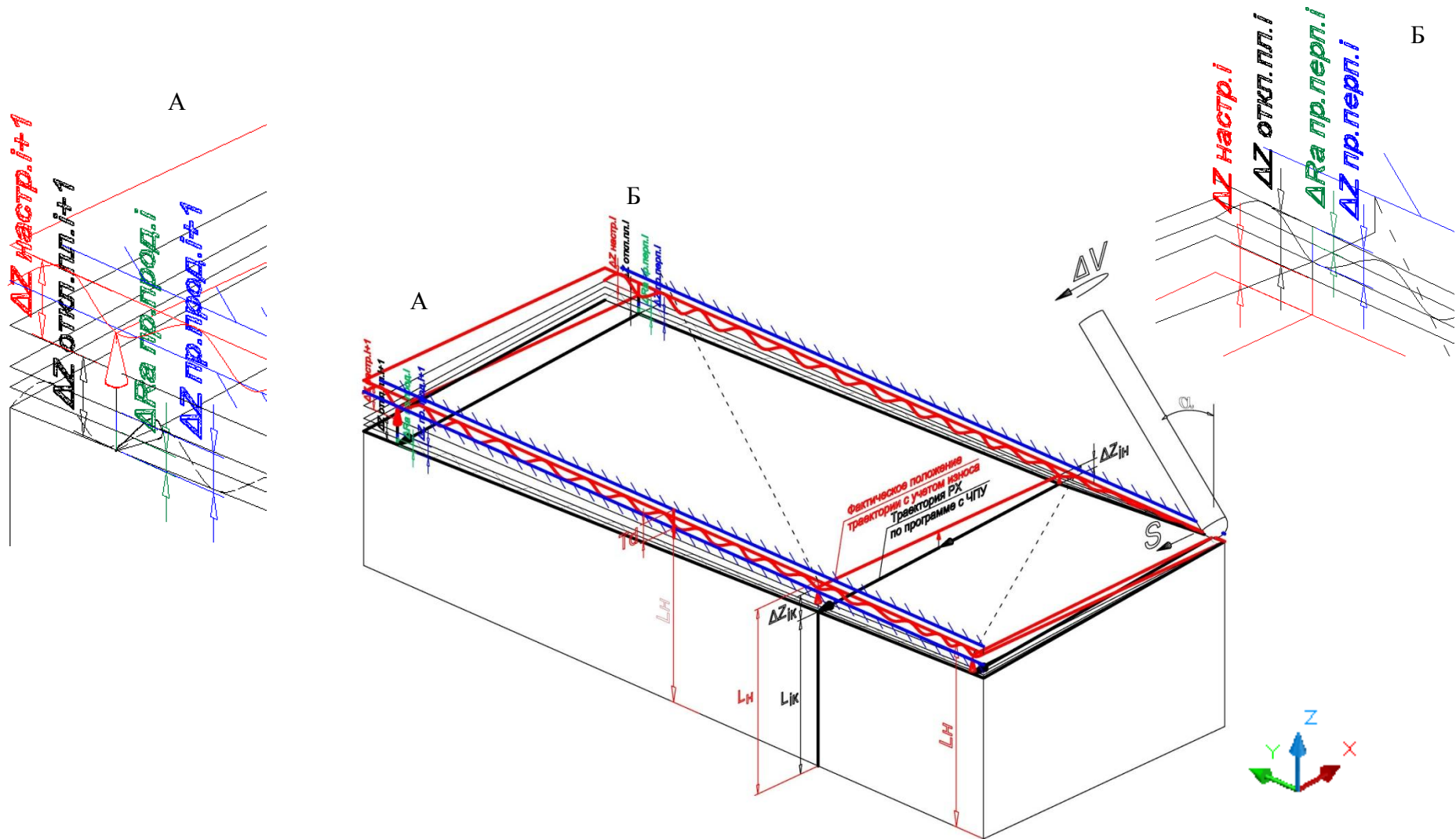


Рисунок 3.7 – Компенсация износа фрезы для улучшения геометрической точности обрабатываемого образца материала штампа

3.4 Нахождение корректирующих смещений для улучшения точности обработки гравюр штампов по данным обработки образцов материала

В результате послойной обработки образца материала и измерений образца в девяти точках найдено изменение необходимых для моделирования геометрической точности отклонений геометрических показателей точности:

- Отклонения от настроенного размера:
- Отклонений от плоскостности:
- Значений Ra и Rz

На рисунке 3.8 приведены графики изменения отдельных отклонений геометрических показателей точности, необходимых для моделирования геометрической точности обработанного образца материала. Отклонение от настроенного размера нарастает и стабилизируется до величины 0,07 мм. до достижения пути резания 1250 м. Отклонение от плоскостности изменяется от сначала нарастает до величины 0,06 мм, затем стабилизируется около величины 0,05 мм до достижения пути резания в 1500 м, после чего резко нарастает до величины в 0,16 мм. Величина Ra на начальном периоде возрастает до величины в 0,7 мкм, затем убывает до 0,3 мм, после чего нарастает до величины в 11 мкм. Величина Rz изменяется в более широких пределах с большей амплитудой. В начальный период до 200 м. увеличивается величина Rz увеличивается, далее уменьшается до 2 мкм на 500-ых метрах пути резания, после чего нарастает до величины 6 мкм.

Математические модели изменения отклонений геометрических показателей приведены в таблице 3.6. Модели используются для моделирования геометрической точности и расчета значений единичных показателей точности в любой точке пути резания обрабатываемой поверхности.

На рисунке 3.9 приведены графики минимальной и максимальной границы положения профиля образца материала по длине пути резания, рассчитанные

по формулам 3.9 и 3.10. Границы положения профиля волнообразно уменьшаются от величины 0,07 мм. на 400 м пути до 0,03 мм на 800-м м. пути резания и увеличиваются до величины 0,06 мм при достижении на 1500 м.

Таблица 3.6 – Регрессионные модели изменения геометрических показателей в периоде стойкости концевых сферических фрез

Показатели	Регрессионная модель	Точность аппроксимации
$Z_{\text{макс.}}$	$Z_{\text{макс.}} = 5\text{E-}16l^5 - 2\text{E-}12l^4 + 3\text{E-}09l^3 - 2\text{E-}06l^2 + 0,0005l - 0,0012$	$R^2 = 0,9576$
$Z_{\text{мин.}}$	$Z_{\text{мин.}} = 5\text{E-}16l^5 - 2\text{E-}12l^4 + 3\text{E-}09l^3 - 2\text{E-}06l^2 + 0,0005l - 0,0012$	$R^2 = 0,9576$
Δ от настр.	Δ от настр. = $3\text{E-}19l^6 - 1\text{E-}15l^5 + 2\text{E-}12l^4 - 1\text{E-}09l^3 + 4\text{E-}07l^2 - 3\text{E-}05l^2 + 6\text{E-}06$	$R^2 = 0,9409$
Δ откл. от пл-ти	Δ откл. от пл-ти = $5\text{E-}11l^3 - 1\text{E-}07l^2 + 2\text{E-}05l - 0,0016$	$R^2 = 0,9294$
Δ износа	Δ износа = $2\text{E-}05l + 0,0021$	$R^2 = 0,9804$
Rz	$Rz = -6\text{E-}15l^4 + 2\text{E-}11l^3 - 3\text{E-}08l^2 + 2\text{E-}05l + 0,0002$	$R^2 = 0,9394$
Ra	$Ra = -1\text{E-}17l^6 + 7\text{E-}14l^5 - 2\text{E-}10l^4 + 1\text{E-}07l^3 - 7\text{E-}05l^2 + 0,013l - 0,0094$	$R^2 = 0,9512$
ΔX станка	ΔX станка = $-0,0001l + 0,01$	$R^2 = 1$
ΔY станка	ΔY станка = $4\text{E-}07l^2 - 2\text{E-}05l + 0,001$	$R^2 = 0,9783$
Δ настр.	Δ настр. = $0,0003l^3 - 0,0043l^2 + 0,0074l^2 - 0,0425$	$R^2 = 0,9153$

Затем наблюдается значительное увеличение отклонения до 0,15 мм, что свидетельствует о потере точности процесса фрезерования. Процесс сопровождается нарастанием отклонений от плоскостности. На диаграмме приведен график размерного износа инструмента. Если значения износа отложить от минимальной границы положения профиля, то положение его точек близко к значениям отклонений прилегающей плоскости от настроечного размера, что можно использовать для его нахождения по данным измерений геометрических показателей точности в процессах фрезерования концевыми сферическими фрезами. В периоде стойкости фрезы, соответствующей пути резания в 1666 м. обеспечивается размерная точность в пределах 0,15 мм.

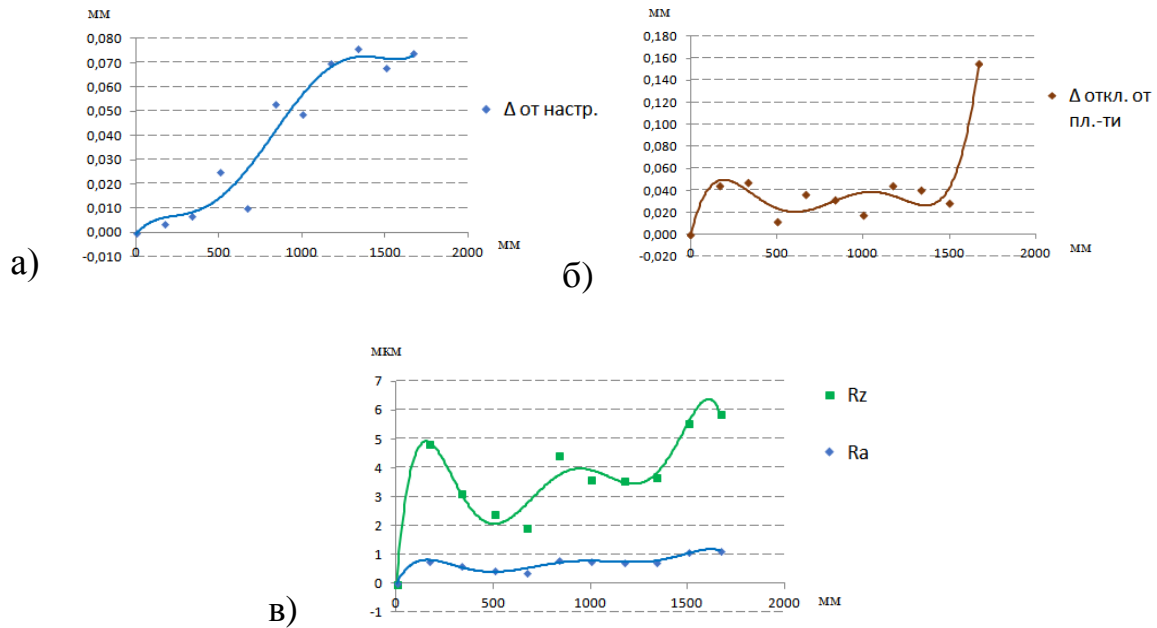


Рисунок 3.8 – Графики изменения отклонений геометрических показателей точности образца изделия материала в периоде стойкости инструмента: а) отклонений от настроечного размера, б) отклонений от плоскостности, в) параметров шероховатости

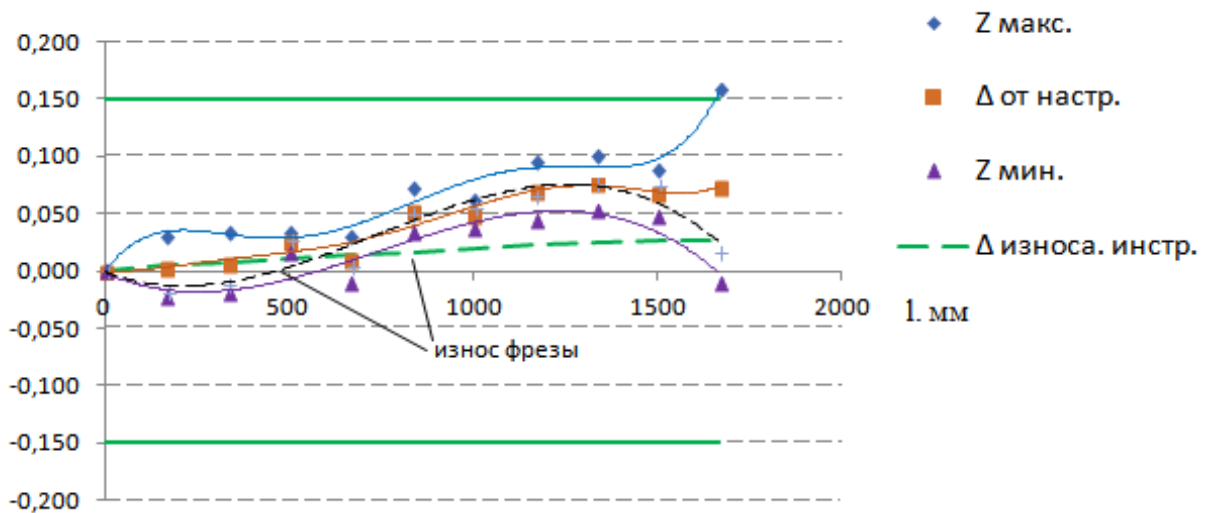


Рисунок 3.9 – Область нахождения координат профиля обрабатываемого образца материала концевой сферической фрезой при угле ее наклона 45°

Рассмотрим возможные варианты регулирования процесса обработки, позволяющего улучшить точность обработки обрабатываемого образца материала. Приведенный выше график положений профиля освобожден от влияния погрешностей модулей станочной системы. Для использования

полученных зависимостей значения отклонений необходимо скорректировать с учетом погрешностей подвижных модулей станочной системы.

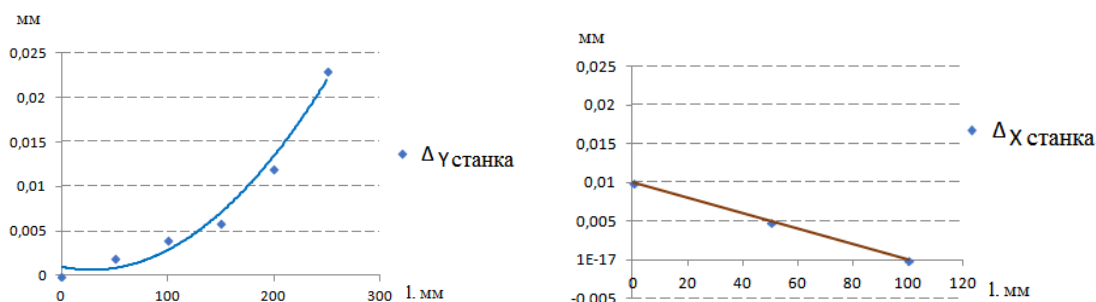


Рисунок 3.10 – Графики изменения отклонений от прямолинейности перемещения отклонений от прямолинейности фрезерного станка с ЧПУ

Обработка небольших штамповых вставок выполняется на поворотном столе, установленном на суппорт трехкоординатного станка с ЧПУ. При этом станок становится четырехкоординатным. При таком способе обработки возможно при обработке выдерживать оптимальный угол наклона фрезы для обеспечения минимальной шероховатости обрабатываемой поверхности штампа. На рисунке 3.10 приведены графики изменения прямолинейности перемещения суппортов на длине обрабатываемого образца материала в направлении продольного и поперечного перемещения инструмента. По оси Y график изменения прямолинейности имеет параболическую форму и на длине 250 мм изменяется на 0,025 мм. По координате X на длине 100 мм прямолинейность изменяется линейно на величину 0,01 мм. Отклонение определяется по результатам измерений электронного щупа, установленного в шпиндель фрезерного станка с ЧПУ с ц.д. 1 мкм. Отклонения прямолинейности являются следствием износа направляющих суппортов фрезерного станка с ЧПУ.

На рисунке 3.11 приведены графики положения профиля с учетом погрешностей подвижных модулей станочной системы графики построены через 166 м пути резания, что соответствует обработанной поверхности образца изделия. Полученные границы изменения положения профилей дают возможность рассчитать величины коррекции программы с ЧПУ обработки

поверхности. Так при настройке на середину поля допуска к концу периода стойкости точки профиля выходят за контрольные границы и границы поля допуска, таким образом заданная точность не обеспечивается. Необходима коррекция инструмента. При смещении инструмента по нормали к обрабатываемой поверхности на величину 0,079 мм к нижней границе поля допуска обеспечивается попадание в допуск во всем периоде стойкости инструмента в допуск 0,2 мм (рисунок 3.11 а).

Дальнейшее улучшение геометрической точности обрабатываемых поверхностей образцов можно при выполнении коррекции после обработки каждого слоя образца через каждые 166 м (рисунок 3.11 б). График коррекций приведен на рисунке 3.12. При данном способе корректирования процесса обработки возможно обеспечить размерную точность каждого слоя материала в допуске 0,15 мм.

В таблице 3.7 приведены статистические данные расчета индексов пригодности процесса при различных вариантах выполненных корректировках, на рисунках 3.13 и 3.14 графики нормального распределения, дающие численное и графическую оценку степени улучшения координат положения профиля обработанного образца материала.

При обработке криволинейных поверхностей гравюр штампа во избежание ступенек коррекцию необходимо проводить после обработки отдельных поверхностей гравюр штампа. Диагностирование станочной системы необходимо выполнять в полях обрабатываемых поверхностей гравюр штампов. Дальнейшее улучшение точности возможно при условии индивидуального регулирования процесса фрезерования в каждом рабочем ходе, для чего необходимо корректировать исходный код программы в соответствии с корректирующими смещениями в каждом ее кадре.

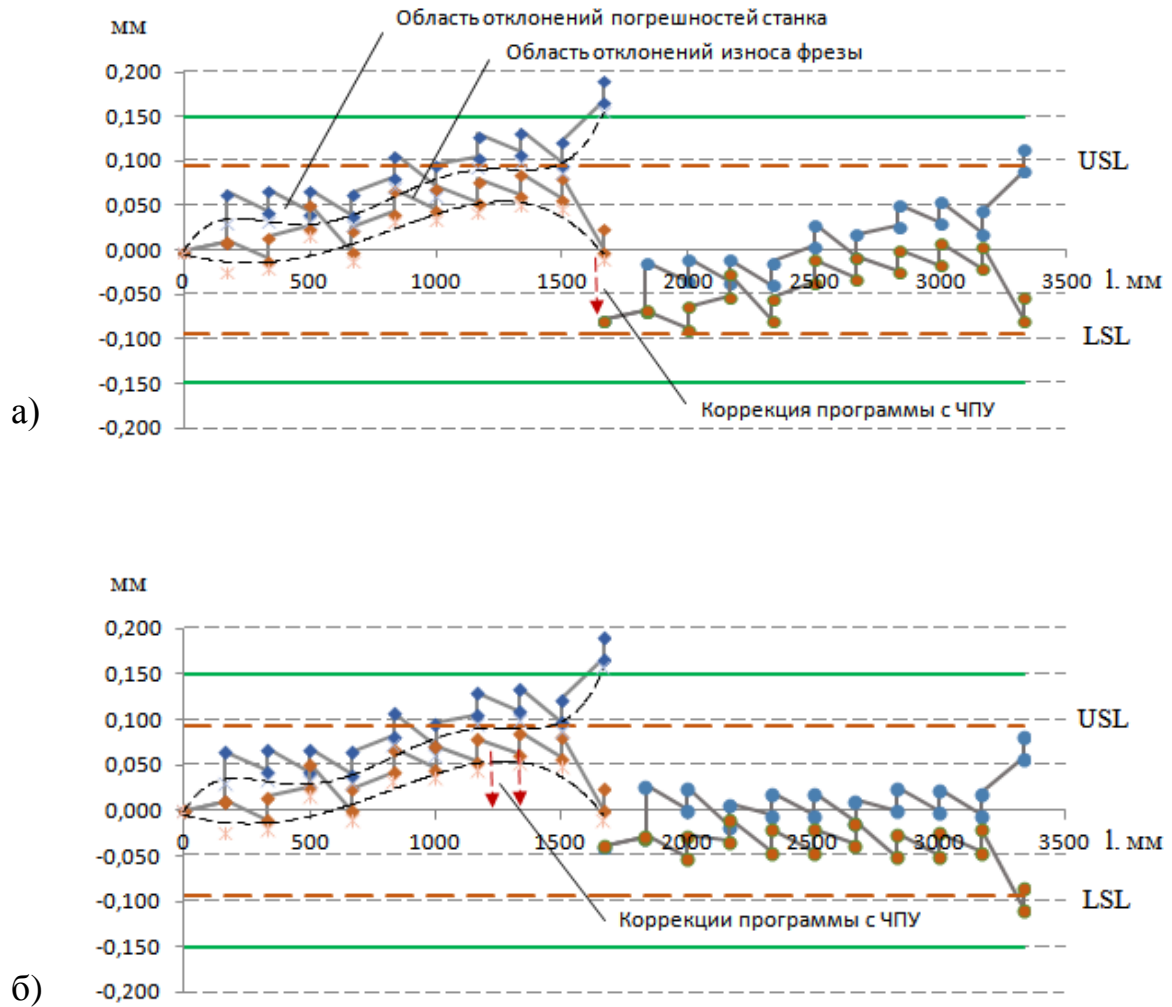


Рисунок 3.11 – Графики изменения положения профиля обрабатываемой поверхности образца материала а) единая коррекция, б) индивидуальная коррекция по слоям обрабатываемого материала

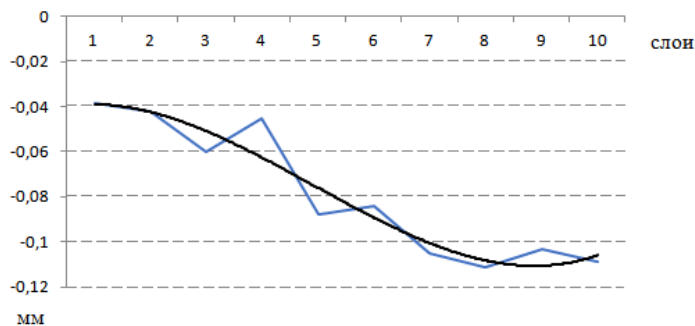


Рисунок 3.12 – График коррекции станка с ЧПУ для послойной компенсации износа фрезы в процессе фрезерования концевыми сферическими фрезами

Таблица 3.7 – Данные статистической обработки координат максимального и минимального положения профиля образца материала

l	Координаты положения профиля							
	исходные		с учетом погрешности станка		после коррекция в периоде стойкости		после коррекция по слоям	
	$Z_{\text{макс.}}$	$Z_{\text{мин.}}$	$Z_{\text{макс.}}$	$Z_{\text{мин.}}$	$Z_{\text{макс.}}$	$Z_{\text{мин.}}$	$Z_{\text{макс.}}$	$Z_{\text{мин.}}$
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
0	0,000	0,000	0,0000	0,0000	-0,0786	-0,0786	-0,0385	-0,0385
166,666	0,031	-0,024	0,0100	0,0100	-0,0686	-0,0686	-0,0285	-0,0285
166,666			0,0656	0,0114	-0,0130	-0,0672	0,0271	-0,0271
333,332	0,034	-0,020	0,0438	-0,0098	-0,0348	-0,0883	0,0018	-0,0518
333,332			0,0688	0,0152	-0,0098	-0,0633	0,0268	-0,0268
499,998	0,033	0,017	0,0432	0,0268	-0,0354	-0,0518	-0,0168	-0,0332
499,998			0,0682	0,0518	-0,0104	-0,0268	0,0082	-0,0082
666,664	0,030	-0,010	0,0401	-0,0001	-0,0385	-0,0787	-0,0049	-0,0451
666,664			0,0651	0,0249	-0,0135	-0,0537	0,0201	-0,0201
833,33	0,073	0,033	0,0831	0,0429	0,0045	-0,0357	-0,0049	-0,0451
833,33			0,1081	0,0679	0,0295	-0,0107	0,0201	-0,0201
999,996	0,062	0,036	0,0716	0,0464	-0,0070	-0,0322	-0,0124	-0,0376
999,996			0,0966	0,0714	0,0180	-0,0072	0,0126	-0,0126
1166,662	0,096	0,044	0,1056	0,0544	0,0270	-0,0242	0,0006	-0,0506
1166,662			0,1306	0,0794	0,0520	0,0008	0,0256	-0,0256
1333,328	0,100	0,052	0,1098	0,0622	0,0313	-0,0164	-0,0012	-0,0488
1333,328			0,1348	0,0872	0,0563	0,0086	0,0238	-0,0238
1499,994	0,088	0,048	0,0981	0,0579	0,0195	-0,0207	-0,0049	-0,0451
1499,994			0,1231	0,0829	0,0445	0,0043	0,0201	-0,0201
1666,66	0,158	-0,010	0,1678	0,0002	0,0892	-0,0784	0,0588	-0,1088
1666,66			0,1928	0,0252	0,1142	-0,0534	0,0838	-0,0838
Размах	0,158	0,076	0,193	0,097	0,1928	0,0969	0,122	0,101
\bar{Z}_i	0,0704	0,0167	0,0913	0,0404	0,0127	-0,0382	0,0128	-0,0381
σ	0,0447	0,0288	0,0480	0,0306	0,0480	0,0306	0,0275	0,0234
C_p	1,1188	1,7382	1,0415	1,6327	1,0415	1,6327	1,8170	2,1389
C_{pk1}	0,5941	1,5442	0,4074	1,1927	0,9531	2,0482	1,6623	2,6826
C_{pk2}	1,6436	1,9322	1,6756	2,0727	1,1299	1,2172	1,9718	1,5953

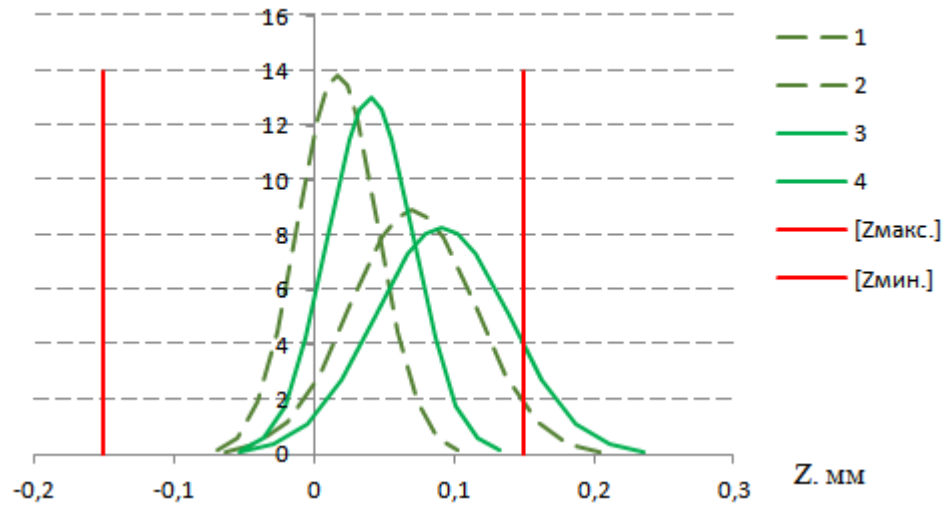


Рисунок 3.13 – Графики нормального распределения координат положения профиля 1, 2 – исходные, 3, 4 – с учетом погрешности подвижных модулей станка

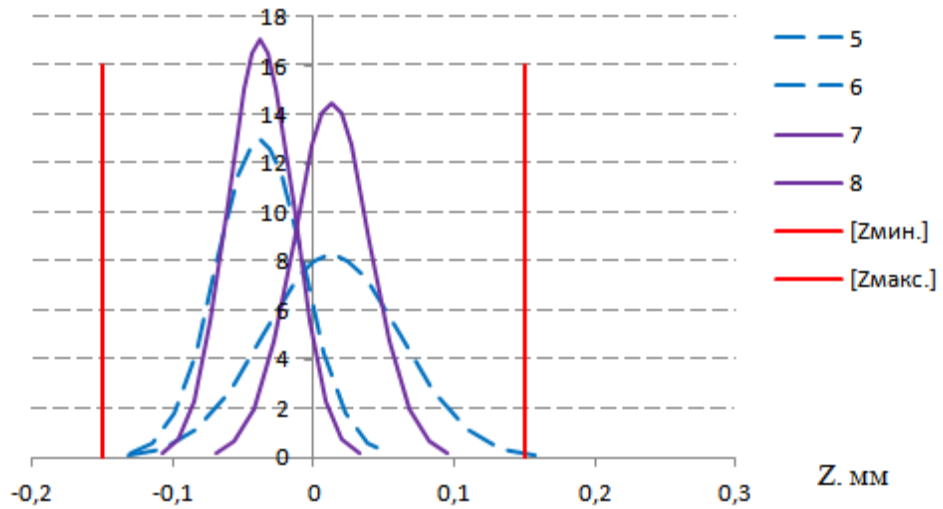


Рисунок 3.14 – Графики нормального распределения координат положения профиля после коррекции 5, 6 – однократной в периоде стойкости инструмента, 7, 8 – после каждого обработанного слоя

3.5 Выводы по 3 главе

1. Разработана методика количественного сравнения концевых сферических фрез для обеспечения точности и стойкости штампов с учетом значимости отдельных показателей точности для обеспечения точности чистового фрезерования поверхности гравюр штампа, позволяющая выбрать оптимальный вариант концевой сферической фрезы, обеспечивающий улучшение точности диаметральных размеров поковок.

2. Систематизированы и экспертно проранжированы характеристики точности гравюр штампа для обеспечения высокой точности и их стойкости. Наиболее значимыми являются отклонения базовой поверхности от настроечного размера (коэффициент значимости 0,3), отклонение от плоскостности (коэффициент значимости 0,15), обеспечивающие геометрическую точность поковок, шероховатость поверхности (коэффициент значимости 0,3) обеспечивающий стойкость штампа.

3. Выполнено сравнение концевых сферических фрез диаметром 8 мм с износостойким покрытием на основе TiN, заточенных пятикоординатном заточном станке с ЧПУ, на специально подготовленном для заточки концевой 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 на специально подготовленном для заточки концевой инструмента фрезерном пятикоординатном станке с ЧПУ.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЧИСТОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГРАВЮР ШТАМПОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОКОВОК

4.1 Обоснование требований к точности расположения профилей гравюр штампа

Согласно требований чертежа имеются лишь общие требования к обработке гравюр согласно математической модели поковки. На положение профилей гравюр штампа жестких требований не установлено. Чтобы установить адекватные требования на положение гравюр штампа необходимо провести статистический анализ геометрических параметров поковки, по которым установить требования к положению гравюр штампа. У поковки коленчатого вала необходимо в первую очередь обеспечить стабильность диаметральных размеров по коренным и шатунным шейкам, а также радиальные размеры по противовесам. Поковка также получает в результате штамповки угловые отклонения шатунных шеек, а также изогнутость оси по третьей коренной шейке.

Штамп должен обеспечить стабильность диаметральных размеров шеек по всей длине поковки. Точность поверхностей гравюр штампов следует ограничить исходя из значений изменчивости их диаметральных размеров. В таблице 4.1 приведены значения среднеквадратичных отклонений размеров горячей объемной штамповки коренных и шатунных шеек коленчатого вала. Исходя из условий снижения изменчивости размеров поковок допуск на радиальный размер поверхностей коренных шеек принят как $1/4$ от размаха кривой нормального распределения диаметральных размеров поковки после штамповки (рисунок 4.1). Его величина принимает значение в интервала от 0,3-0,35 мм. В свою очередь необходимо обеспечить стабильность размера в пределах поля допуска в периоде стойкости инструмента исходя из условия обеспечения $1/3$ поля допуска на радиальный размер поверхностей гравюры

штампа. Его величина должна изменяться в пределах от 0,065 мм до 0,085 мм (таблица 4.1).

При чистовом фрезеровании гравюр штампа стабильность изменения радиальных размеров в периоде стойкости фрезы при фрезеровании сложно обеспечить вследствие значительной площади обработки.

Таблица 4.1 – Статистические данные о стабильности диаметральных размеров коренных, шатунных шеек и противовесов

Конструктивные элементы поковки	σ ГОШ элементов поковки, мкм	Допуск на радиальный размер (12-й квалитет), мкм	Допуски на радиальные размер поверхностей гравюр штампа, мкм	Принятый допуск положения базовой плоскости, мкм
Коренные шейки \varnothing 102 мм				
1	300	350	75	75
2	330		83	
3	500		125	
4	400		100	
5	330		083	
Шатунные шейки \varnothing 89 мм				
1	330	350	83	85
2	660		165	
3	300		75	
4	330		83	
Противовесы R 65 мм				
1	300	300	75	65
2	500		125	
3	350		88	
4	300		75	

Улучшение геометрической точности штампов может выполняться за счет обеспечения своевременной смены инструмента до момента достижения контрольных границ предельных значений на расположение профилей гравюр штампов. На рисунке 4.1 обозначена предельная граница увеличения удельных отклонений геометрической точности из условия обеспечения найденного допуска на положение профиля гравюр штампа в $K_{\min}=0,065/0,25=0,26$ мм/м², $K_{\max}=0,085/0,25=0,34$ мм/м².

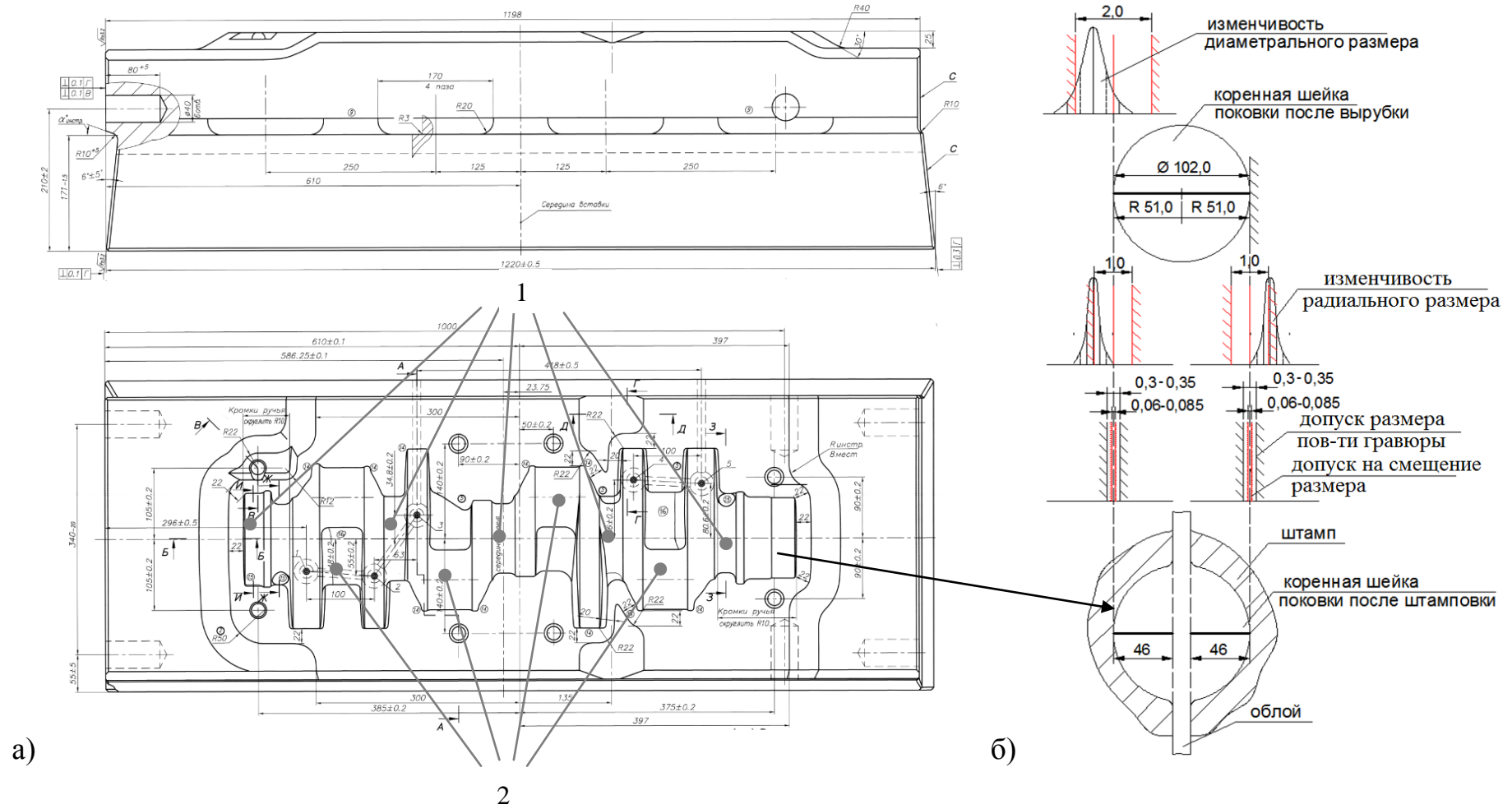


Рисунок 4.1 – а) Нижний штамп горячей объемной штамповки поковки коленчатого вала, б) допуски изготовления коренной шейки поковки и положения профиля поверхности гравюры штампа 1 – поверхности гравюр коренных шеек, 2 – поверхности гравюр шатунных шеек

Возможны несколько вариантов обеспечения качества чистового фрезерования. К одному из них можно отнести обеспечение обработки без коррекции траектории концевой сферической фрезы при этом необходим расчет момента его принудительной смены, который можно рассчитать по математическим моделям изменения значений геометрических показателей, приведенных во второй главе или путем обработки с коррекцией, обеспечивающей компенсацию размерного износа инструмента.

4.2 Методика моделирования геометрической точности обработки гравюр штампов с использованием математических моделей изменения геометрической точности в периодах стойкости фрез

Закономерности износа участков режущей кромки по ее длине в процессе обработки поверхности гравюры штампа различны. Для моделирования точности в периоде стойкости необходимо иметь информацию об износе в каждой контактирующей точке режущей кромки.

Для этого необходимо обеспечить прослеживание геометрической точности на криволинейных обрабатываемых поверхностях, либо на плоской поверхности при условии обеспечения непрерывного обката фрезой на плоских образцах материала. Метод требует наличия для испытаний четырехкоординатного станка с ЧПУ, при этом требуется выполнять измерения износа непрерывно изнашиваемой фаски износа по всей длине режущей кромки, что требует дополнительного координирования инструментального микроскопа относительно обрабатываемой кромки для обеспечения резкости по всей кромке, а также нахождения угла износа, что чрезвычайно трудоемко. Альтернативой может быть исследование износа участка режущей кромки образца изделия в выбранных базовых положениях инструмента с дальнейшей аппроксимацией износа в промежуточных участках кромки.

Лучшим способом 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° (рисунок 4.2). Данный способ обработки выполняется на четырехкоординатном станке с ЧПУ. В процессе обработки гравюры фреза вследствие упругих отжатий 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.

Изменяется и параметры шероховатости обработанной поверхности (рисунок 4.3). Таким образом, отклонение в направлении перпендикулярном обрабатываемой поверхности гравюры может быть рассчитано по следующей формуле:

$$\Delta_{nij} = \Delta_{п.ij} + \Delta_{д.ij} + \Delta_{изн.ij} + \Delta_{мк ij} \quad (4.1)$$

где $\Delta_{п.ij}$ – отклонение, связанные с податливостью фрезы, мм.

$\Delta_{д.ij}$ – отклонение, связанное с вибрациями фрезы, мм.

$\Delta_{изн.ij}$ - отклонения, от износа режущих кромок фрезы, мм.

$\Delta_{мк ij}$ - микронеровности поверхности, от кинематики процесса и износа режущих кромок мм.

i – номер точки обработанной поверхности, мм.

j – номер строки или рабочего хода обработанной поверхности, мм

Процесс обработки сопровождается непрерывным изменением координат участков профиля с различной геометрией и интенсивностью изнашивания, жесткостью и вибрациями. В результате в периоде стойкости концевой сферической фрезы профиль обрабатываемой гравюры штамповой вставки получает сложно предсказуемые отклонения от номинального положения.

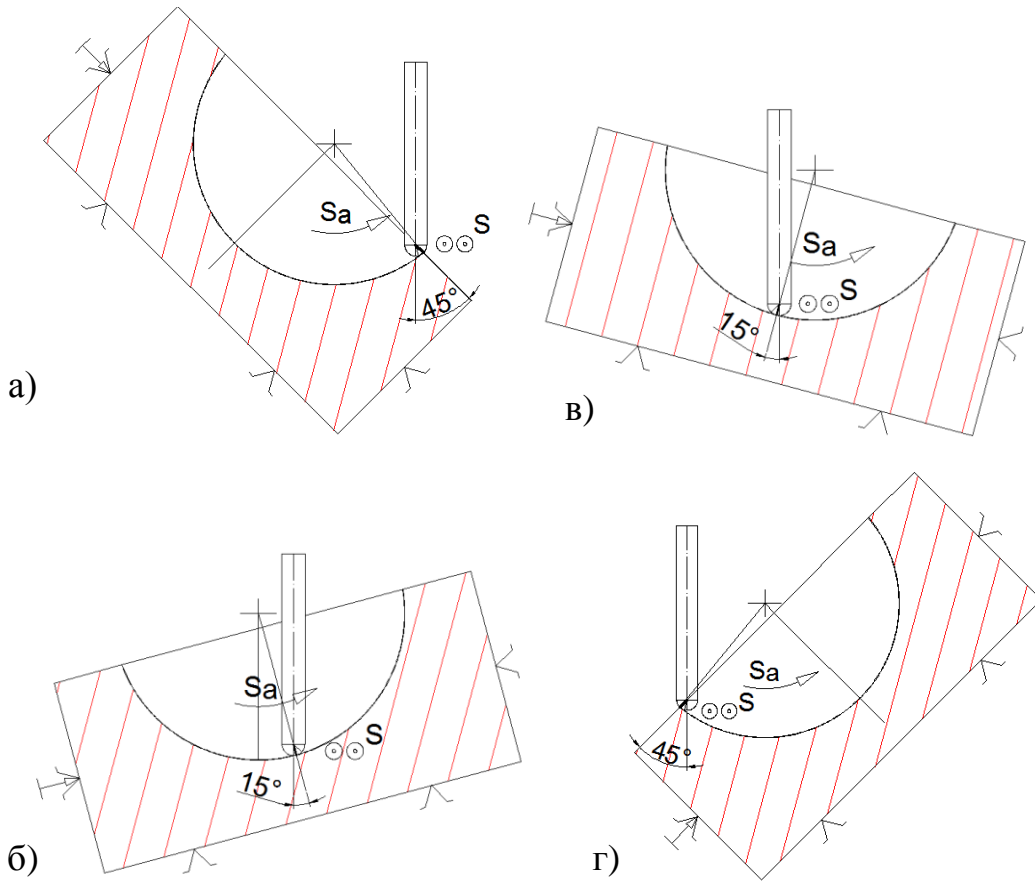


Рисунок 4.2 – Угловые положения штамповой вставки при обработке гравюры коренной шейки поковки коленчатого вала а) начальное, б, в) промежуточные, г) конечные

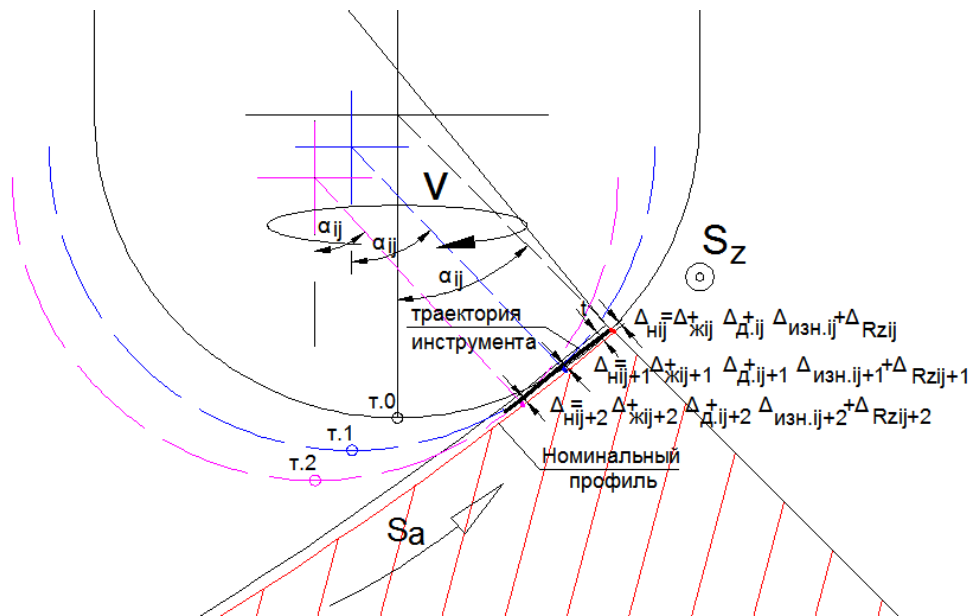


Рисунок 4.3 – Схема геометрических отклонений обрабатываемой поверхности гравюры штампа поковки коленчатого вала

Предлагается получить информацию о закономерностях изменений перечисленных выше отклонений в результате экспериментальной обработки плоских образцов материала с режимами, соответствующими обработке гравюр штамповых вставок с постоянными углами наклона концевых фрез. Углы наклона соответствуют крайним положениям фрезы в процессе обработки гравюр штампа. Такими положениями могут быть положения фрезы в верхней и нижней точке гравюры и других выбранных промежуточных точках, в которых геометрия фрезы значительно изменяется.

Образцы обрабатываются до достижения предельной шероховатости и износа по задней поверхности. В процессе обработки образцы после послойного удаления материала измеряются. По данным измерений находятся отклонения от настроечного размера, отклонение от плоскостности, высотные параметры шероховатости. Согласно формулам 3.11, 3.12 положение точек профиля имеет вероятностный характер и по экспериментальным данным в заданных точках пути резания находятся границы его нахождения в виде координат $Z_{ij \text{ мин.}}$ и $Z_{ij \text{ макс.}}$.

$$Z_{ij \text{ макс.}} = Z_{\text{настр.}} + fl(\Delta Z_{\text{настр.}ij}) + fl\left(\frac{\Delta_{\text{откл.отпл-ти}ij}}{2}\right) + fl(Rz_{ij}) \quad (4.2)$$

где $Z_{\text{настр.}}$ – настроечный размер, мм;

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

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

Rz_{ij} – отклонение профиля шероховатости, мм.

Минимальная граница нахождения профиля обрабатываемого образца может быть найдена по следующей зависимости:

$$Z_{ij \text{ мин.}} = Z_{\text{настр.}} + fl(\Delta Z_{\text{настр.}ij}) - fl\left(\frac{\Delta_{\text{откл.отпл-ти}ij}}{2}\right) - fl(Rz_{ij}) \quad (4.3)$$

Указанные выше геометрические отклонения образца являются следствием строго определенных факторов процесса. Причиной отклонения от настроечного размера $fl(\Delta Z_{\text{настр.}ij})$ являются отклонения, связанные со

статической податливостью фрезы, отклонения $\mp \left(\frac{\Delta_{\text{откл.отпл-ти}ij}}{2} + Rz_{ij} \right)$ являются следствием динамической податливости износа фрезы и вибраций.

Для улучшения геометрической точности в практических расчетах необходимо получить их зависимости по длине пути резания. Обработка гравюры сопровождается в процессе срезания припуска сменной участков режущих кромок. При обработке плоского образца материала изнашивается один участок фрезы, следовательно найденное в результате исследования износа необходимо скорректировать в большую сторону. Увеличение пути резания определяется по соотношению изнашиваемой и не изношенной задней поверхности фрезы.

$$L = L_{\text{прин.}} * K_{\text{п.р.}} \quad (4.4)$$

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

$$K_{\text{п.р.}} = \frac{S_{\text{уч-ка з.п.}}}{S_{\text{з.п. } \alpha_{\text{макс.}}} + S_{\text{з.п. } \alpha_{\text{мин.}}}} \quad (4.5)$$

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

$S_{\text{з.п. } \alpha_{\text{макс.}}}$ - площадь очага износа по задней поверхности на максимальном угле наклона образца материала.

$S_{\text{з.п. } \alpha_{\text{мин.}}}$ - площадь очага износа по задней поверхности на максимальном угле наклона образца материала.

Положение базовой плоскости на участке поверхности гравюры штамповых вставок может быть найдено по следующей формуле:

$$\Delta_{Hij} = \frac{fl(Z_{ij \text{ макс.}})_{\alpha_{\text{ макс.}}} - fl(Z_{ij \text{ мин.}})_{\alpha_{\text{ мин.}}}}{2} \quad (4.6)$$

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° .

Компенсация отклонений базовой плоскости позволяет обеспечить улучшение геометрической точности обрабатываемой поверхности гравюры штампа. В результате для улучшения геометрической точности гравюр штампа можно применить следующие варианты коррекции программы с ЧПУ на величину отклонений базовой поверхности:

- на штамповую вставку;
- на гравюры штамповых вставок;
- индивидуально для каждого рабочего хода

Первые два варианта улучшения геометрической точности возможно осуществить за счет программных продуктов, генерирующих код управляющей программы по 3D модели обрабатываемого изделия – САМ систем. Индивидуальное управление каждым рабочим ходом возможно путем коррекции текста программы в специальном программном продукте.

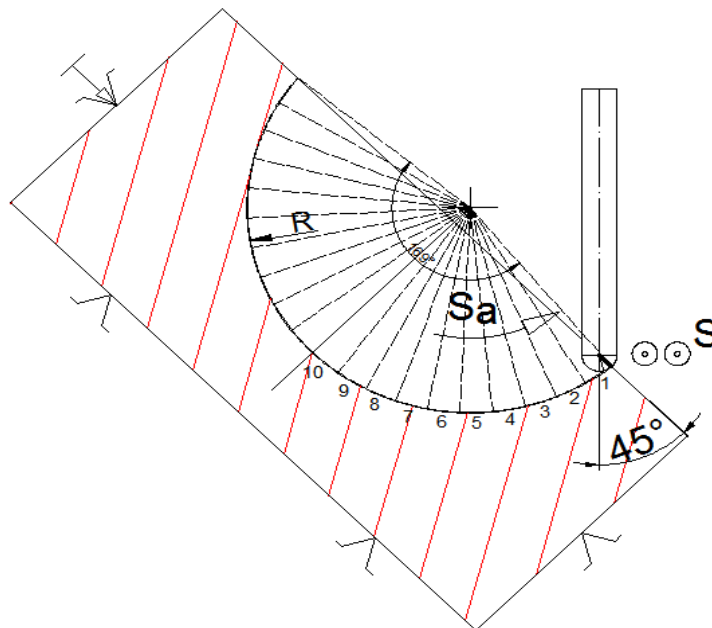


Рисунок 4.4 – Пример зон обработки гравюры коренной шейки для расчета координат графика отклонений базовой поверхности

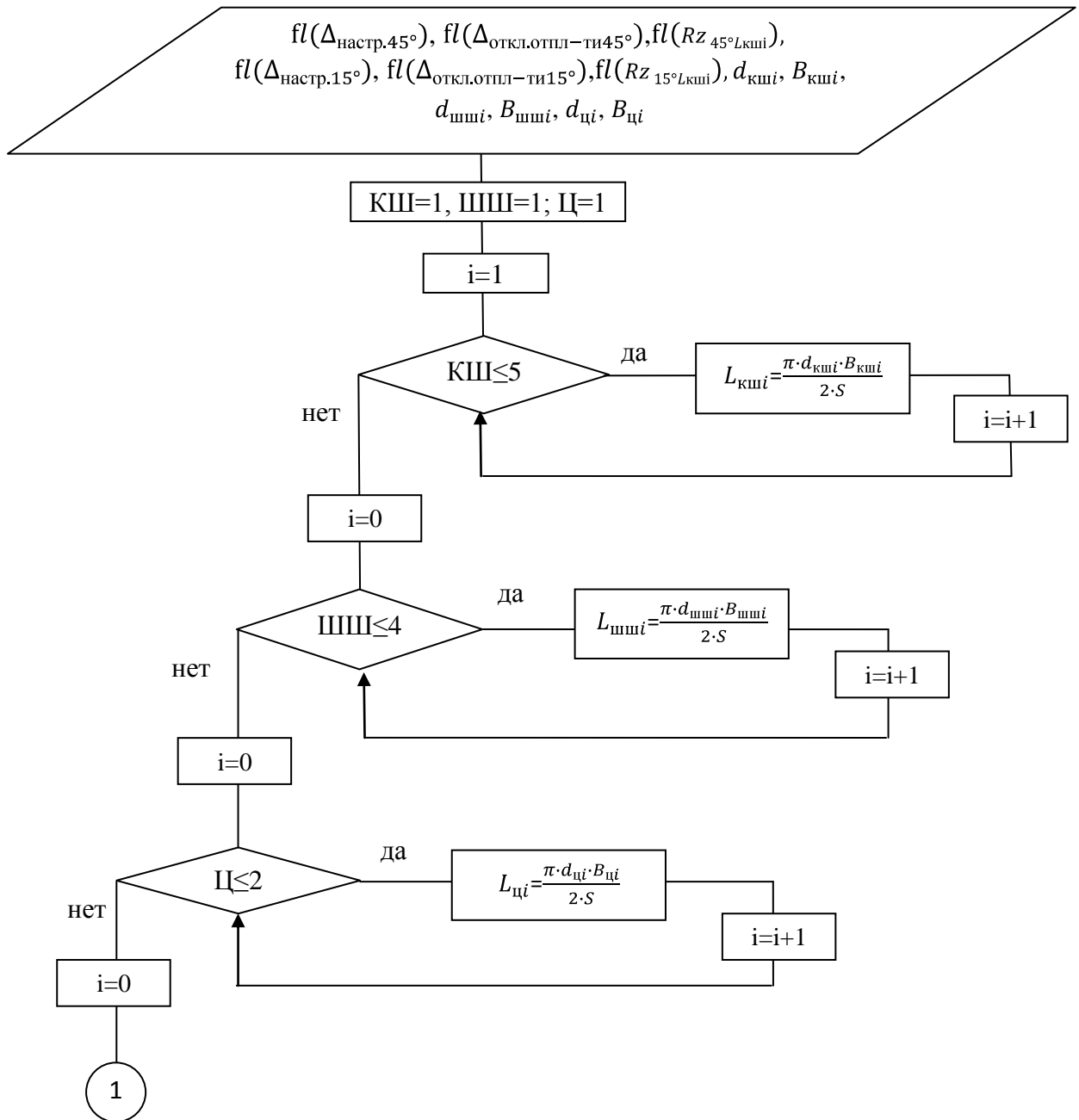


Рисунок 4.5 – Алгоритм расчета пути резания чистового фрезерования гравюр цапф, коренных и шатунных шеек штамповой вставки концевыми сферическими фрезами

По найденным минимальным максимальным границам отклонений возможно нахождение степенных функций отклонений базовой плоскости по пути резания на любых отдельных, промежуточных, угловых участках (рисунок 4.4). Эти зависимости необходимы для расчета коррекции, если фрезерование выполняется участками режущей кромки концевой фрезы в пределах исследованного участка (рисунок 4.5).

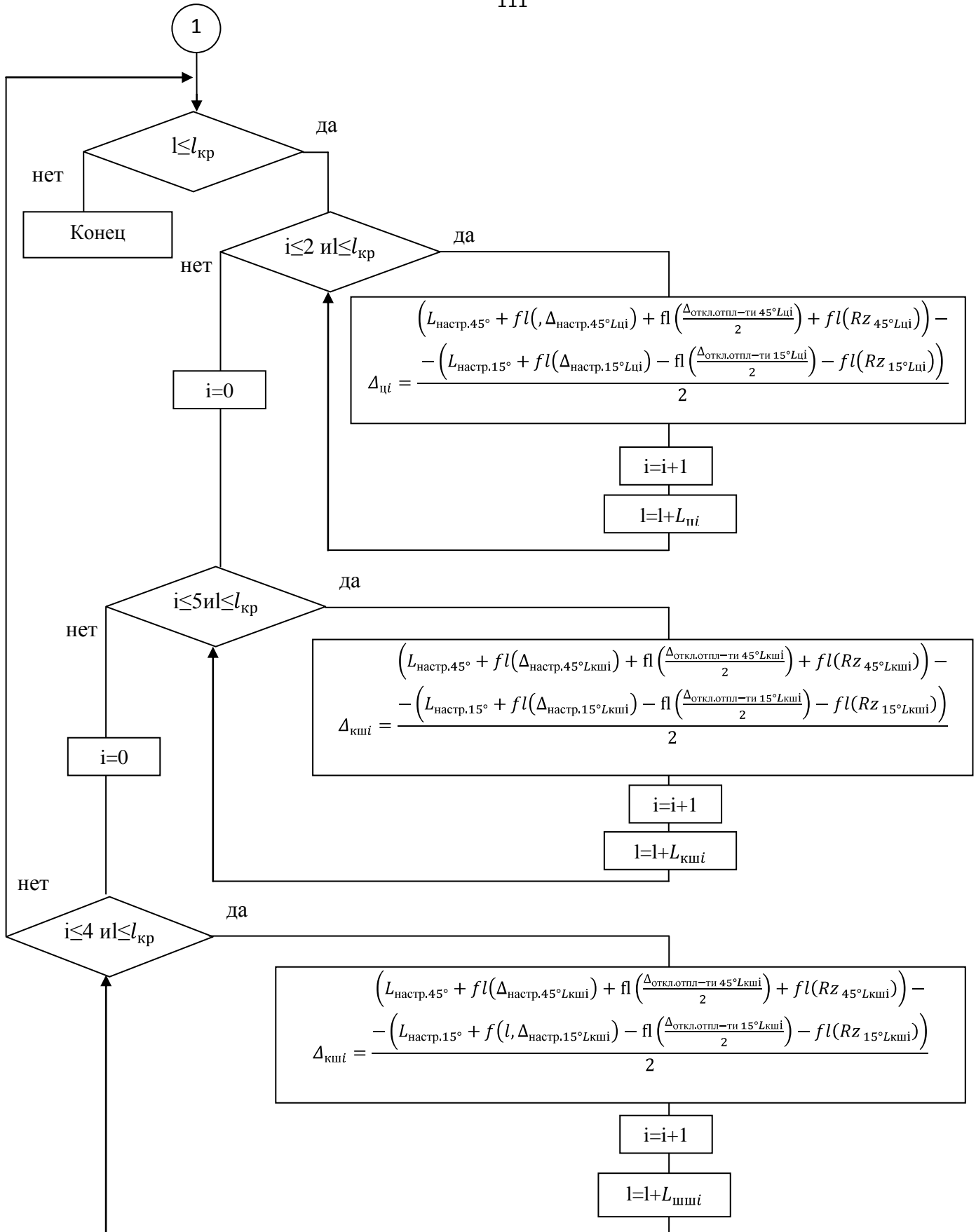


Рисунок 4.6 – Алгоритм расчета корректирующих смещений чистового фрезерования гравюр цапф, коренных и шатунных шеек штамповой вставки концевыми сферическими фрезами

4.3 Расчет величин коррекции траектории рабочих ходов концевой сферической фрезы на примере обработки гравюр коренных и шатунных шеек штамповых вставок

На рисунке 4.7 приведен график изменения высотных параметров шероховатости R_z и R_a . При обработке под углом наклона в 45° R_a не изменяется и принимает значение в 0,7 мкм. При обработке под углом наклона в 15° в течение периода стойкости фрезы величина R_a увеличивается от 1 мкм до 2 мкм. Значения R_z более чувствительны к износу фрезы. При обработке под углом в 45° R_z увеличивается с величины 2 мкм до 6 мкм. под углом 15° происходит непрерывное увеличение R_z с 6 мкм до 16 мкм.

В результате обработки данных высотных размеров с учетом закономерностей изменения высотных параметров шероховатости найдены границы максимального и минимального вероятного положения точек профиля обрабатываемого образца изделия для угла обработки в 45° и 15° (рисунок 4.7). Положение границ нахождения профилей при разных углах обработки различны. 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 связана с упругими отжатиями фрезы. В этой зоне преобладает износ режущей кромки, приводящий к отклонениям преимущественно в отрицательной зоне относительно номинального положения профиля. Величина отклонений составляет до 0,07 мм на длине пути резания 1600 м. В результате обеспечение допуска на положение профиля по всей поверхности гравюр штампа в 0,3 мм невозможно. Найденные математические модели максимальной и минимальной границ отклонений для углов обработки плоского образца материала 45° и 15° приведены в таблице 4.3.

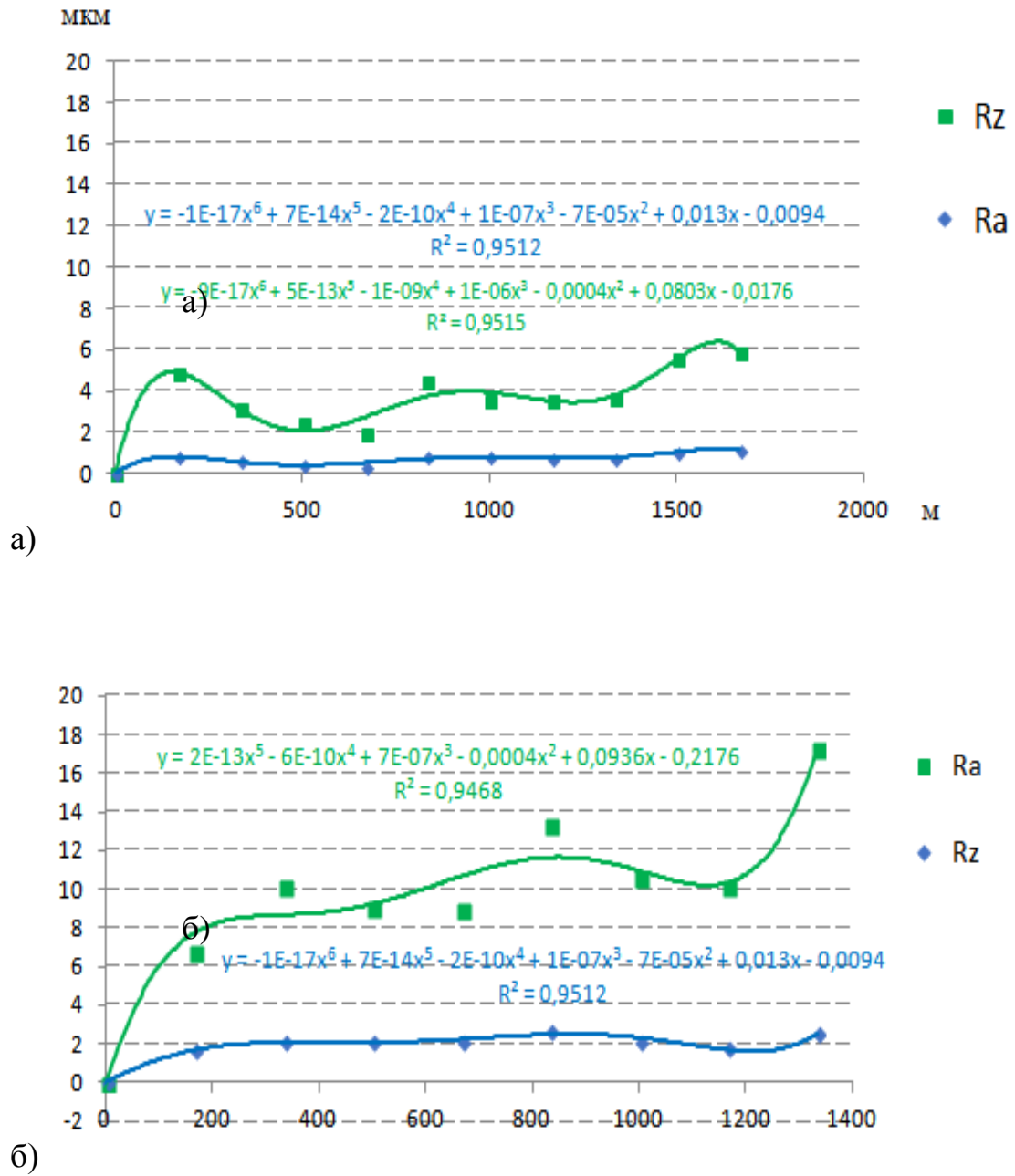
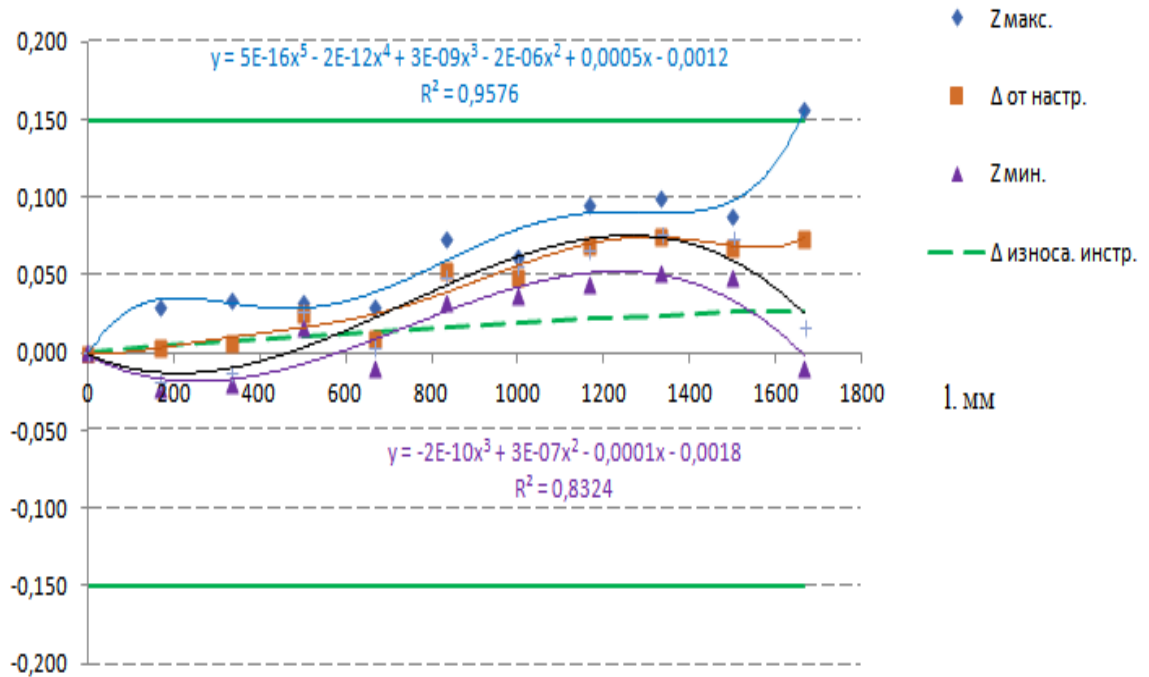
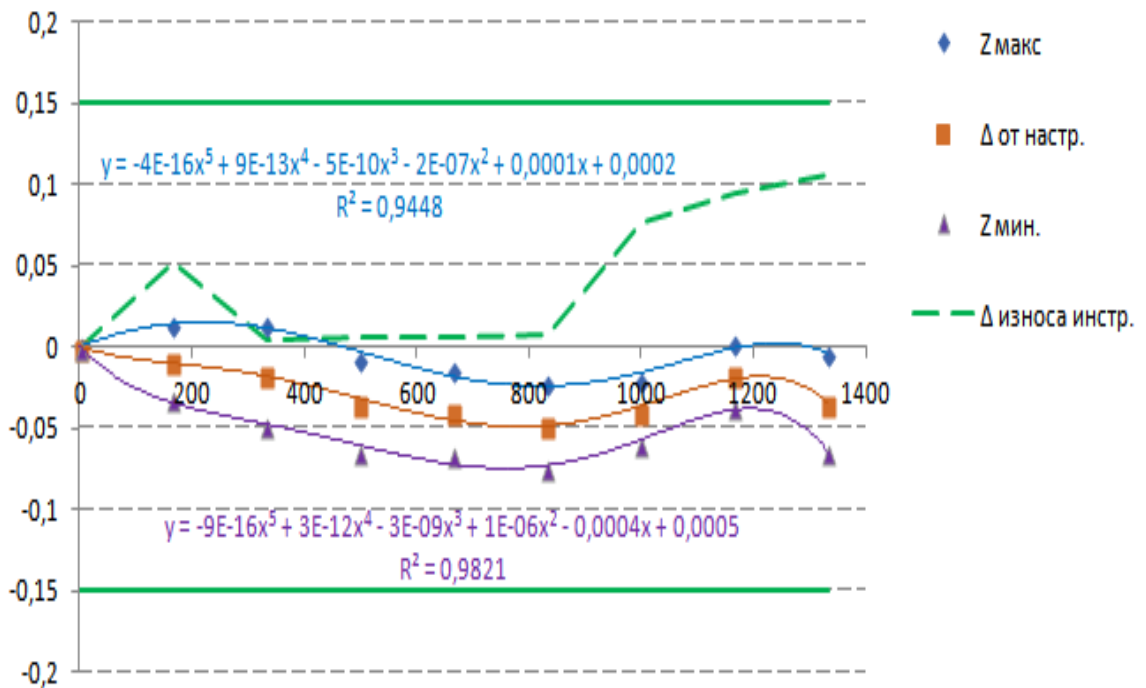


Рисунок 4.7 – Высотные параметры шероховатости образца материала, обработанного концевой сферической фрезой под углом: а) 45° и б) 15°



а)



б)

Рисунок 4.8 – Отклонения размеров образца материала при обработке концевой сферической фрезой под углом: а) 45° и б) 15°

Таблица 4.2 – Формулы нахождения высотных параметров шероховатости поверхности по длине пути резания

Показатели шероховатости	Угол наклона фрезы	Степенная зависимость	Надежность аппроксимации
Rz	45°	$Rz = -9E-17 l^6 + 5E-13 l^5 - 1E-09 l^4 + 1E-06x3 - 0,0004x2 + 0,0803x - 0,0176$	$R^2 = 0,9515$
	15°	$Rz = 2E-13 l^5 - 6E-10 l^4 + 7E-07 l^3 - 0,0004 l^2 + 0,0936 l - 0,2176$	$R^2 = 0,9468$
Ra	45°	$Ra = -1E-17 l^6 + 7E-14 l^5 - 2E-10 l^4 + 1E-07 l^3 - 7E-05 l^2 + 0,013 l - 0,0094$	$R^2 = 0,9512$
	15°	$Ra = -6E-15 l^4 + 2E-11 l^3 - 3E-08 l^2 + 2E-05 l + 0,0002$	$R^2 = 0,9394$

Таблица 4.3 – Формулы нахождения максимальных и минимальных границ отклонений поверхности плоского образца материала по длине пути резания

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

На рисунке 4.9 приведена схема очагов износа по задней поверхности концевой сферической фрезы. По формуле (4.5) найден коэффициент увеличения пути резания. В рассматриваемом примере обработки $\alpha_{\text{макс.}} = 45^\circ$, соответствует верхней границе обрабатываемого профиля у плоскости разъема штамповой вставки, $\alpha_{\text{мин.}} = 15^\circ$ обработке по дну гравюры.

$$K_{\text{п.р.}} = \frac{0,6992}{0,2519 + 0,0923} = 2,03 \quad (4.7)$$

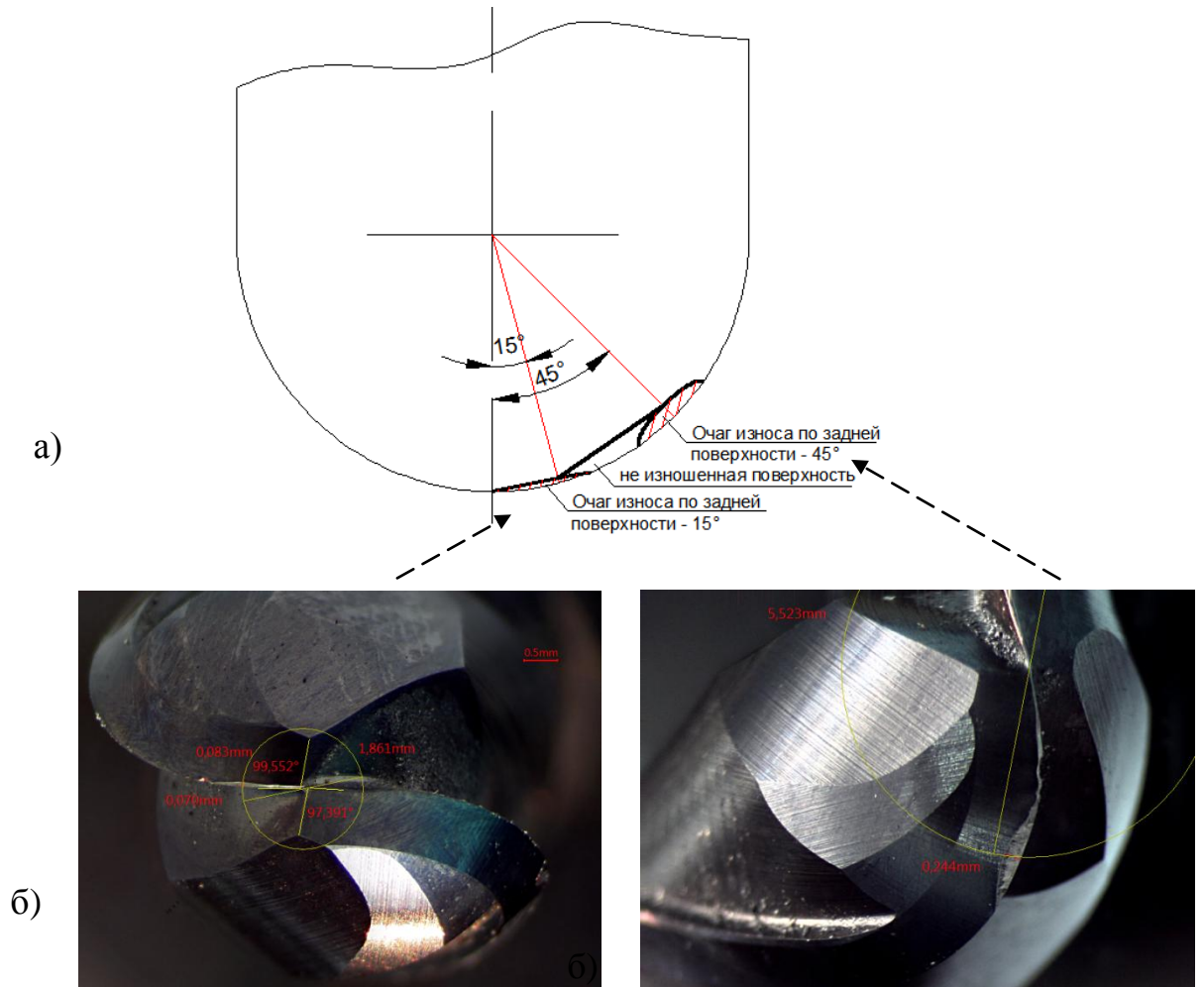


Рисунок 4.9 – а) схема площадей очагов износа для нахождения коэффициента увеличения длины пути резания, б) износ фрезы при обработке под углом 45° , в) под углом 15°

Таким образом, путь резания, найденный в результате исследования износа концевой сферической фрезы на плоских образцов должен быть увеличен в 2,03 раза. По найденным математическим моделям минимальных и максимальных границ нахождения профиля рассчитаны значения отклонений от угла наклона фрезы по длине пути резания концевой фрезы. Данные расчета приведены в таблице П. 2.1 Полученные поверхности приведены на рисунке 4.10. По нижней границе при угле наклона 15° нижняя граница отклонений достигает значений в $-0,5$ мм. При обработке фрезой под углом 45° отклонения геометрической точности более стабильны поверхность имеет значительный боковой наклон от большего к меньшему углу наклона фрезы.

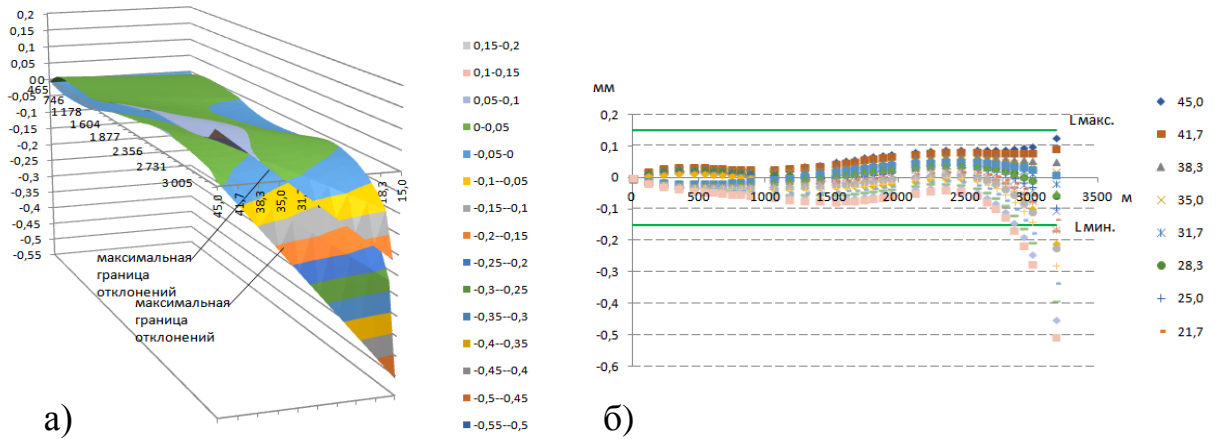


Рисунок 4.10 – а) Поверхность и б) график максимальных и минимальных отклонений поверхности гравюры штамповой вставки в зависимости от угла наклона концевой сферической фрезы в интервале от 15° до 45°

Для расчета значений коррекции необходимо по данным максимальных и минимальных границ найти положение базовой плоскости для данного участка режущей кромки. На рисунке 4.11 приведена поверхность и двухмерный график положения базовой плоскости на участке режущей кромки от 45° до 15°. По этим границам находятся значения отклонений базовой плоскости от номинального положения обрабатываемой поверхности гравюры штампа, график и уравнение аппроксимирующей график степенной функции. Уравнение функции приведено в таблице 4.3.

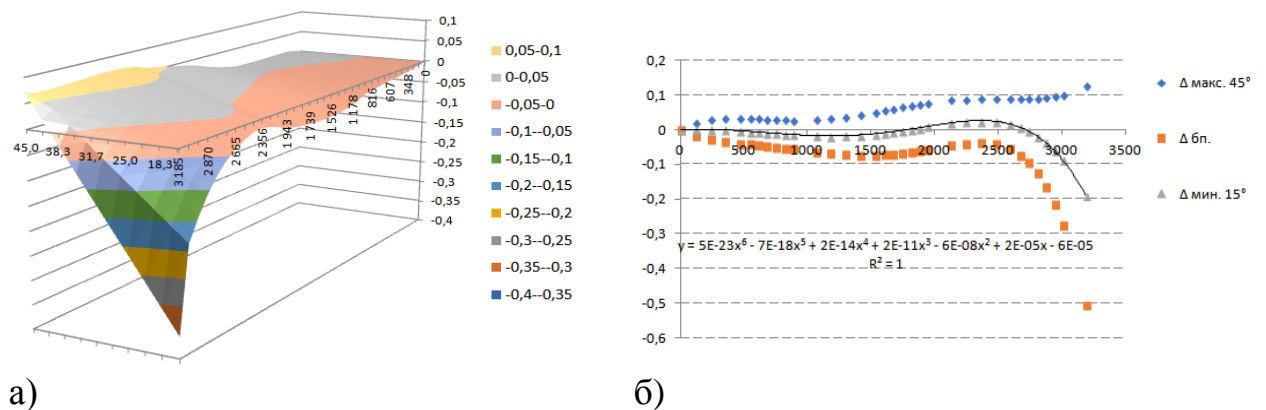


Рисунок 4.11 – а) Поверхность отклонений базовой плоскости гравюры штамповой вставки, б) график вероятного положения профиля гравюры штампа при угле 15° и 45°

Для того чтобы применить на практике найденные экспериментальные зависимости необходимо определить длину пути резания для обрабатываемых гравюр коренных и шатунных шеек, а также цапф на примере поковки коленчатого вала. В таблице 4.4 приведены данные расчета пути резания для каждой гравюры штамповых вставок.

Таблица 4.4 – Элементы гравюр штамповой оснастки и путь резания

Элементы гравюр штамповой вставки	Диаметр шеек	Длина шеек	Площадь поверхности	Путь резания	Путь резания с нарастание
	мм	мм	м ²	м	м
ЩШ1	88	64	0,018	58,978	58,978
ШШ2	88	64	0,018	58,978	117,956
ШШ3	88	64	0,018	58,978	176,934
ШШ4	88	64	0,018	58,978	235,913
Цапфа 1	134	27,95	0,012	39,221	275,133
КШ1	102	31,1	0,010	33,219	308,353
КШ2	102	33	0,011	35,249	343,601
КШ3	102	33	0,011	35,249	378,850
КШ4	102	33	0,011	35,249	414,099
КШ5	102	31,3	0,010	33,433	447,531
Цапфа 2	118	74,1	0,027	91,565	539,096
		Сумма	0,162	539,096	

Таблица 4.5 – Значения коррекций для штамповых вставок и шатунных шеек в периоде стойкости концевой сферической фрезы

№ штамповой вставки в последовательности обработки	Коррекция по вставке	Коррекция по гравюрам шатунных шеек			
		ШШ 1	ШШ 2	ШШ 3	ШШ 4
	мм	мм	мм	мм	мм
1	0,0007	0,0008	0,0012	0,0013	0,0010
2	-0,0120	-0,0063	-0,0080	-0,0096	-0,0113
3	-0,0163	-0,0176	-0,0177	-0,0174	-0,0168
4	0,0060	-0,0053	-0,0023	0,0009	0,0043
5	0,0255	0,0233	0,0251	0,0260	0,0261
6	0,0695	-0,0074	-0,0207	-0,0371	-0,0568

Таблица 4.6 – Значения коррекций для цапф, коренных и шатунных шеек в периоде стойкости концевой сферической фрезы

№ вставки	Цапфа 1	Коренные шейки					Цапфа 2
		КШ 1	КШ 2	КШ 3	КШ 4	КШ 5	
		мм	мм	мм	мм	мм	
1	0,0006	0,0002	-0,0004	-0,0010	-0,0017	-0,0024	-0,0047
2	-0,0123	-0,0131	-0,0139	-0,0147	-0,0154	-0,0160	-0,0172
3	-0,0162	-0,0156	-0,0148	-0,0138	-0,0128	-0,0117	-0,0080
4	0,0066	0,0085	0,0106	0,0126	0,0146	0,0165	0,0210
5	0,0255	0,0245	0,0230	0,0210	0,0183	0,0152	0,0033
6	-0,0720	-0,0862	-0,1027	-0,1208	-0,1406	-0,1609	-0,2255

По геометрическим параметрам обрабатываемых элементов поковки коленчатого вала и параметрам процесса обработки определяется путь резания, необходимый для их обработки. В таблице 4.5, 4.6 приведены рассчитанные значения величины коррекции как для каждой штамповой вставки, так и для отдельных ее гравюр. На рисунке 4.12 приведены точечные графики значений коррекций по каждой гравюре штамповой вставки.

По формуле 4.6 рассчитано положение базовой плоскости и уравнение изменения координат ее положения в периоде стойкости инструмента. На рисунке 4.13 приведены графики границ положения профиля и базовых поверхностей при различных углах наклона концевой сферической фрезы и результаты проведения коррекции по найденным математическим зависимостям.

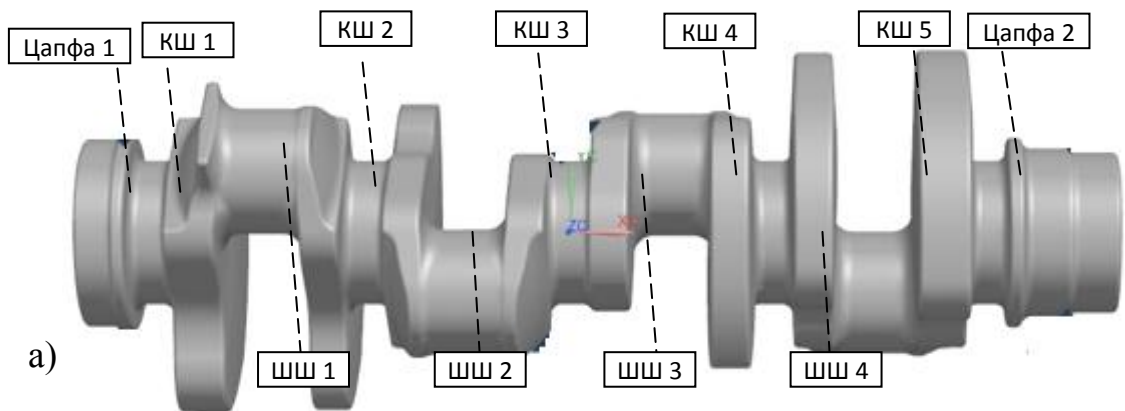
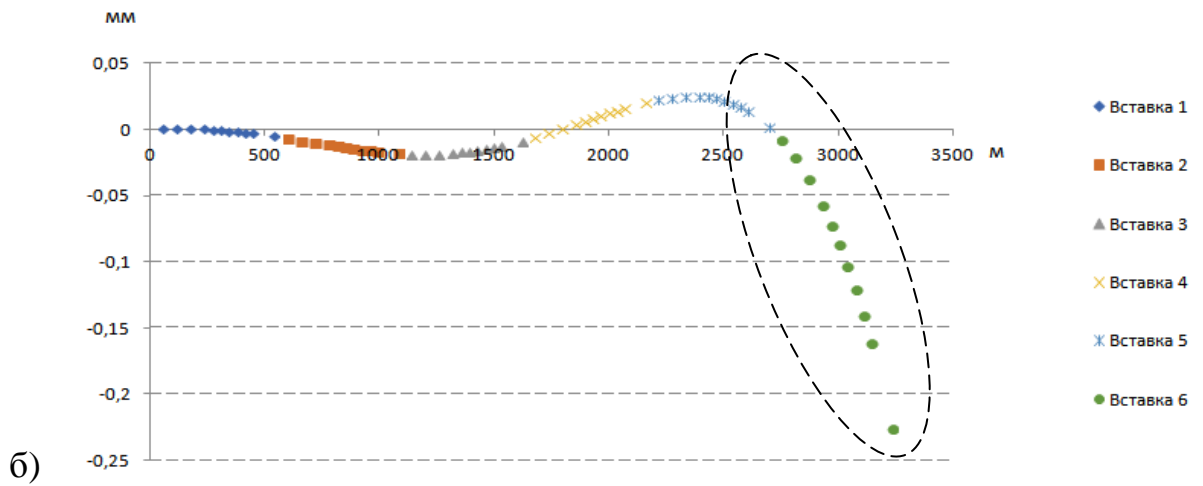
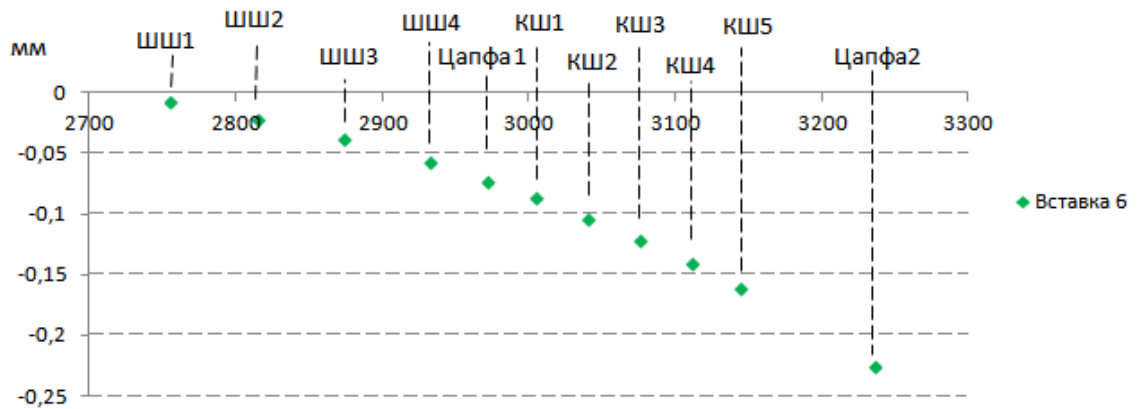


Рисунок 4.12 – а) Элементы поковки коленчатого вала, б) графики коррекция по гравюрам штамповой вставки

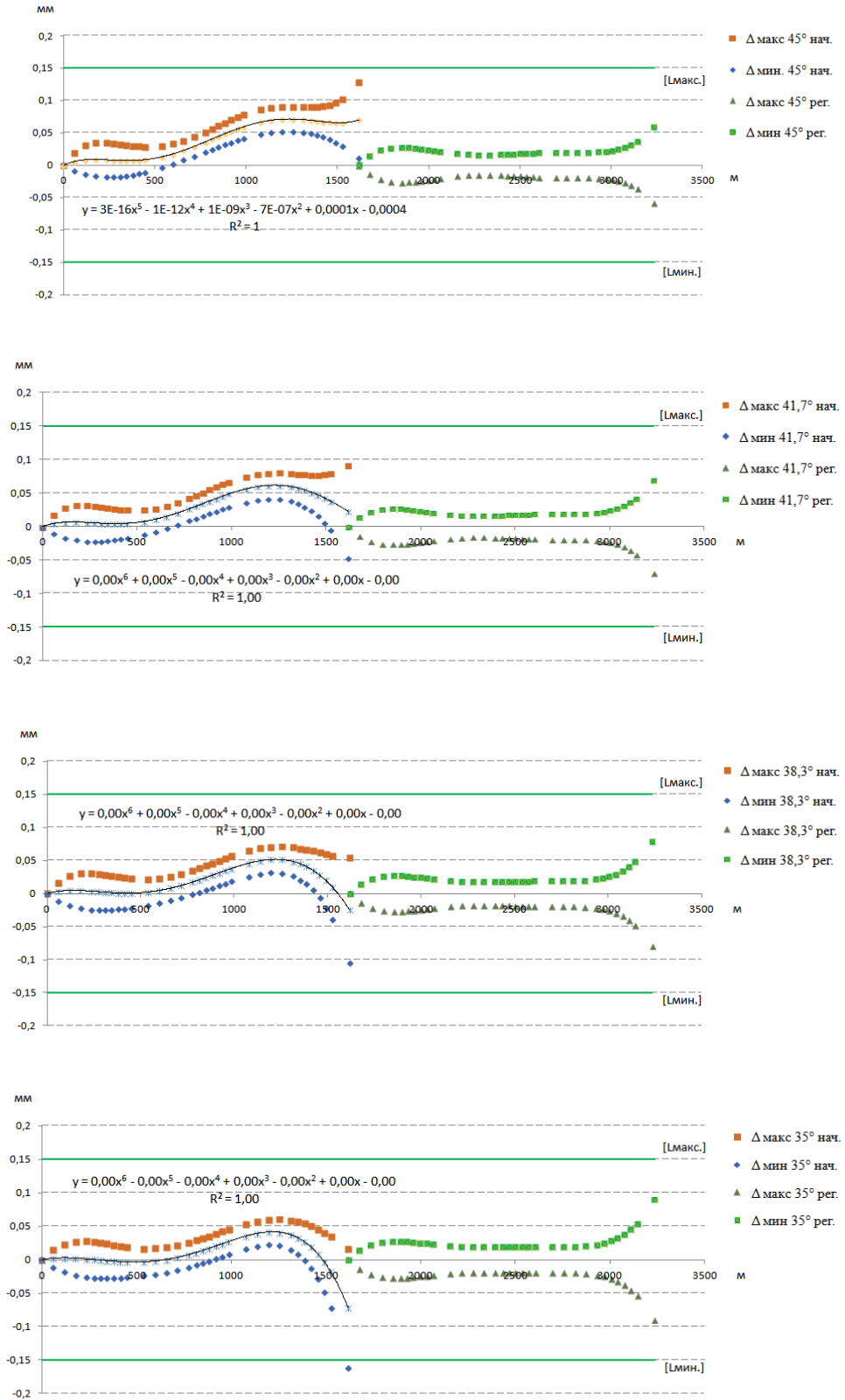


Рисунок 4.13 – Графики границ минимальных и максимального положения профиля при различных углах наклона концевой сферической фрезы

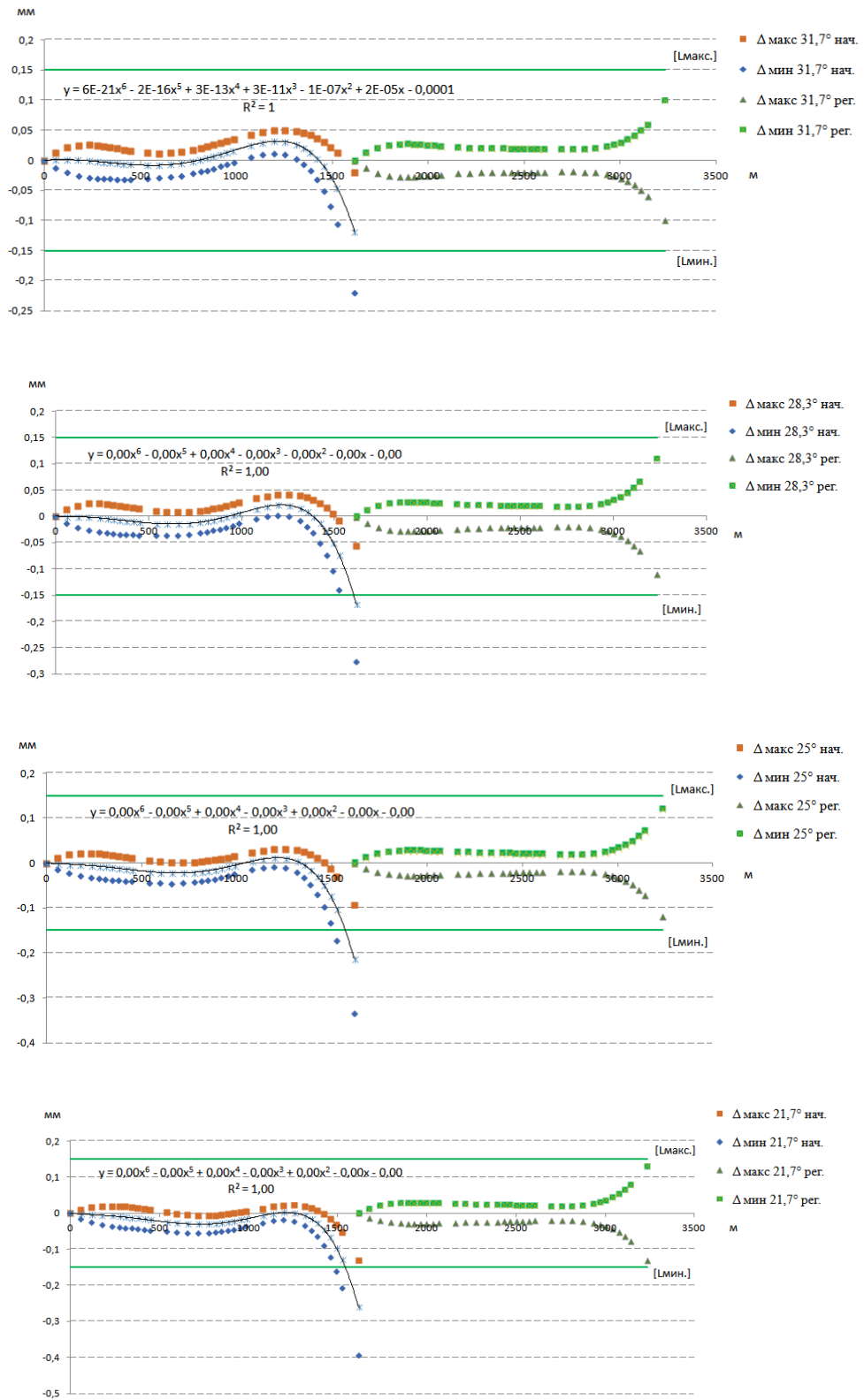


Рисунок 4.14 – Графики границ минимальных и максимального положения профиля при различных углах наклона концевой сферической фрезы

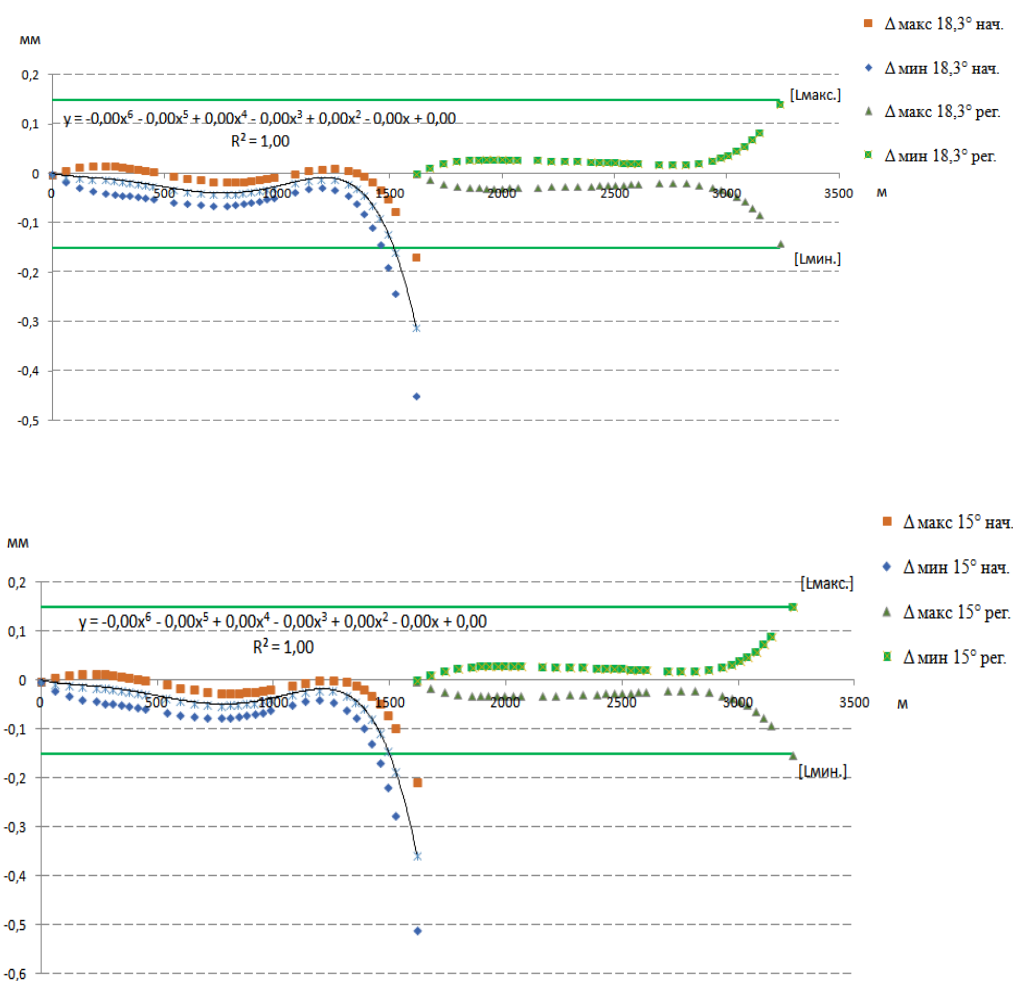


Рисунок 4.15 – Графики границ минимальных и максимального положения профиля при различных углах наклона концевой сферической фрезы

4.4 Статистический анализ точности чистового фрезерования рабочих поверхностей штампов, обработанных с коррекцией износа концевых сферических фрез

С учетом найденных значений коррекции отдельно для штамповых вставок и для гравюр цапф, коренных и шатунных шеек рассчитаны значения максимальных и минимальных границ положения профиля. Значения отклонений приведены в таблице П.Б. 2.2, П.2.3.

Таблица 4.7 – Статистические показатели оценки степени улучшения геометрической точности гравюр штамповых вставок

Статистический показатель	Исходное распределение	Коррекция по вставке	Коррекция по гравюрам вставок
Размах	0,6365	0,6365	0,3023
$\Delta_{\text{ср.}}$, мм	-0,0060	0,0058	0,0000
σ , мм	0,0585	0,0559	0,0331
C_p	0,8545	0,8942	1,5090
C_{pk1}	0,8886	0,8594	1,5090
C_{pk2}	0,8204	0,9291	1,5090

В таблице 4.7 приведены рассчитанные значения статистических показателей распределений отклонений после коррекций по вставке и коррекций по отдельным гравюрам штампа. На рисунке 4.16 приведены графики нормального распределения, построенные по рассчитанным статистическим показателям. Следует отметить, что коррекция по отдельным штамповым вставкам не значительно улучшает геометрическую точность гравюр штампа для одного и того же пути резания инструмента. Коррекция же по отдельным гравюрам штамповых вставок обеспечивает двукратное улучшение геометрической точности 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).

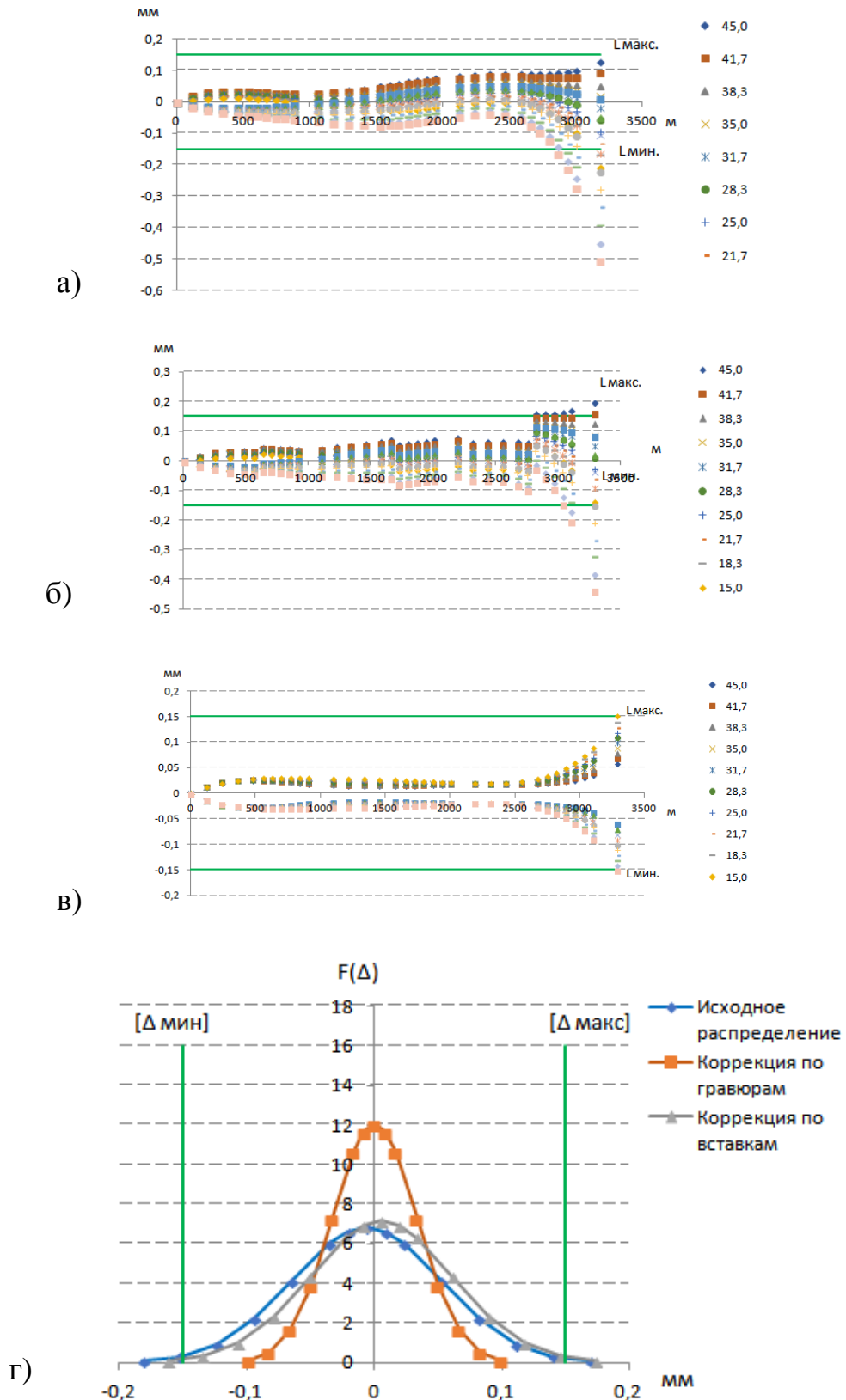


Рисунок 4.16 – Теоретическое улучшение точности чистового фрезерования: а) исходное распределение отклонений, б) график отклонений после коррекций траектории концевой сферической фрезы на штамповую вставку, в) на гравюры штамповых вставок, г) нормальное распределение при различных вариантах коррекции программы с ЧПУ

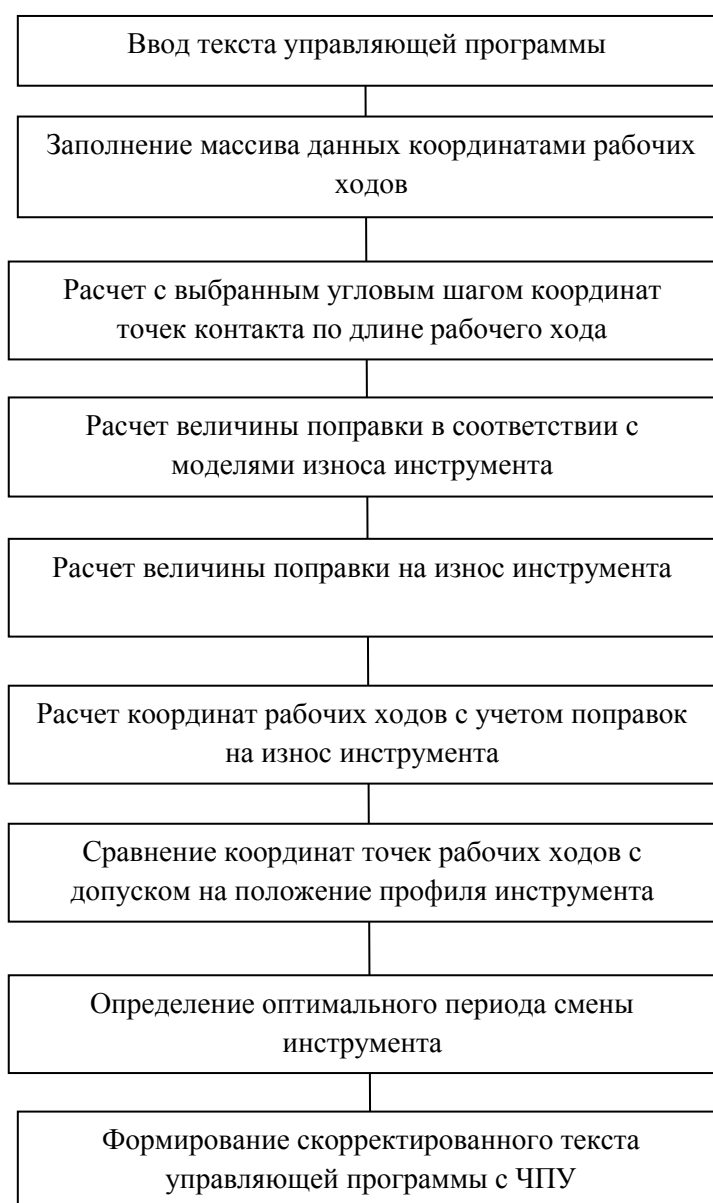


Рисунок 4.17 – Блок-схема расчета оптимального периода смены инструмента

На рисунке 4.17 приведена блок схема расчета оптимального периода смены инструмента, позволяющая оптимизировать периодичность его смены в зависимости от приоритетов обеспечения значений различных показателей.

Значительный вес штампов от 3-х до 5-ти тонн затрудняет их перемещение для высокоточных координатных измерений штампов, обработанных после чистового фрезерования. На участке механической обработки штампов

контроль геометрических параметров поверхностей гравюр коренных и шатунных шеек выполняется фасонными шаблонами, изготовленными по верхним предельным размерам гравюр по величине зазора щупами. Метод не обеспечивает приемлемую точность измерений, поэтому разработана схема измерений гравюр штампа индикаторным глубиномером (рисунок 4.18).

Глубиномер устанавливается на поперечные направляющие, опирающиеся на верхнюю плоскость продольных направляющих, которые по поверхности разреза штампа и центрируются по поверхностям отверстий. В направляющих выполнены отверстия ориентации измерительного прибора. Приспособление позволяет выполнить измерения в точках контакта, соответствующей углу наклона фрезы на участке 15° и 45° . Для выполнения измерений глубиномер настраивается на заранее заданный номинальный размер, соответствующий верхней границе допуска на размер в измеряемой точке гравюры штампа.

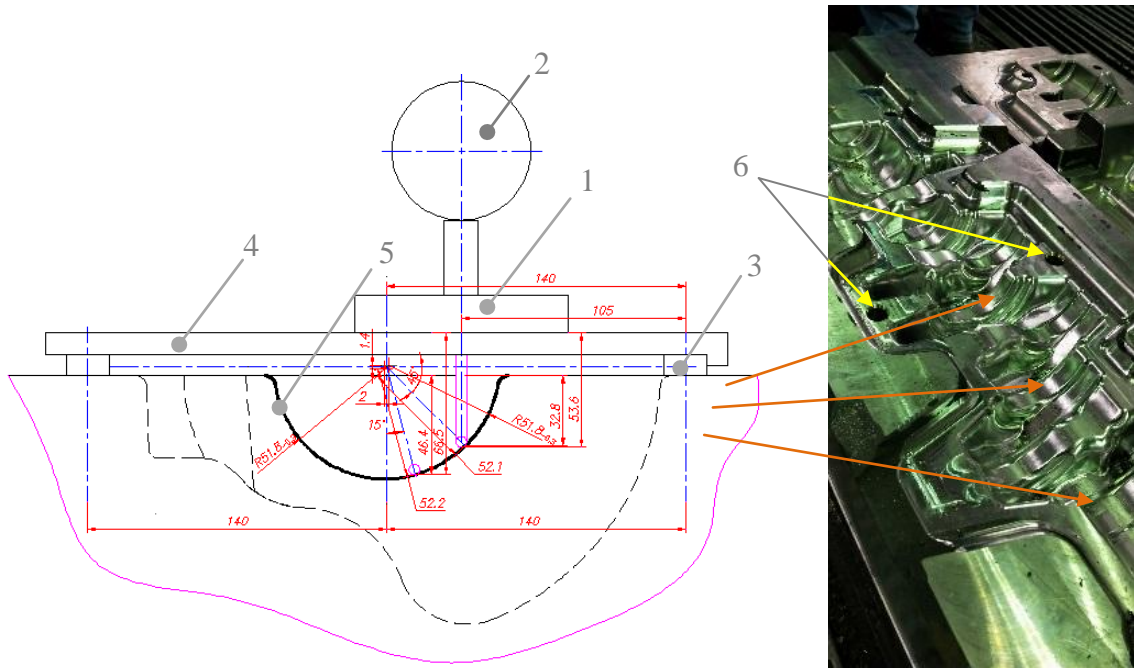
Для угла наклона фрезы в 45° номинальный размер по поверхности гравюр коренных шеек 32,8 мм, по поверхности гравюр шатунных шеек 47,7 мм. Для угла наклона фрезы в 15° номинальный размер по поверхности гравюр коренных шеек 46,4 мм, шатунных шеек 32,8 мм.

Расчет величины радиального размера по гравюре штампа в зоне контакта фрезы под углом 45° выполняется по следующей формуле:

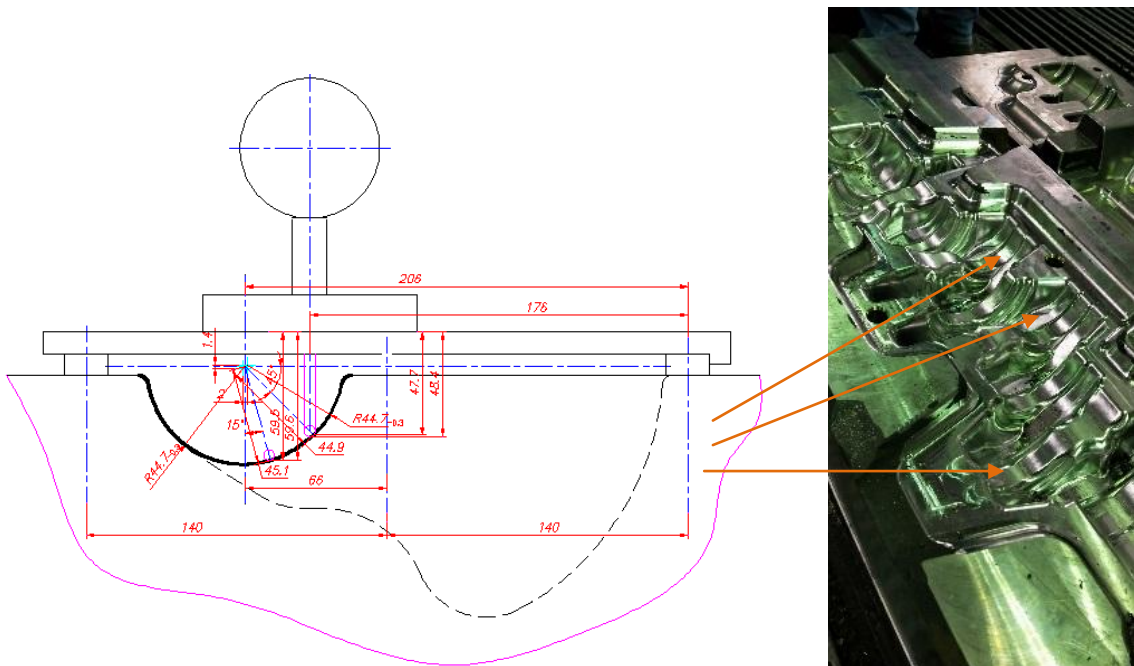
$$R_i = R_n + \Delta_i \cos 45^\circ \quad (4.8)$$

где R_n – номинальный радиальный размер в измеряемой точке гравюры штампа, мм.

Δ_i – значения отклонения по шкале индикаторного нутромера, измеренные по поверхностям гравюр коренных и шатунных шеек мм.



а)



б)

Рисунок 4.18 – Схема измерений высотных параметров гравюры штампа: а) по поверхности гравюр коренных шеек, б) по поверхности гравюр шатунных шеек. 1 – глубиномер индикаторный, 2 – индикатор часового типа, 3 – продольная направляющая, 4 – поперечная направляющая, 5 – измеряемая поверхность гравюры штампа, 6 – базовые отверстия для продольных направляющих измерительного приспособления

Расчет величины радиального размера по гравюре штампа в зоне контакта фрезы под углом 15° выполняется по следующей формуле:

$$R_i = R_n + \Delta_i \cos 15^\circ \quad (4.9)$$

Для проверки результативности коррекции выполнен производственный эксперимент, состоящий из следующих процессов:

1. Чистовом фрезеровании гравюр штампов без коррекции по стандартной программе ЧПУ, сформированной САМ системой.
2. Чистовом фрезеровании гравюр штампов с коррекцией программ ЧПУ по найденным значениям коррекции. Для чего создается пять 3D моделей штампа со смещением каждой гравюры штампа на величину коррекции, соответствующей пути резания их обработки график которых приведен на рисунке 4.11.
3. Измерению линейных размеров по поверхностям гравюр штампов коренных и шатунных шеек с применением контрольного приспособления на основе индикаторного нутромера.
4. Статистической обработке измеренных линейных данных с построением гистограмм и кривых нормального распределению.
5. Расчета индексов воспроизводимости с учетом и без учета настроенности.
6. Оценки результативности улучшения качества чистового фрезерования.

По данным стойкостных испытаний предельно допустимым по износу фрезы соответствует путь резания около 3300 м, что соответствует обработке поверхностей гравюр коренных и шатунных шеек у шести штампов, причем при обработке шестого штампа износ фрезы нарастает катастрофически. Поэтому решено при проведении производственного эксперимента обработать пять штампов.

4.4.1 Последовательность статистической обработки экспериментальных данных

1. Построение гистограмм.

Экспериментальные данные распадаются по интервалам радиальных размеров. Ширина интервала принята кратной цене деления средства измерения. По каждому интервалу рассчитывается частота q попадания радиальных размеров R_i . Анализируется форма гистограмм, размах измеренных значений высотных размеров. Выявляются действия систематических и случайных факторов. Выполняется расчет критерия Пирсона, по которому оценивается принадлежность распределения к нормальному закону распределению.

Критерий вычисляется по следующей формуле:

$$\chi_{\text{эксп.}}^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(q_i - q_i')^2}{q_i'} \quad (4.10)$$

где m – количество интервалов гистограммы

q_i – частота попаданий в i -й интервал гистограммы.

q_i' - теоретическая частота нормального закона распределения.

Рассчитывается критическое значение критерия Пирсона $\chi_{\text{кр.}}^2$ исходя 0,05 уровня значимости и числа степеней свободы $\nu = m - 1$. В случае, если $\chi_{\text{эксп.}}^2 < \chi_{\text{кр.}}^2$, то принимается гипотеза принадлежности экспериментальной выборке нормальному закону распределения, в противном случае гипотеза отвергается. В случае, подтверждения гипотезы рассчитываются параметры теоретического распределения.

2. Расчет статистических характеристик теоретических законов распределения размеров.

Среднеквадратичное отклонение рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n - 1}} \quad (4.11)$$

где R_i – измеренные значения радиальных размеров, мм

\bar{R} – среднеарифметическое по выборке, мм

n – количество радиальных размеров в выборке

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} \quad (4.12)$$

Расчет погрешностей значений среднеарифметических значений радиальных размеров выполняется по следующей формуле:

$$\Delta_{\bar{R}} = Z * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.13)$$

где Z – коэффициент доверия

$$Z=1-0,05=0,95 \quad (4.14)$$

Расчет погрешностей значений среднеквадратичных отклонений выполняется по следующей формуле:

$$\Delta_{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{2(n - 1)}} \quad (4.15)$$

где σ – среднеквадратичное отклонение, мм

n – количество радиальных размеров в выборке

3. Регрессионный анализ процесса изнашивания концевой сферической фрезы.

Выполняется построение графика изменения радиальных размеров по коренным и шатунным шейкам в последовательности их изготовления. График аппроксимируется линейной функцией вида $y=ax+b$. По изменению радиальных размеров в начале и конце периода стойкости определяется фактическая интенсивность износа режущей кромки на рассматриваемом ее участке.

4. Оценка результативности коррекции программы с ЧПУ чистового фрезерования по значениям коэффициентов воспроизводимости.

Значения коэффициентов вычисляются по формулам [41].

Индекс воспроизводимости без учета настроенности вычисляется по формуле:

$$C_p = \frac{TR}{6 * \sigma} \quad (4.16)$$

где TR – допуск на радиальный размер, мм

При $C_p < 1,33$, процесса признается стабильным, чем большее значение показателя, тем более стабилен процесс чистового фрезерования.

Индекс воспроизводимости с учетом настроенности вычисляется по формуле:

$$C_{PK1} = \frac{USL - \bar{R}}{3 * \sigma} \quad (4.17)$$

где USL – максимально допустимый радиальный размер, мм

\bar{R} среднеарифметическое значение по выборке, мм

$$C_{PK2} = \frac{\bar{R} - LSL}{3 * \sigma} \quad (4.18)$$

где LSL – минимально допустимый радиальный размер, мм

При $C_{PK1}, C_{PK2} < 1,33$ процесс признается настроенным, чем большее значение показателей C_{PK1}, C_{PK2} , тем лучше настроенность радиального размера на середину поля допуска радиального размера.

Результативным признается процесс, в котором индексы воспроизводимости без учета и с учетом настроенности принимают большие значения.

4.4.2 Анализ данных измерений радиальных размеров поверхности гравюр коренных и шатунных шеек, обработанных участком режущей кромки ориентированной под углом 45° к оси фрезы

В таблице 4.9 и 4.10 приведены данные измеренных индикаторным глубиномером отклонений Δ_i профиля поверхностей гравюр штампа от

номинального значения. Для коренных шеек 52,1 мм, для шатунных шеек 44,7 мм. В этой же таблице приведены рассчитанные по формуле (4.8) значения радиальных размеров R_i по поверхности гравюр, обработанных участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 45° .

1. Построение гистограмм

В таблицах 4.11 и 4.12 приведены данные по частотам распределения радиальных размеров по интервалам. Величина интервала должна быть не менее, чем в 6 раз меньше допуска. Для построения гистограмм выбрана его ширина в 0,03 мм, что в 10 раз меньше допуска на радиальные размеры по поверхностям гравюр штампа. Также в таблице приведены расчетные данные по критерию Пирсона.

Как до, так и после коррекции программы с ЧПУ выполняется условие $\chi_{\text{Эксп.}}^2 < \chi_{\text{кр.}}^2$, что свидетельствует о возможности применения для описания экспериментального распределения теоретическим нормальным распределением.

По коренным шейкам до коррекции имеется два центра группирования, находящихся в середине поля допуска. После коррекции гистограмма имеет один выраженный центр группирования, что свидетельствует о действии одного систематического фактора, по шатунным шейкам до коррекции также выражены два центра группирования, после коррекции один выраженный центр. Настройка после коррекции сохраняется у верхней границы допуска. Такая настройка сохраняет запас под износ гравюр штампа в процессе штамповки впоследствии увеличивая стойкость штампа.

2. Вероятностно-статистический анализ

В таблице 4.13 приведены рассчитанные значения статистических характеристик теоретического закона распределения. На рисунке 4.21 приведены графики нормального распределения, построенные по рассчитанным данным таблицы 4.13. Рассчитаны значения погрешностей среднеарифметических значений радиальных размеров. Их величина изменяется в пределах от 0,015 мм до 0,027 мм. Погрешность нахождения

среднеквадратичных отклонений изменяется от 0,004 мм до 0,01 мм. При величине поля допуска в 0,30 мм найденные значения погрешностей обеспечивают достаточную степень точности среднеарифметического и среднеквадратичного отклонения.

После проведения коррекции наблюдается значительное улучшение стабильности. Индекс воспроизводимости C_p без учета настроенности изменяется с 0,8 до 1,7 по поверхностям гравюр коренных шеек и с 0,8 до 1,45 мм по гравюрам шатунных шеек. Таким образом, в производственном эксперименте достигнуто улучшение стабильности по коренным шейкам в 2.12 раза, по шатунным шейкам в 1,81 раза, что оставляет большую свободу под регулировку настройки радиальных размеров гравюр штампа.

Меньшее улучшение стабильности по шатунным шейкам объясняется их более дальним расположением по поверхности гравюр и соответственно большими погрешностями модулей станочной системы., прежде всего их геометрической точности.

Индексы воспроизводимости C_{PK1} изменяются незначительно, по C_{PK2} выполняется большее улучшение с 0,587 до 2,361 до коррекции по поверхностям коренных шеек и со значений 0,604 до 2,026, что свидетельствует о лучшей настроенности для обеспечения большего запаса под износ гравюр штампа в процессе штамповки поковок коленчатого вала.

Увеличение значений индексов воспроизводимости свидетельствует о результативности выполненной коррекции программы с ЧПУ для достижения лучшей стабильности и настроенности.

На рисунке 4.19 приведены графики изменения радиальных размеров в периоде стойкости концевой сферической фрезы. Для оценки величины износа в периоде стойкости данные аппроксимированы линейной функцией, которая приведена на поле графиков.

Данные по величине износа приведены в таблице 4.13. По коренным шейкам за счет коррекции влияние износа фрезы на величину радиальных размеров $\Delta_{p,и}$ уменьшено с 0,19 мм до 0,095 мм, по поверхности гравюр

шатунных шеек $\Delta_{p,и}$ по поверхности гравюр коренных шеек уменьшается с 0,194 мм до 0,89 мм.

Таблица 4.8 - Значения радиальных размеров R_i по гравюрам коренных и шатунных шеек штампа до коррекции программы с ЧПУ, обработанных участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 45°

№	Поверхности гравюр коренных шеек		№	Поверхности гравюр шатунных шеек	
	Δ_i , мм	R_i , мм		Δ_i , мм	R_i , мм
1	0,01	52,09	1	0,015	44,69
2	0,02	52,09	2	0,02	44,69
3	0,02	52,09	3	0,03	44,68
4	0,04	52,07	4	0,05	44,66
5	0,06	52,06	5	0,045	44,67
6	0,04	52,07	6	0,045	44,67
7	0,05	52,06	7	0,06	44,66
8	0,07	52,05	8	0,07	44,65
9	0,07	52,05	9	0,09	44,64
10	0,09	52,04	10	0,115	44,62
11	0,08	52,04	11	0,135	44,60
12	0,1	52,03	12	0,135	44,60
13	0,13	52,01	13	0,165	44,58
14	0,14	52,00	14	0,14	44,60
15	0,13	52,01	15	0,14	44,60
16	0,16	51,99	16	0,15	44,59
17	0,17	51,98	17	0,235	44,53
18	0,15	51,99	18	0,235	44,53
19	0,13	52,01	19	0,275	44,51
20	0,17	51,98	20	0,32	44,47
21	0,23	51,94			
22	0,22	51,94			
23	0,25	51,92			
24	0,3	51,89			
25	0,34	51,86			

Таблица 4.9 – Значения радиальных размеров R_i по гравюрам коренных и шатунных шеек штампа после коррекции программы с ЧПУ, обработанных участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 45°

№	Поверхности гравюр коренных шеек		№	Поверхности гравюр шатунных шеек	
	Δ_i , мм	R_i , мм		Δ_i , мм	R_i , мм
1	0,005	52,15	1	0,01	44,74
2	0,01	52,14	2	0,01	44,74
3	0,01	52,14	3	0,02	44,74
4	0,02	52,14	4	0,02	44,74
5	0,03	52,13	5	0,02	44,74
6	0,02	52,14	6	0,02	44,74
7	0,02	52,14	7	0,03	44,73
8	0,03	52,13	8	0,03	44,73
9	0,03	52,13	9	0,04	44,72
10	0,04	52,12	10	0,05	44,71
11	0,04	52,12	11	0,06	44,71
12	0,05	52,11	12	0,06	44,71
13	0,06	52,11	13	0,08	44,69
14	0,07	52,10	14	0,06	44,71
15	0,06	52,11	15	0,06	44,71
16	0,08	52,09	16	0,05	44,71
17	0,09	52,09	17	0,1	44,68
18	0,07	52,10	18	0,1	44,68
19	0,06	52,11	19	0,13	44,66
20	0,07	52,10	20	0,14	44,60
21	0,1	52,08			
22	0,09	52,09			
23	0,11	52,07			
24	0,14	52,05			
25	0,17	52,03			

Таблица 4.10 – Стратификация радиальных размеров R_i выборки по поверхностям гравюр коренных шеек штампа, обработанных участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 45°

№	Интервалы	q докор- рекции	qпослекор- рекции	q'_i докор- рекции	q'_i до кор- рекции	$\frac{(q_i - q'_i)^2}{q'_i}$	$\frac{(q_i - q'_i)^2}{q'_i}$
1	51,84	0	0	0,157	0,000	0,157	0,000
2	51,87	0	0	0,517	0,000	0,517	0,000
3	51,9	1	0	1,348	0,000	0,090	0,000
4	51,93	1	0	2,797	0,000	1,155	0,000
5	51,96	2	0	4,612	0,000	1,479	0,000
6	51,99	3	0	6,045	0,004	1,534	0,004
7	52,02	5	0	6,297	0,150	0,267	0,150
8	52,05	3	0	5,214	1,903	0,940	1,903
9	52,08	6	3	3,431	8,543	1,923	3,597
10	52,11	3	9	1,795	13,545	0,809	1,525
11	52,14	0	9	0,746	7,583	0,746	0,265
12	52,17	0	3	0,247	1,499	0,247	1,503
13	52,2	0	0	0,065	0,105	0,065	0,105
14	52,23	0	0	0,014	0,003	0,014	0,003
15	52,26	0	0	0,002	0,000	0,002	0,000
					$\chi^2_{\text{экс.}}$	9,944	9,054
					$\chi^2_{\text{кр.}}$	23,685	23,685

Таблица 4.11 – Стратификация данных выборки по поверхностям гравюр шатунных шеек штампа, обработанных участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 45°

№	Интервалы	q докоррекции	qпослекоррекции	q'_i до коррекции	q'_i до коррекции	$\frac{(q_i - q'_i)^2}{q'_i}$	$\frac{(q_i - q'_i)^2}{q'_i}$
1	44,5	1	0	1	1,240	0,047	0,000
2	44,47	0	0	2	0,460	0,460	0,000
3	44,5	0	0	3	1,240	1,240	0,000
4	44,53	1	0	4	2,649	1,027	0,000
5	44,56	2	0	5	4,483	1,375	0,001
6	44,59	1	0	6	6,007	4,174	0,029
7	44,62	6	1	7	6,376	0,022	0,856
8	44,65	1	0	8	5,361	3,547	2,667
9	44,68	6	3	9	3,570	1,655	3,243
10	44,71	2	5	10	1,883	0,007	3,752
11	44,74	0	9	11	0,786	0,786	0,212
12	44,77	0	2	12	0,260	0,260	0,067
13	44,8	0	0	13	0,068	0,068	0,349
14	44,83	0	0	14	0,014	0,014	0,024
15	44,86	0	0	15	0,002	0,002	0,001
					$\chi^2_{\text{экс.}}$	14,685	11,202
					$\chi^2_{\text{кр.}}$	23,685	23,685

Таблица 4.12 – Статистические характеристики теоретических законов распределения размеров радиальных размеров, обработанные участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 45°

Характеристики	Поверхности гравюр коренных шеек		Поверхность гравюр шатунных шеек	
	До коррекции	После коррекции	До коррекции	После коррекции
$[R_{\text{макс.}}]$, мм	52,2	52,2	44,8	44,8
$[R_{\text{мин.}}]$, мм	51,9	51,9	44,5	44,5
$[R_{\text{спд.}}]$, мм	52,05	52,05	44,65	44,65
$R_{\text{макс.}}$, мм	52,09	52,15	44,69	44,74
$R_{\text{мин.}}$, мм	51,86	52,03	44,47	44,60
\bar{R} , мм	52,01	52,11	44,61	44,71
$\Delta_{\bar{R}}$	0,025	0,012	0,027	0,015
σ , мм	0,06	0,03	0,06	0,03
Δ_{σ}	0,009	0,004	0,010	0,006
C_p	0,80	1,70	0,80	1,45
C_{PK1}	1,010	1,040	1,005	0,882
C_{PK2}	0,587	2,361	0,604	2,026

где $[R_{\text{макс.}}]$ – максимальная величина допуска на радиальные размеры.

$[R_{\text{мин.}}]$ – минимальная величина допуска на радиальные размеры.

$[R_{\text{спд.}}]$ – середина поля допуска.

$R_{\text{макс.}}$ – максимальное значение радиальных размеров по выборке.

$R_{\text{мин.}}$ – минимальное значение радиальных размеров по выборке.

\bar{R} – среднеарифметическое значение радиальных размеров

$\Delta_{\bar{R}}$ – погрешность среднеарифметических значений радиальных размеров.

σ – среднеквадратичное отклонение

Δ_{σ} – погрешность среднеквадратичных отклонений радиальных размеров

C_p – индекс воспроизводимости без учета настроенности

C_{PK1} , C_{PK2} – индекс воспроизводимости с учетом настроенности

Таблица 4.13 – Размерный износ в периоде стойкости, участка кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 45°

Поверхности гравюр штампов	Период стойкости	Радиальные размеры R_i , мм		$\Delta_{P.I.} - \Delta_{P.I.c \text{ корр.}}$
		с коррекцией	Без коррекции	
По шатунным шейкам	в начале	44,756	44,708	
	в конце	44,661	44,518	
	$\Delta_{P.I.}$, мм	0,095	0,190	0,095
По коренным шейкам	в начале	52,152	52,107	
	в конце	52,064	51,913	
	$\Delta_{P.I.}$, мм	0,089	0,194	0,105

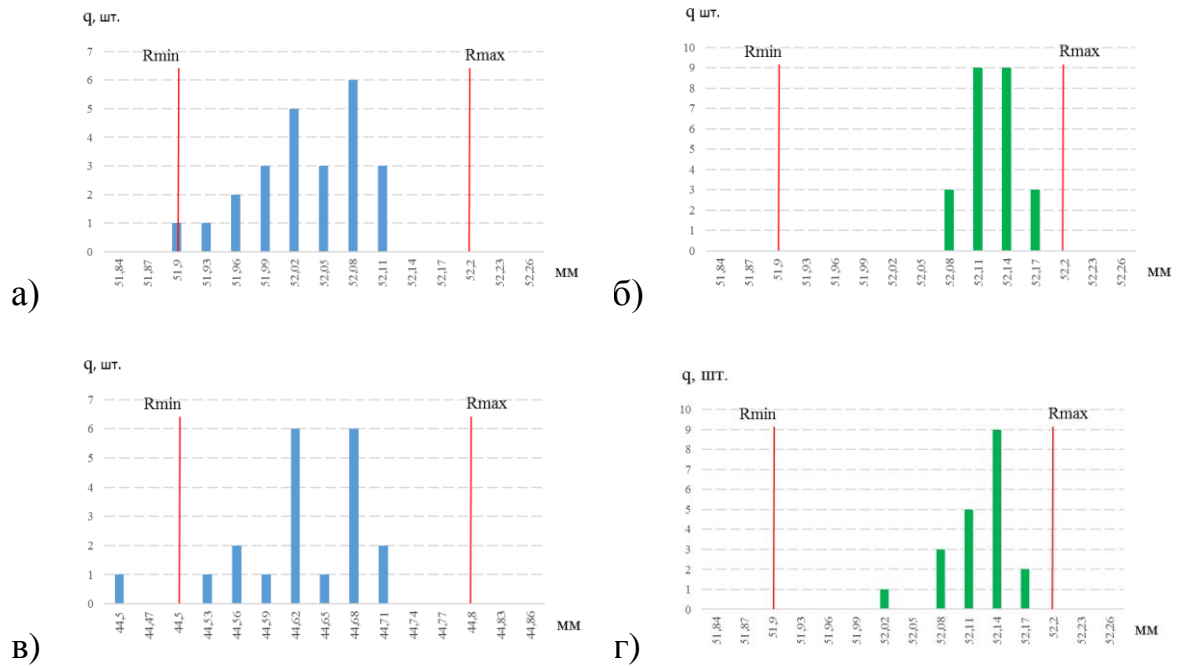


Рисунок 4.19 – Гистограммы распределения радиальных размеров по поверхностям гравюр коренных шеек: а) до коррекции, б) после коррекции, по поверхностям гравюр шатунных шеек в) до коррекции, б) после коррекции, обработанные участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 45°

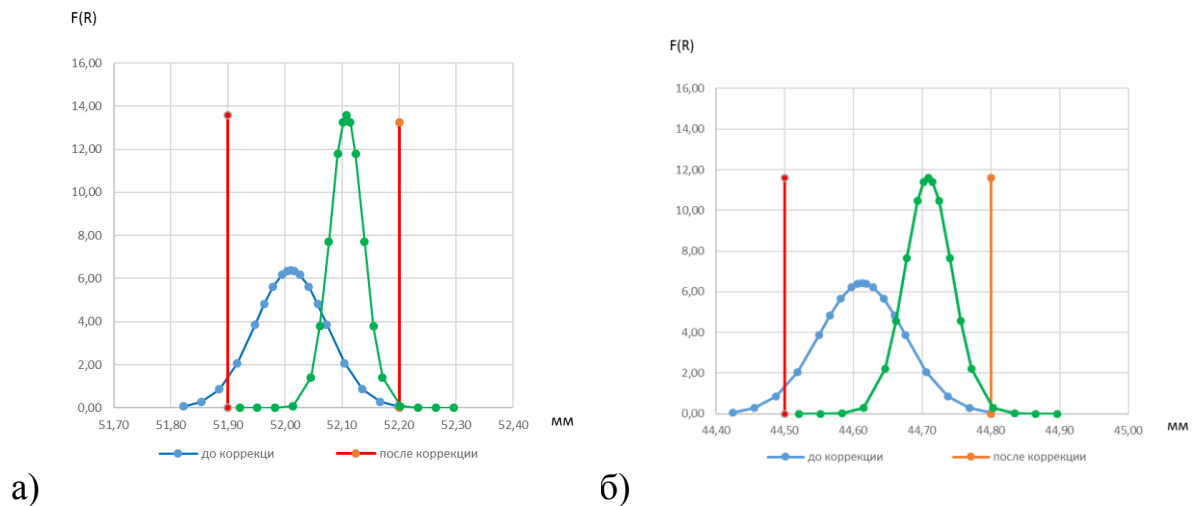
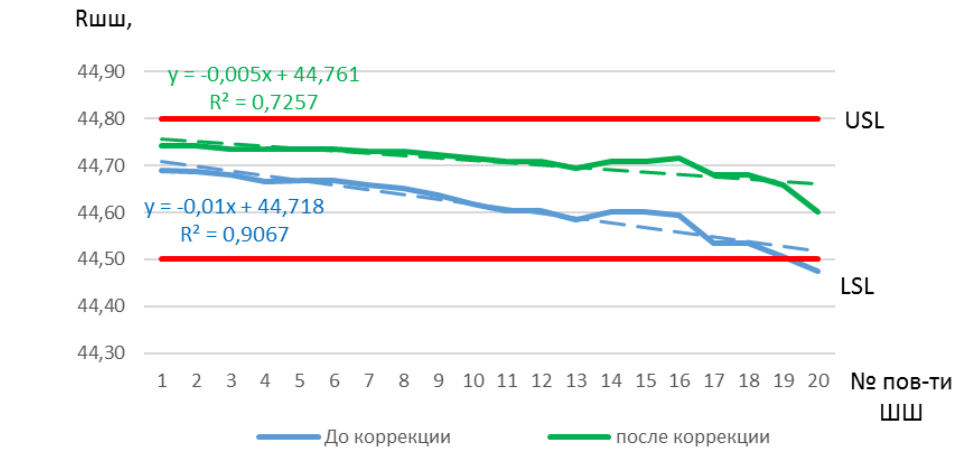
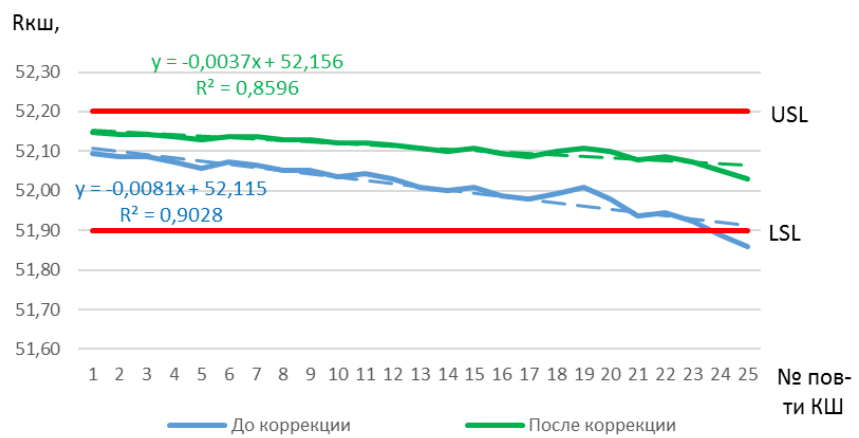


Рисунок 4.20 – Графики нормального распределения радиальных размеров по поверхности гравюр: а) коренных шеек, б) шатунных шеек, обработанные участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 45°



а)



б)

Рисунок 4.21 – Графики изменения радиальных размеров в периоде стойкости концевой сферической фрезы: а) по гравюрам шатунных шеек, б) по гравюрам коренных шеек, обработанные участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 45°

4.4.3 Анализ данных измерений радиальных размеров поверхности гравюр коренных и шатунных шеек, обработанных участком режущей кромки ориентированной под углом 15° к оси фрезы

В таблице 4.14 и 4.15 приведены данные измеренных индикаторным глубиномером отклонений Δ_i профиля поверхностей гравюр штампа от

номинального значения. Для коренных шеек 51,8 мм, для шатунных шеек 45,1 мм. В этой же таблице приведены рассчитанные по формуле (4.8) значения радиальных размеров R_i по поверхности гравюр, обработанных участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 15° .

1. Построение гистограмм.

В таблицах 4.16 и 4.17 приведены данные по частотам распределения радиальных размеров по интервалам. Величина интервала должна быть не менее, чем в 6 раз меньше допуска. Для построения гистограмм также выбрана его ширина в 0,03 мм. В таблице приведены расчетные данные по критерию Пирсона для проверки принадлежности экспериментального распределения нормальному закону распределения.

Как до, так и после коррекции программы с ЧПУ для найденных частот большинства экспериментальных распределений выполняется условие $\chi_{\text{эксп.}}^2 < \chi_{\text{кр.}}^2$, что свидетельствует о возможности применения нормального закона распределения.

По коренным шейкам до коррекции также сформированы два центра группирования, находящиеся в середине поля допуска. После коррекции гистограмма имеет один выраженный центр группирования, смещенный к максимальным значениям радиальных размеров, что свидетельствует о действии одного систематического фактора, по шатунным шейкам до коррекции выражен один группирования, смещенный к нижней границе поля допуска, после коррекции центр группирования смещается в зону, близкую к максимальному предельному значению радиальных значений размеров. Такая настроенность показателя сохраняет запас под износ гравюр штампа в процессе штамповки впоследствии увеличивая стойкость штампа.

2. Вероятностно-статистический анализ

В таблице 4.24 приведены значения статистических характеристик теоретического закона распределения. На рисунке 4.21 приведены графики нормального распределения, построенные по данным таблицы 4.18. Рассчитаны значения погрешностей среднеарифметических значений радиальных размеров.

Их величина изменяется в пределах от 0,015 мм до 0,027 мм. Погрешность нахождения среднеквадратичных отклонений изменяется от 0,013 мм до 0,027 мм. При величине поля допуска в 0,30 мм найденные значения погрешностей также обеспечивают достаточную степень точности среднеарифметического и среднеквадратичного отклонения.

После проведения коррекции также наблюдается значительное улучшение стабильности. Индекс воспроизводимости C_p без учета настроенности изменяется с 0,78 до 1,5 мм по поверхностям гравюр коренных шеек и с 0,81 до 1,26 по гравюрам шатунных шеек. Таким образом в производственном эксперименте достигнуто улучшение стабильности по коренным шейкам в 1,92 раза, по шатунным шейкам в 1,50 раза, что также, как и при обработке участком кромки фрезы под углом 45° обеспечивает свободу под регулировку показателя.

Меньшие значения улучшений стабильности по шатунным шейкам объясняются их более дальним расположением по поверхности гравюр и проявлением погрешностей станочной системы., прежде всего геометрической точности.

Индексы воспроизводимости C_{PK1} изменяются незначительно, по C_{PK2} достигается улучшение с 0,31 до 1,77 до коррекции по поверхностям коренных шеек и со значений 0,343 до 1,682, что свидетельствует о сохранении настроенности показателя в периоде стойкости после проведения коррекции для сохранения большего запаса под износ гравюр штампа при горячей штамповке поковок.

Достигнутые значения индексов воспроизводимости после коррекции программы с ЧПУ свидетельствуют о правильности найденных значений коррекции по результатам стойкостных размерных испытаний инструмента.

На рисунке 4.24 приведены графики изменения радиальных размеров в периоде стойкости концевой сферической фрезы. Для оценки величины износа в периоде стойкости данные аппроксимированы линейной функцией, которая приведена на поле графиков.

Данные по величине размерного износа участка режущей кромки приведены в таблице 4.19. По коренным шейкам за счет коррекции программы с ЧПУ влияние износа фрезы на величину радиальных размеров $\Delta_{р.и.}$ уменьшено с 0,158 мм до 0,045 мм, по поверхности гравюр шатунных шеек $\Delta_{р.и.}$ по поверхности гравюр коренных шеек уменьшается с 0,163 мм до 0,103 мм.

Таблица 4.14 – Значения радиальных размеров R_i по гравюрам коренных и шатунных шеек штампа до коррекции программы с ЧПУ, обработанных участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 15°

№	Поверхности гравюр коренных шеек		№	Поверхности гравюр шатунных шеек	
	Δ_i , мм	$R_{i,2}$ мм		Δ_i , мм	R_i , мм
1	2	3	4	5	6
1	0,01	51,79	1	0,015	45,09
2	0,02	51,79	2	0,02	45,09
3	0,02	51,79	3	0,095	45,03
4	0,17	51,68	4	0,16	44,99
5	0,15	51,69	5	0,15	44,99
6	0,13	51,71	6	0,15	44,99
7	0,17	51,68	7	0,2	44,96
8	0,23	51,64	8	0,225	44,94
9	0,22	51,64	9	0,26	44,92
10	0,25	51,62	10	0,175	44,98
11	0,3	51,59	11	0,135	45,00
12	0,22	51,64	12	0,135	45,00
13	0,13	51,71	13	0,225	44,94
14	0,14	51,70	14	0,275	44,91
15	0,13	51,71	15	0,275	44,91
16	0,23	51,64	16	0,32	44,87
17	0,22	51,64	17	0,235	44,93
18	0,25	51,62	18	0,235	44,93
19	0,3	51,59	19	0,275	44,91
20	0,34	51,56	20	0,31	44,88
21	0,23	51,64			
22	0,22	51,64			
23	0,25	51,62			
24	0,3				
25	0,32				

Таблица 4.15 – Значения радиальных размеров R_i по гравюрам коренных и шатунных шеек штампа после коррекции программы с ЧПУ, обработанных участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 15°

№	Поверхности гравюр коренных шеек		№	Поверхности гравюр шатунных шеек	
	Δ_i , мм	R_i , мм		Δ_i , мм	R_i , мм
1	-0,05	51,89	1	-0,06	45,19
2	0,06	51,81	2	-0,02	45,16
3	0,07	51,80	3	0,02	45,14
4	0,1	51,78	4	0,06	45,11
5	0,09	51,79	5	0,05	45,11
6	0,11	51,77	6	0,06	45,11
7	0,14	51,75	7	0,06	45,11
8	0,17	51,73	8	0,08	45,09
9	0,08	51,79	9	0,06	45,11
10	0,1	51,78	10	0,05	45,11
11	0,09	51,79	11	0,06	45,11
12	0,11	51,77	12	0,1	45,08
13	0,14	51,75	13	0,1	45,08
14	0,17	51,73	14	0,13	45,06
15	0,06	51,81	15	0,06	45,11
16	0,07	51,80	16	0,05	45,11
17	0,1	51,78	17	0,1	45,08
18	0,09	51,79	18	0,1	45,08
19	0,06	51,81	19	0,13	45,06
20	0,15	51,74	20	0,14	45,00
21	0,1	51,78			
22	0,14	51,75			
23	0,11	51,77			
24	0,14	51,75			
25	0,17	51,73			

Таблица 4.16 – Стратификация радиальных размеров R_i выборки по поверхностям гравюр коренных шеек штампа, обработанных участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 15°

№	Интервалы	q докоррекции	qпослекоррекции	q'_i до коррекции	q'_i до коррекции	$\frac{(q_i - q'_i)^2}{q'_i}$	$\frac{(q_i - q'_i)^2}{q'_i}$
1	51,45	0	0	1	0,031	0,000	0,031
2	51,48	0	0	2	0,125	0,000	0,125
3	51,51	0	0	3	0,412	0,000	0,412
4	51,54	0	0	4	1,093	0,000	1,093
5	51,57	1	0	5	2,334	0,000	0,763
6	51,6	3	0	6	4,014	0,000	0,256
7	51,63	3	0	7	5,557	0,001	1,176
8	51,66	7	0	8	6,193	0,025	0,105
9	51,69	2	0	9	5,556	0,391	2,276
10	51,72	5	0	10	4,013	2,738	0,243
11	51,75	0	3	11	2,333	8,552	2,333
12	51,78	0	11	12	1,092	11,910	1,092
13	51,81	3	9	13	0,412	7,399	16,278
14	51,84	0	0	14	0,125	2,050	0,125
15	51,87	0	0	15	0,030	0,253	0,030
					$\chi^2_{\text{эсп.}}$	26,338	9,479
					$\chi^2_{\text{кр.}}$	23,685	23,685

Таблица 4.17 – Стратификация данных выборки по поверхностям гравюр шатунных шеек штампа, обработанных участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 15°

№	Интервалы	q до коррекции	Q после коррекции	q'_i до коррекции	q'_i до коррекции	$\frac{(q_i - q'_i)^2}{q'_i}$	$\frac{(q_i - q'_i)^2}{q'_i}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	44,9	2	0	1	3,827	0,000	0,872
2	44,87	0	0	2	2,053	0,000	2,053
3	44,9	0	0	3	3,827	0,000	3,827
4	44,93	4	0	4	5,616	0,001	0,465

Таблица 4.17 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
5	44,96	5	0	5	6,491	0,019	0,343
6	44,99	2	0	6	5,908	0,210	2,585
7	45,02	4	1	7	4,234	1,291	0,013
8	45,05	1	0	8	2,390	4,480	0,808
9	45,08	0	6	9	1,062	8,791	1,062
10	45,11	2	7	10	0,372	9,756	7,131
11	45,14	0	4	11	0,102	6,122	0,102
12	45,17	0	1	12	0,022	2,173	0,022
13	45,2	0	1	13	0,004	0,436	0,004
14	45,23	0	0	14	0,001	0,049	0,001
15	45,26	0	0	15	0,000	0,003	0,000
					$\chi^2_{\text{эсп.}}$	19,288	8,592
					$\chi^2_{\text{кр.}}$	23,685	23,685

Таблица 4.18 – Статистические характеристики теоретических законов распределения размеров радиальных размеров, обработанные участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 15°

Характеристики	Поверхности гравюр коренных шеек		Поверхности гравюр шатунных шеек	
	До коррекции	После коррекции	До коррекции	После коррекции
$[R_{\text{макс.}}]$, мм	51,9	51,9	45,2	45,2
$[R_{\text{мин.}}]$, мм	51,6	51,6	44,9	44,9
$[R_{\text{спд.}}]$, мм	51,75	51,75	45,05	45,05
$R_{\text{макс.}}$, мм	51,79	51,89	45,09	45,19
$R_{\text{мин.}}$, мм	51,56	51,73	44,87	45,00
\bar{R} , мм	51,66	51,78	44,96	45,10
$\Delta_{\bar{R}}$	0,025	0,013	0,027	0,017
σ , мм	0,06	0,03	0,06	0,04
Δ_{σ}	0,009	0,005	0,010	0,006
C_p	0,78	1,50	0,81	1,26
C_{pk1}	1,242	1,225	1,286	0,835
C_{pk2}	0,310	1,770	0,343	1,682

где $[R_{\text{макс.}}]$ – максимальная величина допуска на радиальные размеры.

$[R_{\text{мин.}}]$ – минимальная величина допуска на радиальные размеры.

$[R_{\text{спд.}}]$ – середина поля допуска.

$R_{\text{макс.}}$ – максимальное значение радиальных размеров по выборке.

$R_{\text{мин.}}$ – минимальное значение радиальных размеров по выборке.

\bar{R} – среднеарифметическое значение радиальных размеров

$\Delta_{\bar{R}}$ – погрешность среднеарифметических значений радиальных размеров.

σ – среднеквадратичное отклонение

Δ_{σ} – погрешность среднеквадратичных отклонений радиальных размеров

C_p – индекс воспроизводимости без учета настроенности

C_{pK1}, C_{pK2} – индекс воспроизводимости с учетом настроенности

Таблица 4.19 – Размерный износ в периоде стойкости, участка кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 15°

Поверхности гравюр штампов	Период стойкости	Радиальные размеры R_i , мм		$\Delta_{p.i.} - \Delta_{p.i.c \text{ корр.}}$
		с коррекцией	Без коррекции	
По шатунным шейкам	в начале	45,152	45,044	
	в конце	45,049	44,881	
	$\Delta_{p.i.}$, мм	0,103	0,163	0,061
По коренным шейкам	в начале	51,802	51,738	
	в конце	51,754	51,580	
	$\Delta_{p.i.}$, мм	0,048	0,158	0,110

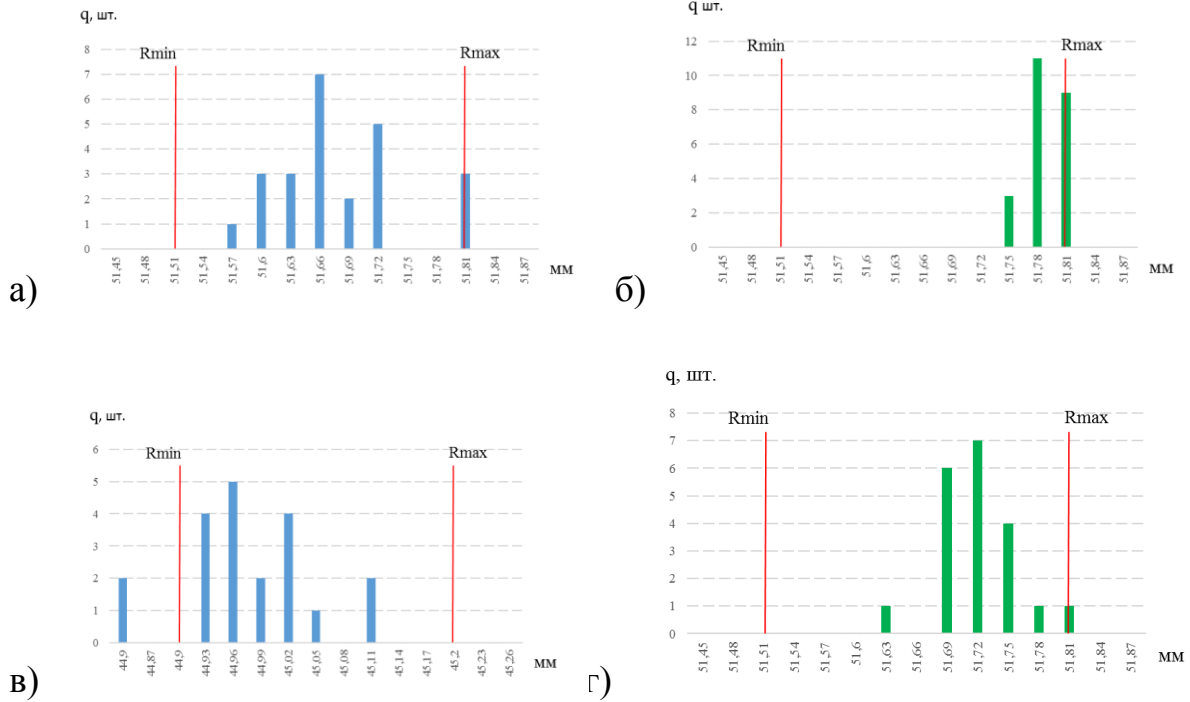


Рисунок 4.22 – Гистограммы распределения радиальных размеров по поверхностям гравюр коренных шеек: а) до коррекции, б) после коррекции, по поверхностям гравюр шатунных шеек в) до коррекции, б) после коррекции, обработанные участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 15°

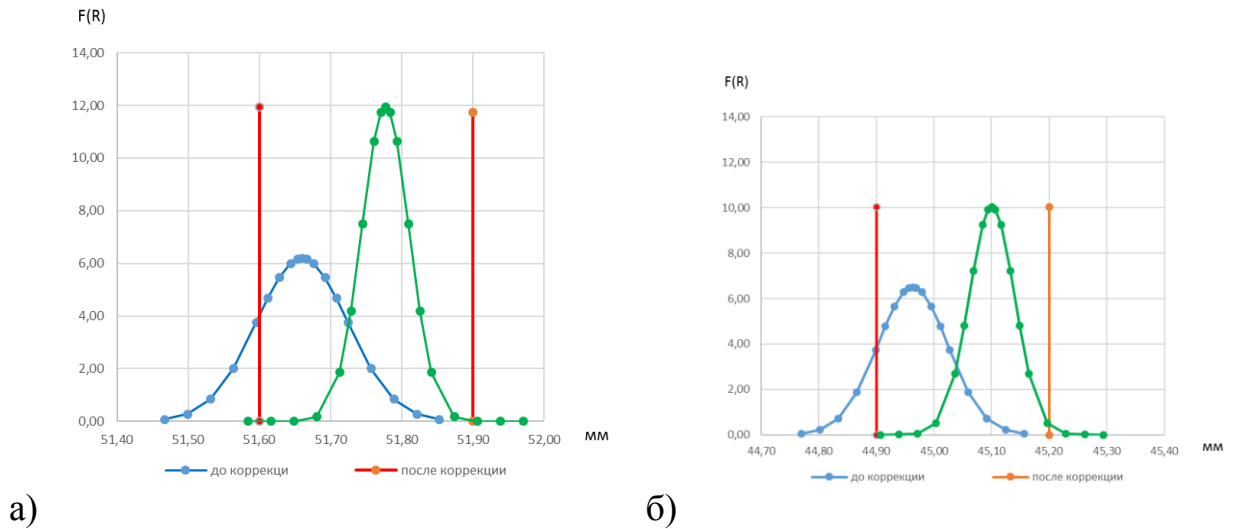
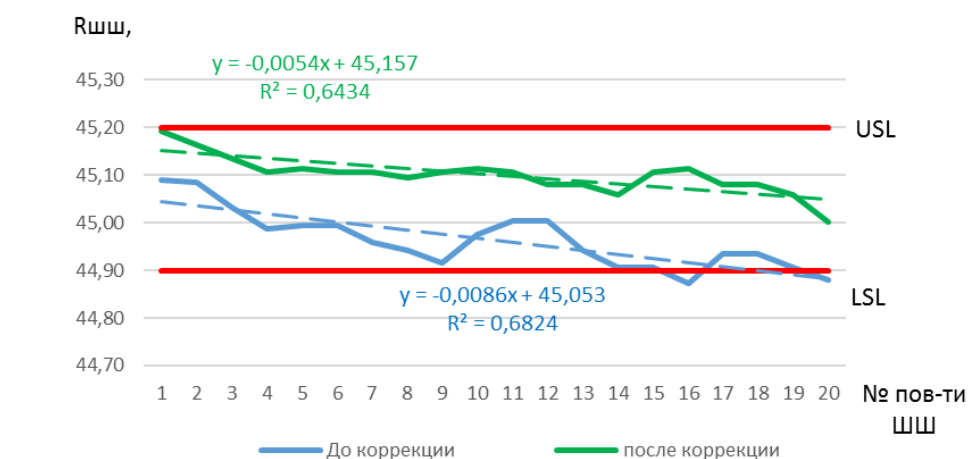
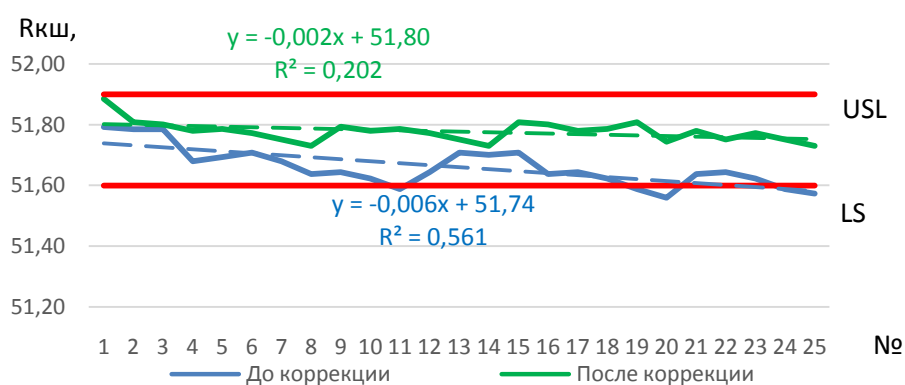


Рисунок 4.23 – Графики нормального распределения радиальных размеров по поверхности гравюр: а) коренных шеек, б) шатунных шеек, обработанные участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 15°



а)



б)

Рисунок 4.24 – Графики изменения радиальных размеров в периоде стойкости концевой сферической фрезы: а) по гравюрам шатунных шеек, б) по гравюрам коренных шеек, обработанные участком кромки фрезы, ориентированной к ее оси под углом 15°

4.5 Выводы по 4 главе

1. Разработан алгоритм расчета коррекции траектории концевых сферических фрезы при обработке гравюр штампа. По геометрическим параметрам обрабатываемых гравюр рассчитывается путь резания с накоплением в периоде стойкости инструмента. По найденному пути резания рассчитываются значения коррекции программы в ЧПУ.

2. Обработка с коррекцией гравюр штампа обеспечивает улучшение геометрической точности в периоде стойкости инструмента до двух раз. Графики нормального распределения до и после реализации коррекции приведены в правой нижней части плаката. По данным расчета значение индекса стабильности S_r увеличилось с 0,85 до 1,5, индекса настроенности с 0,88 до 1,51.

3. Разработана схема измерений гравюр штампа индикаторным глубиномером. Глубиномер устанавливается на поперечные направляющие, опирающиеся на верхнюю плоскость разъема штампа. В направляющих выполнены отверстия ориентации измерительного прибора. По данным измерений гравюр боковой поверхности гравюр коренных и шатунных штампа достигнуто значительное улучшение геометрической точности гравюр штампа. Индекс воспроизводимости без учета настроенности S_r изменился с 0,8 до коррекции до 1,7 после коррекции. Настроенность также находится в заданных пределах, что свидетельствует о значительном улучшении геометрической точности гравюр штампа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании решена важная научная задача – разработана методика повышения геометрической точности 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 математических моделей изменения геометрических показателей обрабатываемых поверхностей в периоде стойкости концевых сферических фрез, позволяющая найти наиболее вероятные границы положения профиля обрабатываемых гравюр штампов для последующего расчета значений корректирующих смещений концевых сферических фрез, 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 износостойким покрытием на основе TiN на геометрические параметры и 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 точности чистового фрезерования поверхности гравюр штампа, позволяющая выбрать оптимальный вариант концевой сферической фрезы, обеспечивающий 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 пятикоординатном заточном станке с ЧПУ, на специально подготовленном 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 мм/м², 0,44 мм/м² и 0,93 мм/м² свидетельствуют о приемлемости геометрической точности фрез, заточенных 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, индекса 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 лабораторией 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dai, Y. Chatter stability prediction for five-axis ball end milling with precise integration method / Y. Dai, H. Li, Z. Wei, H. Zhang. - DOI:10.1016/j.jmapro.2018.01.008 // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – P. 20-31.
2. Ema, S. Cutting Performance of End Mills with Different Helix Angles / S. Ema, R. Davies // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 1989. - P.217 – 227.
3. Gupta, P. Evaluating tool point dynamics using output-only modal analysis with mass-change methods / P. Gupta, M. Law, S. Mukhopadhyay.- doi:10.1016/j.cirpj.2020.06.001 // CIRPJournal of Manufacturing Science and Technology. – 2020. 31. P. 251-264.
4. Hoe, C. H. Chatter behavior in the milling process of inconel 718: Effects of tool edge radius / C. H. Hoe, Reddy, M. M. Lee, V. C. C. Debnath doi:10.1051/mateconf/201820202006// Paper presented at the MATEC Web of Conferences. – 2018.
5. IATF 16949:2016 Системы менеджмента качества. Особые требования к применению стандарта ISO 9001:2015 для автомобильного производства и соответствующих сервисных организаций.
6. Mao, J. A material constitutive model-based prediction method for flank milling force considering the deformation of workpiece / J. Mao, M. Zhao, X. Wei, L. Zhang doi:10.1016/j.jmapro.2022.09.053 // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – 84. P. 403-413.
7. Raja, I. Effects Of Endmill Helix Angle On Accuracy For Machining Thin-Rib Aerospace Component / M.Y. Yuhazri, M. Haszley, M.Amran, S. Subramonian// in Applied Mechanics and Materials. – 2013. -P.773-777.
8. Rajendran, S. Optimization of process parameters for peripheral milling operation using taguchi grey relational analysis / S. Rajendran, S. C. Rasheedali

- doi:10.1063/1.5120230 // Paper presented at the AIP Conference Proceedings. - 2019. - P. 2134.
9. Subramanian, M. Optimization of end mill tool geometry parameters for Al7075-T6 machining operations based on vibration amplitude by response surface methodology / M. Subramanian, M. Sakthivel, K. Sooryaprakash, R. Sudhakaran doi:10.1016/j.measurement.2013.08.015// Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. -2013. - 46(10). –P. 4005-4022.
 10. Tehranizadeh, F. Dynamics and chatter stability of crest-cut end mills. /R. Berenji, K. Budak. doi:10.1016/j.ijmachtools.2021.103813// International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 2021. – P. 171.
 11. Vu, D. Monies. A new optimization tool path planning for 3-axis end milling of free-form surfaces based on efficient machining intervals / D. Vu. Monies, F. Rubio doi:10.1063/1.5034907 // Paper presented at the AIP Conference Proceedings. – 2018.- P. 1960.
 12. Wiczorowski, K. Measurement of coating adhesion to cutting edges by the scratch method / K. Wiczorowski, M. Kupczyk, M. Wiczorowski // Univ. WCharkowie. – Charkyw. - 1999.
 13. Wiczorowski, K. Technika cienkich warstw w zastosowaniu do narzędzi skrawających / K. Wiczorowski // Cz. Mechanik.– Warszawa. - 1993.
 14. Żebrowski, H. Obrybka skrawaniem, ścierna, erozyjna, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej / H. Żebrowski // Techniki wytwarzania. – Wrocław. 2004.
 15. Zhao, W. Cutting performance evaluation of end mills for titanium aircraft components / W. Zhao, S.Wang, Z. Han, N. He doi:10.1016/j.procir.2015.08.051// Paper presented at the Procedia CIRP. - 2015. 35. - P. 1-7.
 16. Аверченков, А.В. Математическое обеспечение процедуры выбора оптимального режущего инструмента / А.В. Аверченков, М.В. Терехов, А.А. Мартненко // Информационные системы и технологии №5 (67), 2011. - С. 50-100.

17. Аверченков, В.И. Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ: монография / В.И. Аверченков, А.В. Аверченков, М.В. Терехов, Е.Ю. Кукло // – Брянск: БГТУ, 2010. – С. 148.
18. Аверченков, В.И. Программно-аппаратный комплекс автоматизации изготовления корпусных деталей на основе управления статистической настройкой инструмента / В.И. Аверченков, Р.А. Аверченков, Л.Б. Филиппов, Л.Б. Филиппова, А.С. Сазонова // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 8 ч.1.- 2017. С. 178-185.
19. Алейников, Д.П. Анализ вибрационных параметров концевых фрез при их износе / А.В. Лукьянов, Д.П.Алейников // Системы Методы Технологии. 2017.- № 4 (36) С. 71-77
20. Анцев, А.В. Система сравнительной оценки качества режущего инструмента разных производителей / А.В. Анцев // Научные технологии в машиностроении. - 2020. - №3.- С. 12-19.
21. Анцев, А.В. Оптимизация режима эксплуатации лезвийных инструментов с учетом стохастического характера процесса резания / А.В. Анцев // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. – С. 397-404.
22. Анцев, А.В. Сравнение качества режущих инструментов разных производителей с учетом вариабельности их периода стойкости / А.В. Анцев // Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении». 23-25 октября 2019 г.: сб. докл.. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019.– С. 110-112.
23. Батуев, В.В. Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Челябинск: ЮУГУ, 2007. - 208 с.

24. Батуев, В.В. Обеспечение производительности при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей в условиях заданной точности / Батуев, В.В. // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. - С. 91-94.
25. Башаров, Р.Р. Исследование процесса фрезерования концевой фрезой при высоких частотах вращения шпинделя станка / Р.Р.Башаров, Р.Г.Кудояров // Вестник УГАТУ.- 2012.- Т.16 №4 (49). - С. 71-77.
26. Башаров, Р.Р. Моделирование точности обработки при концевом фрезеровании деталей / Р.Р.Башаров, Р.Г.Кудояров // Известия вузов. Авиационная техника - 2013.-№1.- С. 66-72.
27. Биленко, С.В. Повышение эффективности высокоскоростной механической обработки на основе подходов нелинейной динамики и нейронносетового моделирования: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2006. - 332 с.
28. Бойко, Н.И. Стойкость фрезы при обработке горячего направленного металла / Н.И. Бойко, Г.В. Санамян, В.В. Коробейников, Н.И. Юрасов // Труды РГУПС.- 2015. - №5.- С. 12-16.
29. Вечеровски, М. Износ режущих кромок пальцевых фрез при фрезеровании шпоночных пазов / А. Матушак-Шаранец, К. Вечеровски, Т. Кендзерски // Вестник ДГТУ.- 2008.- Т.8 №1 (36). - С. 55-63.
30. Внуков, Ю.Н. Определение условий фрезерования сферическими и тороидальными фрезами /Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, В.А. Криишталь В.А, Н.Н. Черновол // Новые материалы и технологии.- 2015.- С. 28-33.
31. Внуков, Ю.Н. Особенности расчета составляющих силы резания при торцевом фрезеровании сферическими фрезами / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Сучасні технології в машинобудуванні Modern technologies in mechanical engineering зб. наук.пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – Вип. 5. – С. 12-17.

32. Волков, А.В. О коэффициенте резания при точении /А.В. Волков, С.В. Матвеев // Известия МГТУ «МАМИ».- 2013.- № 1(15). - С.34-38.
33. Волков, Д.И. Шероховатость поверхности крыльчаток ГТД при концевом фрезеровании твердосплавными фрезами с износостойкими покрытиями /Д.И. Волков, С.М. Кожина // Вестник РГАТУ.- 2019.- №1 (48). - С. 18-23.
34. Вороненко, В.П. Организация системы инструментообеспечения автоматизированных производств /В.П. Вороненко, С.В. Луцюк // Вестник МГТУ «Станкин».- 2009.- №3(7). - С. 23-25.
35. Выбойщик, А.В. Повышение точности и производительности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Челябинск: ЮУГУ.- 2000. - 181 с.
36. Гавлинин, А.Н. Динамика фрезерования конструкционных сталей концевыми фрезами /А.Н. Гавлинин, Г.И. Коровин, П.С. Рожков // Известия Томского политехнического университета. – 2013. Т.323 №2. - С. 56-58.
37. Гимадеев, М.Р. Исследование параметров шероховатости при фрезеровании поверхностей с различными углами наклона концевой сферической фрезы / М.Р. Гимадеев, В.А. Стельмаков // в сб. Информационные технологии XXI века. Сборник научных трудов. Хабаровск. – 2019. С. 410-419.
38. Гимадеев, М. Р. Обеспечение качества поверхности при механообработке сложнопрофильных деталей / М.Р. Гимадеев, В. М. Давыдов // Технология машиностроения. - 2018. - №11. - С. 9-16.
39. ГОСТ 17024-2015. Фрезы концевые сферические, цилиндрические и конические твердосплавные для труднообрабатываемых сталей и сплавов. Технические условия. М. Изд-во стандартов, 2015. - 7 с.
40. ГОСТ 7505-89. Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски М. Изд-во стандартов, 1990. - 80 с.

41. ГОСТ Р ИСО 7870-2 - 2015. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта. М. Стандартиформ, 2016. -54 с.
42. ГОСТ Р 51814.6-2005. Менеджмент качества при планировании, разработке и подготовке производства автомобильных компонентов М.: Издательство стандартов, 2005. – 68 с.
43. Гречишников, В.А. Влияние угла наклона режущей кромки на качество обрабатываемой поверхности при фрезеровании концевыми фрезами со сферическим торцом /В.А. гречишников, Г.А. Скотченко // Автоматизация и управление в машиностроении. – 2017. - №4 (28). - С. 3-8.
44. Гузеев, В.И. Подача для чистовой обработки. Фрезерование пространственно-сложных поверхностей /В.И. Гузеев, В.В. Батуев, И.В. Сурков // Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: справочник / под ред. В.И. Гузеева. М.: Машиностроение, 2005. - С. 237–240.
45. Гузеев, В.И. Погрешности динамической настройки при обточке фасонных деталей на станках с ЧПУ /В.И.Гузеев// Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. Челябинск: ЧПИ, - 1980. - №249. - С.16–18.
46. Гузеев, В.И. Учет влияния следов предшествующей обработки на точность фрезерования пространственно-сложных поверхностей /В.И. Гузеев, В.В. Батуев // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. - С. 115-117.
47. Гусев, В. Г. Проектирование процессов обработки сложных пространственных поверхностей на станках с ЧПУ в САМ-системе ESPRIT /В.Г. Гусев, Е. С. Савина // Вестник машиностроения, 2018.- № 7.- С. 19–22.
48. Древаль, А.Е. Измерение состояния рабочих поверхностей быстрорежущих инструментов в процессе эксплуатации /А.Е. Древаль, В.К. Ардисламов// Известия высших учебных заведений машиностроения. – 2015. - №10 (667). - С. 58-63.

49. Древаль, А.Е. Кинетика состояния поверхностных слоев быстрорежущего инструмента в процессе его изнашивания. Оптимизация процесса резания жаро- и особо прочных материалов / А.Е. Древаль, В.К. Ардисламов, В.М. Кривошей, М.Р. Гайнулин // Всесоюзный тематический межвузовский сборник. Уфа. – 1989. - С. 132–138.
50. Древаль, А.Е. Определение минимального диаметра концевой фрезы / А.Е. Древаль, Д.В. Виноградов, О.В. Мальков // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2015. № 11. С. 43–59.
51. Евченко, К. Г. Стратегия Vortex и технология оптимизации Machinedna от компании /Д.А. Маслов Д. А, А. В. Пинчук, С. А. Таликин. – 2013. - С.129-130.
52. Зенкин, Н.В. Моделирование упругих деформаций концевой фрезы при фрезеровании по контуру /Н.В. Зенкин, А.В. Барков // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2014.- С. 20-26.
53. Иванов, В.В. Оценка режущих свойств сплавов производства АО «КЗТС» при точении нержавеющей стали /В.В. Иванов, А.А. Пряжников, Ю.М. Лопатин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. Вып. 9. - С. 546-554.
54. Иванов, В.В. Эксплуатационные возможности отечественных твердосплавных пластин при точении /В.В. Иванов, А.А. Пряжникова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.- 2017. - Вып.8. Ч.2. - С. 49-57.
55. Исаев, А.В. Математические модели кинематических задних углов в рабочей плоскости при попутном и встречном фрезеровании малогабаритными фрезами /А.В. Исаев, Р.Р. Хамзин // Вестник МГТУ «Станкин».- 2020. - № 4 (55). - С. 93-97.
56. Исаченко, А.С. Построение номограммы отжимов концевых фрез от вылетов для наладок для станков с ЧПУ / А.С.Исаченко // Автоматизированное проектирование в машиностроении. - 2017.- №5.- С. 122-125.

57. Истоцкий, В.В. Проектирование и изготовление концевых фрез снижающих вибрации при высокоскоростном фрезеровании / В.В. Истоцкий // Евразийский Союз Ученых. – 2014. - №7. - С. 58-60.
58. Истоцкий, В.В. Проектирование режущей части фасонных инструментов с использованием виртуальных аналогов шлифовально-заточных станков с ЧПУ, основанных на положениях булевой алгебры /В.В. Истоцкий, В.Б. Протасьев // Известия ТулГУ. Вып.2: Труды Междунар. юбил. научн.-техн. конф. «Проблемы формообразования деталей при обработке резанием», посвящ. 90-летию со дня рождения С.И. Лашнева, 29-30 января 2007 г. – Тула: Изд-во ТулГУ.- 2006.- С. 170-174.
59. Казимиров, А.А. Компьютерное исследование упругих отжатий концевой фрезы в процессе обработки / А.А. Казимиров, С.С. Кугаевский // Научные труды XVI Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники: сборник статей. В 3 ч. Екатеринбург: УГТУ–УПИ.- 2009. - Ч. 2.- 257 с.
60. Калмыков, В.В. Аналитическое и статистическое оценивание упругих деформаций при фрезеровании по контуру / В.В. Калмыков, А.В. Барков // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 8-1. – С. 34–38.
61. Кирющенко, Е. В. Взаимосвязь скорости резания и виброскорости шпинделя при фрезеровании / Е.В. Кирющенко // Инновационные технологии в машиностроении: проблемы, задачи, решения: сборник научных трудов / гл. ред. А. Н. Емелюшин; отв. ред. А. А. Веселовский. – Орск: Издательство Орского гуманитарно-технического института (филиала) ОГУ. - 2012. – С. 87 - 90.
62. Ковка и штамповка: справочник в 4 томах / ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) [и др.] ; под ред. Е. И. Семенова.– М.: Машиностроение, 1986.– Т 2: Горячая штамповка. – 592 с.
63. Козлов, А.М. Повышение производительности фрезерования вогнутых поверхностей сложной формы на станках с ЧПУ / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Вестник машиностроения. - 2014. - №12.- С.71-75.

64. Козлов, А.М. Фрезерование сложных деталей с коррекцией положения инструмента / А.М. Козлов, А.В. Кирющенко, С.Ф. Кузнецов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. - Вып.8 ч.2. - С. 111-119.
65. Козлов, А.М. Технологическое обеспечение точности фрезерной обработки крупногабаритных деталей / А.М. Козлов, Е.В. Кирющенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. №3 (293). - С. 65-73.
66. Козлов, А.М. Параметрическое управление подачей при фрезеровании сложных поверхностей на станках с ЧПУ / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. - Вып.8 ч.1. – С. 59-61.
67. Козлов, А.М. Повышение точности вогнутых поверхностей сложной формы при чистовом фрезеровании на станках с ЧПУ / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. - Вып.8 ч.2. – С. 120-131.
68. Козлов, А.М. Расчет подачи при чистовом фрезеровании вогнутых поверхностей на станках с ЧПУ / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. - Вып.8 ч.2. – С. 40-45.
69. Козлов, А.М. Управление процессом чистовой обработки поверхностей сложной формы на фрезерных станках с ЧПУ / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Научно-технические проблемы машиностроения. – 2018. - №4. - С. 29-37.
70. Козлов, А.М. Повышение эффективности чистового фрезерования вогнутых поверхностей на малогабаритных станках с ЧПУ / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин, Е.А. Малявин, А.А. Козлов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. - т.17. № 5. - С. 92-97.
71. Козлов, А.М. Система динамического контроля отклонений от плоскостности при торцовом фрезеровании / А.М. Козлов, Е.В. Кирющенко // Машиностроение – традиции и инновации: материалы всероссийской научно-образовательной конференции (МТИ-2011). Сборник докладов. – М.: МГТУ «СТАНКИН». - 2011. – С. 123-126.

72. Колесов, К.Н. Компьютерная модель торцевого фрезерования / К.Н. Колесов // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. - № 11. - С. 21-24.
73. Колесов, К.Н. Математические модели концевых твердосплавных фрез / К.Н. Колесов // СТИН. – 2009. - №12. –С.35-37.
74. Котова, Ж.Н. Экспериментальные исследования стойкости концевых фрез / Ж.Н. Котова, Е.В. Фомин // Научно-технические ведомости Севмашвтуза. - 2020. - №2. - С. 13-17.
75. Кравченко, И.И. Математическая модель образования погрешностей обработки плоских поверхностей, вызываемых упругими деформациями технологической системы /И.И.Кравченко DOI: 10.24108/0918.0001426// Машиностроение и компьютерные технологии. - 2018. - № 9. - С. 1-14.
76. Кугаевский, С.С. Исследование влияния упругих отжати́й инструмента на точность обработки при фрезеровании / С.С. Кугаевский // Международный научно-исследовательский журнал. – 2010. - №7. (73). - С. 30-34.
77. Кугультинов, С.Д. Особенности обработки сложных поверхностей на станках с ЧПУ /С.Д.Кугультинов, В.А.Красильникова// Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2015. - №3. - С. 145-148.
78. Кудояров, Р. Г. Исследование жесткости многоцелевого станка 500V/5 /Р.Г.Кудояров, Р.Р.Башаров// Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий. Уфа: УГАТУ. - 2011. - С. 234–240.
79. Кузагильдин, Р.С. Повышение стойкости штампов для горячего деформирования /Р.С.Кузагильдин, Л.А. Шутова// Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. – 2019. - №1(80). - С. 50-58.
80. Лукьяненко, О.Л. Визуализация формирования шероховатости при концевом фрезеровании тонкостенных деталей / О.Л. Лукьяненко // Новые материалы и технологии. - 2014.- С. 52-60.

81. Лукьянов, А.В. Система защиты обрабатывающих центров от опасных динамических нагрузок на основе анализа параметров вибрации и силы / А.В. Лукьянов, Д.П. Алейников, А.Ю. Портной // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2017. - Т.21, №4(123). - С. 30-38.
82. Малютин, Г.Е. Определение усилий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ. / Г.Е. Малютин// Машиностроительные технологии и инструменты. – 2014. - №4(306). - С. 74-81.
83. Мартюгин, А. В. Влияние ключевых параметров штамповки и первых операций механической обработки на балансировку коленчатого вала/ А. В. Мартюгин, И. М. Володин// Автомобильная промышленность. – 2020. №2. – С.30-37.
84. Матасова, Е.Ю. Корректировка подачи при фрезеровании криволинейных поверхностей / Е.Ю.Матасова, Д.В.Виноградов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. - №10(715). - С. 14-24.
85. Мокрицкий, Б.Я. Методики и некоторые результаты применения метода акустической эмиссии для оценки эксплуатационных свойств инструментальных материалов / Б.Я. Мокрицкий, В.В. Высоцкий, Е.Ю. Соболев, К.Ю. Дроздов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. - №7. - С. 37-42.
86. Миронова, М.Н. Экспериментальная апробация интеллектуальной системы для управления точностью механической обработки / М.Н.Миронова // Наука и техника. – 2017. - Т.16, №3. - С. 242-248.
87. Михайлов, М.И. Влияние способа обработки на статическую точность при фрезеровании осесимметричной детали / М.И.Михайлов, Е.А. Кирпичев // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2020. - №1. - С. 15-22.
88. Мокрицкий, Б.Я. Исследование состояния поверхности металлорежущего инструмента методом экзоэлектронной эмиссии / Б.Я. Мокрицкий, А.А. Бурков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. - Т. 77, № 10, С. 26–29.

89. Мокрицкий, Б.Я. Экспрессная сравнительная оценка работоспособности концевых твердосплавных фрез /Б.Я. Мокрицкий, Д.А. Пустовалов, В.Ю. Кваша // Новые материалы и технологии производства. – 2015. - №2(86). - С. 49-53.
90. Мокрицкий, Б.Я. Моделирование напряжений и деформаций твердосплавных концевых фрез /Б.Я. Мокрицкий, А.С.Верещагина, В.Ю. Верещагин // Ученые записки. – 2016. - №1(25). - С. 82-85.
91. Муслинов, А.П. Зависимость наработки спиральных сверл от их диаметра при рациональных параметрах режима резания /А.П. Муслинов, Н.А. Рагрин, В.А. Самсонов // Вестник КРСУ. – 2014. – Т.14,№2. –С. 65-71.
92. Николаев, П.М. Управление положением инструмента при программировании 5-осевой обработки / П.М. Николаев // САПР и графика. 2012. - №11. - С. 74-76.
93. Николаев, П.М. Расчет ориентации фрезы по продольному и боковому наклонам / П.М.Николаев // СТИН. – 2014. - №8. - С. 9-11.
94. Николаев, П.М. Расчет центра фрезы по точке контакта с обрабатываемой поверхностью / П.М.Николаев // СТИН. – 2014. - №8. - С. 11-13.
95. Пасько, Н.И. Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение / Н.И. Пасько, А.В. Анцев, Н.В. Анцева, С.В. Сальников. – Тула: Изд-во ТулГУ, - 2016. – 174 с.
96. Пашкевич, В. М. Многофакторная оптимизация параметров обработки на основе использования семантических сетей / В.М. Пашкевич, М.Н. Миронова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2011. - №4. С. 51–61.
97. Пашкевич, В. М. Управление точностью обработки деталей машин на основе использования семантических сетей / В.М.Пашкевич, М.Н. Миронова // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. - 2012. - № 1. - С. 14–21.

98. Перминов, А.Е. Особенности фрезерования деталей концевыми фрезами / А.Е. Перминов, С.В. Бабин, Е.Ю. Прокофьев // Вестник машиностроения. – 2017. - №12. - С. 57-58.
99. Пивкин, П.М. Инновационная конструкция концевой фрезы со сферическим торцом с постоянным углом наклона на производящей инструментальной поверхности / П.М. Пивкин, Г.А. Скотченко // Автоматизация и управление в машиностроении. - 2016. - №1(23). - С. 44-51.
100. Пономарев, Б.Б. Алгоритм разбиения поверхностей свободной формы по значениям кривизны при подготовке управляющих программ для станков с ЧПУ / Б.Б. Пономарев, Ш.Х. Нгуен // doi: 10.21285/1814-3520-2018-4-62-72 Вестник ИрГТУ. – 2018. - Т. 22, № 4. - С. 62–72.
101. Пономарев, Б.Б. Моделирование и анализ влияния условий обработки на силы резания при концевом фрезеровании / Б.Б. Пономарев, Ш.Х. Нгуен // doi: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).8-16 Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. - Т. 59, №3. - С. 8–16.
102. Пономарев, Б.Б. Оценка шероховатости при пятикоординатном чистовом фрезеровании поверхностей сфероцилиндрической фрезой / Б.Б. Пономарев, Ш.Х. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. - №5 (722). С. 20-23.
103. Пономарев, Б.Б. Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании / Б.Б. Пономарев, Ш.Х. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. - №3 (708). - С. 11-20.
104. Пономарев, Б.Б. Моделирование процесса концевой фрезерования в среде SIMULIA ABAQUS / Б.Б. Пономарев, Ш.Х. Нгуен // III международная научно-практическая конференция WORLD SCIENCE. – М., 2018. – С. 116-123.
105. Протасьев, В.Б. Проектирование фасонных инструментов, изготавливаемых с использованием шлифовально-заточных станков с ЧПУ / В.Б. Протасьев, В.В. Истоцкий // М.: ИНФРАМ. – 2011. - 128с.

106. Пустовалов, Д.А. Методики оценки свойств материалов / Д.А. Пустовалов, Б.Я. Мокрицкий, П.А. Саблин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. - №6. - С. 36-41.
107. Постнов, В.В. Расчетно-экспериментальный метод компенсации погрешности механообработки лопаток газотурбинных двигателей на мехатронном станочном оборудовании / В. В. Постнов, Е. Н. Малахов, С. В. Старовойтов, А. Ю. Федоровцев, Н. Ф. Измайлова // ВЕСТНИК УГАТУ. 2012. - Т.16. № 7(52). - С. 145-153.
108. Рябов, Е.А. Варианты определения периода стойкости концевых сферических фрез при обработке деталей сложной формы/ Е.А. Рябов, А.В. Исаев, Р.М. Хисамутдинов, С.Ю. Юрасов, О.И. Юрасова // Вестник МГТУ «Станкин». – 2018. - №4 (47). - С. 61-65.
109. Сафаров, Д.Т. Планирование энергетических затрат в производственных заданиях обработки деталей на станках с ЧПУ / Д.Т. Сафаров, Л.Р. Сафарова, А.Г. Кондрашов, Г.Ф. Глинина // СТИН. – 2017. - №4. - С.27-35.
110. Сафаров, Д.Т. Обработка косозубых цилиндрических колес концевыми фрезами на четырехкоординатных фрезерных станках с ЧПУ / А.Г. Кондрашов, Р.Р. Казаргельдинов, Г.Ф. Глинина // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева. – 2021. - №3(77). - С.38-44.
111. 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.
112. Сафаров, Д.Т. Идентификация наладочных смещений штампового оборудования для управления геометрической точностью поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей / Д.Т. Сафаров, А.В. Чех // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. - 2022. - №1. - С. 83-94.
113. Сафаров, Д.Т. Нахождение распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала по данным координатных

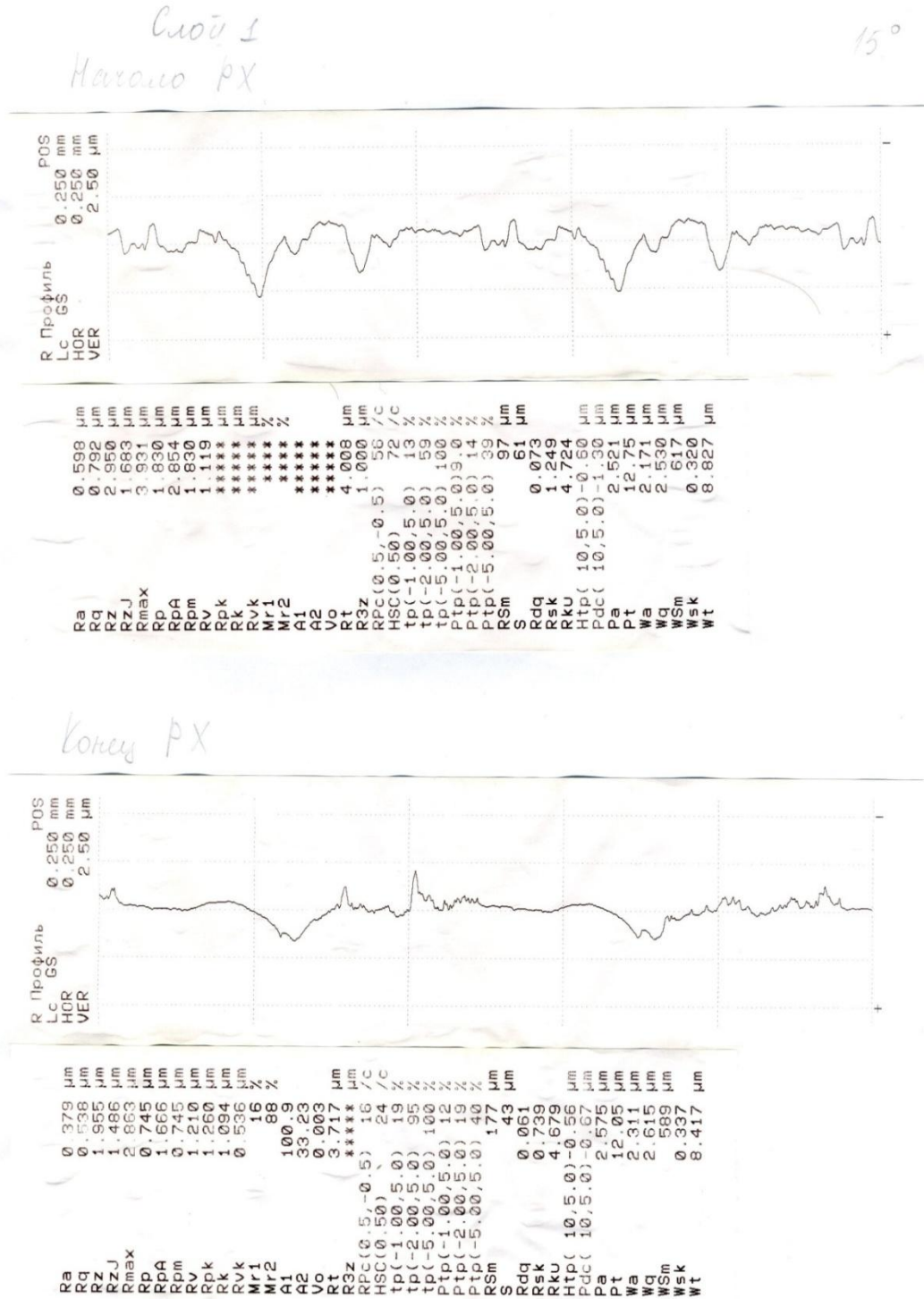
- измерений / Д.Т. Сафаров, А.В. Чех // Омский научный вестник. – 2022. - №1. - С. 33-41.
- 114.Сафаров, Д.Т. Метод расчета оптимальных параметров подналадки штамповочного оборудования для обеспечения геометрической точности поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей / Д.Т. Сафаров, А.В. Чех, А.Г. Кондрашов // «Черные металлы». - 2022. - № 8. - С. 37-43.
- 115.Сафаров, Д.Т. Обеспечение припуска по коренным и шатунным шейкам и балансируемости поковок коленчатых валов большегрузного автомобиля / Д.Т. Сафаров, А.В. Чех, А.Г. Кондрашов // «Черные металлы». – 2023. - № 6. - С. 41-48.
- 116.Сгибнев, А.В. Выбор параметров технологических операций механической обработки на основе учета коэффициента вариации стойкости инструмента / А.В. Сгибнев, П.В. Круглов // Наука и образование. - 2014. - №6. - С. 16-28.
- 117.Сердюкова, Д.А. О многофакторном моделировании обработки поверхности свободной формы /Д.А. Сердюкова, Б.Б. Пономарев // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2024. - Т.8. №3. - С. 9-13.
- 118.Симонян, М.М. Метод ускоренной оценки обрабатываемости материалов /М.М.Симонян, М.О. Навоян, Н.Э. Казарян // Вестник НПУА Механика. Машиноведение. Машиностроение. – 2021. - №1. - С. 43-51.
- 119.Савицкий, В.В. Система автоматизированного расчета параметров размерной настройки концевых фрез для обработки плоских поверхностей на станках с ЧПУ / В.В. Савицкий, Н.В. Беляков, Ю.Е. Махаринский, Д.Г. Латушкин, В.В. Беган // Вестник витебского государственного технологического университета. – 2021. - №1 (40). - С. 39-50.
- 120.Смольников, Н.Я. Стойкостные исследования червячных зуборезных фрез с закругленной вершиной зубьев / Н.Я. Смольников, Г.Г. Скребнев // Вестник ЧитГУ. – 2006. - №4 (41). - С. 5-7.

121. Тимирязев, В.А. Повышение точности контурной обработки концевыми фрезами / В.А. Тимирязев, А.Г. Дацко, В.А. Хазанов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2020. - №4 (55). - С. 28-32.
122. Туромша, В.И. Моделирование стойкости инструмента при нестационарном резании с учетом технологических ограничений / В.И. Туромша, С.Н. Мищенко // Вестник национальной академии наук Беларуси. – 2011. - №1. - С. 48-55.
123. Туромша, В.И. Методология назначения оптимальных параметров режима резания / В.И. Туромша, В.Т. Сафиуллин // Вестник национальной академии наук Беларуси. – 2010. - №3. - С. 35-43.
124. Хайруллин, Р.А. Повышение стойкости ковочных штампов для изготовления поковок коленчатого вала / Р.А. Хайруллин, О.Н. Мартемьянова // В сборнике: Современная наука: теоретический и практический взгляд. Материалы I Международной научно-практической конференции. ООО «НОУ «Вектор науки». – 2014. - С. 86-89.
125. Хамзин, Р.Р. К вопросу проектирования малогабаритного цельного фрезерного инструмента / Р.Р. Хамзин, А.В. Исаев // Двенадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России». Сборник докладов – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2019. - С. 95-97.
126. Чех, А.В. Улучшение точности изготовления поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей на основе статистических методов управления качеством / А.В. Чех, Д.Т. Сафаров // Известия ТулГУ Технические науки. – 2022. - № 6. - С. 139-148.
127. Чех, А.В. Уменьшение сложного пространственного коробления поковки коленчатого вала для обеспечения гарантированного припуска по коренным и шатунным шейкам / А.В. Чех, Д.Т. Сафаров // Вестник ИжГТУ. – 2022. - № 1. - С. 77-90.
128. Шин, И.Г. Комплексная оценка работоспособности твердосплавных режущих пластин с покрытием из нитрида титана / И.Г. Шин, С.Р. Назаров

- У.А. Сапаев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. - №10. - С. 10-14.
- 129.Щёкин, А. В. Экспресс-расчет технологических затрат на обработку детали в сат-приложении для КОМПАС-3D / А.В. Щёкин, И.Н. Трибушинин, В.П. Фомин // СТИН. – 2021. - № 4. - С. 15–18.
- 130.Юрьев, В.Л. Алгоритм назначения технологических требований чистового фрезерования блисков сферическими фрезами /В.Л. Юрьев, С.В. Старовойтов // Ежегодный научно-технический сборник. Под общей редакцией В.Л. Юрьева. УГАТУ. – 2017. - Т.10. - С. 39-46.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛА И ВЕЛИЧИНЫ ИЗНОСА КОНЦЕВЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ФРЕЗ Ф. САНВИК-КОРОМАНТ, ПОЛУЧЕННЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ СТОЙКОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Примеры профилограмм профилей образцов материала штампа,
обработанных
под углом в 15°



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ДАННЫЕ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ ГРАНИЦ
ПОЛОЖЕНИЯ ПРОФИЛЯ ГРАВЮР ШТАМПА**

Таблица П.Б. 2.1 Расчетные исходные данные отклонений.

Угол	Вставка 1						Вставка 2					
	0	119,81	239,61	359,42	479,23	558,90	626,38	697,98	769,59	841,19	909,11	1095,11
45,0	0,0000	0,0194	0,0304	0,0348	0,0351	0,0340	0,0327	0,0313	0,0300	0,0290	0,0285	0,0298
41,7	0,0000	0,0180	0,0283	0,0325	0,0329	0,0318	0,0305	0,0290	0,0276	0,0264	0,0256	0,0257
38,3	0,0000	0,0166	0,0263	0,0303	0,0306	0,0296	0,0283	0,0268	0,0252	0,0238	0,0227	0,0216
35,0	0,0000	0,0153	0,0242	0,0281	0,0284	0,0274	0,0261	0,0245	0,0228	0,0211	0,0197	0,0176
31,7	0,0000	0,0139	0,0222	0,0258	0,0262	0,0252	0,0239	0,0222	0,0204	0,0185	0,0168	0,0135
28,3	0,0000	0,0125	0,0201	0,0236	0,0240	0,0230	0,0217	0,0199	0,0179	0,0159	0,0139	0,0094
25,0	0,0000	0,0112	0,0181	0,0213	0,0218	0,0208	0,0195	0,0177	0,0155	0,0132	0,0110	0,0053
21,7	0,0000	0,0098	0,0160	0,0191	0,0195	0,0186	0,0173	0,0154	0,0131	0,0106	0,0081	0,0012
18,3	0,0000	0,0084	0,0140	0,0169	0,0173	0,0164	0,0151	0,0131	0,0107	0,0080	0,0052	-0,0028
15,0	0,0000	0,0070	0,0119	0,0146	0,0151	0,0143	0,0129	0,0109	0,0083	0,0053	0,0022	-0,0069
45,0	0,0000	-0,0090	-0,0140	-0,0171	-0,0184	-0,0184	-0,0179	-0,0168	-0,0153	-0,0134	-0,0113	-0,0040
41,7	0,0000	-0,0099	-0,0156	-0,0192	-0,0209	-0,0212	-0,0210	-0,0203	-0,0193	-0,0179	-0,0163	-0,0106
38,3	0,0000	-0,0108	-0,0172	-0,0212	-0,0234	-0,0240	-0,0241	-0,0238	-0,0233	-0,0224	-0,0213	-0,0173
35,0	0,0000	-0,0117	-0,0188	-0,0233	-0,0259	-0,0268	-0,0272	-0,0273	-0,0272	-0,0268	-0,0263	-0,0240
31,7	0,0000	-0,0126	-0,0204	-0,0253	-0,0283	-0,0296	-0,0303	-0,0309	-0,0312	-0,0313	-0,0313	-0,0306
28,3	0,0000	-0,0135	-0,0220	-0,0274	-0,0308	-0,0324	-0,0334	-0,0344	-0,0351	-0,0358	-0,0363	-0,0373
25,0	0,0000	-0,0144	-0,0236	-0,0294	-0,0333	-0,0352	-0,0366	-0,0379	-0,0391	-0,0403	-0,0413	-0,0439
21,7	0,0000	-0,0153	-0,0252	-0,0315	-0,0358	-0,0380	-0,0397	-0,0414	-0,0430	-0,0447	-0,0463	-0,0506
18,3	0,0000	-0,0162	-0,0268	-0,0336	-0,0382	-0,0408	-0,0428	-0,0449	-0,0470	-0,0492	-0,0513	-0,0572
15,0	0,0000	-0,0171	-0,0284	-0,0356	-0,0407	-0,0436	-0,0459	-0,0484	-0,0510	-0,0537	-0,0563	-0,0639

Таблица П.Б. 2.1 Расчетные исходные данные отклонений.

Угол	Вставка 3					Вставка 4					
	1214,91	1334,72	1454,53	1574,34	1654,01	1721,49	1793,09	1864,69	1936,30	2004,21	2190,22
45,0	0,0330	0,0378	0,0441	0,0514	0,0565	0,0610	0,0656	0,0701	0,0743	0,0779	0,0858
41,7	0,0279	0,0317	0,0368	0,0430	0,0476	0,0515	0,0558	0,0599	0,0639	0,0674	0,0753
38,3	0,0228	0,0255	0,0295	0,0347	0,0386	0,0421	0,0459	0,0497	0,0535	0,0569	0,0648
35,0	0,0178	0,0193	0,0223	0,0264	0,0296	0,0327	0,0361	0,0396	0,0431	0,0464	0,0544
31,7	0,0127	0,0132	0,0150	0,0180	0,0207	0,0232	0,0262	0,0294	0,0327	0,0358	0,0439
28,3	0,0076	0,0070	0,0077	0,0097	0,0117	0,0138	0,0164	0,0192	0,0223	0,0253	0,0334
25,0	0,0026	0,0009	0,0004	0,0014	0,0028	0,0044	0,0065	0,0091	0,0119	0,0148	0,0230
21,7	-0,0025	-0,0053	-0,0068	-0,0070	-0,0062	-0,0050	-0,0033	-0,0011	0,0015	0,0042	0,0125
18,3	-0,0076	-0,0115	-0,0141	-0,0153	-0,0152	-0,0145	-0,0131	-0,0113	-0,0089	-0,0063	0,0020
15,0	-0,0126	-0,0176	-0,0214	-0,0236	-0,0241	-0,0239	-0,0230	-0,0215	-0,0193	-0,0168	-0,0084
45,0	0,0016	0,0076	0,0139	0,0203	0,0245	0,0280	0,0315	0,0350	0,0382	0,0410	0,0475
41,7	-0,0062	-0,0012	0,0041	0,0097	0,0136	0,0168	0,0203	0,0237	0,0270	0,0300	0,0370
38,3	-0,0140	-0,0101	-0,0057	-0,0008	0,0026	0,0057	0,0090	0,0124	0,0157	0,0189	0,0265
35,0	-0,0217	-0,0189	-0,0155	-0,0114	-0,0083	-0,0054	-0,0022	0,0011	0,0045	0,0078	0,0160
31,7	-0,0295	-0,0278	-0,0253	-0,0219	-0,0192	-0,0166	-0,0135	-0,0102	-0,0067	-0,0033	0,0056
28,3	-0,0373	-0,0366	-0,0351	-0,0325	-0,0301	-0,0277	-0,0248	-0,0215	-0,0180	-0,0144	-0,0049
25,0	-0,0450	-0,0454	-0,0448	-0,0430	-0,0410	-0,0388	-0,0360	-0,0328	-0,0292	-0,0255	-0,0154
21,7	-0,0528	-0,0543	-0,0546	-0,0535	-0,0519	-0,0499	-0,0473	-0,0441	-0,0404	-0,0366	-0,0259
18,3	-0,0606	-0,0631	-0,0644	-0,0641	-0,0628	-0,0611	-0,0585	-0,0554	-0,0516	-0,0477	-0,0364
15,0	-0,0683	-0,0720	-0,0742	-0,0746	-0,0737	-0,0722	-0,0698	-0,0667	-0,0629	-0,0588	-0,0468

Таблица П.Б. 2.1 Расчетные исходные данные отклонений.

Угол	Вставка 5					Вставка 6						
	2310,02	2429,82	2549,63	2669,44	2749,11	2816,59	2888,19	2959,80	3031,40	3099,32	3285,32	
45,0	0,0889	0,0904	0,0907	0,0903	0,0901	0,0903	0,0912	0,0931	0,0966	0,1017	0,1291	
41,7	0,0786	0,0805	0,0809	0,0801	0,0792	0,0785	0,0778	0,0776	0,0782	0,0797	0,0920	
38,3	0,0684	0,0705	0,0710	0,0699	0,0683	0,0666	0,0645	0,0622	0,0598	0,0578	0,0548	
35,0	0,0582	0,0606	0,0612	0,0597	0,0575	0,0548	0,0511	0,0467	0,0414	0,0358	0,0177	
31,7	0,0480	0,0507	0,0514	0,0495	0,0466	0,0429	0,0378	0,0312	0,0231	0,0138	-0,0194	
28,3	0,0378	0,0408	0,0415	0,0393	0,0357	0,0311	0,0244	0,0157	0,0047	-0,0081	-0,0565	
25,0	0,0276	0,0309	0,0317	0,0291	0,0248	0,0193	0,0111	0,0002	-0,0137	-0,0301	-0,0937	
21,7	0,0174	0,0209	0,0219	0,0189	0,0139	0,0074	-0,0023	-0,0153	-0,0321	-0,0520	-0,1308	
18,3	0,0072	0,0110	0,0121	0,0087	0,0031	-0,0044	-0,0156	-0,0308	-0,0505	-0,0740	-0,1679	
15,0	-0,0030	0,0011	0,0022	-0,0015	-0,0078	-0,0163	-0,0290	-0,0463	-0,0689	-0,0960	-0,2050	
45,0	0,0503	0,0519	0,0521	0,0507	0,0488	0,0465	0,0434	0,0395	0,0348	0,0296	0,0111	
41,7	0,0402	0,0419	0,0417	0,0388	0,0351	0,0307	0,0245	0,0167	0,0069	-0,0043	-0,0465	
38,3	0,0301	0,0319	0,0312	0,0268	0,0214	0,0149	0,0057	-0,0061	-0,0209	-0,0382	-0,1041	
35,0	0,0200	0,0219	0,0207	0,0149	0,0077	-0,0010	-0,0132	-0,0289	-0,0488	-0,0720	-0,1617	
31,7	0,0099	0,0119	0,0102	0,0029	-0,0060	-0,0168	-0,0320	-0,0517	-0,0767	-0,1059	-0,2193	
28,3	-0,0002	0,0019	-0,0003	-0,0090	-0,0197	-0,0326	-0,0508	-0,0745	-0,1045	-0,1397	-0,2770	
25,0	-0,0103	-0,0081	-0,0108	-0,0210	-0,0335	-0,0485	-0,0697	-0,0973	-0,1324	-0,1736	-0,3346	
21,7	-0,0204	-0,0181	-0,0213	-0,0330	-0,0472	-0,0643	-0,0885	-0,1201	-0,1603	-0,2074	-0,3922	
18,3	-0,0305	-0,0281	-0,0318	-0,0449	-0,0609	-0,0801	-0,1074	-0,1429	-0,1881	-0,2413	-0,4498	
15,0	-0,0406	-0,0381	-0,0422	-0,0569	-0,0746	-0,0959	-0,1262	-0,1657	-0,2160	-0,2751	-0,5074	

Таблица П.Б. 2.2 Расчетные данные отклонений после коррекции по штамповым вставкам.

Угол	Вставка 1						Вставка 2					
	0	119,81	239,61	359,42	479,23	558,90	626,38	697,98	769,59	841,19	909,11	1095,11
45,0	-0,0007	0,0187	0,0297	0,0341	0,0344	0,0333	0,0449	0,0434	0,0421	0,0411	0,0406	0,0419
41,7	-0,0007	0,0173	0,0276	0,0319	0,0322	0,0311	0,0427	0,0412	0,0397	0,0385	0,0377	0,0379
38,3	-0,0007	0,0160	0,0256	0,0296	0,0300	0,0289	0,0405	0,0389	0,0373	0,0359	0,0348	0,0338
35,0	-0,0007	0,0146	0,0235	0,0274	0,0277	0,0268	0,0383	0,0366	0,0349	0,0333	0,0319	0,0297
31,7	-0,0007	0,0132	0,0215	0,0251	0,0255	0,0246	0,0361	0,0343	0,0325	0,0306	0,0290	0,0256
28,3	-0,0007	0,0119	0,0194	0,0229	0,0233	0,0224	0,0338	0,0321	0,0301	0,0280	0,0260	0,0215
25,0	-0,0007	0,0105	0,0174	0,0207	0,0211	0,0202	0,0316	0,0298	0,0277	0,0254	0,0231	0,0175
21,7	-0,0007	0,0091	0,0153	0,0184	0,0189	0,0180	0,0294	0,0275	0,0253	0,0227	0,0202	0,0134
18,3	-0,0007	0,0077	0,0133	0,0162	0,0166	0,0158	0,0272	0,0253	0,0229	0,0201	0,0173	0,0093
15,0	-0,0007	0,0064	0,0112	0,0139	0,0144	0,0136	0,0250	0,0230	0,0204	0,0175	0,0144	0,0052
45,0	-0,0007	-0,0097	-0,0147	-0,0178	-0,0191	-0,0191	-0,0057	-0,0047	-0,0032	-0,0013	0,0008	0,0081
41,7	-0,0007	-0,0106	-0,0163	-0,0199	-0,0216	-0,0219	-0,0089	-0,0082	-0,0072	-0,0058	-0,0042	0,0015
38,3	-0,0007	-0,0115	-0,0179	-0,0219	-0,0241	-0,0247	-0,0120	-0,0117	-0,0111	-0,0102	-0,0092	-0,0052
35,0	-0,0007	-0,0124	-0,0195	-0,0240	-0,0265	-0,0275	-0,0151	-0,0152	-0,0151	-0,0147	-0,0142	-0,0118
31,7	-0,0007	-0,0133	-0,0211	-0,0260	-0,0290	-0,0303	-0,0182	-0,0187	-0,0190	-0,0192	-0,0192	-0,0185
28,3	-0,0007	-0,0142	-0,0227	-0,0281	-0,0315	-0,0331	-0,0213	-0,0222	-0,0230	-0,0237	-0,0242	-0,0251
25,0	-0,0007	-0,0151	-0,0243	-0,0301	-0,0340	-0,0359	-0,0244	-0,0257	-0,0270	-0,0281	-0,0292	-0,0318
21,7	-0,0007	-0,0160	-0,0259	-0,0322	-0,0364	-0,0387	-0,0275	-0,0292	-0,0309	-0,0326	-0,0342	-0,0384
18,3	-0,0007	-0,0169	-0,0274	-0,0342	-0,0389	-0,0415	-0,0307	-0,0327	-0,0349	-0,0371	-0,0392	-0,0451
15,0	-0,0007	-0,0178	-0,0290	-0,0363	-0,0414	-0,0443	-0,0338	-0,0362	-0,0388	-0,0415	-0,0442	-0,0517

Таблица П.Б. 2.2 Расчетные данные отклонений после коррекции по ШТАМПОВЫМ ВСТАВКАМ.

Угол	Вставка 3					Вставка 4					
	1214,91	1334,72	1454,53	1574,34	1654,01	1721,49	1793,09	1864,69	1936,30	2004,21	2190,22
45,0	0,0493	0,0541	0,0604	0,0677	0,0728	0,0547	0,0594	0,0638	0,0681	0,0717	0,0795
41,7	0,0442	0,0480	0,0531	0,0594	0,0639	0,0453	0,0495	0,0537	0,0577	0,0612	0,0691
38,3	0,0391	0,0418	0,0459	0,0510	0,0549	0,0359	0,0397	0,0435	0,0473	0,0507	0,0586
35,0	0,0341	0,0357	0,0386	0,0427	0,0460	0,0264	0,0298	0,0333	0,0369	0,0401	0,0481
31,7	0,0290	0,0295	0,0313	0,0344	0,0370	0,0170	0,0200	0,0232	0,0265	0,0296	0,0377
28,3	0,0239	0,0233	0,0240	0,0260	0,0280	0,0076	0,0102	0,0130	0,0161	0,0191	0,0272
25,0	0,0189	0,0172	0,0168	0,0177	0,0191	-0,0018	0,0003	0,0028	0,0057	0,0085	0,0167
21,7	0,0138	0,0110	0,0095	0,0094	0,0101	-0,0113	-0,0095	-0,0073	-0,0047	-0,0020	0,0063
18,3	0,0087	0,0049	0,0022	0,0010	0,0012	-0,0207	-0,0194	-0,0175	-0,0151	-0,0125	-0,0042
15,0	0,0037	-0,0013	-0,0051	-0,0073	-0,0078	-0,0301	-0,0292	-0,0277	-0,0255	-0,0230	-0,0147
45,0	0,0179	0,0239	0,0302	0,0366	0,0408	0,0217	0,0253	0,0287	0,0320	0,0348	0,0413
41,7	0,0101	0,0151	0,0204	0,0260	0,0299	0,0106	0,0140	0,0174	0,0207	0,0237	0,0308
38,3	0,0023	0,0062	0,0106	0,0155	0,0190	-0,0005	0,0028	0,0062	0,0095	0,0126	0,0203
35,0	-0,0054	-0,0026	0,0008	0,0050	0,0081	-0,0117	-0,0085	-0,0051	-0,0017	0,0015	0,0098
31,7	-0,0132	-0,0115	-0,0090	-0,0056	-0,0029	-0,0228	-0,0197	-0,0164	-0,0130	-0,0096	-0,0007
28,3	-0,0210	-0,0203	-0,0187	-0,0161	-0,0138	-0,0339	-0,0310	-0,0277	-0,0242	-0,0206	-0,0111
25,0	-0,0287	-0,0291	-0,0285	-0,0267	-0,0247	-0,0450	-0,0423	-0,0390	-0,0354	-0,0317	-0,0216
21,7	-0,0365	-0,0380	-0,0383	-0,0372	-0,0356	-0,0562	-0,0535	-0,0503	-0,0466	-0,0428	-0,0321
18,3	-0,0443	-0,0468	-0,0481	-0,0478	-0,0465	-0,0673	-0,0648	-0,0616	-0,0579	-0,0539	-0,0426
15,0	-0,0520	-0,0557	-0,0579	-0,0583	-0,0574	-0,0784	-0,0760	-0,0729	-0,0691	-0,0650	-0,0531

Таблица П.Б. 2.2 Расчетные данные отклонений после коррекции по штамповым вставкам.

Угол	Вставка 5					Вставка 6					
	2310,02	2429,82	2549,63	2669,44	2749,11	2816,59	2888,19	2959,80	3031,40	3099,32	3285,32
45,0	0,0633	0,0648	0,0651	0,0647	0,0645	0,1598	0,1607	0,1627	0,1661	0,1712	0,1986
41,7	0,0531	0,0549	0,0553	0,0545	0,0536	0,1480	0,1474	0,1472	0,1477	0,1493	0,1615
38,3	0,0429	0,0450	0,0454	0,0443	0,0428	0,1361	0,1340	0,1317	0,1293	0,1273	0,1244
35,0	0,0326	0,0350	0,0356	0,0341	0,0319	0,1243	0,1207	0,1162	0,1110	0,1053	0,0872
31,7	0,0224	0,0251	0,0258	0,0239	0,0210	0,1125	0,1073	0,1007	0,0926	0,0834	0,0501
28,3	0,0122	0,0152	0,0160	0,0137	0,0101	0,1006	0,0939	0,0852	0,0742	0,0614	0,0130
25,0	0,0020	0,0053	0,0061	0,0035	-0,0008	0,0888	0,0806	0,0697	0,0558	0,0394	-0,0241
21,7	-0,0082	-0,0047	-0,0037	-0,0067	-0,0116	0,0769	0,0672	0,0542	0,0374	0,0175	-0,0613
18,3	-0,0184	-0,0146	-0,0135	-0,0169	-0,0225	0,0651	0,0539	0,0387	0,0190	-0,0045	-0,0984
15,0	-0,0286	-0,0245	-0,0233	-0,0271	-0,0334	0,0532	0,0405	0,0233	0,0007	-0,0264	-0,1355
45,0	0,0248	0,0264	0,0266	0,0251	0,0232	0,1160	0,1129	0,1090	0,1043	0,0991	0,0806
41,7	0,0146	0,0164	0,0161	0,0132	0,0095	0,1002	0,0941	0,0862	0,0764	0,0652	0,0230
38,3	0,0045	0,0064	0,0056	0,0012	-0,0042	0,0844	0,0752	0,0634	0,0486	0,0314	-0,0346
35,0	-0,0056	-0,0036	-0,0049	-0,0107	-0,0179	0,0685	0,0564	0,0406	0,0207	-0,0025	-0,0922
31,7	-0,0157	-0,0136	-0,0154	-0,0227	-0,0316	0,0527	0,0375	0,0178	-0,0072	-0,0363	-0,1498
28,3	-0,0258	-0,0236	-0,0259	-0,0346	-0,0453	0,0369	0,0187	-0,0050	-0,0350	-0,0702	-0,2074
25,0	-0,0359	-0,0336	-0,0364	-0,0466	-0,0590	0,0211	-0,0002	-0,0278	-0,0629	-0,1040	-0,2650
21,7	-0,0460	-0,0436	-0,0469	-0,0585	-0,0727	0,0052	-0,0190	-0,0506	-0,0907	-0,1379	-0,3226
18,3	-0,0561	-0,0536	-0,0573	-0,0705	-0,0865	-0,0106	-0,0379	-0,0734	-0,1186	-0,1718	-0,3803
15,0	-0,0662	-0,0637	-0,0678	-0,0824	-0,1002	-0,0264	-0,0567	-0,0962	-0,1465	-0,2056	-0,4379

Таблица П.Б. 2.3 Расчетные данные отклонений после коррекции по отдельным гравюрам штамповых вставок.

Угол	Вставка 1						Вставка 2					
	0	119,81	239,61	359,42	479,23	558,90	626,38	697,98	769,59	841,19	909,11	1095,11
45,0	0,0000	0,0142	0,0222	0,0259	0,0268	0,0262	0,0253	0,0241	0,0227	0,0212	0,0199	0,0169
41,7	0,0000	0,0140	0,0220	0,0259	0,0269	0,0265	0,0258	0,0247	0,0234	0,0221	0,0209	0,0182
38,3	0,0000	0,0137	0,0217	0,0258	0,0270	0,0268	0,0262	0,0253	0,0242	0,0231	0,0220	0,0195
35,0	0,0000	0,0135	0,0215	0,0257	0,0271	0,0271	0,0267	0,0259	0,0250	0,0240	0,0230	0,0208
31,7	0,0000	0,0133	0,0213	0,0256	0,0273	0,0274	0,0271	0,0265	0,0258	0,0249	0,0241	0,0220
28,3	0,0000	0,0130	0,0211	0,0255	0,0274	0,0277	0,0276	0,0272	0,0265	0,0258	0,0251	0,0233
25,0	0,0000	0,0128	0,0208	0,0254	0,0275	0,0280	0,0280	0,0278	0,0273	0,0267	0,0262	0,0246
21,7	0,0000	0,0126	0,0206	0,0253	0,0276	0,0283	0,0285	0,0284	0,0281	0,0277	0,0272	0,0259
18,3	0,0000	0,0123	0,0204	0,0252	0,0278	0,0286	0,0289	0,0290	0,0289	0,0286	0,0282	0,0272
15,0	0,0000	0,0121	0,0201	0,0251	0,0279	0,0289	0,0294	0,0296	0,0296	0,0295	0,0293	0,0285
45,0	0,0000	-0,0142	-0,0222	-0,0259	-0,0268	-0,0262	-0,0253	-0,0241	-0,0227	-0,0212	-0,0199	-0,0169
41,7	0,0000	-0,0140	-0,0220	-0,0259	-0,0269	-0,0265	-0,0258	-0,0247	-0,0234	-0,0221	-0,0209	-0,0182
38,3	0,0000	-0,0137	-0,0217	-0,0258	-0,0270	-0,0268	-0,0262	-0,0253	-0,0242	-0,0231	-0,0220	-0,0195
35,0	0,0000	-0,0135	-0,0215	-0,0257	-0,0271	-0,0271	-0,0267	-0,0259	-0,0250	-0,0240	-0,0230	-0,0208
31,7	0,0000	-0,0133	-0,0213	-0,0256	-0,0273	-0,0274	-0,0271	-0,0265	-0,0258	-0,0249	-0,0241	-0,0220
28,3	0,0000	-0,0130	-0,0211	-0,0255	-0,0274	-0,0277	-0,0276	-0,0272	-0,0265	-0,0258	-0,0251	-0,0233
25,0	0,0000	-0,0128	-0,0208	-0,0254	-0,0275	-0,0280	-0,0280	-0,0278	-0,0273	-0,0267	-0,0262	-0,0246
21,7	0,0000	-0,0126	-0,0206	-0,0253	-0,0276	-0,0283	-0,0285	-0,0284	-0,0281	-0,0277	-0,0272	-0,0259
18,3	0,0000	-0,0123	-0,0204	-0,0252	-0,0278	-0,0286	-0,0289	-0,0290	-0,0289	-0,0286	-0,0282	-0,0272
15,0	0,0000	-0,0121	-0,0201	-0,0251	-0,0279	-0,0289	-0,0294	-0,0296	-0,0296	-0,0295	-0,0293	-0,0285

Таблица П.Б. 2.3 Расчетные данные отклонений после коррекции по отдельным гравюрам штамповых вставок.

Угол	Вставка 3					Вставка 4					
	1214,91	1334,72	1454,53	1574,34	1654,01	1721,49	1793,09	1864,69	1936,30	2004,21	2190,22
45,0	0,0157	0,0151	0,0151	0,0156	0,0160	0,0165	0,0170	0,0176	0,0180	0,0184	0,0191
41,7	0,0170	0,0165	0,0164	0,0167	0,0170	0,0173	0,0177	0,0181	0,0185	0,0187	0,0191
38,3	0,0184	0,0178	0,0176	0,0178	0,0180	0,0182	0,0184	0,0187	0,0189	0,0190	0,0192
35,0	0,0197	0,0191	0,0189	0,0189	0,0190	0,0191	0,0192	0,0192	0,0193	0,0193	0,0192
31,7	0,0211	0,0205	0,0201	0,0200	0,0199	0,0199	0,0199	0,0198	0,0197	0,0196	0,0192
28,3	0,0224	0,0218	0,0214	0,0211	0,0209	0,0208	0,0206	0,0204	0,0201	0,0199	0,0192
25,0	0,0238	0,0232	0,0226	0,0222	0,0219	0,0216	0,0213	0,0209	0,0205	0,0201	0,0192
21,7	0,0251	0,0245	0,0239	0,0233	0,0229	0,0225	0,0220	0,0215	0,0209	0,0204	0,0192
18,3	0,0265	0,0258	0,0252	0,0244	0,0238	0,0233	0,0227	0,0220	0,0214	0,0207	0,0192
15,0	0,0278	0,0272	0,0264	0,0255	0,0248	0,0242	0,0234	0,0226	0,0218	0,0210	0,0192
45,0	-0,0157	-0,0151	-0,0151	-0,0156	-0,0160	-0,0165	-0,0170	-0,0176	-0,0180	-0,0184	-0,0191
41,7	-0,0170	-0,0165	-0,0164	-0,0167	-0,0170	-0,0173	-0,0177	-0,0181	-0,0185	-0,0187	-0,0191
38,3	-0,0184	-0,0178	-0,0176	-0,0178	-0,0180	-0,0182	-0,0184	-0,0187	-0,0189	-0,0190	-0,0192
35,0	-0,0197	-0,0191	-0,0189	-0,0189	-0,0190	-0,0191	-0,0192	-0,0192	-0,0193	-0,0193	-0,0192
31,7	-0,0211	-0,0205	-0,0201	-0,0200	-0,0199	-0,0199	-0,0199	-0,0198	-0,0197	-0,0196	-0,0192
28,3	-0,0224	-0,0218	-0,0214	-0,0211	-0,0209	-0,0208	-0,0206	-0,0204	-0,0201	-0,0199	-0,0192
25,0	-0,0238	-0,0232	-0,0226	-0,0222	-0,0219	-0,0216	-0,0213	-0,0209	-0,0205	-0,0201	-0,0192
21,7	-0,0251	-0,0245	-0,0239	-0,0233	-0,0229	-0,0225	-0,0220	-0,0215	-0,0209	-0,0204	-0,0192
18,3	-0,0265	-0,0258	-0,0252	-0,0244	-0,0238	-0,0233	-0,0227	-0,0220	-0,0214	-0,0207	-0,0192
15,0	-0,0278	-0,0272	-0,0264	-0,0255	-0,0248	-0,0242	-0,0234	-0,0226	-0,0218	-0,0210	-0,0192

Таблица П.Б. 2.3 Расчетные данные отклонений после коррекции по отдельным гравюрам штамповых вставок.

Угол	Вставка 5					Вставка 6					
	2310,02	2429,82	2549,63	2669,44	2749,11	2816,59	2888,19	2959,80	3031,40	3099,32	3285,32
45,0	0,0193	0,0192	0,0193	0,0198	0,0207	0,0219	0,0239	0,0268	0,0309	0,0361	0,0590
41,7	0,0192	0,0193	0,0196	0,0207	0,0221	0,0239	0,0267	0,0305	0,0356	0,0420	0,0692
38,3	0,0192	0,0193	0,0199	0,0215	0,0235	0,0259	0,0294	0,0341	0,0404	0,0480	0,0795
35,0	0,0191	0,0193	0,0203	0,0224	0,0249	0,0279	0,0321	0,0378	0,0451	0,0539	0,0897
31,7	0,0191	0,0194	0,0206	0,0233	0,0263	0,0299	0,0349	0,0415	0,0499	0,0599	0,1000
28,3	0,0190	0,0194	0,0209	0,0242	0,0277	0,0319	0,0376	0,0451	0,0546	0,0658	0,1102
25,0	0,0189	0,0195	0,0213	0,0251	0,0291	0,0339	0,0404	0,0488	0,0593	0,0717	0,1204
21,7	0,0189	0,0195	0,0216	0,0259	0,0306	0,0358	0,0431	0,0524	0,0641	0,0777	0,1307
18,3	0,0188	0,0195	0,0219	0,0268	0,0320	0,0378	0,0459	0,0561	0,0688	0,0836	0,1409
15,0	0,0188	0,0196	0,0222	0,0277	0,0334	0,0398	0,0486	0,0597	0,0736	0,0896	0,1512
45,0	-0,0193	-0,0192	-0,0193	-0,0198	-0,0207	-0,0219	-0,0239	-0,0268	-0,0309	-0,0361	-0,0590
41,7	-0,0192	-0,0193	-0,0196	-0,0207	-0,0221	-0,0239	-0,0267	-0,0305	-0,0356	-0,0420	-0,0692
38,3	-0,0192	-0,0193	-0,0199	-0,0215	-0,0235	-0,0259	-0,0294	-0,0341	-0,0404	-0,0480	-0,0795
35,0	-0,0191	-0,0193	-0,0203	-0,0224	-0,0249	-0,0279	-0,0321	-0,0378	-0,0451	-0,0539	-0,0897
31,7	-0,0191	-0,0194	-0,0206	-0,0233	-0,0263	-0,0299	-0,0349	-0,0415	-0,0499	-0,0599	-0,1000
28,3	-0,0190	-0,0194	-0,0209	-0,0242	-0,0277	-0,0319	-0,0376	-0,0451	-0,0546	-0,0658	-0,1102
25,0	-0,0189	-0,0195	-0,0213	-0,0251	-0,0291	-0,0339	-0,0404	-0,0488	-0,0593	-0,0717	-0,1204
21,7	-0,0189	-0,0195	-0,0216	-0,0259	-0,0306	-0,0358	-0,0431	-0,0524	-0,0641	-0,0777	-0,1307
18,3	-0,0188	-0,0195	-0,0219	-0,0268	-0,0320	-0,0378	-0,0459	-0,0561	-0,0688	-0,0836	-0,1409
15,0	-0,0188	-0,0196	-0,0222	-0,0277	-0,0334	-0,0398	-0,0486	-0,0597	-0,0736	-0,0896	-0,1512

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

«Утверждаю»

Директор Набережночелнинского
института ФГАОУ ВО К(П)ФУ
д-р технических наук, профессор

М.М. Ганиев

«17» 01 2023 г.

Акт внедрения

Составлен «17» января 2023 г. заведующим кафедрой «Конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств» Р.М. Хисамутдиновым в том, что в Набережночелнинском институте (филиале) ФГАОУ ВО Казанский (Приволжский) Федеральный университет внедрены и используются результаты диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Глининой Гульназ Фидаэловны.

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе при обучении бакалавров и магистров по направлениям 15.03.05 и 15.04.05 «Конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств» в виде методик выполнения стойкостных испытаний режущих инструментов, позволяющих обеспечить моделирование геометрической точности обрабатываемых поверхностей деталей, а также методик расчета величин коррекции траектории концевых фрез при обработке сложных фасонных поверхностей технологической оснастки на фрезерных станках с ЧПУ. Положения диссертационной работы использованы в следующих дисциплинах:

- Теория формообразования и режущий инструмент;
- Моделирование систем автоматизированного проектирования в машиностроении. Процессы формообразования;
- Теория резания, проектирование режущих инструментов и приспособлений.

Зав. кафедрой КТОМП

Р.М. Хисамутдинов

Ассистент

Г.Ф Глинина

