

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Брянский государственный технический университет»

На правах рукописи

Нагоркин Максим Николаевич

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ШЕРОХОВАТОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИНСТРУМЕНТАМИ
ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный консультант –
доктор технических наук, профессор
Тотай Анатолий Васильевич

Брянск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
 ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	
22	
1.1. Параметры качества, определяющие эксплуатационные свойства поверхностного слоя деталей машин	24
1.2. Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей	34
1.3. Методы чистовой и финишной обработки поверхностей деталей машин инструментами, оснащенными синтетическими сверхтвёрдыми материалами .	38
1.4. Антифрикционная обработка поверхностей деталей машин. Совершенствование существующих и синтез новых технологических систем .	42
1.5. Средства измерения и контроля параметров качества поверхностей деталей машин	45
1.6. Оценка параметрической надёжности технологических систем	46
1.7. Выводы. Цели и задачи исследований	49
 ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПО ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ	
55	
2.1. Статистические аспекты назначения технологических параметров шероховатости поверхностей деталей в соответствии с ГОСТ 2.309-73	55
2.1.1. К вопросу выбора законов распределения оценок технологических значений параметров шероховатости	55

2.1.2. Вопросы расчёта технологических значений параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин с целью обеспечения выполнения технических условий	61
2.2. Общая схема расчёта параметрической надёжности технологических систем механической обработки поверхностей деталей	68
2.3. Физико-статистические модели формирования параметров качества поверхностей деталей в процессе обработки	75
2.4. Теоретические основы расчёта параметрической надёжности технологических систем методом имитационного моделирования	87
2.5. Программное обеспечение расчёта параметрической надёжности технологических систем на основе активного эксперимента	93
2.6. Выводы ко второй главе	97
ГЛАВА 3. ТЕХНИЧЕСКОЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	98
3.1. Исследуемые технологические системы, материалы, детали	98
3.1.1. Методика экспериментальных исследований технологических систем обработки плоских поверхностей деталей	99
3.1.2. Методика экспериментальных исследований обработки и триботехнических испытаний наружных цилиндрических поверхностей деталей	103
3.2. Метрологическое обеспечение экспериментальных исследований	109
3.2.1. Компьютеризация систем измерений геометрических параметров качества поверхностей деталей	110
3.2.1.1. Измерительно-информационная система для контроля геометрических параметров качества поверхностей	111
3.2.1.2. Мобильные измерительно-информационные системы для контроля геометрических параметров качества поверхностей	114
3.2.2. Средства оптико-микроскопического анализа поверхностей деталей	118

3.3. Выводы к третьей главе	120
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАМИ УПРУГОГО ДЕЙСТВИЯ С УЧЁТОМ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ	122
4.1. Частотные характеристики процессов обработки поверхностей деталей одноинденторными инструментами упругого действия	122
4.1.1. Обработка плоских поверхностей с фасонным дифференцируемым профилем в направлении вектора скорости обработки	122
4.1.2. Обработка цилиндрических поверхностей, имеющих отклонения от круглости	133
4.2. Физическое моделирование процессов обработки поверхностей одноинденторными инструментами упругого действия	140
4.2.1. Обработка плоских фасонных поверхностей с дифференцируемым профилем в направлении вектора скорости обработки	140
4.2.2. Обработка цилиндрических поверхностей при наличии отклонений от круглости	147
4.3. Критерии обеспечения технологической устойчивости процессов поверхностного пластического деформирования поверхностей деталей инструментами упругого действия	152
4.3.1. Обработка плоских поверхностей деталей с дифференцируемым фасонным профилем в направлении вектора скорости	152
4.3.2. Обработка цилиндрических поверхностей деталей с исходной продольной волнистостью или дифференцируемыми отклонениями от круглости	155
4.4. Программное обеспечение расчёта динамических характеристик процессов алмазного выглаживания инструментами упругого действия	161
4.5. Выводы к четвертой главе	163

ГЛАВА 5. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ С СИНТЕТИЧЕСКИМИ СВЕРХТВЁРДЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ	165
5.1. Параметрическая надёжность технологических систем обработки плоских поверхностей деталей из чугуна	165
5.1.1. Формирование шероховатости при обработке плоских поверхностей деталей торцевым фрезерованием композитом 10	165
5.1.1.1. Модели формирования параметров шероховатости	166
5.1.1.2. Параметрическая надёжность технологической системы торцевого фрезерования композитом 10 поверхностей деталей из чугуна	171
5.1.2. Формирование параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна в технологических системах торцевого фрезерования композитом 10 и алмазного выглаживания	174
5.1.2.1. Закономерности формирования параметров шероховатости поверхностей деталей алмазным выглаживанием	174
5.1.2.2. Модели формирования параметров шероховатости деталей алмазным выглаживанием после торцевого фрезерования композитом 10	185
5.1.2.3. Параметрическая надёжность технологической системы торцевого фрезерования композитом 10 и последующего алмазного выглаживания поверхностей деталей из чугуна	187
5.2. Параметрическая надёжность технологических систем обработке цилин- дрических поверхностей деталей из стали 45	190
5.2.1. Модели формирования параметров шероховатости и параметрическая надёжность чистового точения композитом 10 цилиндрических поверхностей деталей	190

5.2.2. Модели формирования параметров шероховатости и параметрическая надёжность алмазного выглаживания поверхностей деталей	195
5.2.3. Параметрическая надёжность комбинированной антифрикционной обработки цилиндрических поверхностей деталей по параметрам отклонений от круглости	199
5.3. Выводы к пятой главе	205

ГЛАВА 6. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СОЕДИНЕНИЙ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ И ПУТИ ЕЁ ПОВЫШЕНИЯ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ	208
6.1. Технологическое обеспечение триботехнических характеристик поверхностей цилиндрических деталей соединений трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой	208
6.2. Параметрическая надёжность триботехнологической системы по триботехническим характеристикам поверхностей деталей соединений трения скольжения	215
6.3. Формирование микрорельефов на поверхностях деталей поверхностным пластическим деформированием программным способом	221
6.3.1. Классификация микрорельефов, получаемых методом поверхностного пластического деформирования программным способом	221
6.3.2. Модели траектории движения инструмента при реализации микрорельефов	224
6.3.3. Формирование микрорельефов методом поверхностного пластического деформирования программным способом	228
6.4. Выводы к шестой главе	237

ГЛАВА 7. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЗАКОНОМЕРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ	239
7.1. Моделирование эксплуатационных воздействий на функциональные поверхности деталей в соединениях трения скольжения	240
7.2. Принципы технологического управления процессом формирования закономерно изменяющихся параметров качества поверхностей деталей	252
7.3. Способы управления процессом закономерного формирования параметров качества поверхности детали	258
7.4. Управление процессом закономерного формирования параметров качества поверхностей деталей на станках с программным управлением	263
7.5. Выводы к седьмой главе	273
ГЛАВА 8. ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ	275
8.1. Модели процессов диагностики технологических систем обработки поверхностей деталей по параметрам качества и эксплуатационных свойств	275
8.2. Аппаратно-программные средства, применяемые при диагностике технологических систем	283
8.3. Выводы к восьмой главе	286
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	288
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	294
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	296
ПРИЛОЖЕНИЯ	338
Приложение 1. Область факторного пространства и матрица планирования эксперимента типа 2^2 по исследованию процесса торцевого фрезерования композитом 10 плоских поверхностей деталей из чугуна	339

Приложение 2. Фрагменты профиля шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна, обработанных торцевым фрезерованием композитом 10, и относительные опорные кривые	340
Приложение 3. Таблицы П.3.1, П.3.2	341
Приложение 4. Область факторного пространства и матрица планирования эксперимента типа 2^{5-1} по обработке торцевым фрезерованием композитом 10 и алмазным выглаживанием плоских поверхностей деталей из чугуна	343
Приложение 5. Микропрофиль поверхностей деталей, обработанных торцевым фрезерованием композитом 10 и алмазным выглаживанием	344
Приложение 6. Профилограммы зон остаточной деформации микропрофиля поверхностей, обработанных торцевым фрезерованием композитом 10 последующим АВ	348
Приложение 7. Таблицы П.7.1, П.7.2	352
Приложение 8. Область факторного пространства и результаты моделирования формирования параметров шероховатости поверхностей деталей из стали 45 чистовым точением композитом 10	355
Приложение 9. Область факторного пространства и матрица планирования эксперимента типа 2^{8-4} от ПФЭ типа 2^8 по исследованию процесса алмазного выглаживания поверхности после точения композитом 10 и нанесения мягких прирабочных пленок	356
Приложение 10. Средние экспериментальные значения параметров шероховатости поверхности, полученные алмазным выглаживанием после точения композитом 10 и нанесения мягких прирабочных пленок	357
Приложение 11. Параметры моделей формирования характеристик шероховатости алмазным выглаживанием после точения композитом 10 и нанесения мягких прирабочных пленок	358
Приложение 12. Средние экспериментальные значения параметров отклонений от круглости поверхностей деталей, обработанных на разных этапах комбинированной антифрикционной обработки	360

Приложение 13. Область факторного пространства и матрица планирования эксперимента типа 2^{12-8} по исследованию триботехнологической системы формирования триботехнических характеристик поверхностей деталей	361
Приложение 14. Рисунки П.14.1, П.14.2, П.14.3, П.14.4	362
Приложение 15. Рисунки П.15.1, П.15.2, П.15.3	366
Приложение 16. Средние экспериментальные значения триботехнических характеристик, формируемых в триботехнологической системе	369
Приложение 17. Листинг программы «Синусоида»	370
Приложение 18. Характеристики физико-статистических моделей формирования параметров шероховатости плоских поверхностей деталей торцевым фрезерованием и алмазным выглаживанием	371
Приложение 19. Акт о внедрении результатов диссертационной работы	372
Приложение 20 Акт о внедрении результатов диссертационной работы	373

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

Одной из главных задач современного машиностроения является обеспечение высокой надёжности техники в период её эксплуатации. Решение этой задачи связано с совершенствованием и внедрением новых эффективных технологических процессов изготовления продукции, автоматизацией систем конструкторской и технологической подготовки производства, автоматизацией процессов контроля и диагностики качества продукции и др.

Одним из направлений повышения качества и надёжности продукции является применение высокопроизводительных технологий обработки поверхностей деталей машин, к которым относятся высокоскоростная обработка резанием инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов (ССТМ), отделочно-упрочняющая обработка (ОУО) поверхностным пластическим деформированием (ППД), в частности, алмазное выглаживание (АВ) и др.

Применение таких технологий обеспечивает высокую надёжность технологических систем и высокие точность и качество поверхностей деталей, что, в свою очередь, позволяет значительно повысить качество выпускаемой продукции. Поэтому, при решении вопросов повышения качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин актуальными являются исследования возможностей технологических систем обработки резанием и ППД поверхностей деталей с применением инструментов с ССТМ.

Исследования по влиянию на процессы формирования параметров качества и эксплуатационных свойств деталей машин различных технологических методов обработки и их условий ведутся по двум направлениям:

- 1) определение степени влияния условий обработки поверхностей деталей на их эксплуатационные свойства;
- 2) формирование эксплуатационных свойств в процессе обработки поверхностей деталей.

Второе направление является более перспективным.

Эффективность внедрения новой технологии обработки деталей зависит от полноты информации о её технологических возможностях. Отсутствие требуемых сведений в научной и справочной литературе затрудняет этот процесс. Нередко сведения о различных методах обработки носят общий рекомендательный характер и не дают возможности прогнозировать результаты обработки.

Анализ литературных источников показал, что для таких методов обработки поверхностей деталей из конструкционных материалов (сталь, чугун), как лезвийная обработка точением или фрезерованием с применением ССТМ, алмазное выглаживание и др., ощущается недостаток математических моделей влияния условий обработки (режимы, параметры качества поверхностного слоя (ПКПС) после предварительной обработки и др.) на формирование параметров качества поверхностей обрабатываемых деталей.

Это значительно затрудняет технологическую подготовку производства с использованием современных высокоэффективных систем автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки поверхностей деталей.

Для технолога важным является знание возможности какой-либо технологической системы (ТС) обеспечить требуемые показатели качества детали с максимальной (заданной) надёжностью.

Функционирующая ТС в определённых условиях может быть неработоспособной, если она не сможет с высокой вероятностью обеспечить требуемые параметры качества в заданных диапазонах их изменения. Поэтому для изготовления продукции с высокими показателями качества и надёжности необходимо обеспечить высокую надёжность самой ТС.

ГОСТ 27.004-85 регламентирует показатели надёжности технологических систем, в том числе вероятность выполнения ТС задания, или вероятность того, что в рассматриваемый интервал времени качество и количество выпускаемой ТС годной продукции и затраты на её изготовление будут соответствовать требованиям нормативно-технической или конструкторской документации.

В соответствии с ГОСТ 27.202-83 надёжность ТС может оцениваться по па-

раметрам качества продукции, по параметрам производительности ТС и по параметрам затрачиваемых ресурсов на изготовление продукции.

В настоящее время в научной и справочной литературе имеется весьма ограниченная информация по параметрической надёжности ТС формирования параметров качества поверхностей чистовыми и финишными методами обработки.

В связи с этим при решении задач технологического обеспечения заданных параметров качества поверхностей деталей машин и их эксплуатационных свойств безусловную **актуальность** приобретает проблема исследования возможностей чистовых и финишных ТС лезвийной обработки инструментами с ССТМ и ППД АВ (наряду с другими ТС) и определения их параметрической надёжности по требуемым показателям качества инженерными методами.

Степень разработанности научной проблемы. Анализ применяемых на практике подходов к реализации технологических процессов чистовой и финишной обработки деталей, литературных источников и нормативно-технической документации показал, что:

- недостаточно регламентированы требования к назначению технологических значений параметров шероховатости поверхностей деталей в технологической документации;

- отсутствуют единая научно-обоснованная методология и инженерные методы определения параметрической надёжности ТС чистовой и финишной обработки деталей по параметрам шероховатости и износостойкости обработанных поверхностей;

- отсутствуют рекомендации по реализации технологий обработки поверхностей деталей, в том числе в компьютеризированных ТС с возможностью управления изменением параметров качества в пределах технологического перехода, а также метрологического обеспечения.

Это позволяет констатировать актуальность и необходимость дальнейших исследований в этом направлении.

Цель работы: решение проблемы исследования и повышения надёжности технологического обеспечения параметров шероховатости и износостойкости по-

верхностей деталей при чистовой и финишной обработке инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов инженерными методами, разработанными на основе результатов технологических исследований.

В работе поставлены следующие задачи:

1. Разработать теоретические основы назначения в технологической документации интервальных значений параметров шероховатости поверхностей деталей, с учётом случайности их формирования, обеспечивающие выполнение конструкторских требований к ним с максимальной надёжностью.

2. Осуществить дальнейшую разработку научных основ методологии определения параметрической надёжности технологических систем чистовой и финишной обработки по параметрам качества поверхностей обрабатываемых деталей с применением методов имитационного моделирования.

3. Разработать алгоритмы и прикладное программное обеспечение для определения параметрической надёжности технологических систем методом имитационного моделирования на основе построения физико-статистических моделей формирования параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин как статистических основ современной методологии научных исследований в технологии машиностроения.

4. Разработать метрологическое обеспечение экспериментальных исследований на основе модернизации и компьютеризации отечественных средств измерений геометрических параметров качества и металлографического анализа поверхностей деталей в соответствии с политикой импортозамещения.

5. Установить влияние динамики процесса обработки ППД плоских и цилиндрических поверхностей деталей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости одноинденторными инструментами упругого действия на стабильность формирования геометрических параметров качества и разработать критерии оценки технологической устойчивости процесса ППД, характеризующей возможность обеспечения регламентируемых параметров шероховатости в допустимых пределах варьирования с максимальной надёжностью.

6. Определить для ТС лезвийной обработки и ОУО ППД плоских и цилинд-

рических поверхностей деталей инструментами, оснащёнными ССТМ, параметрическую надёжность формирования показателей качества и триботехнических характеристик поверхностей.

7. Реализовать ТС комбинированной обработки поверхностей деталей на основе применения чистовых методов лезвийной обработки инструментом с ССТМ, нанесения антифрикционных мягких медесодержащих прирабочных плёнок и финишной ОУО ППД алмазным выглаживанием и определить параметрическую надёжность ТС по параметрам шероховатости и триботехнических свойств обработанных поверхностей деталей.

8. Разработать новые технологии формирования микрорельефов на поверхностях деталей обработкой ППД программным способом в компьютеризированных ТС с ЧПУ, повышающие их триботехнические характеристики.

9. Создать классификацию видов нестабильных эксплуатационных воздействий на поверхности деталей в типовых соединениях трения скольжения по пространственным и временным критериям и разработать принципы и технологические средства управления процессом формирования параметров качества, закономерно изменяющихся по поверхности детали, с целью обеспечения постоянства требуемых параметров её износостойкости при переменных условиях эксплуатации, обусловленных видом нестабильности внешних воздействий.

10. На основе современной методологии научных технологических исследований разработать инженерный метод определения параметрической надёжности ТС механической обработки поверхностей деталей, базирующийся на программном методе экспресс-диагностики ТС (ЭДТС), адаптированный к использованию в условиях производственных экспериментально-технологических лабораторий.

Объектом исследования являются чистовые и финишные стадии технологических процессов обработки инструментами, оснащёнными ССТМ, плоских и цилиндрических поверхностей деталей, работающих в соединениях трения скольжения.

Предмет исследований. Взаимосвязи, закономерности и параметрическая

надёжность процессов технологического обеспечения геометрических параметров качества и износостойкости поверхностей деталей машин на стадиях чистовой и финишной обработки лезвийными и упрочняющими инструментами, оснащёнными ССТМ.

Научная новизна работы. Получено решение проблемы исследования и повышения параметрической надёжности ТС по обеспечению параметров шероховатости и эксплуатационных свойств (на примере износостойкости) поверхностей деталей при чистовой и финишной обработке инструментами, оснащёнными ССТМ, которое позволило получить следующие результаты:

- разработана научно-обоснованная методология определения параметрической надёжности ТС механической обработки деталей по параметрам качества поверхностей методом имитационного моделирования;

- разработаны модели влияния динамических свойств одноинденторных инструментов упругого действия при обработке ППД плоских и цилиндрических поверхностей деталей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости на формирование геометрических параметров качества и критерии оценки технологической устойчивости процесса ППД с учётом технологических факторов и конструктивных параметров инструмента;

- разработаны модели нестабильности эксплуатационных воздействий (нагрузка P , скорость относительного скольжения V) на поверхности трибоэлементов по характеру изменений во времени и в пространстве, позволяющие обосновать требуемую закономерность изменения значений параметров качества по поверхности детали, что позволит обеспечить её равномерный износ;

- разработаны модели и принципы программного управления процессом формирования параметров качества, значения которых закономерно изменяются по поверхности детали в соответствии с характером изменений эксплуатационных нагрузок, что позволит обеспечить равномерный износ поверхности.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методологической основы для исследования и повышения параметрической надёжности технологических систем, для которой:

– теоретически обоснована методология назначения технологических значений параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей, обеспечивающая выполнение требований конструкторской документации с заданной надёжностью;

– разработаны теоретические основы оценки параметрической надёжности ТС механической обработки по обеспечению параметров качества поверхностей деталей имитационным моделированием с построением физико-статистических моделей формирования параметров качества;

– разработано теоретическое обоснование необходимости управления формированием закономерно изменяющихся параметров качества и эксплуатационных свойств поверхности детали для обеспечения её равномерного изнашивания при изменяющихся эксплуатационных нагрузках на основе моделей контактных взаимодействий поверхностей деталей типовых соединений трения-скольжения;

– разработаны теоретические основы построения моделей изменения управляющих факторов в процессе обработки на основе физико-статистического моделирования процессов формирования параметров качества, в том числе с учётом механизма технологического наследования, позволяющие реализовать программное управление в ТС с ЧПУ обеспечением закономерно изменяющихся параметров качества поверхностного слоя.

Практическая значимость работы заключается:

– в реализации на основе полученных физико-статистических моделей возможности технологического управления геометрическими параметрами качества поверхностей деталей и их триботехническими характеристиками чистовой обработкой резанием с последующей финишной обработкой ППД инструментами, оснащёнными ССТМ, как без, так и с модификацией поверхности мягкими прирабочными плёнками;

– в возможности использования с целью выбора ТС из ряда альтернативных комплекса результатов исследований параметрической надёжности ТС лезвийной обработки и обработки ППД инструментами с ССТМ и комбинированной антифрикционной обработки по параметрам шероховатости плоских и цилиндриче-

ских поверхностей и износостойкости цилиндрических поверхностей деталей;

– в создании компьютеризированных измерительных систем оценки геометрических параметров качества поверхностей деталей и системы металлографического анализа;

– в реализации новых технологий формирования микрорельефов на поверхностях деталей обработкой ППД программным способом в ТС с ЧПУ;

– в реализации технологии формирования закономерно изменяющихся параметров качества по поверхности детали, с целью обеспечения её равномерного изнашивания при действии изменяющихся эксплуатационных нагрузок.

– в разработке и реализации программного метода экспресс-диагностики ТС по параметрам качества и триботехническим характеристикам поверхностей, включающей этапы планирования эксперимента, обработки деталей, измерения параметров качества и эксплуатационных свойств, построения моделей их формирования и оценки параметрической надёжности.

Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в ООО НПО «Группа компаний машиностроения и приборостроения», ЗАО «Клондайк электроникс», используются в учебном процессе в Брянском государственном техническом университете.

Часть результатов диссертационной работы получена при проведении научно-исследовательских работ при финансовой поддержке грантов Министерства образования и науки РФ по фундаментальным исследованиям в области машиностроения, выполненных в Брянском государственном техническом университете (Т00-6.3-360, Т02-06.3-579).

Методы исследований. Теоретические исследования выполнялись с использованием основных положений технологии машиностроения, инженерии поверхности, теории надёжности, теории вероятностей и математической статистики, теории математического моделирования, теории автоматического управления. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с применением станочного оборудования и современных измерительных систем с использованием методов планирования эксперимента и корреляционного анализа.

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с использованием как стандартных, так и авторских программ.

Положения, выносимые на защиту, включают:

1. Теоретические и методологические основы определения параметрической надёжности технологических систем механической обработки по параметрам качества обрабатываемых поверхностей деталей.

2. Теоретические основы назначения технологических значений параметров шероховатости поверхностей деталей в технологической документации, обеспечивающие выполнение требований конструкторской документации с заданной надёжностью.

3. Теоретическое обоснование влияния динамики процесса обработки ППД одноинденторными инструментами упругого действия плоских и цилиндрических поверхностей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости на формирование геометрических параметров качества, подтверждённые результатами физического моделирования.

4. Обоснование понятия технологической устойчивости процессов ОУО ППД поверхностей деталей инструментами упругого действия и критерии её оценки из условий безотрывности индентора от обрабатываемой поверхности.

5. Комплекс результатов исследований параметрической надёжности ТС лезвийной обработки (торцевое фрезерование, точение) и обработки ППД инструментами, оснащёнными ССТМ, плоских и цилиндрических поверхностей деталей по геометрическим параметрам качества.

6. Комплекс результатов исследований параметрической надёжности ТС обеспечения параметров износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин на основе комбинированной антифрикционной обработки, включая лезвийную обработку и ППД инструментами, оснащёнными ССТМ.

7. Концепцию программного управления процессом формирования закономерно изменяющихся значений параметров качества по поверхности детали, для обеспечения её равномерного изнашивания при действии изменяющихся эксплуатационных нагрузок.

8. Концепцию оценки параметрической надёжности ТС, базирующейся на программном методе экспресс-диагностики ТС по параметрам качества и эксплуатационных свойств поверхностей обрабатываемых деталей.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует областям исследований паспорта специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения»: п. 2 «Технологические процессы, ... , обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости», п. 3 «Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей...», п. 7 «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин».

Степень достоверности результатов исследований подтверждается адекватностью математических моделей, построенных с использованием реальных результатов исследований, удовлетворительным совпадением теоретических положений с результатами моделирования исследуемых процессов, а также согласованностью полученных результатов с исследованиями других авторов.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: V международная научно-техническая конференция «Обеспечение и повышение качества машин на этапе их жизненного цикла» (г. Брянск, БГТУ, 2005 г.); международная научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии» (г. Липецк, ЛГТУ, 2006 г.); международная научно-техническая конференция «Автоматизация технологических процессов и производственный контроль» (г. Тольятти, ТГУ, 2006 г.); международный научный симпозиум «Гидродинамическая теория смазки – 120 лет» (г. Орел, 2006 г.); VI международная научно-техническая конференция «Проблемы качества машин и их конкурентоспособности» (г. Брянск, 2008 г.); III международная научно-техническая конференция «Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения» (г. Брянск, БГТУ, 2011 г.); IV международная научно-техническая конференция «Наукоёмкие технологии в авиадвигателестроении» (г. Рыбинск, РГАТУ, 2012 г.); VII между-

народная научно-техническая конференция «Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения» (г. Брянск, БГТУ, 2015 г.); VIII международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии на современном этапе развития машиностроения» (г. Москва, МАДИ, 2016 г.); международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2016 г.); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» ICIE-2016 (г. Челябинск, 2016); международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития машиностроения» (г. Липецк, ЛГТУ, 2016); X Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, ТПУ, 2016); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» ICIE-2017 (г. Санкт-Петербург, 2017); международный научный симпозиум технологов-машиностроителей «Виброволновые процессы в технологии обработки высокотехнологичных деталей» (г. Ростов-наДону, ДГТУ, 2017 г.); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» ICIE-2018 (г. Москва, МПУ 2018); всероссийская научно-техническая конференция «Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем» (г. Курск, ЮЗГУ, 2019).

Диссертационная работа заслушана в полном объеме на заседании научно-технической секции международной научно-технической конференции «МК-16-М» в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (г. Липецк, 2016 г.); на научном семинаре «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений», посвященному 90-летию со дня рождения Рыжова Э. В. в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (г. Брянск, 2018 г.); на пленарном заседании научно-технической конференции «Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем» в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, 2019 г.); заседании кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж, 2019 г.); на расширенном заседании

учебно-научного технологического института ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (г. Брянск, 2019 г.).

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты исследований, основная часть которых выполнена лично автором, а часть в соавторстве с сотрудниками кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». С участием соавторов проводились отдельные экспериментальные исследования, разрабатывались компьютерные программы, предложены отдельные конструкторско-технологические решения по диагностике ТС.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 93 научных работы, в том числе 19 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 статей в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе Scopus, 4 монографии, 62 публикации в материалах научных конференций, 2 отчета по НИР.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 8 глав, основных выводов и результатов, списка литературы, включающего 349 наименований, 20 приложений. Диссертация выполнена на 374 страницах, содержит 144 рисунка, 18 таблиц.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Одним из важных факторов, определяющих качество и надёжность продукции машиностроения, являются эксплуатационные свойства (ЭС) применяемого технологического оборудования и оснастки – износостойкость базовых деталей, их контактная жёсткость, плотность соединений и др. Эти характеристики зависят от параметров качества функциональных поверхностей, к которым относятся геометрические и физико-механические параметры качества поверхностного слоя, точность размеров, погрешности формы [10, 11, 19, 21, 28, 29, 56, 57, 58, 67, 79, 90, 95, 96, 111, 112, 113, 168, 181, 185, 187, 188, 189, 190, 193, 197, 199, 200, 204, 207, 326, 328 и др.].

Применение какого-либо метода обработки для обеспечения регламентируемых ЭС поверхностей деталей машин должно быть детально обоснованным, что возможно только при проведении фундаментальных исследований.

В машиностроении на стадиях технической подготовки производства практикуются следующие схемы решения задач по технологическому обеспечению параметров качества и эксплуатационных характеристик изделий:

1) конструктор с целью обеспечения заданных параметров эксплуатационных свойств (ПЭС) поверхностей деталей устанавливает значения параметров качества поверхностного слоя (ПКПС) и допустимые пределы их изменения;

2) технолог разрабатывает технологический процесс и назначает условия обработки, обеспечивающие требуемые ПКПС с максимальной надёжностью.

Задача, решаемая технологом, является ответственной, так как из-за большого количества случайных факторов, оказывающих влияние на формирование ПКПС в процессе обработки деталей, надёжность их обеспечения различна не только для разных технологических систем (ТС) механической обработки, но и для одной и той же ТС в силу воздействия на неё как систематических (изнаши-

вание и др.), так и случайных (поломки, нарушение параметров настройки и др.) факторов. Решение этой задачи должно включать следующие этапы:

- 1) выбор методов обработки, обеспечивающих требуемые значения нескольких регламентируемых ПКПС или какого-то комплексного критерия;
- 2) проектирование технологического процесса с учетом технологической наследственности, обеспечивающего принятый критерий оптимальности;
- 3) назначение условий обработки, обеспечивающих требуемые или комплексный критерий.

В настоящее время в машиностроении при изготовлении деталей на заключительных этапах формирования ПКПС применяют множество технологических методов, к которым относятся высокоскоростная лезвийная обработка (токарная обработка, фрезерование) инструментами, оснащёнными синтетическими сверхтвёрдыми материалами (ССТМ), методы отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) поверхностным пластическим деформированием (ППД) (алмазное выглаживание, накатывание, вибронакатывание), модификация поверхностей износостойкими и приработочными плёнками и др.

Анализ научной и справочной литературы показывает, что, при большом количестве информации о различных технологических методах формирования ПКПС деталей машин, наблюдается недостаток данных, в том числе для перечисленных методов, позволяющих оценить их возможности обеспечить требуемые значения различных параметров качества и параметрическую надёжность.

Первая глава посвящена анализу вопросов, связанных с надёжностью технологического обеспечения ПКПС деталей машин чистовыми и финишными методами обработки. Рассматриваются показатели качества поверхностного слоя деталей; вопросы влияния ПКПС на эксплуатационные свойства функциональных поверхностей деталей машин; методы чистовой и отделочной обработки поверхностей деталей; анализируется современное состояние вопросов оценки параметрической надёжности ТС механической обработки.

На основе представленного анализа ставятся цель и задачи исследований.

1.1. Параметры качества, определяющие эксплуатационные свойства поверхностного слоя деталей машин

Влияние геометрических параметров качества на эксплуатационные показатели соединений деталей рассматривается в теории контактирования твёрдых тел, основные положения которой были разработаны в 30-х годах XX века. В молекулярно-механической теории трения и износа, предложенной Крагельским И. В. в 1939 г., учитывается дискретность контакта двух тел, связанной с наличием шероховатости, волнистости и макроотклонений поверхностей.

Дальнейшее развитие теория контактной деформации получила в работах Галина Л. А. [35], Лурье А. И. [108], Мухелишвили Н. И. [118], Штаермана И. Я [322] и др.

Для оценки параметров взаимодействия контактирующих тел предложены различные модели шероховатости поверхностей твердых тел. В качестве неровностей шероховатой поверхности Дёмкин Н. Б. [59, 60], Крагельский И. В. [95], и др. предложили рассматривать сферические сегменты; в трудах Крагельского И. В. [95 и др.] шероховатость моделировалась в виде стержней; эллипсоиды рассматривались в трудах Дьяченко П. Е. [67, 68], Рыжова Э. В. [181, 185]. Предложены модели шероховатости в виде пирамид (Хисакадо), конусов (Линг, Яшимото), цилиндров (Линкольн).

В работах Рыжова Э. В. отдельные микронеровности представлены в виде эллипсоидов, вершины которых характеризуются продольным и поперечным радиусами закругления, волнистость поверхности моделируется эллипсоидами и цилиндрами, макронеровности считаются описанными параболами [181]. В дальнейшем эти теоретические предпосылки были развиты в трудах Дёмкина Н. Б. [59, 60], Максака В. И. [110], Михина Н. М. [113], Рудзита Я. А. [179], Сулова А. Г. [204, 213 и др.] и др.

Исследования отечественных и зарубежных учёных (Галина Л. А. [35], Дёмкина Н. Б. [59, 60], Дьяченко П. Е. [67, 68], Крагельского И. В. [95, 96], Лурье А. И. [108], Максака В. И. [110], Михина Н. М. [113], Мухелишвили Н. И. [118],

Рудзита Я. А. [179], Рыжова Э. В. [186, 189], Сулимы А. М. [200], Сусллова А. Г. [204, 207], Штаермана И. Я. [322] и др.) показывают, что на эксплуатационные изменения поверхностных слоёв влияют геометрические параметры и физико-механические свойства поверхностей. Вопросы определения рациональной системы параметров качества поверхностей деталей, отражающей в полной мере их свойства, рассмотрены в работах Билика Ш. М., Витенберга Ю. Р., Дёмкина Н. Б., Дунина-Барковского И. В., Дьяченко П. Е., Комбалова В. С., Крагельского И. В., Лоповка Т. С., Маталина А. А., Рудзита Я. А., Рыжова Э. В., Сулимы А. М., Сусллова А. Г., Хусу А. И., Шнейдера Ю. Г. и др.

В работах этих и других учёных предлагается множество параметров, характеризующих состояние поверхностного слоя деталей и обосновывается их влияния на эксплуатационные свойства соединений деталей.

В работах Сусллова А. Г. [204, 207, 210 и др.] показано, например, что для расчётов контактной жёсткости достаточно иметь следующую систему параметров шероховатости: Ra , $Rmax$, Rp , tm , Sm и S , по которым могут быть определены значения параметров b , v , tp , ρ_m , Δ , характеризующих несущую способность шероховатости. Также в этих работах имеются данные по расчёту параметров контактного взаимодействия аналитическими и аналитико-экспериментальными методами. Аналитические расчётные зависимости включают до 20 и более параметров качества поверхностей двух контактирующих поверхностей, многие из которых носят вероятностный характер и имеют достаточно сложное метрологическое обеспечение, что затрудняет использование таких зависимостей для производственных целей.

Для аналитико-экспериментальных зависимостей исследуемые факторы выбираются на основе анализа физических явлений, происходящих при контактировании поверхностей, а параметры моделей определяются по результатам активных экспериментов, проводимых методами математической статистики [211].

В работе Сусллова А. Г. [204] определены 25 параметров качества поверхностного слоя деталей, влияющих на их эксплуатационные свойства: Ra , Rz , $Rmax$, Sm , S , tp , Rp , v , b , ρ_m , Δ , Wz , $Wmax$, Smw , $Hmax$, Hp , $H_{\mu 0}$, h_H , σ_{ocm} , $h_{\bar{o}}$, $I_{\bar{o}}$, ρ_D , C_{ϕ} , I , ϕ .

Метрологически обеспеченными являются 16 показателей: Ra , Rz , $Rmax$, Sm , tp , Rp , Wz , $Wmax$, Smw , $Hmax$, $H_{\mu 0}$, h_H , $\sigma_{ост}$, I_b , C_{ϕ} , I . Также определены технологически управляемые параметры качества: Ra , Rz , $Rmax$, Sm , Rp , Wz , $Wmax$, Smw , $Hmax$, $H_{\mu 0}$, h_H , $\sigma_{ост}$.

Научно обоснованный подход к нормированию качества поверхностей деталей предлагает для нормирования параметры Ra , Sm , Rp , Wz , Smw , $Hmax$, $H_{\mu 0}$, что указывает на несовершенство действующих стандартов, регламентирующие параметры качества поверхностного слоя деталей.

В работе Безъязычного В. Ф. [11] указывается, что в настоящее время нет единого мнения о степени влияния параметров поверхностного слоя (шероховатости, остаточных напряжений и наклёпа) на ряд эксплуатационных свойств.

Предлагаются зависимости, которые позволяют назначить значения управляющих факторов процессов обработки деталей, позволяющих обеспечить заданные эксплуатационные характеристики. Это подтверждает актуальность разработки моделей зависимости процессов формирования эксплуатационных характеристик поверхностей деталей от управляемых факторов технологических процессов на основе физико-статистического подхода.

В настоящее время под руководством проф. Сулова А. Г. активно развивается научное направление об инженерии поверхности, исследования в котором ведутся по пяти направлениям [203]:

- 1) определение оптимальной формы и качества поверхностного слоя деталей машин, исходя из их функционального назначения, предусматривающее установление взаимосвязи ЭС поверхностей деталей и их соединений с ПКПС;
- 2) технологическое обеспечение требуемой формы и качества поверхностного слоя деталей с наименьшей себестоимостью, предусматривающее физическое и математическое описание процессов формирования ПКПС;
- 3) исследование механизма технологического наследования формы и качества поверхностного слоя деталей и их изменения при эксплуатации для формирования равновесной шероховатости в процессе приработки;
- 4) модификация поверхностных слоёв деталей, основанная на применении

методов нанесения покрытий, ионной имплантации, плазменного и лазерного легирования поверхностей и других процессов;

5) разработка методов и средств контроля геометрических и физико-механических параметров качества поверхностного слоя деталей.

В ГОСТ 2789-73 определены следующие показатели шероховатости:

Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости от средней линии в пределах базовой длины;

Rz – высота неровностей профиля шероховатости по десяти точкам в пределах базовой длины;

$Rmax$ – наибольшая высота профиля шероховатости в пределах базовой длины;

Sm – среднее значение шага неровностей профиля шероховатости по средней линии в пределах базовой длины;

S – среднее значение шага местных выступов профиля шероховатости;

tp – относительная опорная длина профиля шероховатости на уровне p сечения профиля.

η_p – опорная длина профиля.

В ГОСТ 25142-82 регламентирован алгоритм расчёта этих геометрических параметров качества, а также параметров:

Rq – среднего квадратического отклонения профиля от средней линии;

Rp – высоты наибольшего выступа профиля шероховатости;

Rv – глубины наибольшей впадины профиля шероховатости;

λq – средней квадратической длины волны профиля шероховатости;

λa и λq – соответственно, средней и средней квадратической длины волны профиля шероховатости;

l_0 – относительной длины профиля шероховатости;

D – плотности выступов профиля шероховатости;

dy/dx или $tg \alpha_i$ – наклона профиля или тангенса углов наклона в любой точке профиля шероховатости;

Δa и Δq – соответственно, среднего арифметического и среднего квадрати-

ческого значения наклона профиля шероховатости.

Для оценки свойств поверхности широко применяется кривая опорной поверхности (кривая Аббота-Файрстоуна), построенная в относительных или в абсолютных координатах; параметры v и b начального участка кривой опорной поверхности; ρ – средний радиус кривизны вершины местного выступа профиля шероховатости; ρ_m – средний радиус кривизны выступов профиля шероховатости; Δ – безразмерный комплекс Крагельского-Комбалова и др. [11, 15, 59, 67, 79, 82, 83, 90, 95, 103, 113, 168, 181, 188, 189, 200, 204 и др.].

Также профиль шероховатости рассматривается как случайная функция, характеризующаяся спектральной плотностью микропрофиля поверхности, корреляционными функциями и др. [33, 39, 65, 313 и др.].

Волнистость поверхности оценивается параметрами, алгоритм расчета которых аналогичен алгоритмам расчета параметров шероховатости [79, 82, 203 и др.]:

Wa – среднее арифметическое отклонение профиля волн от средней линии в пределах базовой длины;

Wz – высота неровностей профиля волн по десяти точкам;

$Wmax$ – максимальная высота профиля волн;

Wp – высота сглаживания волнистости;

Sm_w – среднее значение шага профиля волн по средней линии;

tp_w – относительная опорная длина профиля волн и др.

Макроотклонение поверхности характеризуют такими параметрами, как: $Hmax$ – наибольшая высота макроотклонения; Hp – высота сглаживания макроотклонения (расстояние от средней линии профиля до огибающей [12, 82].

ГОСТ 24642-81 регламентировал отклонения от круглости цилиндрических поверхностей: отклонение от круглости EFK ; среднее арифметическое отклонение от круглости EFK_a ; среднее квадратическое отклонение от круглости EFK_q .

ГОСТ Р ИСО 4287-2014, регламентирует большее количество параметров для оценки структуры поверхности, по сравнению с ГОСТ 2789-73, а именно шероховатости R , волнистости W и исходного профиля P поверхности:

R_p, W_p, P_p – максимальная высота пика профиля;

R_v, W_v, P_v – наибольшая глубина впадины профиля;

R_z, W_z, P_z – максимальная высота профиля (идентичен параметру R_{max} по ГОСТ 2789-73);

R_c, W_c, P_c – средняя высота элементов профиля (идентичен параметру R_z по ГОСТ 2789-73);

R_t, W_t, P_t – общая высота профиля;

R_a, W_a, P_a – среднее арифметическое отклонение оцениваемого профиля (идентичен параметру R_a по ГОСТ 2789-73);

R_q, W_q, P_q – среднеквадратичное отклонение оцениваемого профиля;

R_{sk}, W_{sk}, P_{sk} – асимметрия оцениваемого профиля;

R_{qu}, W_{qu}, P_{qu} – эксцесс оцениваемого профиля;

R_{Sm}, W_{Sm}, P_{Sm} – средняя ширина элементов профиля (идентичен параметру S_m по ГОСТ 2789-73);

RA_q, WA_q, PA_q – среднеквадратичный угол наклона оцениваемого профиля;

$R_{mr}(c), W_{mr}(c), P_{mr}(c)$ – коэффициент смятия профиля (идентичен параметру tp по ГОСТ 2789-73);

R_{ac}, W_{ac}, P_{ac} – различие высоты среза профиля;

R_{mr}, W_{mr}, P_{mr} – относительный коэффициент смятия.

Переход к новой системе регламентации параметров структуры поверхности в производстве и для проведения научных исследований по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 является сложным процессом. Это связано с метрологическим обеспечением процессов измерения этих параметров и недостатком информации о взаимосвязи предлагаемых параметров с эксплуатационными параметрами и по выбору методов обработки поверхностей деталей.

К основным показателям, характеризующим физико-химическое состояние поверхностного слоя деталей относят:

$H_{\mu 0}$ – поверхностную микротвёрдость;

U_n, h_n – степень и глубину наклёпа поверхностного слоя;

$\sigma'_{ост}, \sigma''_{ост}$ – поверхностные остаточные макронапряжения 1-го и 2-го рода;

$h_{\sigma 0}$ – глубина залегания остаточных напряжений первого рода и др.

На значения этих показателей влияют структурно-фазовый (размер и форма зёрен; плотность дислокаций; размер блоков; концентрация и число фаз и др.) и химический состав материала детали [6, 71, 113, 190, 199, 204, 207, 308, 309].

Результаты исследования влияния ПКПС на ЭС деталей машин представлено во множестве научных работ. Проблемы изнашивания и повышения износостойкости соединений рассматриваются в работах Алексеева П. Г., Белого В. А., Гаркунова Д. Н., Крагельского И. В., Михина Н. М., Проникова А. С., Рыжова Э. В., Сулова А. Г. и др. При исследовании влияния физико-механических и геометрических параметров качества и физико-химических процессов, протекающих в поверхностном слое, на её износостойкость было установлено, что трение поверхностей определяется молекулярной составляющей, связанной с преодолением сопротивления в плёнке, и механической, связанной с деформированием и формоизменением подплёночного слоя. На механическую составляющую коэффициента трения большое влияние оказывает шероховатость поверхности.

Геометрические параметры качества поверхностей, в том числе параметры шероховатости и волнистости, существенно влияют на различные показатели ЭС деталей машин.

1. Интенсивность износа поверхностей деталей.

Большая часть деталей машин выходит из строя в результате их изнашивания в процессе трения [65, 207, 313 и др.]. В период нормального изнашивания интенсивность процесса разрушения поверхностных слоёв деталей может быть определена по зависимости [204, 207, 210]:

$$I_h = \frac{1,2 \pi p^{7/6}}{n \lambda t m^{3/2} H_{\mu 0}^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1 - \mu^2)(2\pi Ra W_z H_{max})^{1/3}}{E S m}}, \quad (1.1)$$

где n – число циклов нагрузок, приводящих к разрушению материала; p – номинальное давление на поверхность трения; λ – коэффициент, учитывающий влияние на изнашивание поверхностных остаточных напряжений; $t m$ – относительная опорная длина профиля шероховатости на уровне средней линии профиля; $H_{\mu 0}$ –

поверхностная микротвёрдость; μ – коэффициент Пуассона; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости от средней линии в пределах базовой длины; Wz – высота неровностей профиля волн по десяти точкам; $Hmax$ – наибольшая высота макроотклонения; E – модуль Юнга; Sm – среднее значение шага неровностей профиля шероховатости по средней линии.

2. Контактные деформации и контактная жёсткость.

Контактная жёсткость j определяется как отношение величины проекции силы P , стремящейся сформировать деталь, к величине y_k нормальных контактных перемещений двух деталей: $j = P / y_k$. Величина y_k при первом приложении нагрузки определяется как сумма пластических и упругих контактных деформаций поверхностных слоев двух деталей [204, 207]:

$$y_k = (y_{nl1} + y_{nl2}) + (y_{yn1} + y_{yn2}). \quad (1.2)$$

При действии нормальной силы P на плоский стык величина пластических деформаций составляет:

$$y_{nl} = \pi \sqrt[3]{\frac{2\pi P Ra Wz Hmax}{A H_{\mu 0}}}, \text{ [мкм]}, \quad (1.3)$$

где A – геометрическая площадь контакта.

Упругие деформации пропорциональны пластическим [82, 207, 210 и др.].

$$y_{yn} = 2\pi \frac{1-\mu^2}{E} H_{\mu 0} Sm \frac{y_{nl}}{Ra}, \text{ [мкм]}, \quad (1.4)$$

3. Несущая способность профиля определяется безразмерным комплексом Крагельского-Комбалова:

$$\Delta = \frac{Rmax}{\rho_m b^{1/v}} \text{ или } \Delta = \left(\frac{100}{tp} \right)^{1/v} \frac{Rp}{\rho_m}, \quad (1.5)$$

b и v – параметры начального участка кривой опорной поверхности; ρ_m – средний радиус кривизны выступов профиля шероховатости.

Чем меньше комплекс Δ , тем выше несущая способность профиля шероховатости поверхности [210].

4. Поверхностная контактная статическая и динамическая прочность.

При действии статической P_{cm} и динамической P_d составляющих нагрузки на поверхностный слой детали контактные разрушения поверхности определяются величиной накапливаемой контактной деформации, которая может определяться по зависимости [207, 217]:

$$y_t = \sqrt[3]{\frac{2\pi(P_{cm} + P_d)Ra Wz Hmax}{AH_{\mu 0}} \left(\frac{t}{t_{HB}}\right)^m}, \quad (1.6)$$

где t – время действия сил; t_{HB} – время испытания на твердость по Бринеллю; m – показатель роста деформаций при действии динамической нагрузки; A – геометрическая площадь контакта поверхностей деталей.

5. Статическая и усталостная прочность.

Неровности, образующиеся на поверхности деталей при их обработке, являются концентраторами напряжений и служат одним из факторов снижения предела выносливости. Коэффициент концентрации напряжений для поверхностей деталей, полученных методами механической обработки, определяется соотношением [204, 207]:

$$\alpha_0 = 1 + \frac{200}{tmSm} \sqrt{2\gamma Rmax(Rmax - Rp)}. \quad (1.7)$$

γ – коэффициент, учитывающий влияние на прочность детали поверхностных остаточных напряжений.

6. Коррозионная стойкость.

Комплексный параметр, характеризующий скорость коррозии поверхностного слоя нетермообработанной детали после механообработки, определяется эмпирической зависимостью [204, 207]:

$$v_k = v_{k0} \left(1,1U_n^4 + 4U_n^3 - 4,1U_n^2\right) \left(28 \cdot 10^6 \frac{Rmax - Rp}{tm^2 Sm^2}\right)^n, \quad (1.8)$$

где v_{k0} – скорость коррозии материала детали до механической обработки; U_n – степень наклёпа поверхностного слоя ($U_n = 1,0 \dots 1,75$); n – коэффициент, зависящий от условий корродирования [33, 65, 66 и др.].

7. Герметичность соединений.

Согласно закону Дарси о фильтрации жидкостей и газов в пористой среде величину утечки Q через сопрягаемые поверхности можно определить по формуле [207, 217]:

$$Q = 0,0066 \frac{\pi D \Delta p k}{\mu' l} H, \quad (1.9)$$

где D и l – размеры соединения; Δp – перепад давления; k – коэффициент проницаемости; μ' – динамический коэффициент вязкости жидкости или газа; H – толщина пористого слоя сопрягаемых поверхностей под нагрузкой, зависящая от параметров качества сопрягаемых поверхностей деталей 1 и 2:

$$H = 0,5(Hmax_1 + Hmax_2 + Wz_1 + Wz_2) + Rp_1 + Rp_2 - y_k, \quad (1.10)$$

где y_k – контактная деформация сопрягаемых поверхностей, определяемая по зависимости (1.2).

8. Прочность посадок с натягом.

Под прочностью посадок с натягом S понимается способность передавать сопрягаемыми деталями крутящий момент $M_{кр}$ и осевые нагрузки P без взаимного проскальзывания деталей. Прочность соединений определяется величиной приведенного натяга \bar{S} , учитывающего шероховатость, волнистость и макроотклонения поверхностей вала 1 и втулки 2 [82, 207, 217 и др.]:

$$\bar{S} = S - 0,5(Hmax_1 + Hmax_2 + Wz_1 + Wz_2) - Rp_1 - Rp_2. \quad (1.11)$$

Можно привести еще множество примеров влияния ПКПС на различные ЭС деталей, такие как аэро- и гидродинамическое сопротивление тел, обтекаемость жидкостью и газом, теплопроводность соединений, электрическую проводимость и электроконтактное сопротивление, магнитные свойства, отражение электромагнитных волн и света от поверхности, радиационные свойства и др. Также можно отметить влияние ПКПС на такие функциональные показатели изделий, как вибрационная активность, точность измерений, маслоёмкость поверхности, смазочная способность эластогидродинамических смазочных материалов, различные экономические и технические характеристики при назначении технологических режимов и др.

Изложенное позволяет констатировать, что эксплуатационные свойства де-

талей машин в значительной степени зависят от следующих параметров качества поверхностного слоя: Ra , Rz , Rp , Sm , tp , ρ_m , Wa , $Wmax$, Smw , $Hmax$, $H_{\mu 0}$, U_n , h_n , σ_0 , $h_{\sigma 0}$.

Эти параметры являются основными при выборе системы характеристик, определяемых в конструкторско-технологической документации.

Знание закономерностей комплексного и отдельного влияния ПКПС детали на их ЭС позволяет оптимизировать техпроцессы изготовления деталей.

1.2. Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей

Зависимость параметров износостойкости, как одного из важнейших эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин, от ПКПС с одной стороны и зависимость ПКПС от условий обработки (метод, режимы и др.) с другой обуславливают тот факт, что решение проблемы обеспечения износостойкости типовых соединений деталей машин, в частности, цилиндрических соединений трения скольжения, в настоящее время сводится к решению двух задач [24, 40, 57, 112, 182, 183, 188, 207 и др.]:

1) конструкторская задача, связанная с выбором материалов деталей, определению их размеров и точности, назначению параметров качества поверхностного слоя и допустимых интервалов их варьирования, что обеспечивает необходимые триботехнические характеристики соединений;

2) технологическая задача обеспечения точности размеров и ПКПС деталей, назначенных в конструкторской документации.

Решение этих задач базируется на результатах многочисленных работ отечественных и зарубежных учёных (Алексеева П. Г. [6], Базрова Б. М. [57], Белого А. А. [17], Буше Н. А. [27], Бутенко В. И. [25], Васильева А. С. [28, 55, 153], Гаркунова Д. Н. [36, 37], Горленко О. А. [41, 182, 188], Дальского А. М. [55, 57, 58, 153, 207], Добычина Н. М. [94], Елизаветина М. А. [71], Киричека А. В. [86], Клименко С. А. [187, 215], Комбалова В. С. [90, 94], Костецкого Б. И. [92], Крагель-

ского И. В. [94, 95, 96], Маталина А. А. [111, 112], Михина Н. М. [96, 113], Погоньшева В. А. [162], Проникова А. С. [168, 170], Рыжова Э. В. [180 – 189], Смелянского В. М. [190, 191], Соколовского А. П. [193], Старкова В. К. [197], Сулиммы А. М. [199, 200], Сулова А. Г. [201 – 204, 207, 210], Ящерицина П. И. [325 – 328], Боудена Ф. П. [21], Брюмерхофа Р. [330], Казихико Е. [338], Кита Х. [339], Мейснера Ф. [94], Палича Г. [347], Польцера Г. [163], Салье Е. [348], Тейбора Д. [21] и др.). Эти результаты используют при назначении условий технологического процесса изготовления детали.

На формирование эксплуатационных свойств поверхностей деталей существенное влияние оказывает ряд факторов: 1) выбор эффективных технологических методов обработки на завершающей стадии технологического процесса; 2) параметры качества поверхностного слоя; 3) механизм технологического наследования; 4) надёжность технологического обеспечения параметров качества и др. Также на ЭС поверхностей влияет ряд эксплуатационных факторов, действующих на сопрягаемые поверхности соединений (скорость относительного скольжения, нагрузка на сопряжение, вид смазки, температура и др.).

В работах [58, 182, 186, 207, 217 и др.] показано, что формирование ЭС поверхностей деталей машин во многом определяется на заключительных этапах технологического процесса механической обработки: чистовых и финишных операциях. Развитие технологий чистовой и финишной обработки осуществляется на основе применения механических, электрофизических и комбинированных методов воздействия на поверхность детали. К таким методам относят методы ОУО ППД, обработку с использованием лазерного излучения (лазерное легирование поверхности), финишную антифрикционную безабразивную обработку (ФАБО) поверхности [37, 106], обработку с нанесением твердых износостойких покрытий [162, 187, 307 и др.], комбинированные методы обработки (ФАБО + ППД; нанесение покрытий + ППД [155, 218 и др.]).

Важнейшим фактором повышения эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей является рациональный выбор методов чистовой и финишной обработки.

В работе [235] указывается, что для повышения износостойкости поверхностей деталей наиболее эффективным является обработка ППД, которая обеспечивает улучшение физико-механических свойств поверхностного слоя, изменение знака величины остаточных напряжений, формирование заданных параметров шероховатости поверхности.

В многочисленных научных работах и справочной литературе [82, 83, 155, 162, 195, 196, 219, 220, 320, 321 и др.], в которых рассматриваются технологические особенности и представлены рекомендации по применению различных методов ОУО ППД, показано, что на формирование ПКПС наибольшее влияние оказывают следующие факторы:

- физико-химические свойства обрабатываемого материала (химический состав, структура, твёрдость и др.);
- взаимодействие материалов обрабатываемой детали и инструмента;
- условия и режимы обработки: подача, скорость, сила деформирования, геометрия деформирующей части инструмента, вид смазочно-охлаждающего технического средства (СОТС) и др.);
- вибрации деформирующего элемента инструмента относительно обрабатываемой поверхности и изменения значения силы обработки, в значительной мере определяемые жёсткостью ТС.

В работах Смелянского В. М. [190, 191] закономерности формирования поверхностного слоя деталей методами ППД (обкатывание и алмазное выглаживание) рассмотрены с позиции механики деформируемых сред. В предложенных моделях ключевыми факторами для оценки качества поверхностного слоя являются степень сдвиговой деформации и исчерпания ресурса пластичности материала, тензор остаточных напряжений.

Эффективность применения методов технологического обеспечения ЭС поверхностей деталей возрастает при проектировании технологических процессов с учетом технологической наследственности, вопросы влияния которой на формирование ПКПС при обработке деталей рассматриваются в работах Аверченкова В. И., Базрова Б. М., Васильева А. С., Дальского А. М., Рыжова Э. В., Сулова А. Г.,

Ящерицына П. И. и др. [56, 57, 58, 207, 209, 328 и др.].

Технологическая задача назначения условий обработки решается на основе использования зависимостей, оценивающих влияние факторов обработки для выбранных методов технологического воздействия на ПКПС обрабатываемой детали. Построение таких зависимостей осуществляется на основе физико-статистического моделирования процессов обработки, связанного с планированием, реализацией и обработкой результатов активного эксперимента [151, 217, 279, 286]. Результаты исследований ТС на основе такого подхода представлены в работах [1, 17, 24, 82, 83, 113, 119, 154, 155, 162, 182, 186, 188, 189, 195, 196, 197, 207, 210, 217, 230, 235, 286 и др.], где представлены модели формирования ПКПС и ПЭС в зависимости от условий методов обработки (лезвийных, отделочно-упрочняющих, комбинированных), а также от условий эксплуатации в процессе приработки.

Одним из направлений научных исследований ТС является имитационное моделирование процессов обработки, позволяющее строить статистические зависимости, отражающие связи между управляющими факторами процессов обработки и функциями отклика (ПКПС и ПЭС) [4, 210, 217 и др.].

Следует отметить, что при решении конструкторских задач обеспечения требуемой износостойкости эксплуатационные факторы воздействия на поверхности деталей (нагрузка, скорость и др.) рассматриваются, как постоянно действующие по величине и во времени и в пространстве (по поверхности).

При решении технологических задач обеспечения требуемой износостойкости условия и режимы обработки назначаются постоянными в рамках одного технологического перехода. В соответствии с ГОСТ 3.1109-82 технологический переход рассматривается как «...законченная часть технологической операции, выполняемой одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах...». При современном развитии ТС обработки деталей на основе применения микропроцессорной техники такое определение технологического перехода является устаревшим.

Таким образом, решение конструкторско-технологических задач обеспече-

ния ЭС деталей машин должно осуществляться с учётом нестабильности эксплуатационных воздействий на функциональные поверхности и с учётом возможностей ТС с ЧПУ обеспечить изменение значений параметров обработки в рамках одного технологического перехода.

Применение методов обработки ППД в таких ТС расширяет их технологические возможности, так как управление режимами обработки в пределах технологического перехода позволяет обеспечить требуемый закон изменения ПКПС, а значит и ПЭС, что является актуальным при обработке поверхностей деталей, работающих в изменяющихся условиях эксплуатации, и является резервом повышения долговечности соединений [217]

1.3. Методы чистовой и финишной обработки поверхностей деталей машин инструментами, оснащёнными синтетическими сверхтвёрдыми материалами

Каждый технологический метод обработки поверхностей деталей характеризуется отличительными особенностями («почерком»), оцениваемыми количественно и качественно. Характеристики метода определяются возможностями формирования различных параметров качества деталей при их обработке (диапазон значений): формы неровностей микропрофиля поверхности, высотные и шаговые характеристики, степень и глубина наклёпа и др.

Поэтому для формирования требуемых свойств поверхностного слоя необходимо осуществлять обоснованный выбор методов обработки и их последовательности в проектируемых технологических процессах.

Распространённым способом финишной обработки поверхностей деталей машин является алмазно-абразивная обработка, отличающаяся высокой производительностью, большими скоростями резания, силовым и термическим воздействием на поверхность заготовки (шлифование кругами, брусками, конечными и бесконечными лентами, средами (магнитно-абразивная обработка) и др.).

Вероятностная природа процесса шлифования обуславливает сложность обеспечения требуемых ПКПС деталей. Это связано с нестабильностью физико-

механических свойств абразивных материалов; разнообразием форм абразивных зёрен одной зернистости; неравномерное распределение зёрен на поверхности абразивного инструмента и др.

Большие силы резания и высокая температура в зоне резания приводят к образованию остаточных растягивающих напряжений, отрицательно влияющих на ПКПС деталей. Устранить эти явления позволяет уменьшение скорости резания, что снижает производительность шлифования.

Избежать значительных температурных деформаций и других нежелательных явлений позволяет применение в качестве режущего материала синтетических сверхтвёрдых материалов (ССТМ) на основе плотных модификаций нитрида бора. Применение ССТМ в инструментах позволило разработать новые технологии обработки деталей на основе высокоскоростного точения и фрезерования [23, 24, 105, 176, 197, 216, 228, 229 и др.].

Главными достоинствами таких методов являются высокие производительность обработки и стойкость инструмента, низкая теплонапряжённость и энергоёмкость, низкие значения параметров шероховатости и макроотклонений, что позволяет обеспечить высокие ЭС поверхностей деталей. Применение инструментов с ССТМ при лезвийной обработке дает возможность обеспечить ПКПС деталей машин в широком диапазоне варьирования, что расширяет возможности применения этих методов.

В настоящее время для этих методов обработки имеется недостаточно информации об их параметрической надёжности по параметрам качества и эксплуатационным свойствам поверхностей деталей в заданных интервалах их варьирования, которые можно рекомендовать для практического применения в производственных условиях.

Важная роль в формировании ПКПС и ЭС деталей машин принадлежит методам ОУО ППД. Исследованиям методов ППД посвящено большое количество работ: Алексеева П. Г., Аскинази Б. М., Балтера М. А., Баумана В. А., Белова В. А., Браславского В. М., Бутенко В. И., Витенберга Ю. Р., Горленко О. А., Елизаветина М. А., Жасимова М. М., Киричека А. В., Коновалова Е. Г., Кузнецова В. П.,

Одинцова Л. Г., Отения Я. Н., Папшева Д. Д., Проскуракова Ю. Г., Рыжова Э. В., Смелянского В. М., Сулова А. Г., Торбило В. М., Фёдорова В. П., Хворостухина Л. А., Чепы П. А., Шнейдера Ю. Г. и др.

В зависимости от материала и формы упрочняющих элементов инструментов, кинематики их движения при ППД различают методы накатывания или обкатывания, выглаживания, виброобработки, динамического упрочнения, электро-механического упрочнения, комбинированной обработки [82, 83, 235, 237 и др.]. Обработка осуществляется инструментами жёсткого или упругого действия.

Распространёнными являются методы накатывания (обкатывания) и выглаживания инструментами упругого действия. Использование жёстких инструментов при высокой точности обработки может приводить к резкому росту сил при неравномерных припусках. Это значительно повышает стоимость предварительной обработки в силу ужесточения требований к её точности.

Процесс накатывания или выглаживания связан с изменением текстуры поверхностного слоя детали деформирующим индентором. При внедрении индентора в материал обрабатываемой поверхности на определённую глубину формируется локального очага деформации, характеристики которого зависят от силовых параметров процесса.

Накатывание (обкатывание) роликами или шариками позволяет получать поверхности с низкой шероховатостью, благодаря движению индентора в условиях трения качения с проскальзыванием и относительно малого нагрева поверхностей. Высокая производительность метода, простота инструмента позволяет производить обработку в условиях любого производства на любом оборудовании.

Эффективным технологическим направлением повышения ресурса машин является алмазное выглаживание (АВ) инструментом, в котором в качестве индентора применяется кристалл природного или синтетического алмаза или поликристалл на основе плотных модификаций нитрида бора [38, 52, 72, 154, 155, 161, 162, 216, 223, 235, 309, 310 и др.].

Основными достоинствами АВ являются физико-механические свойства (высокая твёрдость, низкий коэффициент трения по металлу) и теплостойкость

алмазного индентора. Высокие удельные давления, создаваемые при АВ, позволяют обрабатывать материалы с высокой твёрдостью при радиусах вершины индентора 1 – 4 мм и силе выглаживания 50 – 300 Н. Метод также отличается высокой производительностью и простотой технологической оснастки.

В последнее время растёт количество теоретических исследований динамики процессов выглаживания, в том числе с позиций нелинейной механики, к которым относятся работы Бутенко В. И., Заковоротного В. Л., Минакова В. С., Кузнецова В. П., Ханукаева М. М. и др. [25, 74, 75, 99, 100, 101]. В этих работах показано значительное влияние динамических характеристик ТС и устойчивости процесса обработки на формирование параметров качества обрабатываемых поверхностей и на основе анализа сигнала виброакустической эмиссии, предложен метод обеспечения рациональных параметров настройки процесса. Предложен алгоритм настройки, который для обеспечения заданного качества формируемой поверхности должен учитывать геометрические параметры поверхности детали, её физико-механических свойств и характеристики конкретного выглаживателя.

Устойчивость процессов ППД и, в частности АВ, и её влияние на качество обрабатываемой поверхности достаточно рассматривается в работах [25, 75 и др.], в которых показано, что с целью формирования покрытий в ТС упрочняющей обработки следует использовать специальный критерий, зависящий от характеристик спектра на значимых частотах виброакустического сигнала.

В работах Кузнецова В. П. [99, 100, 101] приводятся результаты комплексных исследований наноструктурирующего выглаживания поверхностей прецизионных деталей при малых скоростях обработки, которые охватывают вопросы от его теоретического обоснования и моделирования до создания специальных патентозащищенных инструментов и исследования их технологических возможностей. В частности, разработана модель нелинейной динамики наноструктурирующего выглаживания, которая позволяет устанавливать взаимосвязь масштабного коэффициента пластического структурообразования и технологических параметров процесса с развитием автоколебаний инструмента.

Несмотря на большое количество исследований процессов алмазного вы-

глаживания, ощущается недостаток данных по параметрической надёжности ТС обработки АВ поверхностей деталей машин.

Новые перспективы использования методов обработки ППД открываются в связи с использованием оборудования с компьютерными системами ЧПУ. Их применение позволяет получать различные микрорельефы на поверхности без специальной технологической оснастки программным путём.

1.4. Антифрикционная обработка поверхностей деталей машин.

Совершенствование существующих и синтез новых технологических систем

Эффективным технологическим методом, обеспечивающим высокую износостойкость поверхностей деталей, является нанесение прирабочных плёнок из мягких материалов на поверхность. Прирабочная плёнка на поверхности детали даёт возможность использования менее дорогостоящего материала детали [36, 159]. Применяют мягкие металлы с низкой прочностью среза (Pb, Cd, Cu, Sn, Zn) или их сплавы в виде тонкого слоя на поверхности деталей. Материалы, содержащие медь (Cu), являются предпочтительными, так как при наличии поверхностно-активных веществ в зоне трения медь может привести к инициализации избирательного переноса [36].

Сократить процесс приработки поверхностей в соединениях и повысить износостойкость деталей машин позволяет финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО), получившая развитие в исследованиях Белого А. А., Бутенко В. И., Гаркунова Д. Н., Лозовского В. Н., Полякова А. А. и др. [17, 25, 36, 37, 106].

В процессе ФАБО на поверхность детали фрикционным [98] или электрофрикционным [19] способами наносится плёнка из медесодержащего материала с поверхностно-активными веществами, которые для пары трения-скольжения, работающей со смазкой, определяют переход ее в режим избирательного переноса. Легирующие элементы материала пленки, растворяясь, уходят в смазку, а атомарная медь формирует тонкую плёнку на поверхности [36 и др.].

В процессе ФАБО прутков из медесодержащего материала $\varnothing 6...8$ мм, прижимается к поверхности обрабатываемой детали с давлением до 200 МПа при скорости перемещения прутка относительно поверхности образца до 6 м/с [16, 36, 162 и др.].

В работе Погонишева В. А. [162] представлены рекомендации, позволяющие назначить оптимальные режимы нанесения плёнок пластичных металлов на поверхности деталей: для латунной плёнки – $P = 80$ МПа, $V = 0,48$ м/с; цинковой – $P = 60$ МПа, $V = 0,43$ м/с; оловянной – $P = 35$ МПа, $V = 0,35$ м/с. Шероховатость поверхности, на которую рекомендуется наносить пленку, характеризуется параметром $Ra = 0,08...1,5$ мкм..

Качество покрытия при ФАБО определяется сплошностью плёнки, полученной после ФАБО на поверхности детали. В работах [36, 187, 307 и др.] указывается, что на сплошность плёнки влияет шероховатости поверхности. Оптимальными значениями являются параметры шероховатости $Ra = 0,08...0,16$ мкм. Такие параметры обеспечиваются с высокой надёжностью обработкой резанием инструментом из ССТМ.

Формирование микрогеометрии поверхности, обеспечивающей требуемые триботехнические характеристики соединения решается методами ОУО ППД, в частности, алмазным выглаживанием. Отсюда вытекает общая схема эффективной антифрикционной обработки: «чистовая лезвийная обработка – нанесение мягкой прирабочной плёнки – финишная обработка ППД».

Основой для совершенствования известных технологических методов обработки и создания новых является концепция целенаправленных воздействий на поверхностные слои детали, кинематического, силового, температурного и химического характера, исходя из их дальнейшего функционального назначения [207, 208]. В рамках такой концепции финишную обработку поверхностей трения деталей можно рассматривать как процесс приработки, обеспечивающий их равновесное состояние. Поэтому процессы, протекающие при обработке деталей, актуально рассматривать с позиций триботехнологии, в которой рассматриваются вопросы формирования параметров качества поверхностей деталей узлов трения и кри-

терием оптимальности применяемых технологических методов являются не ПКПС, а триботехнические характеристики поверхностей (коэффициент трения, интенсивность износа, путь приработки, задиростойкость, ресурс) [36, 234 и др.].

Функциональные поверхности деталей, работающих в условиях изменяющихся эксплуатационных характеристик (скорость, нагрузка, температура) должны обладать быстрой прирабатываемостью. Для формирования поверхностных слоев с быстрой прирабатываемостью и высокими триботехнологическими характеристиками необходимо создание новых технологий обработки деталей.

Одним из способов решения таких задач является концепция единства технологий изготовления и эксплуатации деталей [207, 217]. Обработка поверхностей деталей трения деталей на финишных этапах осуществляется на режимах, моделирующих ускоренный процесс их приработки. Главной задачей при этом является обоснованное определение значений управляющих факторов технологического процесса или их изменения в процессе обработки с учетом функционального назначения детали.

В работе [191] обработка и эксплуатация поверхности детали рассматривается как единый процесс, связанный с исчерпанием ресурса пластичности металла. Такой подход автор предлагает применить для методов ППД и механической обработки резанием в рамках теории технологического наследования и рассматривая процессы нагружения металла на всех этапах изготовления детали: производство заготовки, механической обработки, эксплуатации.

Эффективным является закономерное изменение при обработке поверхности детали параметров качества поверхностного слоя в пределах технологического перехода. Так, в работе Горленко А. О. [40] представлены результаты исследований по повышению износостойкости криволинейных поверхностей трения за счёт управления режимами электромеханической обработки, что позволило закономерно изменять показатели качества.

В настоящее время число исследований в этом направлении весьма ограничено, что сдерживает применение таких методов обработки.

1.5. Средства измерения и контроля параметров качества поверхностей деталей машин

Измерение и расчёт параметров качества поверхностей деталей машин позволяют осуществлять различные средства метрологического контроля: профилографы-профилометры, кругломеры, микротвердомеры, адгезиометры и т. д., большинство из которых построены на базе микропроцессорных комплектующих.

Нередко, недостатком средств измерения параметров качества поверхностей является их ограниченная возможность, связанная с измерением небольшого количества параметров [79, 217 и др.].

Расширить возможности измерительных средств позволяет создание измерительно-информационных систем на базе ПЭВМ. Их применение позволяет обеспечить эффективное управление процессами обработки деталей за счёт повышения скорости процессов измерений показателей качества и обработки и представления информации.

Несмотря на большое количество применяемых средств измерений геометрических параметров качества поверхностей деталей необходима разработка измерительно-информационных систем за счет модернизации отечественных средств измерения.

Решение этой задачи возможно на основе их компьютеризации. Это позволит производить измерение геометрических параметров качества поверхностей (регламентированных стандартами и исследовательских) как в лабораторных, так и в цеховых условиях с параллельной обработкой и представлением полученной информации в наглядной форме, статистическую обработку данных и т. п.

Это относится к средствам измерения шероховатости, отклонений от круглости, а также к средствам микроскопического анализа поверхностного слоя деталей машин.

1.6. Оценка параметрической надёжности технологических систем

Анализ надёжности различных изделий машиностроения в процессе эксплуатации показывает, что до 40 % их отказов относятся к отказам производственным [168 и др.]. В работах Проникова А. С. [168, 169] выделены три группы причин возникновения отказов, связанных с несовершенством производственных технологий (рисунок 1.1).

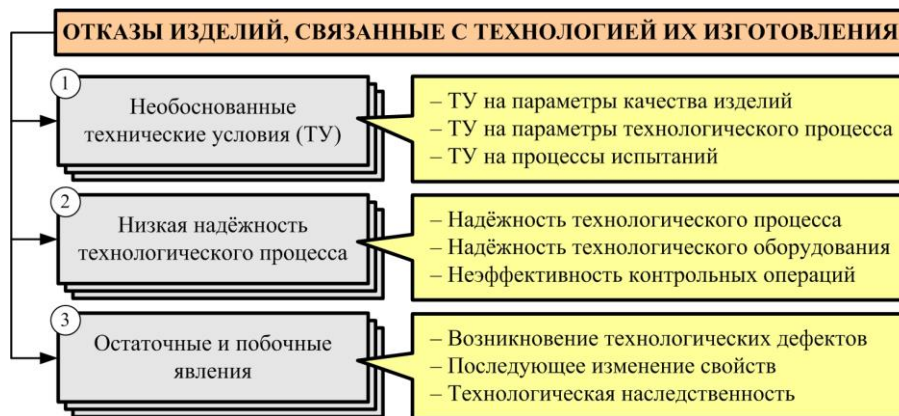


Рисунок. 1.1 – Классификация производственных отказов изделий машиностроения

Таким образом, актуальными являются вопросы повышения качества самих технологических процессов или их параметрической надёжности.

Согласно ГОСТ 27.002-2015, надёжность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортировки.

На стадии технической подготовки производства должны решаться конструкторские и технологические задачи обеспечения надёжности изделия.

На этапе проектирования по условиям эксплуатации определяются критерии надёжности изделия, зависимость её от ЭС поверхностей деталей, зависимость ЭС от ПКПС и влияние условий обработки деталей на значение формируемых ПКПС. Такой подход к обеспечению надёжности изделия в процессе технической подготовки производства отражён в работах [111, 112, 168, 169].

При технологической подготовке производства решаются задачи надёжного

технологического обеспечения показателей качества изделия. При этом осуществляется выбор методов обработки, определяются условия обработки деталей в ТС и оценивается вероятность технологического обеспечения регламентируемых в конструкторской документации параметров качества.

Надёжность ТС – это свойство выполнять заданные функции, сохраняя показатели качества продукции в заданных пределах и ритм её выпуска, в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки [213].

В ГОСТ 27.004-85 технологическая система рассматривается как совокупность средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения требуемых технологических процессов или операций. ТС может находиться в работоспособном или неработоспособном состоянии, при котором хотя бы один показатель качества продукции не соответствует требованиям конструкторско-технологической документации.

Таким образом, выпуск качественной продукции возможен при условии высокой параметрической надёжности ТС.

К основным показателям надёжности ТС, в соответствии с ГОСТ 27.004-85, относится вероятность выполнения ТС задания – то есть, вероятность того, что в рассматриваемый интервал времени объём выпуска ТС качественной продукции и затраты на её изготовление будут соответствовать требованиям нормативно-технической документации (НТД).

Для оценки надёжности ТС ГОСТ 27.202-83 устанавливает критерии отказов систем по параметрам производительности, по параметрам затрачиваемых ресурсов и по параметрам качества изготавливаемой продукции.

Известно, что в процессе механической обработки на формирование параметров качества обрабатываемой поверхности оказывает влияние значительное количество случайных факторов. Это влечёт за собой случайный характер обеспечиваемых параметров, которые в силу большого количества случайных факторов обработки в соответствии с законом больших чисел в подавляющем большинстве случаев имеют нормальное распределение. Поскольку вероятность точного обеспечения случайной величины равна нулю, то конструктору необходимо в

технической документации указывать, наряду с её желаемым точным значением (математическим ожиданием), допустимый интервал её варьирования с требуемой надёжностью обеспечения в процессе обработки.

При оценке надёжности ТС по параметрам качества определяется вероятность того, что она обеспечит изготовление продукции в соответствии с требованиями НТД. ГОСТ 27.202-83 регламентирует оценку вероятности выполнения задания по одному i -му параметру качества (1.12) или одновременно по n параметрам качества для единицы продукции, изготовленной в момент времени t (1.13):

$$P_i(t) = P\{ x_{ni} \leq x_i(t) \leq x_{vi} \}, \quad (1.12)$$

$$P_{1\dots i}(t) = P\{ x_{n1} \leq x_1(t) \leq x_{v1}; \dots; x_{nn} \leq x_n(t) \leq x_{vn} \}, \quad (1.13)$$

где $x_i(t)$, x_{vi} , x_{ni} – фактическое, верхнее и нижнее значения i -ого параметра качества, соответственно.

Вопросы оценки надёжности технологических систем по параметрам точности рассматриваются в исследованиях Маталина А. А., Проникова А. С., Решетова Д. Н., Соколовского А. П., Сулова А. Г., Федорова В. П. и др. [111, 112, 168, 169, 170, 171, 177, 193, 212 и др.].

В работах [169, 187] для оценки надёжности ТС предлагаются также применять следующие показатели: вероятность отказа ТС $F(t)$; параметр потока отказов $\omega(t)$; наработка на отказ T ; t_{cp} – средний срок функционирования; технический ресурс T_p .

В методических указаниях ВНИИНМАШ [189] для удобства сравнения технологических процессов и в целях унификации диапазон изменений величин $P(t)$, $F(t)$, $\omega(t)$, t_{cp} делится на классы и разряды. Установлено 8 классов надёжности с 3 разрядами каждый, а основным критерием надёжности является вероятность брака (отказа) $F(t)$.

Анализ показывает, что для традиционных и перспективных методов обработки в научной и справочной литературе весьма ограничены сведения о вероятности выполнения задания по параметрам качества поверхностного слоя деталей машин и их эксплуатационным свойствам.

Отсутствие показателей (1.12) и (1.13) не даёт возможности определить пе-

риодичность настроек и диагностики технологического оборудования, выбрать метод статистического контроля технологических процессов и операций, выбрать план технического контроля готовой продукции, повышать параметрическую надёжность ТС.

Ряд исследований по определению надёжности технологического обеспечения ПКПС в различных ТС представлены в работах Старкова В. К., Фёдорова В. П., Кельнера А. А., Тамаркина М. А. и др. [84, 197, 212, 279, 286 и др.].

На основе исследований надёжности ТС по обеспечению геометрических параметров качества поверхностей деталей, остаточных напряжений и наклёпа созданы базы данных вероятностей выполнения заданий по формированию параметров качества поверхностного слоя в симметричном δ -процентном допустимом интервале варьирования параметров.

Недостаток данных по параметрической надёжности различных технологических систем по критериям вероятности обеспечения ПКПС и ПЭС деталей машин, а также отсутствие единого критерия оптимальности по характеристикам надёжности при выборе ТС существенно снижает уровень качества и надёжности выпускаемых в машиностроении изделий уже на этапе разработки конструкторско-технологической документации.

1.7. Выводы. Цели и задачи исследований

На основе анализа исследований отечественных и зарубежных ученых, выполненных в области надёжности технологического обеспечения параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин чистовыми и финишными методами обработки инструментами с ССТМ, установлено следующее.

1. Лимитирующими эксплуатационными свойствами поверхностей деталей машин, в частности, технологического оборудования и оснастки является износостойкость соединений и контактная жёсткость, технологическому обеспечению которых, следует уделять первостепенное внимание

2. Установлено, что геометрические параметры качества поверхностного

слоя деталей оказывают значительное влияние на параметры их эксплуатационных свойств.

3. В настоящее время существуют множество высокопроизводительных методов эффективного технологического воздействия на обрабатываемые поверхности деталей машин – методы лезвийной обработки инструментами с ССТМ; триботехнологии на основе нанесения твёрдых нитридсодержащих покрытий или мягких медесодержащих прирабочных плёнок; методы ОУО ППД и др. При этом ощущается необходимость создания на их основе новых высокоэффективных технологий, ориентированных на компьютеризированные технологические системы с ЧПУ.

4. Во многих работах отмечено, что причины отказов изделий часто связаны с несовершенством технологии их производства: необоснованностью технологических условий, недостаточной надёжностью технологических систем механической обработки и др. В связи с этим, одним из важнейших критериев выбора возможных методов обработки является параметрическая надёжность ТС.

5. Недостаточно разработаны теоретические основы и методика назначения технологических значений параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в технологической документации, обеспечивающие выполнение технических условий, заданных конструктором.

6. Физико-статистические модели формирования ПКПС и ПЭС, которые в научно-технической и справочной литературе широко рекомендуются к практическому применению в условиях конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, обладают рядом существенных недостатков, к которым в первую очередь можно отнести следующие:

– отсутствие фактора времени, т. е. модели ориентированы на начальный момент эксплуатации ТС и неадекватны принятой и апробированной модели проф. А. С. Проникова;

– рекомендуемые модели адекватны только к условиям их получения, к которым относятся состояние применяемой при этом ТС механической обработки, т. е. в них не учитываются факторы технического состояния реальной ТС, кото-

рые изменяются во времени, что подчеркивает необходимость периодической диагностики ТС.

7. Надёжность ТС механической обработки поверхностей деталей машин можно оценить методами диагностирования, точность которых зависит от степени автоматизации, учёта факторов влияющих на процесс формирования параметров качества и эксплуатационных свойств при обработке и др.

8. Анализ показал, что в настоящее время отсутствуют стандартизированные методы диагностирования ТС, позволяющие определить её возможности по обеспечению требуемых параметров качества и эксплуатационных свойств и параметрическую надёжность.

9. При оценке факторов, влияющих на формирование параметров качества поверхностей деталей при обработке методами ППД, обычно не учитываются динамические характеристики процессов взаимодействия деформирующих элементов инструментов с обрабатываемой поверхностью. Это связано с недостатком исследований динамики процессов ППД различными методами.

10. Необходимо дальнейшее развитие теории и практики решения актуальной проблемы надёжности технологического обеспечения ПКПС и ЭС деталей машин, в частности, в компьютеризированных ТС с ЧПУ.

11. Анализ работ по метрологическому обеспечению диагностики технологических систем по параметрам качества поверхностей обрабатываемых деталей показал, что оно требует дальнейшего развития с применением современных измерительных систем и использованием статистических инструментов качества, регламентированных стандартами ISO серии 9000.

12. При наличии теоретических положений и практических рекомендаций по диагностике ТС с ЧПУ программным способом, предложенных проф. А. С. Прониковым, в настоящее время практически отсутствует методика диагностики параметрической надёжности ТС программным способом по параметрам качества обрабатываемых поверхностей, ориентированные на ТС с ЧПУ механической обработки деталей.

13. Важным при определении факторов, влияющих на формирование экс-

платационных свойств поверхностей деталей, является учёт характера действующих нагрузок при их работе в соединениях трения-скольжения. Это, в свою очередь, позволяет назначить режимы обработки, позволяющие снизить влияние нестабильных эксплуатационных нагрузок на неравномерность износа, что повышает надёжность соединений трибоэлементов. Анализ показал, что практически отсутствуют исследования в этом направлении.

Таким образом, обеспечение высокой надёжности формирования требуемых параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей зависит от надёжности ТС, выбор которой зависит от достоверности информации о её технологических возможностях и обоснованности выбранных значений факторов обработки.

Представленный анализ определяет актуальность темы исследований, **целью** которой является решение проблемы исследования и повышения надёжности технологического обеспечения параметров шероховатости и износостойкости поверхностей деталей при чистовой и финишной обработке инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов инженерными методами, разработанными на основе результатов технологических исследований.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Разработать теоретические основы назначения в технологической документации интервальных значений параметров шероховатости поверхностей деталей, с учётом случайности их формирования, обеспечивающие выполнение конструкторских требований к ним с максимальной надёжностью.

2. Осуществить дальнейшую разработку научных основ методологии определения параметрической надёжности технологических систем чистовой и финишной обработки по параметрам качества поверхностей обрабатываемых деталей с применением методов имитационного моделирования.

3. Разработать алгоритмы и прикладное программное обеспечение для определения параметрической надёжности технологических систем методом имитационного моделирования на основе построения физико-статистических моделей формирования параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей

деталей машин как статистических основ современной методологии научных исследований в технологии машиностроения.

4. Разработать метрологическое обеспечение экспериментальных исследований на основе модернизации и компьютеризации отечественных средств измерений геометрических параметров качества и металлографического анализа поверхностей деталей в соответствии с политикой импортозамещения.

5. Установить влияние динамики процесса обработки ППД плоских и цилиндрических поверхностей деталей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости одноинденторными инструментами упругого действия на стабильность формирования геометрических параметров качества и разработать критерии оценки технологической устойчивости процесса ППД, характеризующей возможность обеспечения регламентируемых параметров шероховатости в допустимых пределах варьирования с максимальной надёжностью.

6. Определить для ТС лезвийной обработки и ОУО ППД плоских и цилиндрических поверхностей деталей инструментами, оснащёнными ССТМ, параметрическую надёжность формирования показателей качества и триботехнических характеристик поверхностей.

7. Реализовать ТС комбинированной обработки поверхностей деталей на основе применения чистовых методов лезвийной обработки инструментом с ССТМ, нанесения антифрикционных мягких медесодержащих прирабочных плёнок и финишной ОУО ППД алмазным выглаживанием и определить параметрическую надёжность ТС по параметрам шероховатости и триботехнических свойств обработанных поверхностей деталей.

8. Разработать новые технологии формирования микрорельефов на поверхностях деталей обработкой ППД программным способом в компьютеризированных ТС с ЧПУ, повышающие их триботехнические характеристики.

9. Создать классификацию видов нестабильных эксплуатационных воздействий на поверхности деталей в типовых соединениях трения скольжения по пространственным и временным критериям и разработать принципы и технологические средства управления процессом формирования параметров качества, законо-

мерно изменяющихся по поверхности детали, с целью обеспечения постоянства требуемых параметров её износостойкости при переменных условиях эксплуатации, обусловленных видом нестабильности внешних воздействий.

10. На основе современной методологии научных технологических исследований разработать инженерный метод определения параметрической надёжности ТС механической обработки поверхностей деталей, базирующийся на программном методе экспресс-диагностики ТС (ЭДТС), адаптированный к использованию в условиях производственных экспериментально-технологических лабораторий.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПО ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

2.1. Статистические аспекты назначения технологических параметров шероховатости поверхностей деталей в соответствии с ГОСТ 2.309-73

2.1.1. К вопросу выбора законов распределения оценок технологических значений параметров шероховатости

Анализ литературных источников, представленных в главе 1, показывает что параметры шероховатости поверхности, определяющие эксплуатационные свойства деталей машин, представляют собой элементы конечного множества N_K :

$$N_K = \{Ra, Rz, Rp, Sm, tp, \rho_m, Wa, Wmax, Smw, Hmax, H_{\mu 0}, U_n, h_n, \sigma_o, h_{\sigma 0}\}. \quad (2.1)$$

В технической документации на изделие конструктор задаёт либо какой-то один параметр (например, Ra), либо несколько (например, Ra, Sm, tp). Конструкторские значения параметров далее обозначаются R_{ik} . В этих случаях регламентируемые параметры принадлежат множеству N_K (2.1), т. е. $Ra \in N_K$ и $(x_1 = Ra, x_2 = Sm, x_3 = tp) \in N_K$.

Фактические значения параметров шероховатости, полученные после той или иной обработки функциональной поверхности детали, являются технологическими параметрами качества R_{iT} и случайными величинами с соответствующими законами распределения и статистическими характеристиками:

– математическое ожидание:

$$\mu(R_{iT}) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (R_{iT})_j ; \quad (2.2)$$

– среднее квадратическое (нормальное) отклонение (СКО):

$$S(R_{iT}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n ((R_{iT})_j - \mu\{R_{iT}\})^2}, \quad (2.3)$$

– коэффициент вариации:

$$v = S(R_{iT}) / \mu(R_{iT}), \quad (2.4)$$

где n – общее количество измерений (объём выборки) технологического параметра шероховатости R_{iT} .

В соответствии с ГОСТ 25142-82 среднее значение параметра шероховатости поверхности \bar{P} оценивается зависимостью

$$\bar{P} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_j, \quad (2.5)$$

где k – число единичных длин оценки;

R_j – значение параметра, определённое на одной базовой длине;

n – число базовых длин на единичной длине оценки.

Таким образом, измерения шероховатости следует проводить на различных участках m поверхности ($m \in (1, 2, \dots, k)$), причём каждое измерение должно включать n базовых длин (обычно $k = 3 \dots 5$, $n = 5$).

В этом случае зависимость (2.2) приобретает вид:

$$\mu(R_{iT}) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k \left(\frac{1}{n} (R_{iT})_j \right)_m. \quad (2.6)$$

Закон распределения параметров шероховатости в большинстве случаев принимается нормальным. Это обосновывается влиянием на формирование параметров шероховатости в процессе обработки поверхности большого числа различных факторов, имеющих случайный характер (неоднородность материала обрабатываемой заготовки; динамические характеристики технологической системы; техническое состояние оборудования в момент обработки, отклонения фактических эксплуатационных параметров технологической оснастки от заданных; параметры качества предварительно обработанной поверхности, случайность которых передаётся через механизм технологического наследования и др.).

Для параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей их

нормальное распределение задаётся плотностью распределения $f(R_{iT})$ или интегральной функцией распределения $F(R_{iT})$:

$$f(R_{iT}) = \frac{1}{S\{R_{iT}\}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(R_{iT} - \mu\{R_{iT}\})^2}{2S^2\{R_{iT}\}}\right], \quad (2.7)$$

$$F(R_{iT}) = \frac{1}{S\{R_{iT}\}\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{R_{iT}} \exp\left[-\frac{(R_{iT} - \mu\{R_{iT}\})^2}{2S^2\{R_{iT}\}}\right] dx, \quad (2.8)$$

где теоретически $-\infty < R_{iT} < \infty$.

Так как в качестве случайной переменной рассматриваются параметры шероховатости поверхности, то их отрицательные значения не имеют физического смысла (рисунок 2.1 а, заштрихованная область). В связи с этим для описания распределения параметров шероховатости целесообразно использовать усечённый закон нормального распределения (рисунок 2.1 б), который получается ограничением интервала изменения случайной величины обеспечиваемого параметра R_{iT} только положительными значениями. Его целесообразно использовать при больших значениях коэффициента вариации v (2.4).

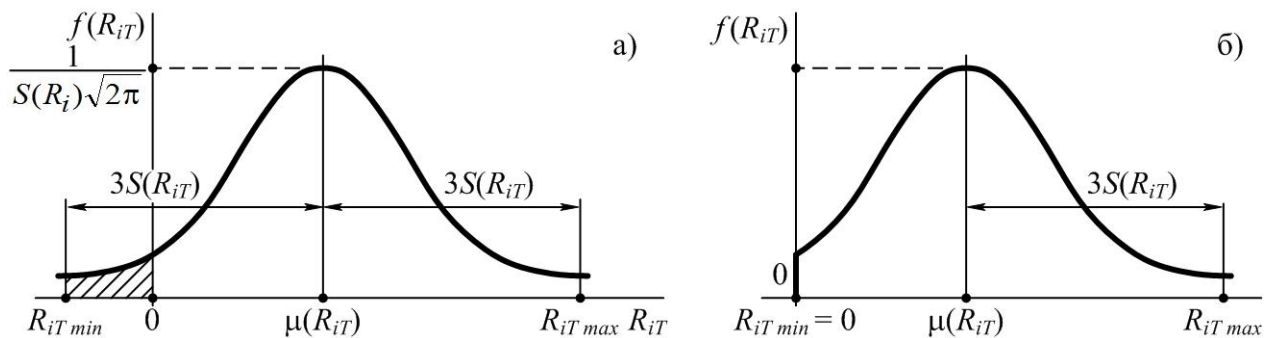


Рисунок 2.1 – Плотности вероятности технологического параметра R_{iT} качества поверхности детали при гипотезе его: а – нормального распределения; б – усечённого нормального распределения

Функция плотности вероятности усечённого нормального распределения для технологических значений параметров шероховатости поверхности имеет вид:

$$f(R_{iT}) = \frac{c}{S\{R_{iT}\}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(R_{iT} - \mu\{R_{iT}\})^2}{2S^2\{R_{iT}\}}\right], \quad (2.9)$$

где c – коэффициент для распределения, ограниченного пределами изменения R_{iT}

от a до b , определяется из условия

$$\int_a^b f(R_{iT})d(R_{iT}) = c[F(b) - F(a)] = 1, \quad (2.10)$$

откуда

$$c = \frac{1}{F(b) - F(a)} = \frac{1}{\Phi\left(\frac{b - \mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}}\right) - \Phi\left(\frac{a - \mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}}\right)}, \quad (2.11)$$

где $F(a)$ и $F(b)$ – значения интегральных функций нормального распределения для предельных значений R_{iT} .

В рассматриваемом случае (рисунок 2.1 б) усечённое нормальное распределение используется, как и в большинстве случаев, с предельными значениями $a = 0$ и $b = \infty$, что аргументировано в теории надёжности невозможностью отказов при отрицательных значениях времени, а для технологического обеспечения параметров шероховатости – невозможностью физической реализации их отрицательных значений.

В случае, когда $a = 0$ и $b = \infty$, зависимость (2.11) приводится к виду

$$c = \frac{1}{\Phi(\infty) - \Phi\left(-\frac{\mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}}\right)} = \frac{1}{0,5 - \Phi\left(\frac{\mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}}\right)}. \quad (2.12)$$

Для определения коэффициента c можно использовать таблицы функции Лапласа или квантилей нормального распределения. Так, при $0 \leq R_{iT} \leq \infty$ имеются следующие характеристики усечённого нормального распределения:

$$\bar{\mu}\{R_{iT}\} = \mu\{R_{iT}\} + kS\{R_{iT}\}, \quad (2.13)$$

$$\bar{D}\{R_{iT}\} = \bar{S}^2 = S^2 \left(1 - k^2 - k \frac{\mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}} \right), \quad (2.14)$$

где $\bar{\mu}\{R_{iT}\}$, $\bar{D}\{R_{iT}\}$, $\bar{S}\{R_{iT}\}$ – математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение для усечённого нормального распределения;

$\mu\{R_{iT}\}$, $D\{R_{iT}\}$ и $S\{R_{iT}\}$ – те же параметры для нормального распределения.

Величина k определяется выражением

$$k = \frac{c}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\mu^2\{R_{iT}\}}{2S^2\{R_{iT}\}}\right]. \quad (2.15)$$

Следует иметь в виду, что на практике обычно имеют место случаи, когда $\mu\{R_{iT}\} > 2S\{R_{iT}\}$. Тогда коэффициент $c \approx 1$, в связи с чем необходимость учёта отсечения нормального распределения отпадает. Интегральная функция для усеченного нормального распределения технологических параметров шероховатости R_{iT} имеет вид:

$$F\{R_{iT}\} = c \left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{R_{iT} - \mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}}\right) \right]. \quad (2.16)$$

Исключение появления отрицательных значений параметров возможно при использовании других законов распределения, в частности, логарифмически нормального распределения и распределения Вейбулла.

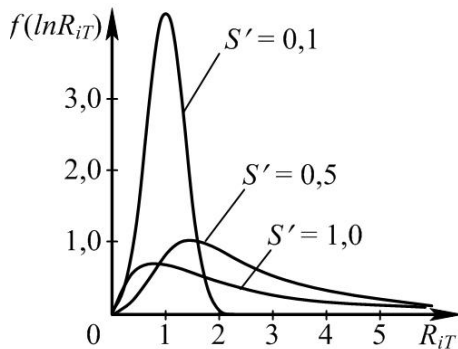


Рис. 2.2. Плотности распределения вероятностей для логарифмически нормального закона

В случае логарифмически нормального распределения (рисунок 2.2) логарифм случайной величины распределяется по нормальному закону. Закон логарифмически нормального распределения успешно применяется при описании наработки на отказ сложных технических и технологических систем в машиностроении, а также при построении имитационных моделей Кобба-

Дугласа. Плотность распределения (рисунок 2.2) имеет вид

$$f(\ln R_{iT}) = \frac{1}{S'\{\ln R_{iT}\}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln R_{iT} - \mu')^2}{2S'^2\{\ln R_{iT}\}}\right], \quad (2.17)$$

а функция распределения:

$$F(\ln R_{iT}) = \frac{1}{S'\{\ln R_{iT}\}\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu')^2}{2S'^2\{\ln R_{iT}\}}\right] dx, \quad x > 0. \quad (2.18)$$

Здесь введено обозначение $x = \ln R_{iT}$.

При логарифмически нормальном распределении вероятностные характеристики R_{iT} определяются по зависимостям (2.19 – 2.21):

$$M(x) = \exp\left(\mu + \frac{(S')^2}{2}\right), \quad (2.19)$$

$$D(x) = \exp(2\mu' + (S')^2 [\exp(S')^2 - 1]), \quad (2.20)$$

$$v = \sqrt{\exp(S')^2 - 1}. \quad (2.21)$$

Величины μ' и S' оценивают по результатам измерений параметров шероховатости R_{iT} :

$$\mu' = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln R_{ijT}, \quad (2.22) \quad S' = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\ln R_{ijT} - \mu')^2}. \quad (2.23)$$

В ряде случаев может оказаться целесообразным использование распределения Вейбулла (рисунок 2.3), плотность и интегральная функция которого могут

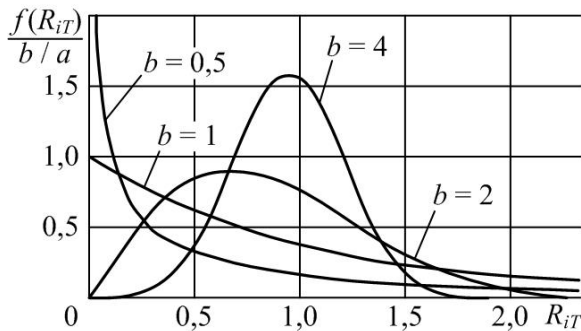


Рис. 2.3. Кривые распределения Вейбулла при различных значениях параметра формы b ($a = 1$)

задаваться в виде (2.24 – 2.25):

$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right], \quad x \geq 0, \quad (2.24)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right], \quad x \geq 0, \quad (2.25)$$

где: $a > 0$, $b > 0$ – параметры масштаба и формы.

Под величиной x подразумевается исследуемый или обеспечиваемый параметр шероховатости R_{iT} .

Для распределения Вейбулла основными характеристиками являются:

$$M(x) = aK; \quad D(x) = a^2(c - K^2); \quad v = \sqrt{\frac{c}{K^2} - 1}, \quad (2.26)$$

где $K = \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$; $c^2 = \Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - K^2$;

$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} U^{z-1} \exp(-U) dU$ – гамма функция.

Особенностью распределения Вейбулла является то, что с изменением параметра формы b изменяется и вид графика функции плотности распределения (рисунок 2.3). Это позволяет соответствующим подбором параметров обеспечить

хорошее совпадение опытных данных с аналитическим выражением. Кроме того, распределение Вейбулла включает в себя как частные случаи экспоненциальное распределение ($b = 1$) и распределение Рэлея ($b = 2$), при $b = 5$ близко к нормальному.

2.1.2. Вопросы расчёта технологических значений параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин с целью обеспечения выполнения технических условий

Конструируя деталь соединения, конструктор назначает параметры качества её функциональных поверхностей исходя из обеспечения требуемых эксплуатационных свойств соединения (износостойкость, контактная жёсткость, усталостная прочность и др.). Наряду с точностью обработки, физико-механическими свойствами, в их число входят и геометрические параметры: шероховатость, волнистость и макроотклонения. Параметры шероховатости наиболее полно стандартизированы как в плане физической трактовки и методик определения, так и в плане обозначений в нормативно-технической документации (НТД) на изделие.

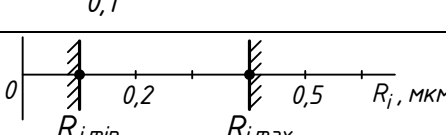
Конструктор на чертеже детали регламентирует конструкторское значение параметров шероховатости R_{iK} , одним из пяти методов в соответствии с ГОСТ 2.309-73. В таблице 2.1 представлены схематические изображения допустимых границ регламентируемого параметра.

Недостатком современных стандартов на параметры шероховатости является отсутствие требований по надёжности их обеспечения. В большинстве случаев в нормативно-технической документации для параметров шероховатости указывается наибольшее значение (п. 1, таблица 2.1), которое затем дублируется в технологической документации на изготовление детали.

Это ошибочный путь, так как конструкторское значение параметра R_{iK} – детерминированная постоянная величина, а его технологическое значение R_{iT} – величина случайная, имеющая соответствующий закон распределения и статистические характеристики (математическое ожидание $\mu(R_{iT})$, среднее квадратическое

отклонение $S(R_{iT})$, коэффициент вариации $\nu(R_{iT})$ и др.). Таким образом, вероятность точного обеспечения $R_{iT} = R_{iK}$ стремится к нулю, поэтому необходимо определять интервальное технологическое обеспечение параметров качества обрабатываемых поверхностей, в том числе и параметров шероховатости.

Таблица 2.1 – Регламентация параметров шероховатости поверхностей деталей по ГОСТ 2.309-73 и их схематические изображения

	Вид указания параметров	Обозначение в конструкторской документации	Схематичное изображение границ параметра
1	Наибольшее значение	ФПД* 	
2	Наименьшее значение		
3	Диапазон значений		
4	Номинальное значение с предельными отклонениями		
5	Указание двух и более параметров	 <ul style="list-style-type: none"> → параметр высоты шероховатости → параметр шага на базовой длине 0,8 мм → относительная опорная длина профиля на уровне $p = 50\%$ на базовой длине 0,8 мм 	

* ФПД – функциональная поверхность детали

Анализ результатов обработки поверхностей в различных ТС показывает на возможность обеспечения i -го технологического параметра шероховатости R_{iT} как с различными математическими ожиданиями $\mu_k(R_{iT})$, так и с различными средне-квадратическими отклонениями $S_k(R_{iT})$. Здесь k – номер рассматриваемой ТС.

Возможные предельные случаи плотностей распределения вероятностей $f(R_{iT})$ представлены на рисунке 2.4.

Графическая интерпретация плотности вероятностей (рисунок 2.4 а) пока-

зывает, что при возможном равенстве математических ожиданий обеспечиваемых технологических значений параметров шероховатости $\mu_k(R_{iT})$ их средние квадратические отклонения $S_k(R_{iT})$ различны для различных ТС обработки ($k = 1, 2, 3$). Следовательно вероятность технологического обеспечения параметра шероховатости R_{iT} в заданном интервале $[a, b]$ ($P_1(R_{i1T} \in [a, b])$) будет различной:

$$P_1(R_{i1T} \in [a, b]) > P_2(R_{i2T} \in [a, b]) > P_3(R_{i3T} \in [a, b]), \quad (2.27)$$

где

$$P_k(R_{ikT} \in [a, b]) = \int_{-\infty}^b f(x) dx - \int_{-\infty}^a f(x) dx; \quad x = R_{ikT}. \quad (2.28)$$

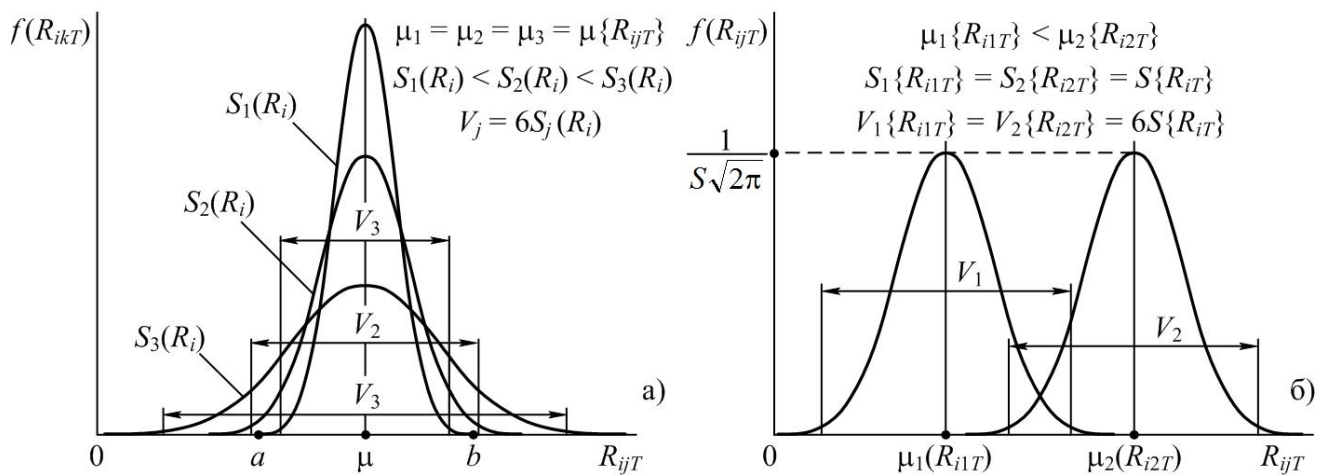


Рисунок 2.4 – Плотности вероятности $f(R_{iT})$ нормального распределения технологического значения параметра R_{iT} качества поверхности при различных значениях: а – среднего квадратического отклонения $S_j(R_{iT})$; б – математического ожидания $\mu_j(R_{iT})$

Возможен вариант обработки поверхности детали, когда при равенстве СКО, обеспечиваются различные математические ожидания технологических значений R_{ikT} (рисунок 2.4 б).

В целом при обработке в одной технологической системе возможны варианты, показанные на рисунке 2.4, а также входящие в ограничиваемое ими множество методов обработки, когда

$$\mu(R_{ijT}) = \text{const}; \quad S(R_{ijT}) = \text{var}; \quad (2.29)$$

$$\mu(R_{ijT}) = \text{var}; \quad S(R_{ijT}) = \text{var}; \quad (2.30)$$

$$\mu(R_{ijT}) = \text{var}; \quad S(R_{ijT}) = \text{const}. \quad (2.31)$$

В случае, представленном на рисунке 2.4 б, вероятность P обеспечения па-

параметра R_{iT} в пределах $V_1 = 6S_1\{R_{i1T}\}$ и $V_2 = 6S_1\{R_{i2T}\}$ при условии $S_1\{R_{i1T}\} = S_2\{R_{i2T}\}$ составляет 0,9973, что практически является достоверным событием.

На основе изложенного можно предложить варианты назначения технологических значений параметров шероховатости при разработке технологической документации в соответствии с рекомендуемыми ГОСТ 2.309-73 видами указаний параметров шероховатости.

При регламентации в конструкторской документации наибольшего значения параметра шероховатости (п. 1 таблица 2.1, рисунок 2.5 а) при выборе технологического значения, равного конструкторскому (вариант 1), неизбежно теоретическое получение брака «+», которое составит при нормальном распределении в соответствии с «правилом трёх сигм» максимум 49,86%, что не обеспечит выполнения технических условий обеспечения качества по параметрам шероховатости. С целью обеспечения обработки без брака в этом случае целесообразно установить технологическое значение $\mu_2(R_{iT})$ (вариант 2):

$$\mu_2(R_{iT}) = R_{iK} - 3S\{R_{iT}\}. \quad (2.32)$$

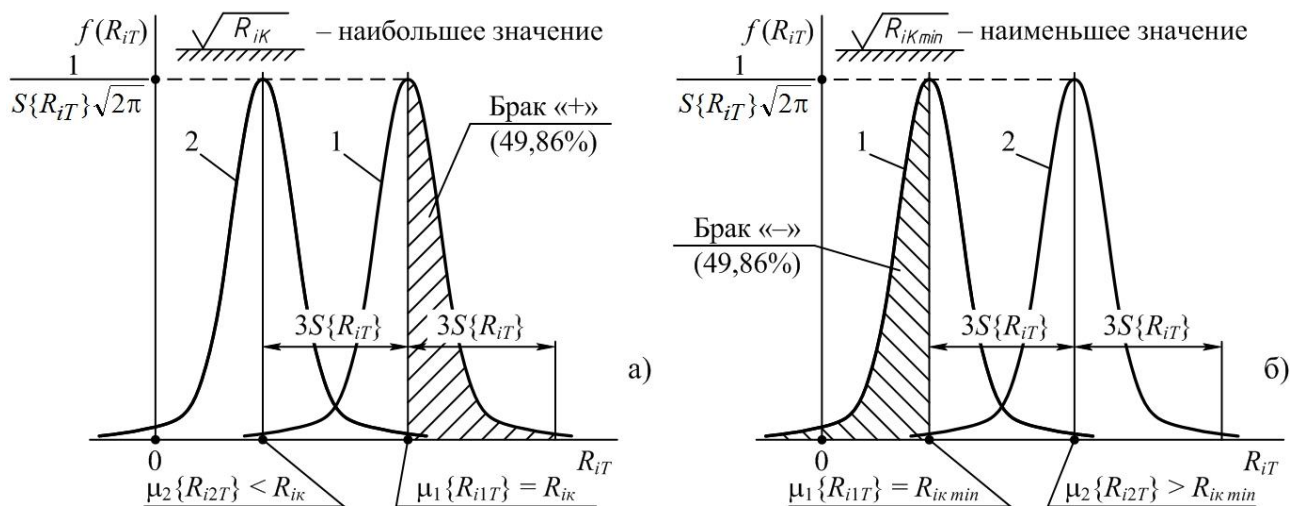


Рисунок 2.5 – Варианты выбора технологических значений R_{iT} , обеспечиваемых наибольших (а) и наименьших (б) конструкторских значений R_{iK} параметров шероховатости поверхности для условий обработки без брака

Аналогично решается задача определения допустимых технологических значений параметров шероховатости при обеспечении конструкторских регламентируемых минимальных значений R_{iKmin} (рисунок 2.5 б). В этом случае при назначении технологом $\mu_1(R_{iT}) = R_{iKmin}$ при нормальном распределении R_{iT} неизбежно

но теоретическое получение брака ($R_{iT} < R_{iKmin}$) до 49,86% в соответствии с «правилом трех сигм». Обеспечение обработки поверхности без брака по i -тому параметру шероховатости в этом случае возможно при назначении его математического ожидания

$$\mu_2(R_{i2T}) = R_{iKmin} + 3S\{R_{iT}\}. \quad (2.33)$$

Соотношение (2.33) справедливо в случае, когда при настройках ТС на технологическое обеспечение $\mu_1(R_{iT})$ и $\mu_2(R_{iT})$ (рисунок 2.5 б) средние квадратические отклонения $S\{R_{iT}\}$ будут одинаковы.

Если $S\{R_{iT}\} \neq \text{const}$, то задача решается аналогично с использованием в зависимостях (2.32) и (2.33) соответствующих значений $S\{R_{i1T}\}$ (рисунок 2.5а) и $S\{R_{i2T}\}$ (рисунок 2.5б).

Таким образом, зависимости (2.32) и (2.33) приобретают вид (2.34) и (2.35) соответственно:

$$\mu_2(R_{i2T}) = R_{iK} - 3S\{R_{i1T}\}, \text{ (рисунок 2.5 а)}, \quad (2.34)$$

$$\mu_2(R_{i2T}) = R_{iKmin} + 3S\{R_{i2T}\}, \text{ (рисунок 2.5 б)}. \quad (2.35)$$

В случае задания конструкторского значения параметра R_{iK} диапазоном допустимых значений ($R_{iK} \in [A, B]$) варианты его технологического обеспечения показаны на рисунке 2.6.

Если в этом случае назначить математическое ожидание параметра R_{iT} равным минимальному ($\mu_1\{R_{i1T}\} = R_{iKmin} = A$) или максимальному ($\mu_2\{R_{i2T}\} = R_{iKmax} = B$) значениям, то в соответствии с «правилом трёх сигм» в первом случае возможен брак «-» ($\approx 49,9\%$), а во втором случае – брак «+» ($\approx 49,9\%$).

Таким образом, ограничения технологических значений параметра R_{iT} по вариантам 1 и 2 (рисунок 2.6) неприемлемы. Целесообразно выбирать третий вариант, когда значение $\mu_3\{R_{i3T}\}$ равно, например, середине интервала $[A, B]$:

$$\mu_3\{R_{i3T}\} = \frac{B - A}{2} = \frac{R_{iKmax} - R_{iKmin}}{2} = \mu_3\{R_{i3T}\}_{\text{опт}}. \quad (2.36)$$

При этом для исключения брака важно, чтобы соблюдалось условие

$$6S_3\{R_{i3T}\} \leq R_{iKmax} - R_{iKmin}. \quad (2.37)$$

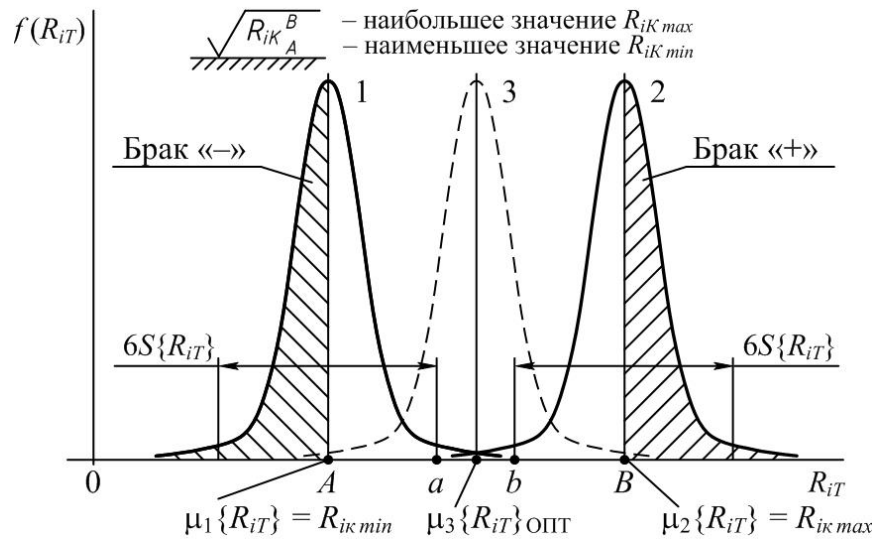


Рисунок 2.6 – Выбор технологического значения параметра шероховатости при его заданном диапазоне значений

Если это условие не соблюдается, то возможны два варианта:

- 1) поиск других условий обработки в данной ТС, которые при сохранении значения $\mu_3\{R_{i3T}\}$ привели бы к необходимому уменьшению $S_3\{R_{i3T}\}$;
- 2) поиск другой ТС обработки, обеспечивающей выполнение условий (2.36) и (2.37).

Если эти варианты неприемлемы, решается вопрос о надёжности P обеспечения параметра R_{iT} в заданном интервале $[A, B]$ ($(P(R_{iT} \in [A, B]))$) и проводится согласование приемлемости такого решения с конструктором.

В настоящее время требуемая надёжность технологического обеспечения параметров качества функциональных поверхностей деталей (в том числе и параметров шероховатости) в конструкторской НТД не указывается. Это является серьёзным недостатком проектно-конструкторской разработки.

ГОСТ 2.309-73 предусматривает возможность задания номинального значения параметра шероховатости с симметричными предельными отклонениями (таблица 2.1). В этом случае при его техническом обеспечении (рисунок 2.7) целесообразно выбрать математическое ожидание технологического параметра R_{iT} равное номинальному конструкторскому значению:

$$\mu\{R_{iT}\} = R_{iK\ ном}. \quad (2.38)$$

При этом с целью исключения брака должно соблюдаться условие:

$$6S\{R_{iT}\} \leq R_{iKmax} - R_{iKmin}. \quad (2.39)$$

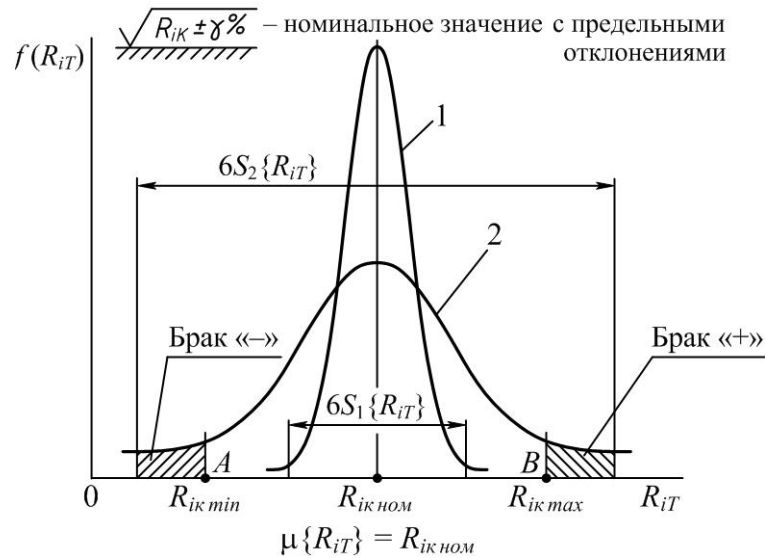


Рисунок 2.7 – Схема определения технологического значения параметра шероховатости при задании его номинального значения с симметричными предельными отклонениями

Для случая 1 (рисунок 2.7) это условие соблюдается, а для случая 2 – нет, что приводит к возможности получения брака «-» или «+». Соответствующие вероятности P можно рассчитать по известным зависимостям теории вероятностей:

$$P(R_{iT} > R_{iKmax}) = 1 - \int_{-\infty}^B f(x) dx, \quad (2.40)$$

$$P(R_{iT} < R_{iKmin}) = \int_{-\infty}^A f(x) dx. \quad (2.41)$$

В зависимостях (2.40) и (2.41) величина $x = R_{iT}$.

При ограничениях в НТД значений двух и более параметров (п. 5 таблица 2.1) для каждого, используя представленные результаты, назначают приемлемое технологическое решение. Технологию предпочтительнее выбирать технологически гибкой, с точки зрения управления процессом формирования параметров качества, способ обработки поверхностей деталей, например, отделочно-упрочняющую обработку методом ППД, с учётом технологической наследственности.

Следует иметь в виду, что факты наличия «брак (+)» и «брак (-)» по параметрам шероховатости технологически сравнительно легко устранимы. Однако это устранение связано не только с потерей производительности технологическо-

го процесса, но и с нарушением проектной технологии обработки, что приводит, в итоге, к браку по параметрам ЭС из-за с возникновения таких нежелательных явлений, как нарушение требуемой топографии поверхностного слоя, шаржирование поверхности и др.

2.2. Общая схема расчёта параметрической надёжности технологических систем механической обработки поверхностей деталей

Современные технологические системы, предназначенные для выполнения технологических процессов или операций механической обработки деталей машин, представляют собой совокупность множества взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей. Наличие в технологических системах разнообразных взаимосвязей и факторов обработки, природа многих из которых носит вероятностный характер, определяет сложность обеспечения качества продукции, которое регламентируется большим количеством показателей. Поэтому формирование требуемых параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей в значительной степени зависит от надёжности обрабатывающих технологических систем.

Надёжность технологического процесса – это свойство сохранения во времени его способности обеспечить в установленных пределах требуемые параметры качества продукции, изготавливаемой в заданном объеме.

Надёжность технологического процесса *оценивается теми же показателями*, которые используются для оценки надёжности любой системы. В качестве показателей надёжности технологического процесса могут быть выбраны вероятность безотказной работы $P(t)$; параметр потока отказов $\omega(t)$; вероятность отказа F ; средняя наработка до отказа T_1 [45, 46].

Вероятность безотказной работы (вероятность выполнения задания по всей совокупности нормируемых показателей качества) представляет собой наиболее удачную характеристику, так как по ней очень просто судить о безотказности технологической системы. Она охватывает факторы, существенно влияющие на

надёжность – погрешности оборудования, температурный режим и т. д. [47, 48, 49].

Параметры качества обрабатываемого изделия формируются в тесной взаимосвязи со структурой технологического процесса, методами контроля, надёжностью технологических операций и переходов.

В соответствии с обобщённой схемой эволюции параметров качества поверхности детали в процессе обработки (рисунок 2.8) технологический процесс можно представить в виде q технологических систем, для которых входными факторами Y_{ei} являются ПКПС, полученные на предыдущих этапах обработки, управляющими факторами X_{qi} являются условия обработки, а выходными Y_{qi} – ПКПС окончательно обработанной детали Y_{qi} . Такая схема соответствует модели формирования показателей надёжности технологического процесса (рисунок 2.9), предложенной в работе [168].

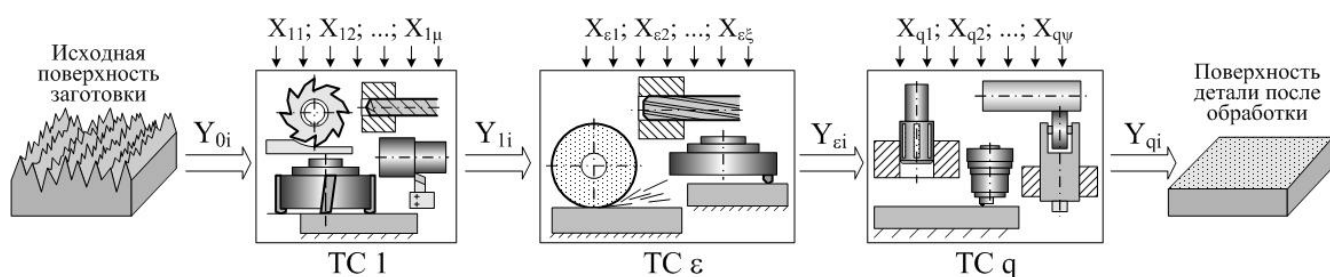


Рисунок 2.8 – Схема эволюции функциональных поверхностей деталей в процессе обработки

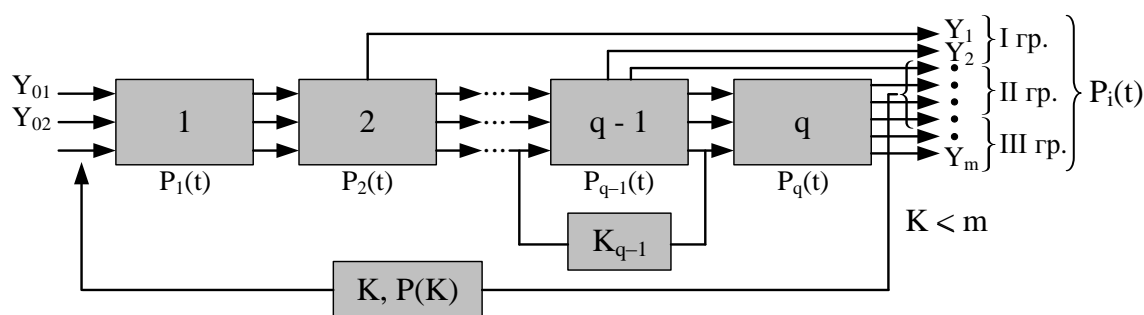


Рисунок 2.9 – Модель формирования показателей надёжности технологического процесса

Технологический процесс, состоящий из q последовательных операций должен обеспечить m параметров качества детали или её функциональной поверхности в пределах допуска δ , т. е. каждый из выходных параметров качества Y_{qi} , где $i = 1 \dots m$, должен удовлетворять требованию

$$Y_i = \bar{Y}_i \pm \delta_i \bar{Y}_i. \quad (2.42)$$

Здесь \bar{Y}_i , δ_i – соответственно среднее значение i -го выходного параметра качества и его допустимое относительное отклонение, которые задаются конструктором и регламентируются в технической документации.

Вероятность $P_{qi}(t)$ выхода любого из параметров за пределы допуска после q -й операции в течение заданного времени $t = T$ определяет безотказность конкретного технологического процесса.

В соответствии с моделью, представленной на рисунке 2.9, выходные параметры качества поверхности Y_{qi} формируются в результате последовательной обработки заготовки и, как правило, для каждой операции задаются значения выходных параметров $Y_{\varepsilon i}$ ($\varepsilon = 1 \dots q$), определяемых аналогично зависимости (2.42).

Особенностью формирования параметров Y_{qi} является то, что вероятность $P_i(t)$ выполнения задания по обеспечению требуемых значений выходных параметров не равна произведению вероятностей $P_{qi}(t)$ выполнения задания каждой операцией. Это объясняется следующими причинами [168].

1. Формирование ПКПС деталей происходит на заключительных – чистовых и финишных – операциях технологического процесса. Значение большинства параметров качества, контролируемых на промежуточных операциях, не играет существенной роли, так как они изменяются при дальнейшей обработке. Только часть этих параметров, переходит в разряд выходных параметров процесса (I группа, рисунок 2.9). Чем ближе технологическая операция к завершению процесса обработки детали, тем больше её влияние на выходные параметры Y_i . Исключение обычно составляют характеристики материала детали, являющиеся входными параметрами, но определяют также и окончательные результаты техпроцесса.

2. Значения большинства параметров Y_i , формируемых на финишных операциях, определяют надёжность всего техпроцесса (II группа, рисунок 2.9), так как именно на этих этапах окончательно формируются параметры качества.

3. На некоторые выходные параметры Y_i , формируемые на финишных операциях, влияют результаты предыдущих технологических операций (III группа, рисунок 2.9). Здесь важную роль играет фактор технологической наследственности. Отказы ТС по параметрам III группы (рисунок 2.9) должны рассматриваться

как зависимые, связанные с вероятностью невыполнения задания на предыдущих операциях.

С позиций схемной надёжности контрольные операции играют важную роль в обеспечении надёжности технологического процесса, играя роль резервных элементов. Если происходит отказ по параметру качества технологической операции (например, выход размера за пределы допуска), то контрольная операция позволяет исключить брак, то есть рассматривается как резервный элемент, ликвидирующий последствия отказа [168, 169].

Зная вероятности P_{qi} формирования m выходных параметров технологического процесса с учётом промежуточного и выходного контроля с эффективностью P_k отбраковки изделий вероятность безотказной работы технологического процесса можно определить по зависимости:

$$P_i(t) = \prod_1^m [1 - (1 - P_{qi})(1 - P_k)]. \quad (2.43)$$

При абсолютно надёжном контроле $P_k = 1$, а для неконтролируемых параметров $P_k = 0$.

Технологическим системам, как и всем системам вообще, свойственны различные виды отказов. В соответствии с ГОСТ 27.004-85 для технологических систем характерны функциональные или параметрические отказы, отказы по параметрам качества продукции и др.

Параметрический отказ ТС – это отказ, при котором её функционирование сохраняется, но значения одного или нескольких параметров технологического процесса выходят за пределы, установленные в НТД и (или) конструкторской и технологической документации.

Отказ по параметрам качества продукции – отказ ТС, в результате которого значение хотя бы одного параметра качества производимой продукции не соответствует требованиям, установленным в НТД и (или) конструкторской и технологической документации.

Отказы по параметрам качества продукции и параметрические отказы взаимосвязаны. Рассматривая параметры качества обрабатываемой поверхности дета-

ли как параметр качества продукции, сложно найти такой параметрический отказ технологической системы, при котором бы она функционировала с выполнением требований по параметрам качества поверхностного слоя.

В данной главе рассматриваются отказы технологических систем по параметрам качества продукции. Так как параметры качества обрабатываемых поверхностей закладываются в нормативно-техническую документацию технологического процесса, в дальнейшем такие отказы будем называть параметрическими отказами ТС.

Одним из основных показателей надёжности технологического процесса в целом является параметрическая надёжность отдельных операций или надёжность по параметрам качества. Её обеспечение является важным для этапов чистовой и финишной обработки поверхностей деталей, окончательно формирующих параметры качества и эксплуатационные свойства поверхности [168, 169, 171 и др.].

В работах [168, 169 и др.] параметрическая надёжность ТС определяется, как свойство обеспечивать требуемые параметры качества изготавливаемой продукции в заданный период времени при заданном объёме выпуска.

ГОСТ 27.203-83 определяет общие требования к методам оценки надёжности ТС.

В ГОСТ 27.202-83 регламентируются требования к методам оценки надёжности ТС или выполнения заданий по параметрам качества изготавливаемой продукции. Оценка выполнения заданий по параметрам качества осуществляют с целью определения вероятности того, что изготавливаемая ТС продукция будет соответствовать требованиям НТД.

То есть параметрическая надёжность ТС может характеризоваться вероятностью её безотказной работы по параметрам качества продукции.

Отказ ТС происходит, если не соблюдается условие (2.42), то есть хотя бы один из m регламентируемых показателей качества детали выходит за допустимые пределы.

В соответствии с ГОСТ 27.202-83 вероятность выполнения ТС задания по i -му параметру качества за наработку T определяется выражением:

$$P\{E_{ji} \leq Y_i(t) \leq E_{si}\} \leq P_i(t), \quad (2.44)$$

где E_{ji} , E_{si} – нижнее и верхнее предельные отклонения для i -го параметра качества, установленные в конструкторско-технологической документации; $Y_i(t)$ – значения i -го параметра в момент времени t .

Измерение наработки T осуществляется в единицах времени, или единицах изготовленной продукции, или циклах функционирования.

Вероятность выполнения ТС задания одновременно по всем параметрам m качества выпускаемой продукции:

$$P\{E_{j1} \leq Y_1(t) \leq E_{s1}; E_{j2} \leq Y_2(t) \leq E_{s2}; \dots; E_{jm} \leq Y_m(t) \leq E_{sm}\} = P(t). \quad (2.45)$$

Оценка параметрической надёжности ТС необходима для:

- 1) определения вероятности выполнения задания по одному показателю качества, то есть один определённый параметр качества должен соответствовать требованиям конструкторской и технологической документации;
- 2) определения вероятности выполнения задания по всем регламентированным в конструкторской и технологической документации показателям качества;
- 3) определения вероятности выполнения задания по параметрам производительности, при условии, что все показатели качества будут обеспечены.

В качестве показателя надёжности технологических процессов (операций) металлообработки предлагается вероятность выполнения задания по параметрам качества поверхностных слоев в заданных пределах.

Оценка надёжности ТС статистическим моделированием базируется на функционально-статистическом подходе к построению модели технологического процесса, связывающей условия обработки и ПКПС обработанной детали:

$$Y_i = f(b_0, b_i, X_i),$$

где Y_i – i -ый параметр качества поверхности детали; X_i – i -ый параметр условий обработки на рассматриваемой операции; b_0 , b_i – коэффициенты модели.

Такие модели описывают условия технологического процесса, но могут противоречить представлениям о физико-химическом механизме процессов, протекающих при обработке [42, 151, 222, 327, и др.].

При определении моделей формирования параметров качества обрабаты-

ваемой поверхности в зависимости от условий обработки и исследовании параметрической надёжности ТС целесообразно применять методы математической статистики и имитационного моделирования.

Имитационное моделирование предполагает использование метода статистических испытаний (Монте-Карло) [317].

Задачи, решаемые при определении надёжности ТС по параметрам качества поверхностей обрабатываемых деталей можно разделить на три группы, в соответствии с блок-схемой, представленной на рисунке 2.10;

1) построение моделей формирования ПКПС и ПЭС обрабатываемых дета-

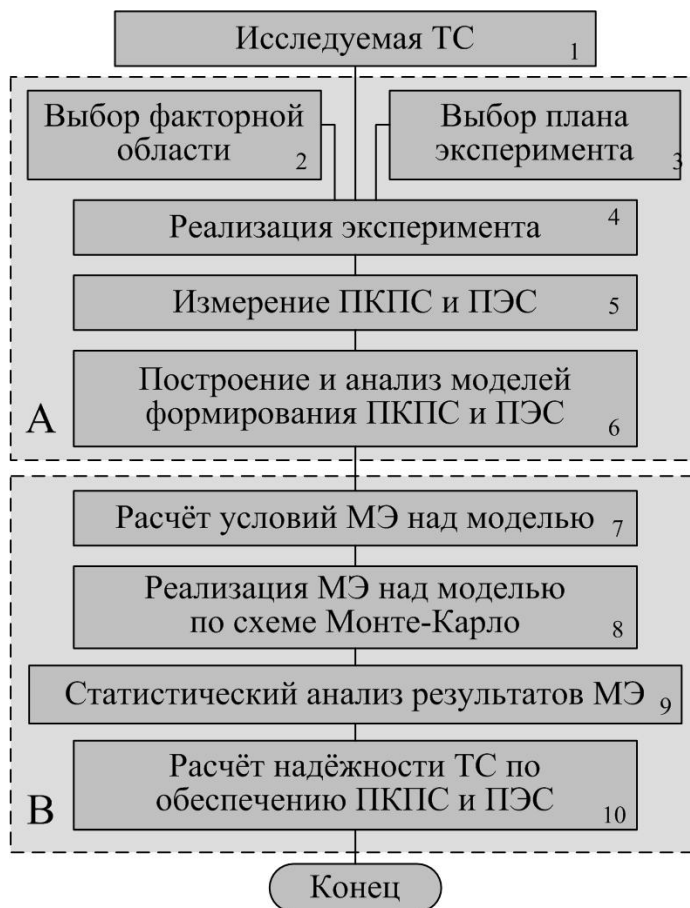


Рисунок 2.10 – Схема определения параметрической надёжности ТС по обеспечению ПКПС и ПЭС

ности ТС можно выделить два этапа:

- построение и анализ моделей формирования параметров качества обрабатываемых деталей (блоки 2 – 6);
- расчёт показателей надёжности ТС (блоки 7 – 10).

лей поверхностей одним из методов (блоки группы А);

2) проведение машинных экспериментов (МЭ) по схеме Монте-Карло с использованием соответствующих алгоритмов и программного обеспечения, и анализ их результатов для оценки вероятностных характеристик выходных величин моделируемой ТС (блоки группы В);

3) расчёт показателей надёжности исследуемой ТС по ПКПС или ПЭС обрабатываемых деталей (блоки группы В).

Таким образом, в схеме определения показателей надёж-

2.3. Физико-статистические модели формирования параметров качества поверхностей деталей в процессе обработки

При определении надёжности ТС по параметрам качества обрабатываемых деталей возникает необходимость решения значительного количества разноплановых частных задач. С точки зрения системного подхода это объясняется иерархией операций в технологическом процессе, множеством причинно-следственных связей параметров качества детали после j -той операции обработки с соответствующими параметрами качества и условиями обработки на предыдущих и последующих операциях обработки, а также с параметрами её эксплуатационных свойств.

Примером множества связей входных и выходных параметров может служить ТС обработки ППД накатыванием шариковой головкой (рисунок 2.11). Таким методом обрабатываются плоские поверхности, в частности направляющие различного технологического оборудования, важнейшими эксплуатационными характеристиками которых являются износостойкость и контактная жёсткость. Именно эти характеристики определяют точность работы технологического оборудования.

В качестве входных параметров данной ТС рассматриваются материал заготовки обрабатываемой детали M , его твёрдость HRC_3 , радиус r и количество n деформирующих элементов 3 шариковой головки 2, сила накатывания Q , скорость обработки V , количество проходов i , подача S , жёсткость оборудования j , вид применяемой смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС), состояние предварительно обработанной поверхности Ra_{np} . Для некоторых параметров характерна случайность их проявления.

Выходными являются две группы параметров: параметры КПС и ЭС обработанной детали. ПКПС определяются в основном пятью группами показателей: параметрами шероховатости R_i , волнистости W_i и макроотклонений H_i , параметрами наклёпа (поверхностная микротвёрдость $H_{\mu 0}$, степень U_n и глубина h_n наклёпа поверхностного слоя), параметрами остаточной напряжённости (величина ос-

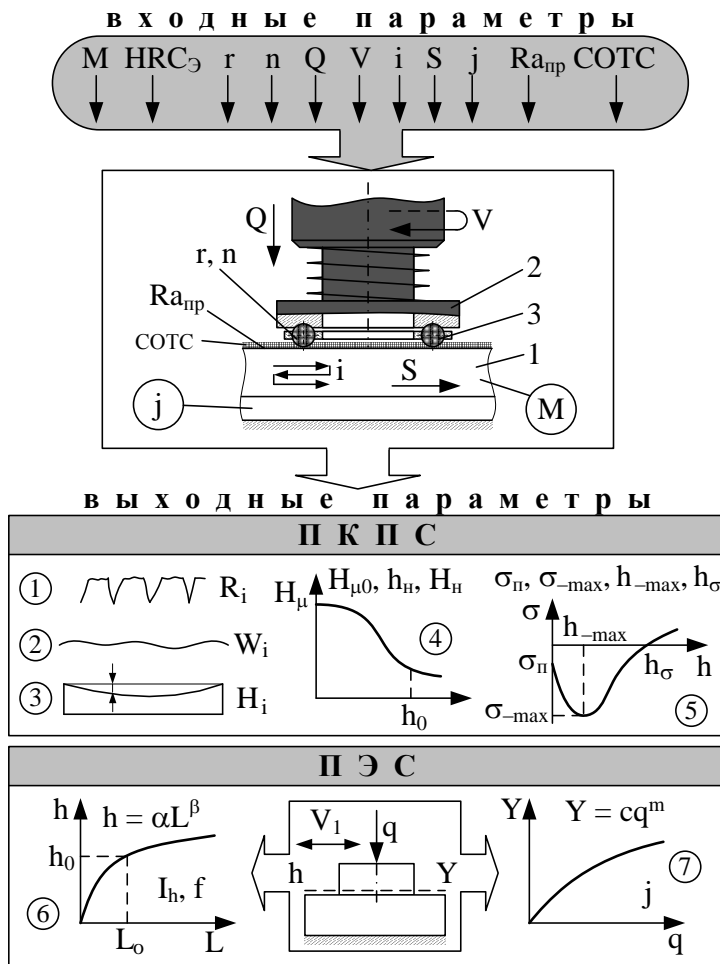


Рисунок 2.11 – Схема процесса обработки методом ППД шариковой головкой: 1 – обрабатываемая деталь, 2 – шариковая головка, 3 – деформирующий элемент

точных напряжений на поверхности σ_n , максимальные сжимающие остаточные напряжения σ_{-max} и глубина их залегания h_{-max} , общая глубина залегания остаточных напряжений h_{σ}).

ПЭС зависят от служебного назначения детали. В рассматриваемом случае это группа показателей износостойкости 6 и контактной жёсткости 7.

В группу 6 входят величина начального износа h_0 и путь (или время) приработки L_0 поверхности детали, интенсивность износа I_h , коэффициент трения f , а также параметры аппроксимации кривой изнашивания α и β .

Группу 7 характеризуют такие показатели, как контактная жёсткость j , коэффициенты аппроксимации c и m зависимости сближения Y от нагрузки q .

Следует отметить, что 6-ю и 7-ю группы ПЭС (рисунок 2.11) необходимо рассматривать как выходные параметры соответствующей системы эксплуатации, входными факторами которой, наряду с условиями эксплуатации, являются группы 1 – 5 ПКПС, полученные в результате обработки.

Для общего описания функциональной взаимосвязи параметров ТС можно ввести следующие обозначения:

\bar{X}_1 – группа входных факторов ТС, характеризующих условия обработки;

\bar{Y}_1 – группа выходных параметров ТС, включающая ПКПС;

\bar{X}_2 – группа факторов, определяющих условия эксплуатации обрабатываемой

мой детали в соответствующей системе (нагрузка q , скорость скольжения V_1 и др.);

\bar{Y}_2 – группа выходных параметров ТС, определяющих ЭС детали.

Функциональные зависимости между факторами обработки, параметрами состояния поверхностного слоя, параметрами эксплуатационных свойств и условиями эксплуатации можно определить следующими выражениями:

$$\bar{Y}_1 = F_1\{\bar{X}_1\}, \quad (2.46)$$

$$\bar{Y}_2 = F_2\{\bar{X}_2, \bar{Y}_1\}, \quad (2.47)$$

$$\bar{Y}_2 = F_3\{\bar{X}_1, \bar{X}_2\}, \quad (2.48)$$

Эти соотношения носят вероятностный характер, так как множество параметров групп носят случайных характер.

Соотношение (2.46) представляет собой функцию ТС по обеспечению ПКПС, и оно должно быть положено в основу технологического проектирования при необходимости обеспечения лишь параметров данной группы. В этом случае по заданным элементам Y_{1i} определяют факторы обработки X_{1i} , удовлетворяющие условию (2.46), а затем оценивают показатели надёжности ТС по обеспечению параметров Y_{1i} .

Если заданы параметры Y_{2i} и условия эксплуатации X_{2i} , то возможны два случая. Первый заключается в том, что, используя соотношение (2.47), определяют необходимые значения Y_{1i} , а затем из соотношения (2.46) – условия обработки X_{1i} .

Второй случай заключается в том, что из соотношения (2.48) по заданным элементам Y_{2i} и X_{2i} определяют условия обработки X_{1i} .

Как в первом, так и во втором случаях после определения условий обработки, удовлетворяющих поставленным требованиям, оцениваются показатели надёжности ТС по обеспечению параметров Y_{2i} . Результаты, полученные по второму, более короткому пути, могут обеспечить и более высокую надёжность, так как в этом случае исключается из промежуточных расчётов целый ряд случайных величин Y_{1i} .

Таким образом, во всех рассмотренных случаях необходимо знать соотношения (2.46) – (2.48), которые представляют собой модели формирования ПКПС и ПЭС в процессе обработки или функции технологических систем и их вероятностные характеристики.

Учитывая многообразие существующих технологических процессов и сложность протекающих в них физических явлений, построение таких моделей представляет собой достаточно сложную и ответственную задачу.

В соответствии с ГОСТ 3.1109-73 технологический процесс – это процесс качественного изменения предметов труда направленным воздействием на них различных видов энергии различными способами и методами.

В работе [54] в соответствии с теорией синтеза физических явлений предлагается создавать новые технологические процессы на основе семи видов энергетического воздействия на объекты обработки – механического, термического, электрического, магнитного, атомного, химического, лучистого.

Количество возможных сочетаний видов энергетического воздействия, составляет $2^7 - 1 = 127$. Это базовое количество сочетаний для разработки технологических процессов. Общее же количество технологических процессов значительно больше, так как оно формируется за счёт использования различных методов и способов передачи энергии. Поэтому разработать раз и навсегда модели для всех технологий, определить их вероятностные характеристики, учесть характеристики различных обрабатываемых материалов и обрабатывающих инструментов не представляется возможным.

Это подчеркивает актуальность и сложность задачи построения и исследования моделей ТС. Для её решения необходима разработка инженерной методологии, которая позволит в кратчайшие сроки получить необходимую информацию о той или иной технологической системе.

Для оценки параметрической надёжности ТС на основе моделей (2.46) – (2.48) целесообразно применять имитационное моделирование, характеризующееся высокой эффективностью при относительно невысоких материальных затратах.

Построение моделей формирования параметров качества деталей в рассматриваемых ТС осуществляется на основе физико-технологического и функционально-статистического подходов [4, 189, 276 и др.].

Модели, полученные на основе физико-технологического подхода, достаточно хорошо описывают физику и механизмы явлений, протекающих при выполнении технологического процесса, но малопригодны для учёта конкретных условий производства [4].

Модели, полученные на основе функционально-статистического подхода, связывают параметры качества обработанной детали с условиями обработки с учётом влияния случайных воздействий [4].

Для количественной оценки влияния управляющих (входных) факторов технологических процессов на выходные характеристики в технологии машиностроения применяют физико-аналитические или физико-статистические типы моделей.

Физико-аналитические модели представлены в виде аналитических зависимостей между входными факторами и выходными характеристиками ТС, полученные на основе аналитических описаний физических процессов, протекающих в процессе обработки [9 – 12, 14, 41, 84, 88, 119, 130, 141, 189, 210, 211, 217 и др.].

Физико-статистические модели взаимосвязей между входными и выходными факторами ТС строятся на основе статистических методов планирования эксперимента, множественного корреляционно-регрессионного анализа и др. [4, 276], когда рассматриваемые процессы не представляется возможным описать аналитическими зависимостями. Эти модели позволяют с достаточной точностью прогнозировать параметры качества, формируемые в ходе обработки деталей при заданных условиях, а также при управлении ТС обеспечивать получение требуемых параметров качества в допустимых пределах с заданной надёжностью.

Таким образом, для решения большинства задач исследования надёжности ТС предпочтительным является применение физико-статистических моделей, в которых входные факторы определяются на основе физико-технологического анализа причинно-следственных связей внешней среды и факторов обработки, а

выходные факторы определяются статистическими методами [4, 9, 211, 217, 386 и др.].

Для построения физико-статистических моделей и определения параметрической надёжности ТС формирования параметров качества обрабатываемых деталей необходимо решить задачи в соответствии со схемой на рисунке 2.10:

1) построить статистические модели функции ТС по обеспечению ПКПС и ПЭС вида (2.46), (2.47) или (2.48);

2) разработать алгоритм и программное обеспечение для проведения имитационного моделирования методом Монте-Карло;

3) реализовать машинные эксперименты в выбранной области факторного пространства и провести их анализ с целью оценки вероятности выполнения задания в рассматриваемой ТС;

4) прогнозировать показатели надёжности технологического обеспечения требуемых параметров качества или эксплуатационных свойств поверхности детали в рассматриваемой ТС.

Эффективным методом построения моделей является проведение активных экспериментов с использованием корреляционно-регрессионного анализа.

Такой подход использовался при решении задач трения и износа и исследованиях различных технологических процессов [9, 17, 31, 40, 69, 79, 88, 116, 194, 209, 217, 227, 230, 286 и др.].

Важным этапом, определяющим эффективность и качество полученной модели, является выбор факторов ТС, оказывающих наибольшее влияние на формирование ПКПС и ПЭС детали при обработке, а также интервала варьирования значений факторов (блок 2, рисунок 2.10). Такой выбор осуществляется при анализе графов корреляционных связей по коэффициентам парной (частной) корреляции между входными факторами и выходными параметрами ТС.

Выбор плана эксперимента (блок 3, рисунок 2.10) в зависимости от типа модели ТС осуществляется в соответствии с рекомендациями, представленными в работах [31, 42, 62, 151 и др.]. Эффективными, с экономической точки зрения, являются планы первого порядка, позволившие получить удовлетворительные ре-

зультаты в ряде технологических исследований [186, 189, 210 и др.].

Реализация экспериментов (блок 4, рисунок 2.10) осуществляется в исследуемой ТС обработки деталей для получения моделей типа (2.46) – «условия обработки $\bar{X}_1 \rightarrow$ ПКПС \bar{Y}_1 » или на специальных испытательных стендах для получения моделей типа (2.47) – «условия эксплуатации \bar{X}_2 , ПКПС $\bar{Y}_1 \rightarrow$ ПЭС \bar{Y}_2 », и моделей (2.48) – «условия обработки \bar{X}_1 , условия эксплуатации $\bar{X}_2 \rightarrow$ ПЭС \bar{Y}_2 ».

Тип испытательных стендов определяется конкретными эксплуатационными свойствами, которые необходимо обеспечить в процессе обработки (износостойкость, контактная жёсткость, усталостная прочность и др.) или их совокупностью.

Измерение и расчёт значений параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей (блок 5, рисунок 2.10) предпочтительно осуществлять в компьютеризированных системах измерения ПКПС и ПЭС (гл. 3) для исключения ошибки измерений, снижающих точность получаемой модели.

После построения модели формирования ПКПС и ПЭС (блок 6, рисунок 2.10) оцениваются её параметры и вероятностные характеристики, значимость рассматриваемых факторов и адекватности модели [31, 62, 63, 69, 151, 152, 194 и др.].

Параметрическая надёжность ТС рассчитывается на основе имитационного моделирования ТС (блоки 7...10, рисунок 2.10), заключающийся в проведении машинного эксперимента над моделями ТС. Исходными данными являются параметры моделей с соответствующими вероятностными характеристиками и граничные значения области факторного пространства условий обработки ТС.

Машинный эксперимент позволяет сформировать массивы выходных параметров моделей (блок 8), затем проводится их статистический анализ (блок 9), результаты которого позволяют рассчитать вероятность P выполнения ТС задания по технологическому обеспечению требуемых ПКПС (блок 10, рисунок 2.10).

В общем случае различают детерминированные и статистические (стохастические) математические модели [4 и др.], связывающие входные факторы (воз-

действия) $X_i = (i = 1, k)$ исследуемого процесса с выходными характеристиками $Y_j = (j = 1, m)$ или функциями отклика, которыми для ТС являются ПКПС, точность обработки, производительность и др.:

$$Y_j = f_j(X_1, X_2, \dots, X_k). \quad (2.49)$$

Детерминированные модели не учитывают вероятностные характеристики процессов (рисунок 2.12 а), модели статистические учитывают случайный (стохастический) характер факторов и параметров системы (рисунок 2.12 б) [4].

Для любого процесса характерна физическая изменчивость каких-либо факторов $x_i \pm \Delta x_i(\tau)$ и внешние случайные воздействия, поэтому при равенстве значении входных воздействий $x(\tau)$ в моменты времени τ_1 и τ_2 значения выходных характеристик $Y(\tau)$ будут различными (рисунок 2.12 б). Следовательно, для вероятностных процессов, в которых нельзя пренебрегать случайными колебаниями $\Delta x_i(\tau)$ и внешними воздействиями $\xi_i(\tau)$, систему характеризуют с учётом статистического закона распределения мгновенных значений $Y(\tau)$ относительно средней величины $Y_{cp}(\tau)$ [4]:

$$Y(\tau) = Y_{cp}(\tau) \pm \Delta Y(\tau) = f(X_{cp}) + \zeta(\Delta X, \xi). \quad (2.50)$$

При снижении значений параметров ΔX и ξ уравнение (2.50) по структуре становится похожим на уравнение (2.49), описывающему детерминированные системы.

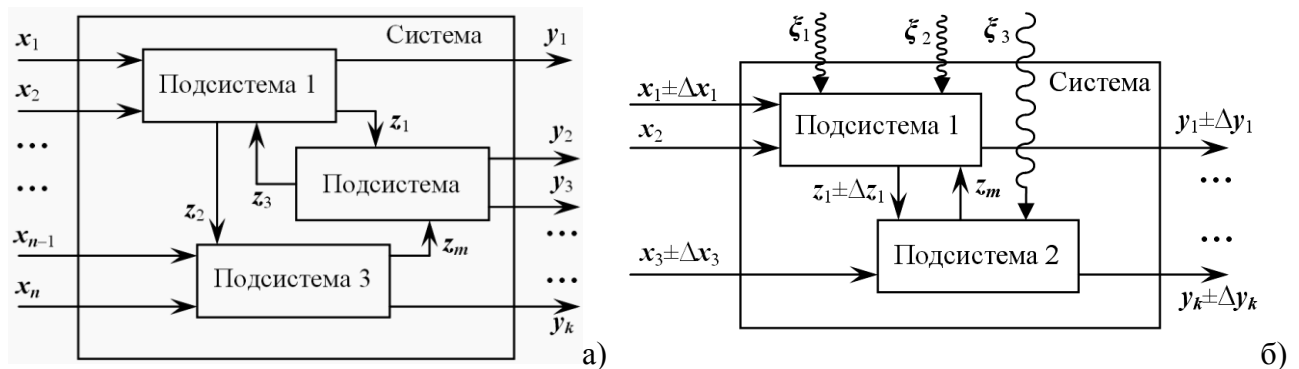


Рисунок 2.12 – Модели технических систем: а – детерминированные; б – стохастические

Обычно детерминированные модели (2.49) удается построить, когда о рассматриваемых процессах имеются ясные физические формализованные представления. Поэтому для описания детерминированных систем часто используют ста-

статистические модели. В этих случаях систему рассматривают как «чёрный ящик», для которого известны только значения входных факторов X и измеряемых выходных параметров Y . По таблицам соответствий $\{x_1 y_1; x_2 y_2; \dots; x_n y_n\}$ строятся функции (2.50).

Для определения параметрической надёжности ТС исследования проводились методом активного эксперимента [4, 31, 62, 151, 152, 194, 211, 327 и др.]. Такие технологические исследования позволили получить положительные результаты [186, 187, 189, 210, 227 и др.]. В результате строятся статистические модели влияния условий обработки на формирование ПКПС или ПЭС, а также зависимости эксплуатационных характеристик поверхностей от ПКПС, т. е. зависимости типа «режимы обработки – ПКПС», «режимы обработки – ПЭС», «ПКПС – ПЭС».

В настоящей работе исследовались как количественные, так и качественные факторы исследуемых технологических систем, включая параметры обработки поверхностей деталей машин и условия их изнашивания. В связи с этим, для сокращения объёма экспериментальных исследований и повышения достоверности получаемых результатов при исследовании применялись статистические методы планирования эксперимента.

Для описания многофакторных процессов протекающих в ТС обработки деталей можно с достаточной для практических целей точностью применять полиномиальные (аддитивные) модели:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \dots + \beta_k X_k, \quad (2.51)$$

где Y_i – i -ый параметр качества или эксплуатационных свойств поверхностного слоя детали после обработки;

X_i – i -ый фактор технологического процесса;

β_0, β_i – значения коэффициентов регрессии.

Такие модели предполагают наличие линейной связи между параметрами Y_i и факторами X_i , что в практике встречаются достаточно редко. Обычно наблюдается нелинейная зависимость выходных параметров моделей относительно факторов обработки. В таких случаях исходные данные подвергают преобразованиям

с целью линеаризации рассматриваемых зависимостей по оцениваемым параметрам, для чего удобно использовать мультипликативные модели в виде функции Кобба-Дугласа:

$$Y_i = \beta_0 \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot X_k^{\beta_k}. \quad (2.52)$$

После логарифмирования осуществляется линеаризация зависимости:

$$\ln Y_i = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \dots + \beta_k \ln X_k. \quad (2.53)$$

Имитационные модели (2.51) или (2.52) являются приближённой имитацией технологического процесса формирования ПКПС и ПЭС и представляют собой модели «черного ящика», недостатком которых является отсутствие адекватного отклика на изменение условий проведения моделируемого процесса.

В представленной работе моделируются устойчиво протекающие процессы.

Модели (2.51) и (2.52) строятся на основе многофакторного регрессионного анализа. Его применение считается корректным, если предполагается линейная зависимость математического ожидания величины выходного параметра Y от фактора X , а условная дисперсия $\text{var}(Y/X)$ не зависит от величины X и $\text{var}(Y/X) = \sigma^2$, где σ^2 – константа.

Оценки коэффициентов регрессии β_i являются нормально распределенными случайными величинами с математическим ожиданием b_i и средним квадратическим отклонением $S\{\beta_i\}$. Эти величины необходимо знать для проведения дальнейшего МЭ над моделью методом Монте-Карло, при этом в моделях (2.51) или (2.52) случайные величины β_i рассматриваются в качестве переменных, а факторы обработки X_i считаются фиксированными [170, 171 и др.].

Величины b_i определяются решением системы линейных уравнений, матричная форма которых имеет вид:

$$X \cdot B = Y. \quad (2.54)$$

где X , B , Y – соответственно, матрица условий эксперимента, матрица коэффициентов b_i и матрица значений измеряемых параметров или их логарифмов, вид которых представлен в (2.55):

$$X = \begin{vmatrix} X_{01} & X_{11} & \dots & X_{k1} \\ X_{02} & X_{12} & \dots & X_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{0N} & X_{1N} & \dots & X_{kN} \end{vmatrix} \quad B = \begin{vmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{vmatrix}; \quad Y = \begin{vmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_N \end{vmatrix}, \quad (2.55)$$

где N – число опытов в матрице планирования.

Решение уравнений (2.54) относительно коэффициентов b_i в матричной форме представлено выражением:

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y). \quad (2.56)$$

В таблице 2.2 представлен алгоритм обработки экспериментальных данных по зависимостям, в которых:

b'_i – кодированное значение i -го коэффициента;

X_{ij} – кодированное значение i -того фактора в j -том опыте (+1 или -1);

Y_j – значение выходного параметра в j -том опыте;

n – количество повторений каждого опыта;

$S^2\{\beta_i\}$ – дисперсия определения коэффициентов регрессии;

$S^2\{y\}$ – дисперсия опыта;

N – число опытов;

$S_j^2\{y\}_{max}$ – максимальное значение дисперсии среди N опытов плана экспе-

римента, повторяющихся n раз.

Таблица 2.2 – Алгоритм построения имитационных моделей

№ п/п	Элементы алгоритма	Расчётная зависимость	№ формулы
1	Расчёт кодированных значений коэффициентов регрессий	$b'_i = \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij} Y_j}{N}$	(2.57)
2	Дисперсия определения коэффициента регрессии	$S^2\{\beta_i\} = \frac{S^2\{Y\}}{n \cdot N}$	(2.58)

№ п/п	Элементы алгоритма	Расчётная зависимость	№ формулы
3	Кодирование уровней факторов для моделей (2.51) и (2.52)	$X_{ij} = \frac{2X_{ij} - X_{i\max} - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}}$ $X_{ij} = \frac{2 \ln X_{ij} - \ln X_{i\max} - \ln X_{i\min}}{\ln X_{i\max} - \ln X_{i\min}}$	(2.59) (2.60)
4	G-критерий Кохрена (расчётное значение)	$G_{расч} = \frac{S_j^2\{Y\}_{\max}}{\sum_{i=1}^N S_j^2\{Y\}}$	(2.61)
5	Дисперсия воспроизводимости (дисперсия опыта, если $G_{расч} \leq G_{табл}$)	$S^2\{Y\} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{ij})^2}{N(n-1)}$	(2.62)
6	Расчётное значение критерия Стьюдента	$t_i^{расч} = \frac{ b'_i }{\sqrt{S^2\{\beta_i\}}}$	(2.63)
7	Дисперсия адекватности	$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\tilde{Y}_j - \bar{Y}_j)^2}{N - k - 1}$ <p>$f_2 = N - k - 1$ и $f_1 = n - 1$ – степени свободы знаменателя и числителя</p>	(2.64)
8	Расчётное значение критерия Фишера	$F_{f_2, f_1}^{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{Y\}}$	(2.65)
9	Значение коэффициентов b_0 , b_i и их среднее квадратическое отклонение $S\{\beta_i\}$ для натуральных величин факторов	$b_0 = \frac{\exp(b'_0)}{\prod_{i=1}^k \exp\left(b'_i \frac{\ln X_{i\max} + \ln X_{i\min}}{\ln X_{i\max} - \ln X_{i\min}}\right)}$ $b_i = \frac{2b'_i}{\ln X_{i\max} - \ln X_{i\min}}$ $S\{\beta_i\} = \frac{2S\{\beta'_i\}}{\ln X_{i\max} - \ln X_{i\min}}$ $S\{\beta_0\} = S\{\beta'_i\} - \sum_{i=1}^k \left(S\{\beta'_i\} \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \right)$ $S\{\beta_0\} = \frac{\exp(S\{\beta'_i\})}{\prod_{i=1}^k \exp\left(S\{\beta'_i\} \frac{\ln X_{i\max} + \ln X_{i\min}}{\ln X_{i\max} - \ln X_{i\min}}\right)}$	(2.66)

Значения коэффициентов b_i , получаемых по зависимости (2.57), учитываются только для кодированных значений факторов. Их удобно применять при ранжировании входных факторов техпроцесса для оценки степени их влияния на формирование параметров качества поверхностей деталей машин, что позволит эффективно управлять процессом обработки.

Значимость влияния рассматриваемых факторов обработки на формирование параметра качества оценивается по критерию Стьюдента t . Если $t_{i\text{расч.}} \geq t_{i\text{табл.}}$, влияние i -ого фактора значимо при выбранном уровне значимости.

Модель вида (2.52) адекватна, если $F_{f_1, f_2, \alpha}^{\text{расч}} \leq F_{\text{табл.}}$ при выбранном уровне значимости α .

Такая методика статистической обработки результатов экспериментов позволяет получить модели (2.51) или (2.52) и определить вероятностные характеристики параметров β_i , имеющих нормальное распределение с плотностью:

$$\varphi(\beta_i) = \frac{1}{S\{\beta_i\}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\beta_i - b_i)^2}{2S^2\{\beta_i\}}\right). \quad (2.67)$$

Для исследований параметрической надёжности технологических систем по предлагаемой методике было разработано программное обеспечение*, позволяющее построить модели, характеризующие влияние входных факторов технологических систем на формирование требуемых параметров качества изделий.

2.4. Теоретические основы расчёта параметрической надёжности технологических систем методом имитационного моделирования

Для расчёта показателей параметрической надёжности ТС, в частности, вероятности выполнения задания по параметрам качества обрабатываемых поверхностей деталей или вероятности их безотказного функционирования на протяжении жизненного цикла работы изделия в течение времени $t = T$, необходимо знать математическое ожидание Y_{i0} и среднее квадратическое отклонение σ_{i0} рассмат-

* Программа разработана с участием аспиранта Исканцева Н. В.

риваемого параметра качества детали.

На рисунке 2.13. представлена блок-схема расчёта показателей параметрической надёжности ТС по параметрам качества Y_i и их характеристик $M\{Y_i\}$ и $S\{Y_i\}$, которые являются оценками величин математического ожидания Y_{i0} и среднеквадратического отклонения σ_{i0} . Для этого целесообразно применять метод статистических испытаний или метод Монте-Карло. Эта блок-схема соответствует содержимому блоков 8 – 10 общей схемы определения параметрической надёжности ТС (рисунок 2.10).

В работе [317] отмечается, что применение метода статистических испытаний (метод Монте-Карло) особенно целесообразно для исследования систем, модели которых описываются сложными стохастическими уравнениями.



Рисунок 2.13 – Блок-схема расчёта параметрической надёжности ТС по параметрам качества деталей методом статистических испытаний (Монте-Карло)

Если в моделях (2.51) и (2.52) случайными величинами являются только коэффициенты β_0 и β_i , то оценка математического ожидания $M\{Y_{i0}\}$ и дисперсии $S^2\{Y_{i0}\}$ выходного параметра модели осуществляется по зависимостям [30]:

– для моделей вида (2.51):

$$M\{Y_{i0}\} = M\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k X_i M\{\beta_i\}, \quad (2.68)$$

$$S^2\{Y_{i0}\} = S^2\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k X_i^2 S^2\{\beta_i\}, \quad (2.69)$$

– для моделей вида (2.52):

$$M\{Y_{i0}\} = \exp(\ln M\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k \ln X_i \cdot M\{\beta_i\}), \quad (2.70)$$

$$S^2\{Y_{i0}\} = \exp(\ln (S^2\{\beta_0\}) + \sum_{i=1}^k (\ln X_i)^2 \cdot S^2\{\beta_i\}). \quad (2.71)$$

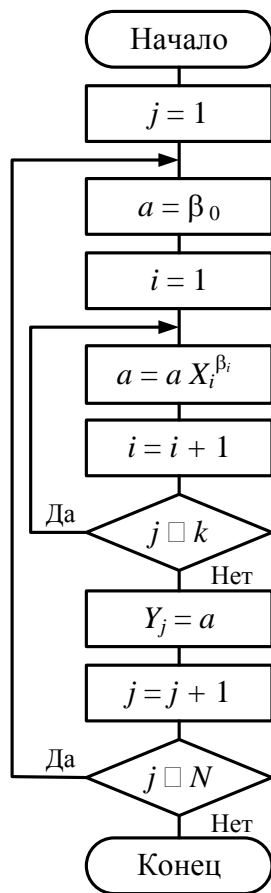


Рисунок 2.14 –
Блок-схема
расчёта $Y_i (i = 1, \dots, N)$

Если в моделях (2.51) и (2.52) случайными являются факторы обработки X_i , то определение $M\{Y_{i0}\}$ и $S^2\{Y_{i0}\}$ осуществляется обработкой массива данных Y_{iN} , полученных после МЭ над моделью ТС по схеме Монте-Карло (рисунок 2.14).

Для расчета параметрической надежности к качеству исходных данных используются (блок 1, рисунок 2.13):

– модель формирования параметра качества Y в виде (2.51) или (2.52) – $Y = f(\beta_0, \beta_i, X_i)$;

– модель скорости изменения параметра Y в процессе функционирования ТС $\gamma = f(\xi_0, \xi_i, X_i)$;

– математические ожидания и средние квадратические отклонения коэффициентов и случайных факторов обработки $M\{\beta_i\}, S\{\beta_i\}, M\{X_i\}, S\{X_i\}, M\{\xi_i\}, S\{\xi_i\}$;

– допустимые пределы изменения параметра Y_i , установленные в конструкторской документации Y_{max}, Y_{min} ,

и время T безотказного функционирования технологической системы;

– границы варьирования технологических факторов обработки $X_{i max}, X_{i min}$;

– доверительная вероятность α и допустимые абсолютные ошибки определения оценок $M\{Y_i\}$ и $S^2\{Y_i\}$ (величины a и d).

В блоке 2 (рисунок 2.13) определяются значения управляющих факторов X_i , обеспечивающих получение оптимального значения требуемого параметра $Y_{0 opt}$,

и максимальную величину запаса ТС η по данному параметру. В соответствующих имитационных моделях при этом применяются коэффициенты $b_i = M\{\beta_i\}$.

В блоке 3 (рисунок 2.13) определяются характеристики точности и достоверности результатов моделирования, связанные с выбором количества прогонов модели N в ходе машинного эксперимента, которое должно обеспечить точности оценки значений $M\{Y_i\}$ и $S^2\{Y_i\}$.

Математическое ожидание параметра Y_i должно удовлетворять условию

$$P[Y_{i0} - d \leq M\{Y_i\} \leq Y_{i0} + d] = 1 - \alpha, \quad (2.72)$$

где $(1 - \alpha)$ – вероятность, что интервал $(Y_{i0} \pm d)$ содержит оценку $M\{Y_i\}$.

В таком случае число прогонов при условии нормального распределения величины Y_i рассчитывается по зависимости

$$N_1 = \frac{(\sigma_{i0} z_{\alpha/2})^2}{d^2}, \quad (2.73)$$

где $z_{\alpha/2}$ – стандартная нормальная двусторонняя статистика; σ_{i0} – среднее квадратическое отклонение параметра Y_i ; d – допустимая разность между оценкой и рассчитанным значением математического ожидания параметра Y_i .

Величину, характеризующую ошибку определения $S^2\{Y_i\}$, можно представить выражением $d = \sigma_{i0}/a$, тогда

$$N_1 = \frac{(\sigma_{i0} z_{\alpha/2})^2}{\left(\frac{\sigma_{i0}}{a}\right)^2} = a^2 z_{\alpha/2}^2. \quad (2.74)$$

Обеспечить условие заданной точности оценки дисперсии позволит расчет числа прогонов N_2 модели по условию:

$$P[(1 - d)\sigma_{i0}^2 \leq S^2\{Y_i\} \leq (1 + d)\sigma_{i0}^2] = 1 - \alpha, \quad (2.75)$$

где d – число, характеризующее степень близости оценки $S^2\{Y_i\}$ к истинной дисперсии σ_{i0}^2 ($0 \leq d \leq 1$).

В уравнении (2.75) доверительную вероятность можно сделать не зависящей от значения σ_{i0}^2 с помощью χ^2 -статистики значения $(N_2 - 1) S^2\{Y\} / \sigma_{i0}^2$ с числом степеней свободы $(N_2 - 1)$. Если значение N_2 велико, то распределение χ^2

можно аппроксимировать как нормальное и получить уравнение относительно N_2 :

$$N_2 = \frac{1 + 2z_{\alpha/2}^2}{d^2}. \quad (2.76)$$

Результирующее число прогонов N выбирается с учётом выполнения условий (2.74) и (2.76).

В ходе МЭ (блоки 5 – 8 рисунок 2.13) производится N прогонов моделей формирования параметра Y_i и скорости γ его изменения в процессе обработки.

Случайные величины $X_i, \beta_{0i}, \beta_{ij}, \xi_{0i}, \xi_{ij}$, генерируются датчиком псевдослучайных чисел (блок 5).

Равномерно распределённые случайные числа генерируются в интервале (0, 1), затем генерируются нормально распределённые случайные числа с параметрами $M\{\beta_i\} = b_i, S\{\beta_i\}$.

Для модели (2.52) при расчёте параметра Y_j в процессе МЭ вычисляются N значений функции $Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_k; b_0, b_1, \dots, b_k; S\{\beta_0\}, S\{\beta_1\}, \dots, S\{\beta_k\})$, определяемой по зависимости

$$Y_i = b_0 \prod_{j=1}^k X_j^{RND N_i(b_i, S\{\beta_i\})}, \quad (2.77)$$

где X_1, X_2, \dots, X_k – значения входных параметров технологического процесса;
 b_0, b_1, \dots, b_k – математические ожидания коэффициентов модели (регрессии);
 $S\{\beta_0\}, S\{\beta_1\}, \dots, S\{\beta_k\}$ – среднеквадратические отклонения коэффициентов модели (регрессии);

$RND N_i(b_i, S\{\beta_i\})$ – нормально распределённое случайное число с параметрами распределения b_i и $S\{\beta_i\}$.

Блок-схема программы формирования массива Y_j показана на рисунке 2.14. Аналогично формируется массив для скорости γ .

В блоке 9 блок-схемы расчёта параметрической надёжности ТС методом Монте-Карло (рисунок 2.13) осуществляется проверка статистических гипотез и оцениваются параметры распределения. Для этого вычисляются значения $M\{\tilde{Y}_i\}$ и $S^2\{\tilde{Y}_i\}$:

$$M\{\tilde{Y}_i\} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_{ij}}{N}, \quad (2.78)$$

$$S^2\{\tilde{Y}_i\} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (Y_{ij} - M(\tilde{Y}_i))^2, \quad (2.79)$$

$$S\{\tilde{Y}_i\} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (Y_{ij} - M(\tilde{Y}_i))^2}, \quad (2.80)$$

где \tilde{Y}_i – значения параметра Y_i , полученные расчётным путём в ходе МЭ.

По полученным данным \tilde{Y}_i и \tilde{y}_i с помощью критерия χ^2 определяется закон распределения – нормальное, логарифмически-нормальное распределения или распределение Вейбулла. Критерий χ^2 определяется выражением

$$\chi_{расч}^2 = \sum_{\ell} \frac{(\psi_0 - \psi_{\ell})^2}{\psi_{\ell}}, \quad (2.81)$$

где ψ_0 – наблюдаемая частота для каждого интервала значений значения параметра Y_i ; ψ_{ℓ} – теоретическая частота для каждого интервала.

Соответствующий закон распределения принимается, если для заданного уровня значимости α и числа степеней свободы соблюдается условие $\chi_{расч}^2 \leq \chi_{табл}^2$.

В блоке 10 (рисунок 2.13) определяется вероятность выполнения задания по регламентируемым параметрам качества обрабатываемой поверхности:

$$P\{Y_{i \min} < Y_i < Y_{i \max}\} = \Phi\left(\frac{Y_{i \max} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right) - \Phi\left(\frac{Y_{i \min} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right) \quad (2.82)$$

или

$$P\{Y_i < Y_{i \max}\} = 0,5 + \Phi\left(\frac{Y_{i \max} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right). \quad (2.83)$$

Зависимость (2.82) используется в случае двухстороннего ограничения допуска параметра Y_i , а (2.83) – в случае одностороннего ограничения допуска.

В связи с тем, что параметры качества поверхностного слоя и параметры эксплуатационных свойств часто задаются с симметричным допуском в виде

$$Y_i = M\{Y_i\} \pm \delta M\{Y_i\}, \quad (2.84)$$

где δ – относительный интервал варьирования (оговаривается в конструкторской документации), в блоке 10 (рисунок 2.13) проводится оценка вероятности выполнения задания ТС по параметру качества Y_i в зависимости от величины δ .

Вероятность безотказной работы ТС в течение времени $t = T$, выражающейся в обеспечении параметра качества детали Y_i в пределах, оговорённых техническими условиями, рассчитывается в блоке 11 в соответствии с зависимостями (2.82) или (2.83).

При исследовании показателей надёжности ТС методом имитационного моделирования следует учитывать, что моделируются результаты проведенных испытаний ТС, то есть «прошлое». Поэтому для практического применения полученных результатов необходимо обеспечить постоянство формы распределения параметров технологического процесса во времени. Такие результаты следует учитывать для нормально функционирующего технологического процесса.

2.5. Программное обеспечение расчёта параметрической надёжности технологических систем на основе активного эксперимента

Для исследований параметрической надёжности технологических систем было разработано программное обеспечение*, позволяющее построить модели, характеризующие влияние входных факторов технологических систем на формирование требуемых параметров качества изделий, и методом имитационного моделирования определить вероятность выполнения задания технологической системой.

Общая блок-схема работы программы аналогична блок-схеме, представленной на рисунке 2.10.

Программа разработана на языке C# в среде программирования *Visual Studio* 2010. Язык C# выбран как компромиссный вариант между простотой программи-

* Программа разработана с участием аспиранта Исканцева Н. В.

рования и производительностью вычислений. Для реализации пользовательского интерфейса выбрана технология *Windows Forms* – технология разработки *Windows*-приложений для платформы *Microsoft.NET*, позволяющая создавать интерфейсы со стандартными элементами управления.

Преимуществом выбранной технологии является высокая надёжность программного продукта, удобство интерфейса, отсутствие неприемлемых для пользователя временных задержек даже для большого числа факторов эксперимента.

На первом этапе работы программы реализуется алгоритм построения имитационных моделей, изложенный в таблице 2.2.

Расчёт параметров моделей осуществляется по результатам проведения активных экспериментов типа 2^k по исследованию технологических систем, в частности, влияния факторов обработки на формирование параметров качества деталей.

В рабочем окне программы предлагается ввести данные результатов исследований технологических систем (рисунок 2.15):

- число входных факторов X_i с указанием границ их варьирования во время эксперимента;
- число измерений выходных параметров, произведенных во время эксперимента.

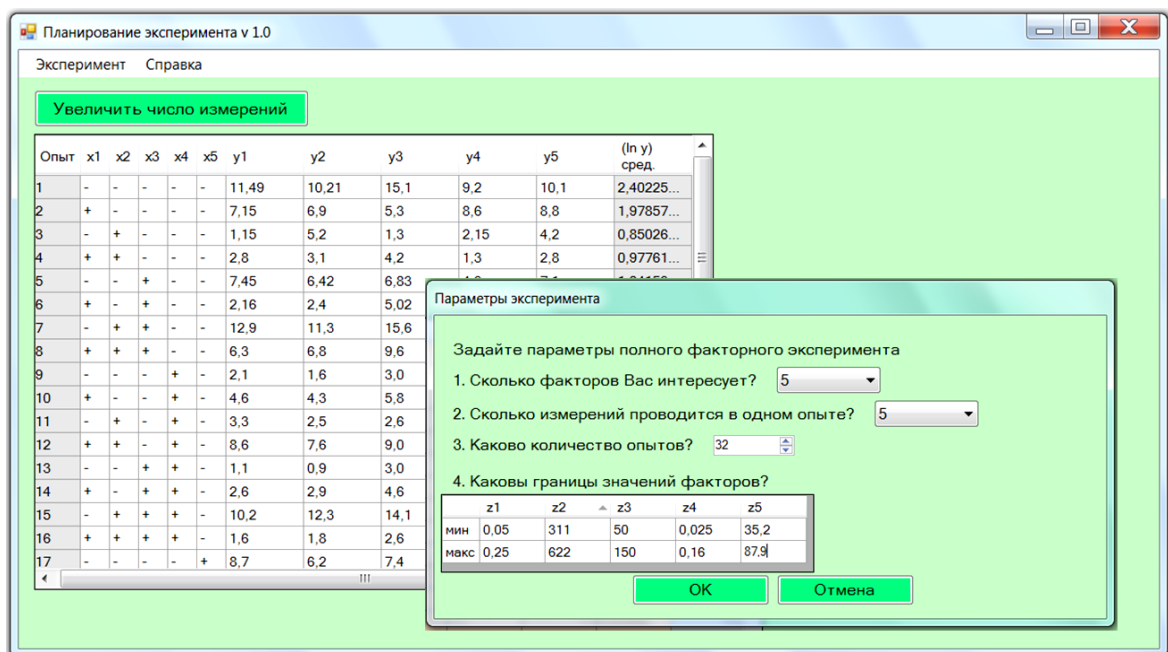


Рисунок 2.15 – Окна ввода исходных данных для расчета параметров моделей

В следующем окне вводятся результаты измерений в таблицу планирования экспериментов (рисунок 2.15).

После подтверждения ввода данных рассчитываются коэффициенты регрессии β_i моделей (2.51), (2.52). Выбор вида модели – аддитивной или мультипликативной определяется в меню выбора параметров расчётов. При этом назначается уровень значимости модели по критериям адекватности (0,05; 0,01).

Результаты представляются в окне (рисунок 2.16), в котором предлагается выбор дальнейших действий: проверки адекватности полученной модели или дальнейшее определение параметрической надёжности.

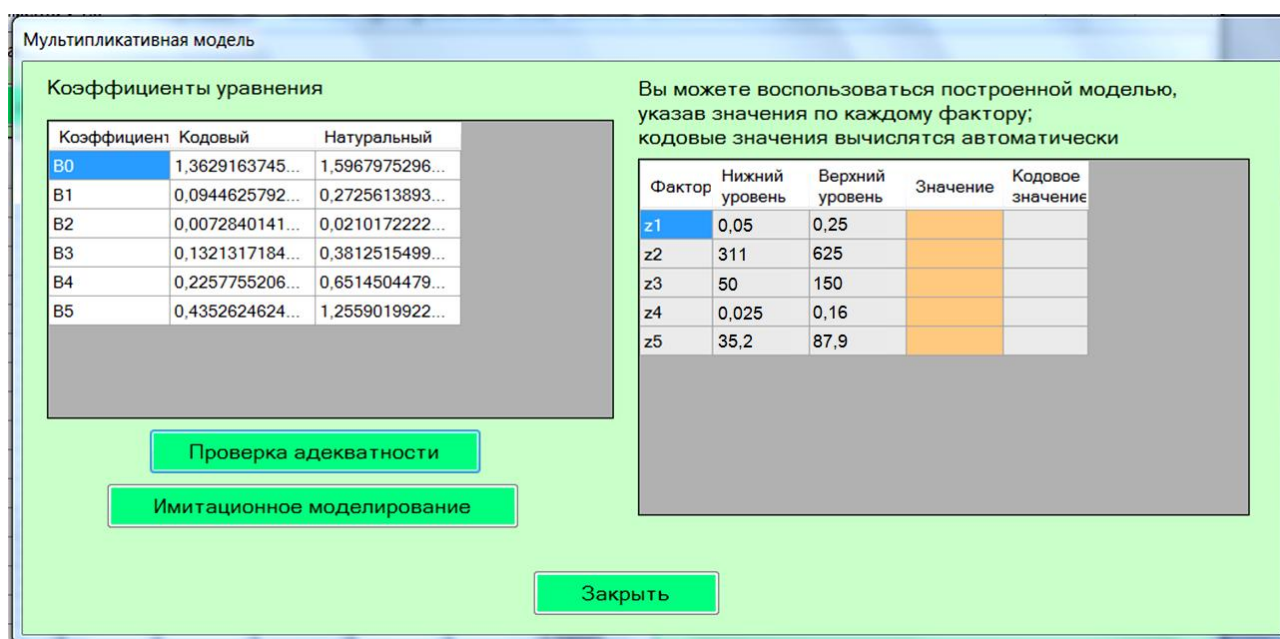


Рисунок 2.16 – Окно результатов расчёта параметров β_i моделей и выбора действий

Проверка адекватности полученной модели позволяет получить данные по проверке значимости коэффициентов β_i моделей по T -критерию Стьюдента, воспроизводимости процесса по G -критерию Кохрена и адекватности модели по F -критерию Фишера. Результаты расчётов появляются в соответствующем окне (рисунок 2.17) или сохраняются по желанию пользователя в протоколе в виде *html*-отчётов.

Выбор функции «Имитационное моделирование» (рисунок 2.18) позволяет рассчитать вероятность выполнения задания технологической системой. Рассчитывается вероятность P_i появления значения Y_i в интервалах δ % с построением

соответствующего графика. При этом пользователь может задавать различные фиксированные значения входных факторов X_i – средние, максимальные, минимальные; или выходных факторов Y_i – минимальные или максимальные. Результаты моделирования также можно вывести в виде html-отчёта.

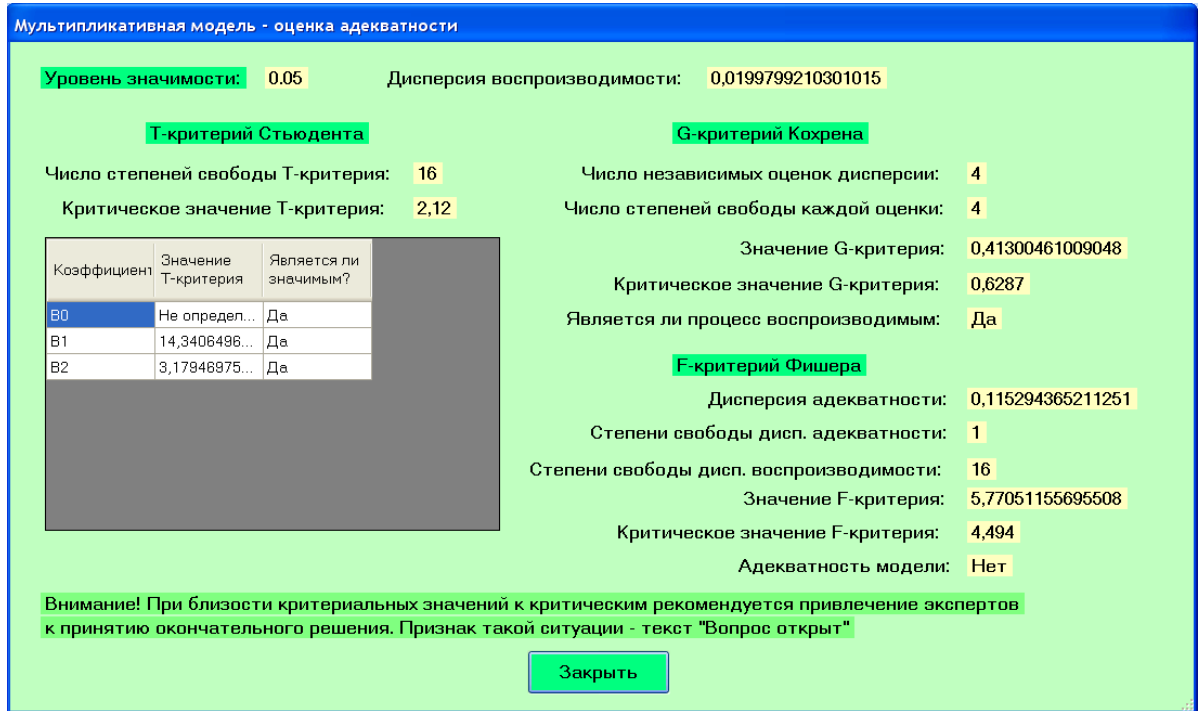


Рисунок 2.17 – Окно результатов расчётов адекватности модели

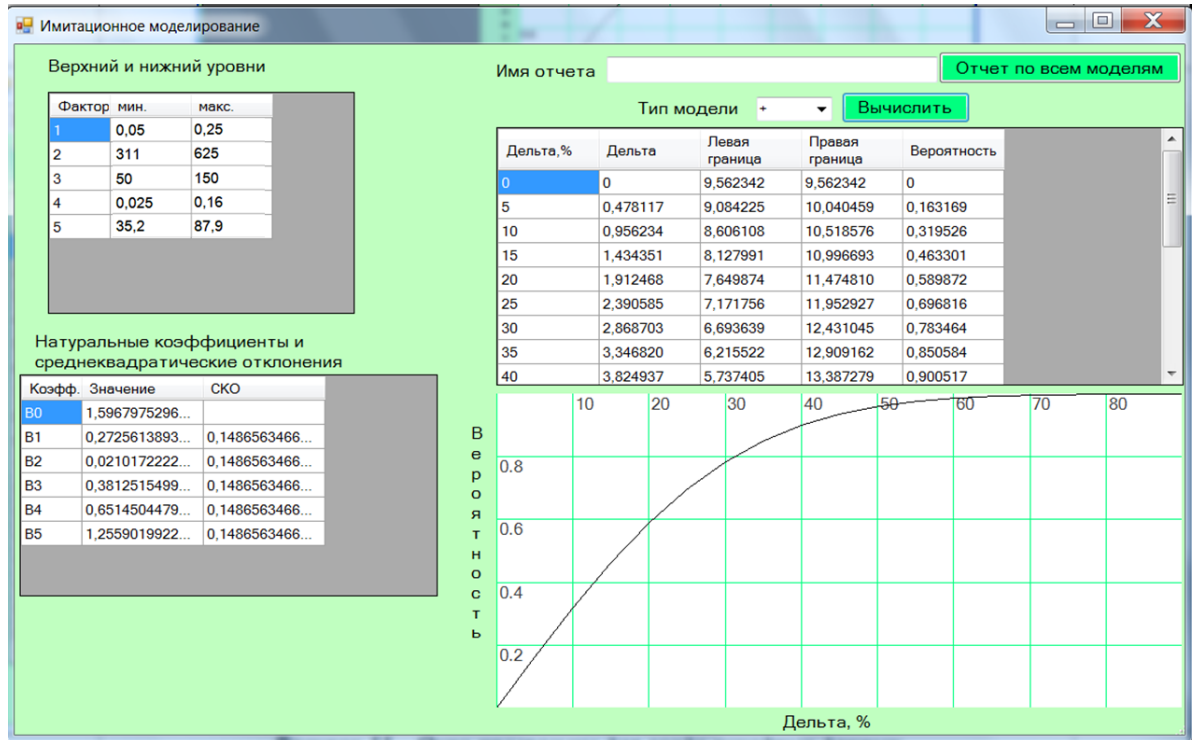


Рисунок 2.18 – Окно результатов расчёта вероятности выполнения задания технологической системой

Отдельные результаты исследований с применением предложенной методики расчёта параметрической надёжности, изложенной в данной главе, получили отражение в публикациях автора [123, 129, 130, 131, 134, 139, 140, 145, 258, 265, 276, 287, 296, 304, 334, 345 и др.].

2.6. Выводы ко второй главе

Для достижения поставленной цели исследований в главе 2 решены задачи 1, 2, 3, сформулированных в главе 1. Результаты решения этих задач позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработаны теоретические основы назначения технологических значений параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в технологической документации, обеспечивающие выполнение технических условий, заданных конструктором. Получены соответствующие зависимости, пригодные для практического применения на этапе технологической подготовки производства.

2. Разработаны теоретические и методологические основы оценки параметрической надёжности технологических систем механической обработки по обеспечению параметров качества поверхностей деталей в заданных интервалах, включающей построение моделей их формирования, реализацию и обработку результатов машинных экспериментов над моделями с применением методов имитационного моделирования. Разработана методология их практического применения.

3. Раскрыты особенности построения физико-статистических моделей формирования параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин в процессе механической обработки в зависимости от её условий (выбор функций отклика, факторов обработки и др.).

4. Разработана методика расчёта параметрической надёжности технологических систем обработки поверхностей деталей и соответствующее алгоритмическое и программное обеспечение.

ГЛАВА 3. ТЕХНИЧЕСКОЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Исследуемые технологические системы, материалы, детали

Для решения задач, поставленных в 1 главе, использовался разработанный комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки для оценки параметрической надежности технологических систем по параметров качества и эксплуатационным свойствам поверхностей деталей машин (рисунок 3.1).

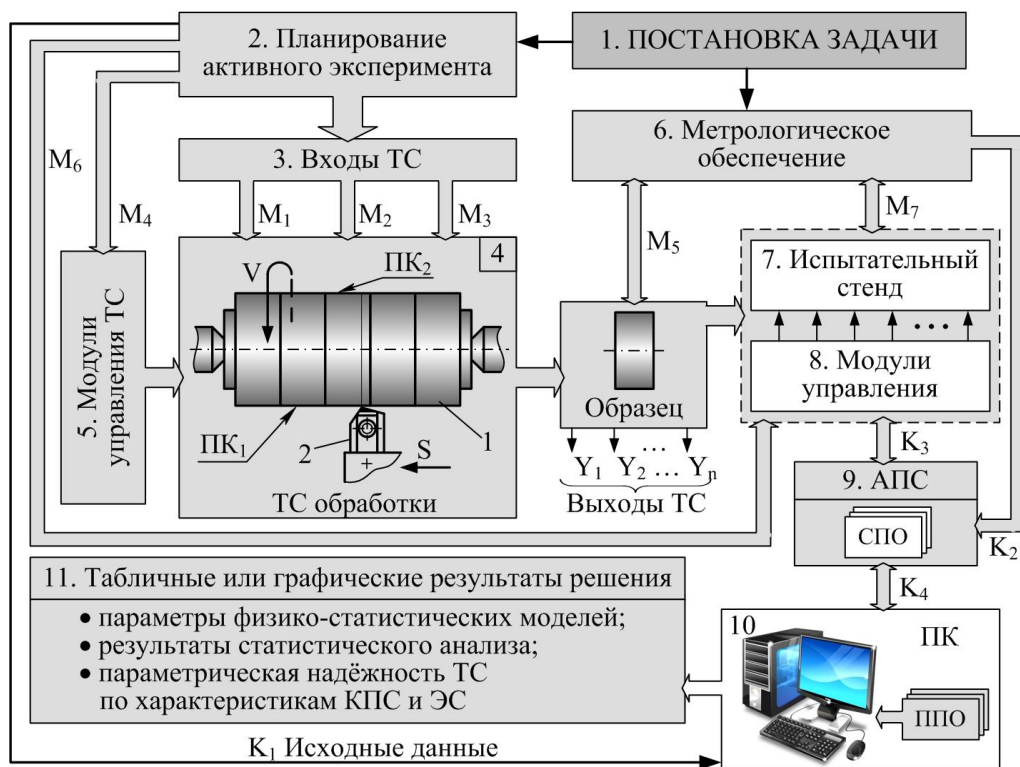


Рисунок 3.1 – Структурная схема экспериментальных исследований параметров технологических систем металлообработки для оценки их параметрической надежности

При планировании эксперимента 2 выбираются входные факторы ТС 3 в виде множеств M_i : M_1 – параметры качества поверхности после предварительной обработки PK_1 или режимы предварительной обработки, которые задаются с целью исследования влияния технологической наследственности на формирование параметров качества поверхности PK_2 в процессе обработки; M_2 – геометрические или

другие параметры инструмента; M_3 – режимы и другие условия обработки в ТС (блок 4). Наряду с выбором факторов, регламентируются их пределы варьирования, определяющие исследуемую область факторного пространства. Этот вопрос, если он не оговорён в постановке задачи 1, решается экспериментально или путём анализа априорной информации об исследуемой ТС.

В состав структурной схемы входят также испытательные стенды 7 для исследования ЭС поверхностей деталей, аппаратно-программные средства (АПС) 9, компьютер 10, а также программные или ручные модули управления ТС (блок 5) и испытательными стендами 8. Управление модулями 5 и 8 осуществляется автоматически или вручную путём введения элементов множеств M_4 и M_6 , сформированными в соответствии с планом эксперимента.

В структурной схеме действуют следующие основные каналы передачи информации: K_1 – исходные данные активного эксперимента в ПК (10); K_2 – результаты измерений параметров качества устройствами автономного действия (измерительные блоки профилометров, микроскопов и др.); K_3 – измерительные сигналы, снятые с датчиков (индуктивных, тензометрических, температурных и др.), встроенных в испытательные стенды; K_4 – обмен информацией между АПС и ПК.

Выходом ТС (4) являются параметры качества обработанной поверхности (ПК₂) Y_1, Y_2, \dots, Y_n , которые после измерения передаются в 6 в виде множества $M_5 = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$. Аналогично измеряются в 7 и передаются в 6 параметры эксплуатационных свойств поверхности или соединения (множество M_7), элементом которого она является.

3.1.1. Методика экспериментальных исследований технологических систем обработки плоских поверхностей деталей

Эксперименты по исследованию параметрической надёжности технологических систем обработки инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов (ССТМ) проводились на образцах из чугуна СЧ20 (ГОСТ 1412-85), широко применяемого для изготовления базовых деталей металлорежущих станков и

технологической оснастки.

Габаритные размеры образцов из чугуна призматической формы (рисунок 3.2а) составляли $300 \times 60 \times 30$ мм.

Исследовалась технологическая система торцевого фрезерования деталей из чугуна инструментами, оснащёнными ССТМ как метод, позволяющий обеспечить высокую производительность и качество обработки деталей. В работах [24, 38, 65, 71, 80, 105, 153, 176, 227 и др.] рассматриваются вопросы применения инструмента, оснащённого ССТМ, но нет информации по надёжности формирования параметров качества поверхности деталей

Для чистового фрезерования торцевыми фрезами применялись резцы-вставки, оснащенные композитом 10 (гексанит-Р). Общий вид фрезы ($\varnothing 110$ мм) представлен на рисунке 3.2б.

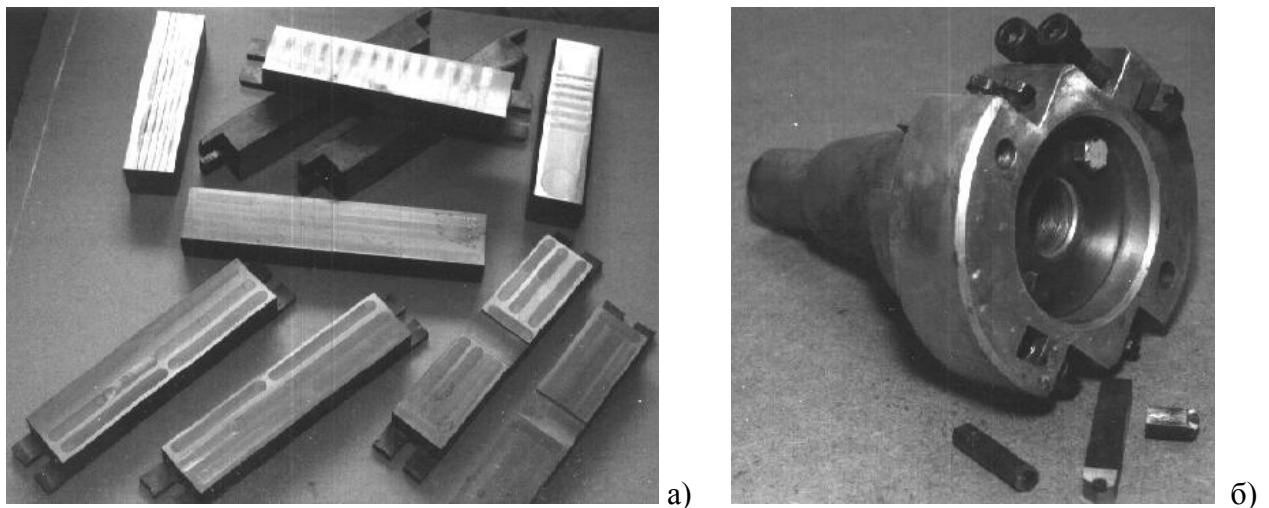


Рисунок 3.2 – Экспериментальные образцы из чугуна СЧ20 (а) торцевая фреза для высокоскоростного фрезерования с резцами-вставками, оснащёнными композитом 10 (б)

По сравнению с другими видами ССТМ композит 10 отличается повышенной износостойкостью и стабильностью режущих свойств, что связано с особенностями структурного состояния композита 10, в котором нитрид бора представлен сфалеритной ($BN_{сф}$) и вюртцитной ($BN_{в}$) модификациями, а графитоподобная фаза не превышает 1%.

Композит 10 может применяться для прерывистой обработки чугунов с твёрдостью 160 – 600 НВ, закалённых сталей с твёрдостью 40 – 60 HRC и др.

Для фрезерования использовался однозубый инструмент. Такой выбор обусловлен стремлением обеспечить устойчивость процесса обработки, который при увеличении числа режущих кромок приводит к снижению виброустойчивости процесса фрезерования из-за возникновения в ТС автоколебаний и, как следствие, повышению шероховатости и волнистости обрабатываемой поверхности [216].

Для алмазного выглаживания (АВ) применялся инструмент упругого действия с периферийно расположенным индентором из алмаза синтетического поликристаллического (АСПК, карбонадо) (рисунок 3.3).

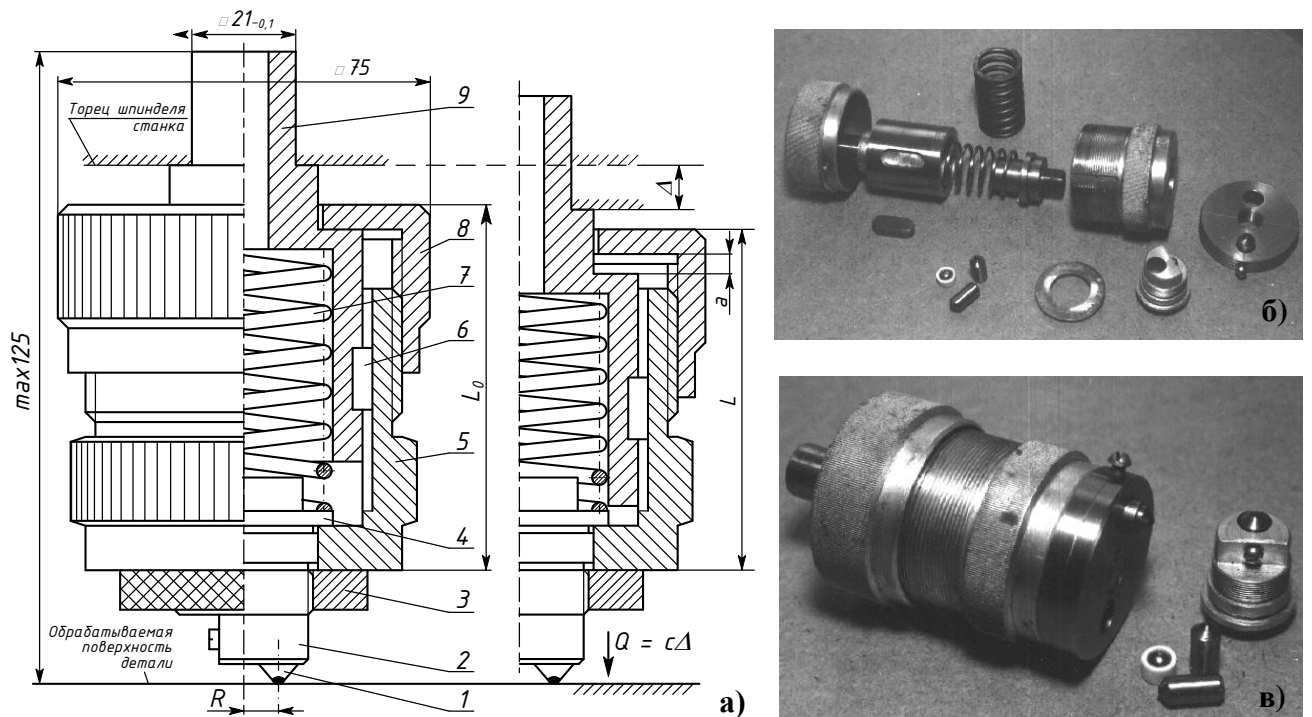


Рисунок 3.3 – Конструкция инструмента для алмазного выглаживания плоских поверхностей деталей: а – конструкция выглаживателя: 1 – вставка с индентором из АСПК; 2 – держатель; 3 – гайка; 4 – корпус держателя; 5 – корпус; 6 – шпонка; 7 – пружина; 8 – крышка; 9 – хвостовик; б – выглаживатель в разобранном состоянии; в – общий вид алмазного выглаживателя с различными держателями и инденторами

В инструменте ППД упругого действия (рисунок 3.3а) вставка с индентором 1 крепится держателем 2 в корпусе 4 гайкой 3. От хвостовика 9 через пружину 7 сила выглаживания Q передаётся на корпус держателя 4, начальное положение которой характеризуется расстоянием L_0 , регулируемым крышкой 8. Крутящий момент через шпонку 6 передается от хвостовика на корпус инструмента 5.

Натяг пружины 7 определяется величиной $\Delta = (L_0 - L - a)$, где a – постоян-

ная величина перемещения корпуса держателя 4 в направлении обрабатываемой поверхности после контакта с ней индентора. Сила алмазного выглаживания составляет $Q = \Delta c$, где c – жёсткость пружины 7.

Тарировка пружины осуществляется с помощью динамометра.

Алмазный индентор может иметь как периферийное, так и центральное расположение в инструменте. Его конструкция допускает изменение радиуса R расположения индентора в пределах от 0 до $B/2$, где B – ширина обработки. В условиях проводимых экспериментов $R_{max} = 20$ мм.

Наряду с АВ рассматривался процесс ППД методом накатывания шариковым индентором из стали ШХ15. Конструкция инструмента для АВ (рисунок 3.3) позволяет осуществлять его переналадку для обработки накатыванием шариком за счёт простой замены алмазных инденторов на шариковые.

В исследуемой ТС (рисунок 3.4) входными управляющими факторами в подсистеме ТС1 являются режимы фрезерования (глубина t , подача S , скорость V обработки), инструментальный материал и др., определяющие точность обработки и параметры качества поверхностного слоя K_1 (шероховатость, волнистость, макроотклонения). Вместе с режимами выглаживания (подача S_{AB} , скорость V_{AB} , сила выглаживания Q_{AB}), видом СОТС и другими управляющими воздействиями параметры качества K_1 формируют группу управляющих факторов в системе ТС2. К выходным факторам K_2 относятся, ПКПС и ПЭС поверхности, обработанной в подсистеме ТС2.

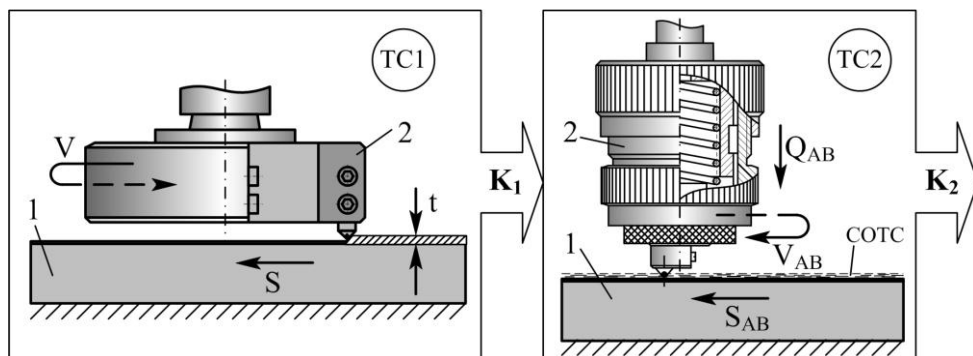


Рисунок 3.4 – Технологическая система обработки плоских поверхностей деталей из чугуна торцевым фрезерованием (ТС1) и последующим алмазным выглаживанием (или накатыванием шариком) (ТС2) с применением инструментов, оснащённых ССТМ: 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – инструмент

Исследования проводились на следующих станках (рисунок 3.5):

- 6A12П как представителе универсальных станков вертикальной консольно-фрезерной группы;
- 6P13Ф3 как представителе станков с ЧПУ класса NC и класса PCNC (под управлением ПК) фрезерной группы (рисунок 3.5 а);
- FQW-400 с системой управления CNC как представителя фрезерных станков с компьютерными системами ЧПУ (рисунок 3.5 б, в).

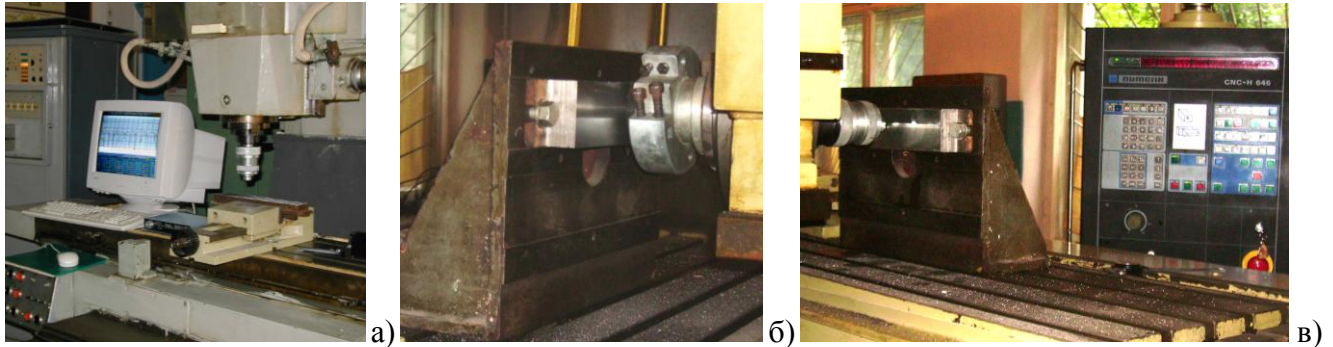


Рисунок 3.5 – Алмазное выглаживание деталей на станке 6P13Ф3 (а); торцевое фрезерование (б) и алмазное выглаживание (в) деталей на станке FQW-400 с системой ЧПУ CNC-H 646

3.1.2. Методика экспериментальных исследований обработки и триботехнических испытаний наружных цилиндрических поверхностей деталей

Одной из задач исследований является технологическое обеспечение требуемых ПКПС и ПЭС, в частности, износостойкости цилиндрических поверхностей деталей на основе обработки инструментами из ССТМ. Формирование параметров качества, определяющих износостойкость трущихся поверхностей деталей, осуществлялось в трёхступенчатой комбинированной ТС обработки, которая включает три основных этапа (рисунок 3.6) [120, 158, 278 и др.].

1 этап – предварительная чистовая обработка поверхности, обеспечивающая заданную точность размеров детали и требуемые геометрические параметры качества для эффективного нанесения материалов прирабочных плёнок. Технологические операции могут выполняться чистовым точением O_{11} инструментом с ССТМ или шлифованием O_{12} . Предпочтительнее применение лезвийных методов

обработки, при которых исключается процесс шаржирования поверхности.

2 этап – нанесение на поверхности деталей материалов для получения мягкой прирабочной плёнки. Операция выполняется двумя способами: O_{21} – финишной антифрикционной безабразивной обработкой (ФАБО) фрикционным лагунированием (меднением и др.); O_{22} – химическим способом, включающем нанесение на поверхность химических растворов, вызывающих осаждение на ней плёнки мягкого вещества, например меди.

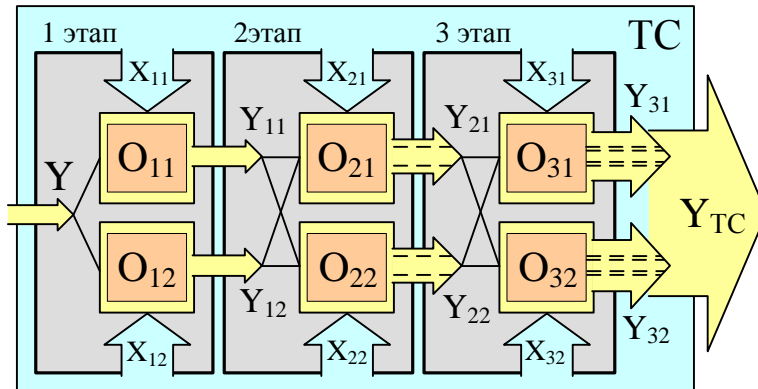


Рисунок 3.6 – Схема трёхступенчатой комбинированной технологической системы обработки деталей: Y – качество поверхностного слоя, полученное на предыдущих технологических операциях; Y_{11}, \dots, Y_{mn} – ПКПС на промежуточных этапах технологического процесса обработки; Y_{TC} – ПКПС после обработки; X_{mn} – факторы обработки технологической операции; O_{mn} – вид технологической операции; m – этап обработки; n – метод обработки

сением на поверхность химических растворов, вызывающих осаждение на ней плёнки мягкого вещества, например меди.

3 этап – формирование микропрофиля, исключая процесс микрорезания и обеспечивающий требуемые ПЭС, в частности износостойкость. Обработка осуществляется методами ППД: O_{31} – алмазным выглаживанием; O_{32} – накатыванием шариками и т. п.

Для исследований технологических возможностей рассматриваемой ТС использовались цилиндрические детали из стали 45 с твёрдостью HRC 48...50, как типичного представителя среднеуглеродистых конструкционных сталей.

При обработке поверхностей образцы в виде ступенчатых валиков (рисунок 3.7 а) базировались в центрах, а в виде колец размерами $\varnothing 50 \times \varnothing 40 \times 20$ мм (рисунок 3.7 б) – на оправках 3 или 4 (рисунок 3.7 г) с различной жёсткостью.

На этапе 1 (рисунок 3.6) параметры качества поверхностей деталей формировались на токарном станке чистовым точением стандартными резцовыми вставками 1, режущая часть которых оснащена композитом 10. Вставки закреплялись в державке 2 (рисунок 3.7 в).

АВ и нанесение мягких прирабочных плёнок осуществлялось инструментами упругого действия 5, 6, с инденторами 7 (рисунок 3.7 д, е), оснащённые ал-

мазами АСПК или латунные стержни 8 для ФАБО (рисунок 3.7 д).

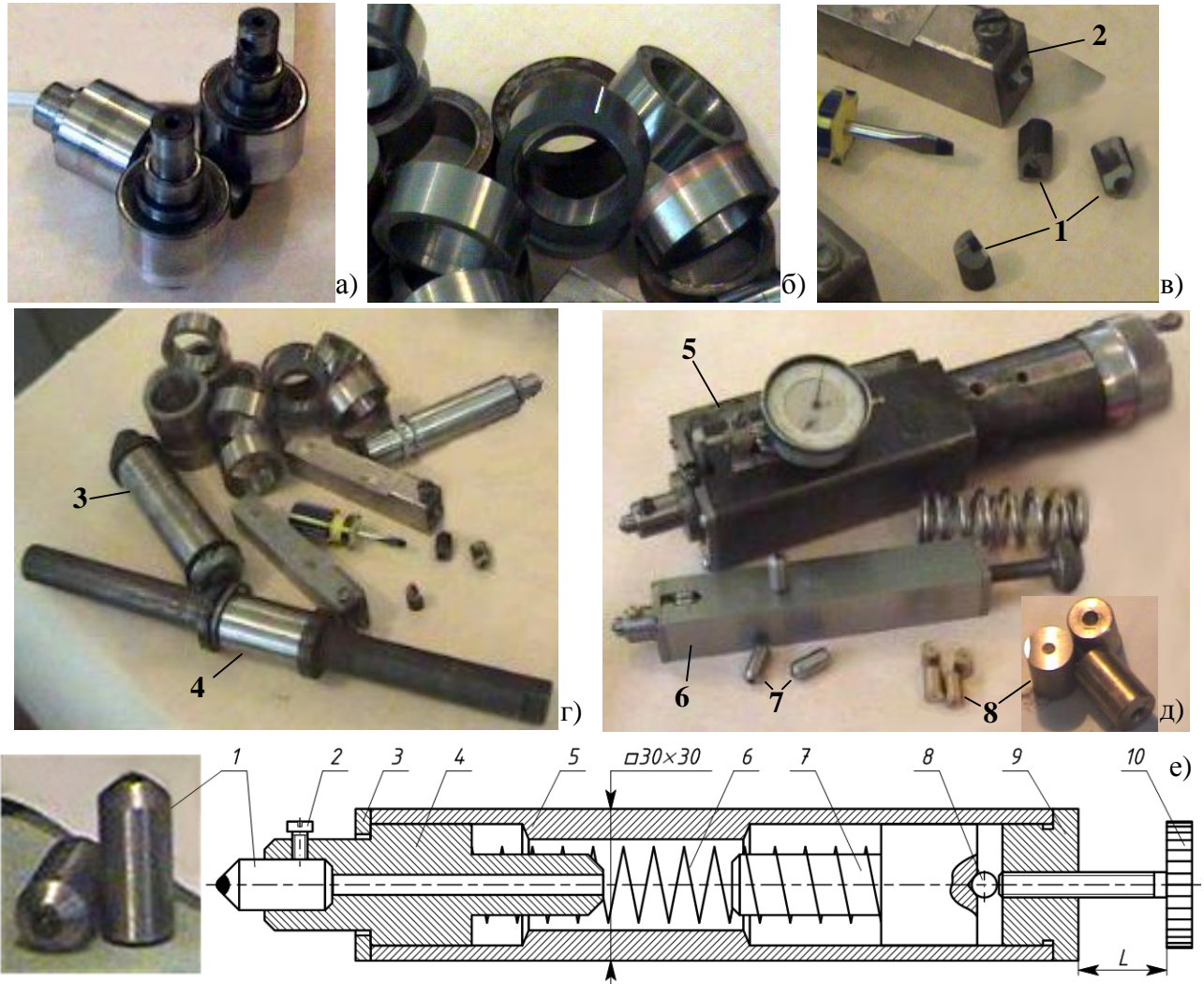


Рисунок 3.7 – Образцы и оснастка для исследования ТС обработки цилиндрических деталей:
 а) образцы валов монолитные; б) образцы валов в виде колец, устанавливаемых на оправку; в) державка для тонкого точения и резцовые вставки из ССТМ; г) оснастка и инструмент; д) инструмент упругого действия для АВ и ФАБО, е) конструкция инструмента упругого действия: 1 – алмазный индентор; 2 – винт; 3 – крышка; 4 – держатель; 5 – корпус; 6 – пружина; 7 – шток; 8 – шарик; 9 – заглушка; 10 – регулировочный винт

В процессе ФАБО фрикционным латунированием поверхности применялись поверхностно-активные вещества (глицерин). В зоне контакта латунного стержня с поверхностью обработки создавалось давление 30 МПа. Подача инструмента с латунным стержнем составляла 0,05 мм/об, обработка детали проводилась со скоростью 20 м/мин. Обработка поверхности осуществлялась за три прохода, что обеспечивало формирование устойчивой плёнки.

Общий вид операции фрикционного латунирования показаны на рисунке 3.8 г. Химическое меднение (рисунок 3.8 б) поверхности на 2 этапе комбиниро-

ванной обработки осуществлялась нанесением на обезжиренную поверхность образца, вращающегося со скоростью $V = 20$ м/мин, раствора хлорной меди $CuCl_2$ в смеси 70%-ной уксусной кислоты (CH_3COOH , 86 г.) с глицерином ($CH_2OHCH_2OHCH_2OH$, 92 г.). Равномерная медная плёнка формировалась на поверхности через 7 – 10 минут выдержки детали с постоянной небольшой скоростью вращения (рисунок 3.8 в).

Обработка деталей осуществлялась на токарно-винторезном станке 16K20 (рисунок 3.8 а) и на токарно-фрезерном обрабатывающем центре мод. EX-308 (фирма TAKISAWA) (рисунок 3.8 д).

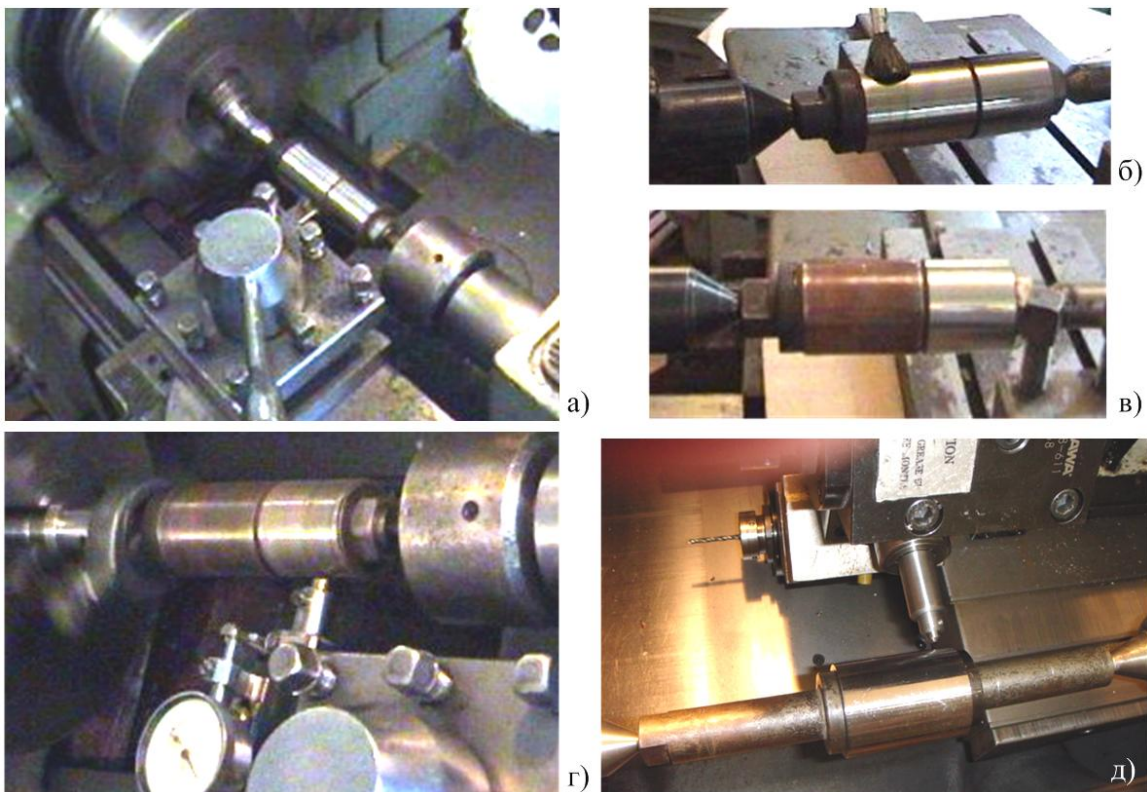


Рисунок 3.8 – Операции трёхступенчатой комбинированной ТС обработки деталей:
 а) чистовое точение композитом 10; б) химическое меднение; в) поверхностная плёнка меди;
 г) фрикционное латунирование; д) алмазное выглаживание образцов на токарно-фрезерном обрабатывающем центре мод. EX-308

Одной из задач, поставленных в работе, является исследование параметрической надёжности процесса формирования триботехнических характеристик поверхностей деталей соединений трения-скольжения.

Рассматривались вопросы формирования триботехнических характеристик поверхностей в процессе приработки цилиндрических пар трения скольжения

«сталь 45 – бронза ОЦС 5-5-5 или антифрикционный чугун АЧС-1».

На рисунке 3.9 представлена схема модели соединения.

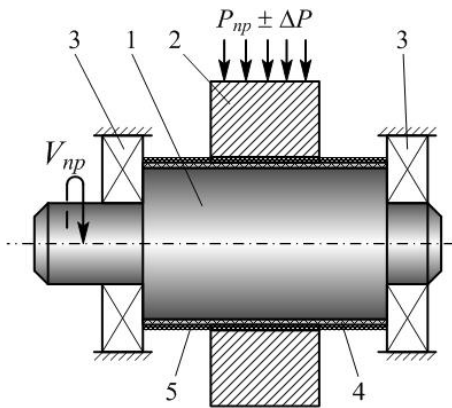


Рисунок 3.9. Модель цилиндрической пары трения-скольжения: 1 – модель вала; 2 – модель вкладыша; 3 – подшипники качения; 4 – приработочная плёнка на поверхности вала; 5 – смазка; P – погонная динамическая нагрузка; V_c – скорость относительного скольжения трибоэлементов

Модели валов 1 изготавливались из стали 45 (HRC 48...50), функциональные поверхности валов были обработаны комбинированной обработкой (рис. 3.6).

Модели вкладышей 2 изготавливались из антифрикционного чугуна АЧС-1 или бронзы БрОЦС 5-5-5. Функциональные поверхности образцов обрабатывались тонким растачиванием.

Исследование триботехнических свойств поверхностей осуществлялось на установке триботехнических испытаний цилиндрических пар трения-скольжения при дина-

мических нагрузках, являющейся модернизированным вариантом устройства применявшегося в исследованиях [114, 115, 119, 286]. Схема установки представлена на рисунке 3.10.

Втулка 27, имитирующая вкладыш подшипника скольжения, и вал 7 образуют исследуемое соединение. Вал 7 вместе с коническими роликовыми подшипниками 8 устанавливается в корпусе 3, который крепится к плите 1 винтами 2. После выбора в подшипниках осевого зазора затяжкой гайки 27 вал с подшипниками окончательно крепятся к корпусу 3 крышкой 26. Нагрузка на пару трения создается блоком, включающим винт 20, образцовый динамометр 10 с тензодатчиками, откидной рычаг и промежуточный нажимной элемент (не показаны), шарики 12, 9 и ролики 46 и 49, позволяющие осуществлять симметричную радиальную нагрузку на объект исследования. Винт 20 ввинчивается в гайку 13, запрессованную в стойку, установленной на плите 1. Гайка 13 для исключения проворота фиксируется штифтом в стойке. Консольная балка 30 с тензодатчиками позволяет измерить величину момента трения.

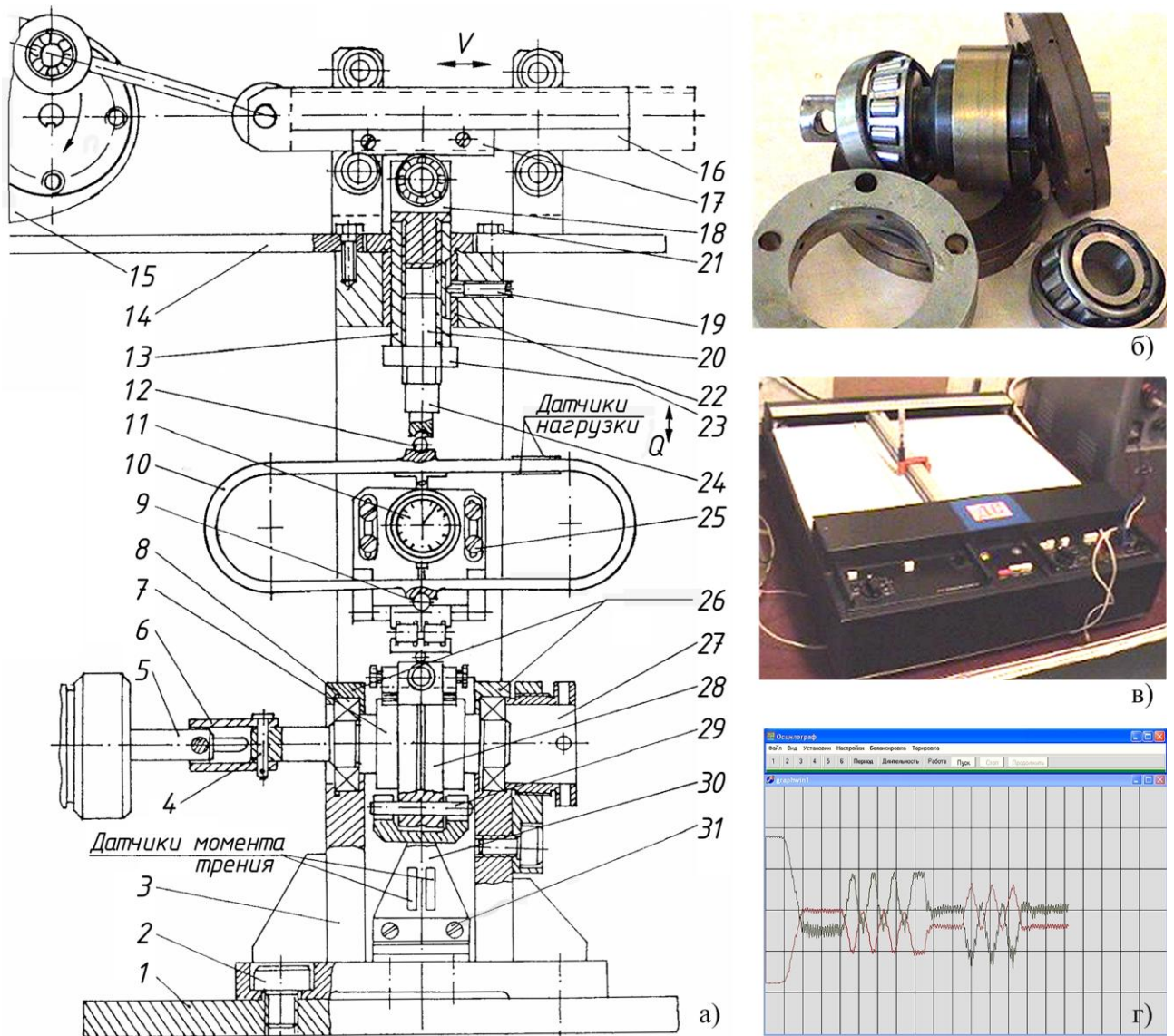


Рисунок 3.10 – Установки для триботехнических испытаний: а – схема установки; б – модель узла трения; в – двухкоординатный самописец ДС; г – окно результатов измерений программы «Осциллограф»

Вращение вала в испытываемой модели пары трения обеспечивается приводом с регулируемой скоростью вращения.

Изменение нагрузки относительно номинальной нагрузки P_0 характеризуется амплитудой колебательной нагрузки ΔP и периодом ее изменений T . Величина ΔP определяется в относительных величинах: $\Delta P = ((P_{max} - P_{min}) / 2 P_0) 100 \%$. Нагрузки изменяются по закону: $P = P_0 (a + b \sin \omega t)$, где a, b – коэффициенты, $0 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq 1$.

В модуле создания переменных динамических нагрузок частота изменения нагрузки ω задаётся с помощью редуктора, а программноносителем амплитуды яв-

ляется кулачок.

В процессе испытаний установка обеспечивает измерения и регистрацию нагрузки на трибоэлементы, момента трения, температуры в зоне контакта поверхностей, величину контактных перемещений в стыке.

Модуль электронного счётчика числа циклов нагружения, управляемый электроконтактным датчиком находится в модуле создания переменной программной нагрузки 15 (рисунок 3.10 а)

Измерение температуры в зоне контакта осуществляется электронным термометром ТЭН–5.

Измерительный блок реализован в двух исполнениях. В первом исполнении датчик подключается к тензоуселителю ТА–5 для регистрации контролируемых процессов на двухкоординатном самописце или на шлейфовом осциллографе Н-008М (рисунок 3.10в).

Во втором варианте применяется измерительная система «Осциллограф» на базе ПК, подключаемого к выходу тензометрического усилителя ТА–5. Работа системы «Осциллограф» обеспечивается программами периферийного интерфейса, интерфейса пользователя и специального математического обеспечения. Система позволяет измерять сразу несколько параметров (рисунок 3.10 г) [119].

Оценка величины линейного износа осуществлялось на профилографе и кругломере при измерении исходного и изношенного участков поверхности вала и вкладыша.

Приработка соединения проходит с использованием смазки (масло «Индустриальное И-30А»). Она подается в зону трения по 5 – 10 капель каждые 20 минут.

3.2. Метрологическое обеспечение экспериментальных исследований

Вопросы метрологического обеспечения параметров качества обрабатываемых поверхностей в процессе исследований можно решать различными средствами:

1. Использование измерительных средств (профилографы-профилометры, кругломеры, микротвердомеры, металлографические микроскопы и др.), которые

физически работоспособны, но морально устарели и не отвечают современным требованиям процессов исследований с точки зрения производительности измерения, обработки полученных результатов и оперативной коррекции режимов работы технологических систем обработки.

2. Использование современных отечественных или импортных компьютеризированных систем аналогичного назначения, свободных от недостатков, присущих средствам п. 1.

3. Использование традиционных отечественных измерительных средств, но модернизированных путём их компьютеризации с соответствующим программным обеспечением.

Преимуществом средств, указанных в п. 1, являются их максимальная дешевизна, доступность использования, так как они имеются в лабораториях и на предприятиях в достаточных количествах.

Современные измерительные средства (п. 2) отличаются высоким качеством, гибкостью применения, но высокая цена (особенно импортных) затрудняет их приобретение, особенно для малых производственных предприятий и лабораторий учебных заведений и исследовательских организаций.

Поэтому большой интерес представляют модернизированные измерительные системы (п. 3), обладающие при умеренной стоимости достоинствами средств, указанных в п. 2.

Результаты исследований, представленных в работе получены преимущественно с использованием таких модернизированных измерительных систем, разработанных в ФГБОУ ВО «БГТУ» (г. Брянск).

3.2.1. Компьютеризация систем измерений геометрических параметров качества поверхностей деталей

Актуальность разработки компьютеризированной системы измерений параметров шероховатости и волнистости поверхностей деталей машин обоснована следующим: 1) серийно изготавливаемые компьютеризированные профилографы-

профилометры при закрытом «жестком» программном обеспечении при ограниченных возможностях имеют высокую стоимость; 2) имеющиеся в организациях парк профилометров-профилографов старого образца при хорошем физическом состоянии морально устарел, не способен решать современные задачи, стоящие в области науки и подготовки инженерных кадров и нуждается в модернизации; 3) модернизация систем измерений на основе применения виртуальных приборов (ВП) в силу своей открытости обеспечивает «гибкость» программного обеспечения и возможность оперативной коррекции структуры ВП в соответствии с новыми требованиями.

3.2.1.1. Измерительно-информационная система для контроля геометрических параметров качества поверхностей

Реализация измерительно-информационной системы ИИС-1 контроля параметров шероховатости, волнистости и отклонений от круглости позволила повысить скорость и информативность измерений геометрических параметров качества поверхностей деталей [2, 3, 5, 79, 123, 201, 238 и др.].

Основу ИИС-1 составляют измерительные модули и модуль сопряжения с ПК (рисунок 3.11).

Измерение параметров шероховатости и волнистости осуществляется профилографом-профилометром мод. 170311 («Калибр»), измерение параметров отклонений от круглости осуществляет кругломер мод. 175121 («Калибр»).

Модулем сопряжения измерительных блоков с ПК является адаптер аналого-цифрового ввода-вывода NVL 03 («Сигнал»).

Конструкции электронных блоков профилографа-профилометра и кругломера позволяют подключать их к внешним устройствам управления – измерительную информацию с датчиков можно передавать в память ПК. Во время работы ИИС-1 используются только измерительные блоки профилометра и кругломера.

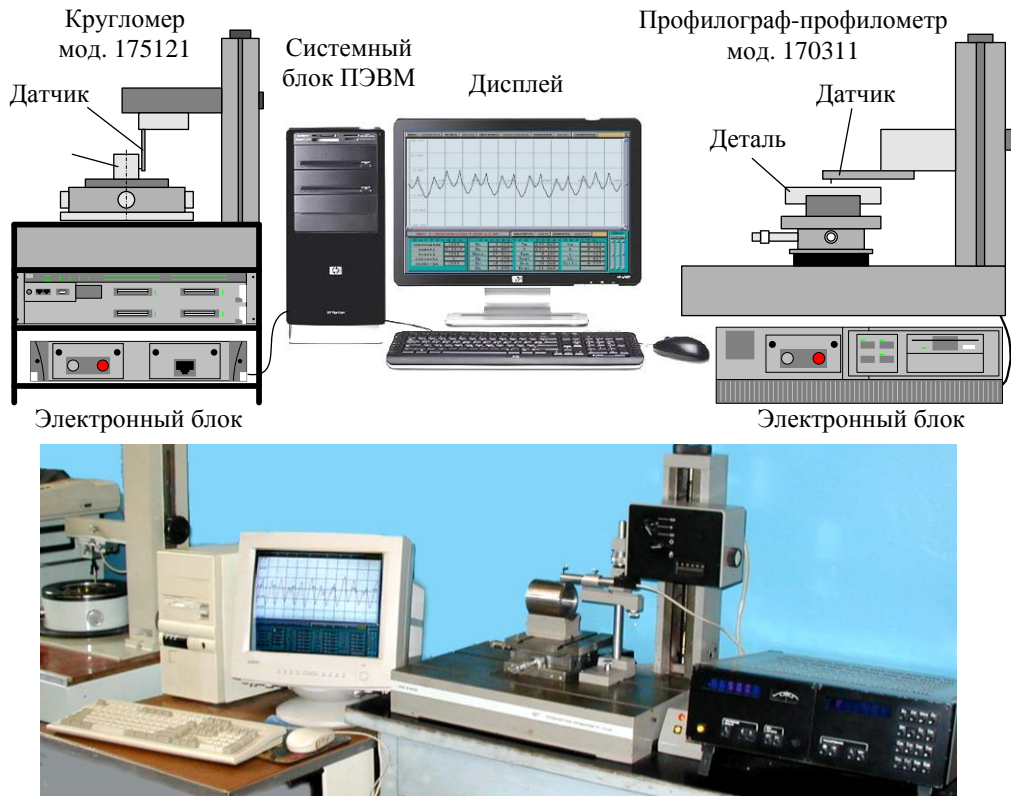


Рисунок 3.11 – Измерительно-информационная система ИИС-1 контроля геометрических параметров качества поверхностей деталей

Реализация ИИС-1 осуществлялась с перспективами дальнейшей модификации и наращивания системы, что определило её построение по модульному принципу формирования технических и программных блоков. Работа её определяется пакетом системных и прикладных программ, обеспечивающих последовательный периферийный интерфейс, интерфейс пользователя, обработку результатов измерений, создание баз данных и др.

Программное обеспечение (ПО) ИИС-1 позволяет измерить и вычислить следующие геометрические параметры качества поверхностей деталей.

1. Параметры шероховатости:

а) по алгоритму расчёта, регламентированному ГОСТ 25142-82: среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости от средней линии R_a ; высота неровностей профиля шероховатости по десяти точкам R_z ; наибольшая высота неровностей профиля шероховатости R_{max} ; высота наибольшего выступа профиля шероховатости R_p ; глубина наибольшей впадины профиля шероховатости R_v ; среднее квадратическое отклонение профиля от средней линии R_q ; среднее значе-

ние шага неровностей профиля шероховатости по средней линии S_m ; среднее значение шага местных выступов профиля шероховатости S ; относительная опорная длина tr профиля шероховатости на уровне p от линии выступов; наклон профиля или тангенс углов наклона $\operatorname{tg}\alpha_i$ в любой точке профиля шероховатости; относительная длина l_0 профиля шероховатости;

б) с нестандартизованным алгоритмом расчёта: средний радиус ρ кривизны вершины местного выступа профиля шероховатости; средний радиус ρ_m кривизны выступов профиля шероховатости; коэффициенты v и b аппроксимации начального участка относительной кривой опорной поверхности профиля шероховатости; безразмерный комплекс Δ Крагельского-Комбалова;

2. Параметры волнистости: среднее арифметическое отклонение профиля волн от средней линии Wa ; высота неровностей профиля волн по десяти точкам Wz ; наибольшая высота профиля волн W_{max} ; средний радиус кривизны ρ_w выступов профиля волнистости.

3. Параметры отклонений от круглости по ГОСТ 24642-81: отклонение от круглости E_{FK} ; среднее арифметическое отклонение от круглости E_{FKa} ; среднее квадратическое отклонение от круглости E_{FKq} ; характеристика овальности TFE .

Также строится график относительной кривой опорной поверхности профиля шероховатости детали (рисунок 3.12 а).

Пользовательский интерфейс ИИС-1 содержит различные опции, позволяющие упростить работу по расчёту геометрических параметров качества поверхностей.

Для профилометра основными опциями являются (рисунок 3.12а) тарирование системы по эталону шероховатости; назначение режимов измерения; увеличение измеренного профиля; изменение длины измеряемого участка поверхности; выбор границ фильтрации при измерении волнистости или макроотклонений; расчёт параметров профиля профилограммы (волнограммы); выделение границ участка профилограммы для расчёта параметров и др.

Для кругломера основными опциями являются (рис 3.12б) тарирование системы по эталону; масштабирование измеряемой круглограммы; назначение гра-

ниц фильтрации круглограммы; совмещение оси вращения шпинделя кругломера с осью измеряемой детали; расчёт параметров отклонений от круглости поверхностей деталей с выводом результатов на экран и др.

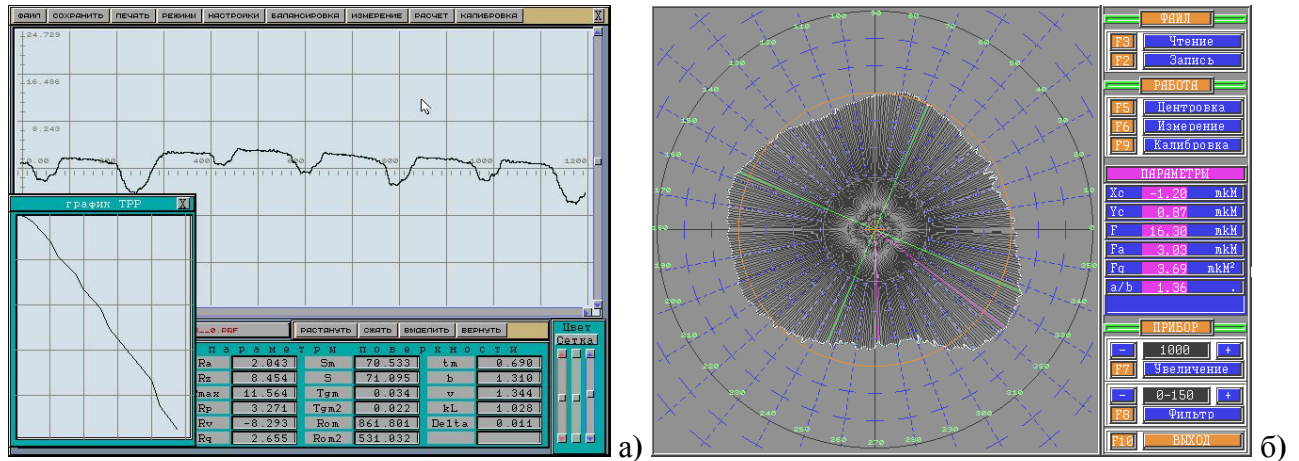


Рисунок 3.12 – Окна пользователя программными пакетами: а – профилометр; б – кругломер

Измерительно-информационная система ИИС-1 является эффективным средством для измерения геометрических параметров поверхностей деталей. Её рекомендуется использовать в научно-исследовательских и учебных организациях, в заводских лабораториях и др.

3.2.1.2. Мобильные измерительно-информационные системы для контроля геометрических параметров качества поверхностей

Для повышения надёжности ТС необходим контроль параметров качества деталей на всех технологических операциях – от заготовительных до финишных.

Для этого необходимо применение контрольно-измерительных приборов непосредственно на рабочих местах.

Была разработана мобильная измерительно-информационная система ИИС-2 для контроля параметров шероховатости и волнистости поверхностей деталей машин [3, 5, 130, 238, 246 и др.], которая по своим возможностям аналогична ИИС-1, но отличается технической реализацией и компактными размерами.

В качестве вычислительно-управляющего модуля может применяться ноутбук или мобильная рабочая станция. Измерительным модулем является блок при-

вода с датчиком-преобразователем (например, от профилометра мод. 170622 («Калибр»)), устанавливаемый на измеряемую поверхность или на сменных опорах, в зависимости от контуров и габаритов детали.

Модулем согласования управляющего и измерительного блоков является аппаратно-программный блок оригинальной конструкции, разработанный на базе микроконтроллера AT89C51 (Atmel), обеспечивающий инициализацию и запуск периферийных объектов, ввод-вывод информации, самоконтроль и диагностику и др. Габариты блока – 200×150×40 мм (рисунок 3.13).

Разработанный аппаратно-программный блок обеспечивает питание переменным током индуктивного датчика и привода движения датчика; формирование тактовых сигналов; стабилизацию скорости перемещения датчика; преобразование аналоговых сигналов (измерения) в цифровые; управление процессами передачи данных в память ПК и др.

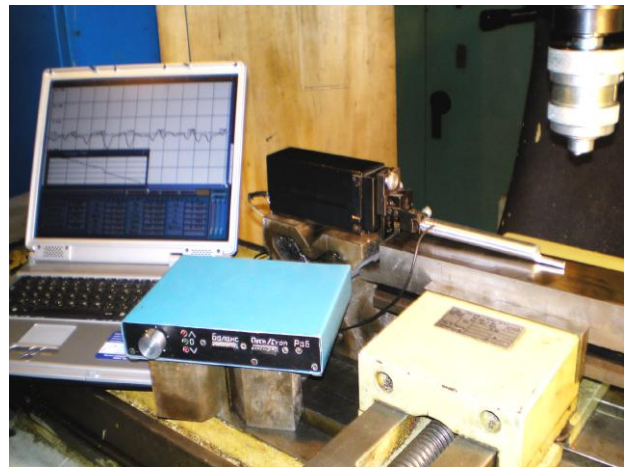
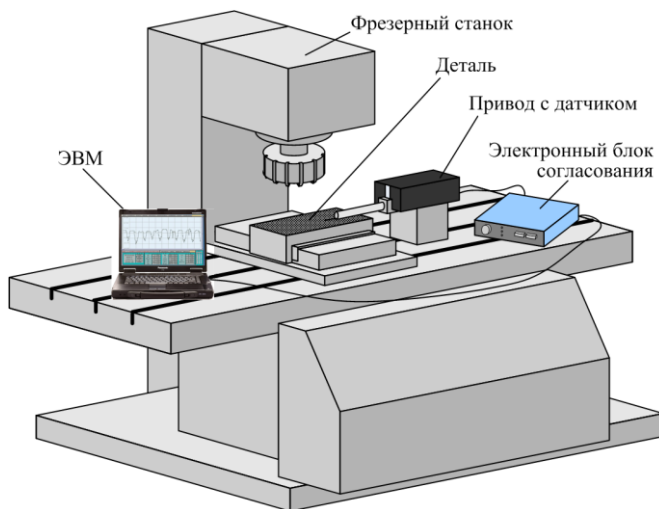


Рисунок 3.13 – Мобильная измерительно-информационная система ИИС-2 контроля параметров шероховатости и волнистости поверхностей деталей на рабочем месте

Программное обеспечение мобильной ИИС-2 разработано на основе системных и прикладных программ для ИИС-1. Пользовательский интерфейс и обработка результатов измерений обеспечивается программами, используемыми в ИИС-1, поэтому окно пользователя ИИС-2 выглядит так же, как и на рисунок 3.12 а. Для сервисной обработки результатов измерений и расчёта параметров шероховатости и волнистости используются те же опции пользовательского интерфейса.

Рассчитываются параметры шероховатости и волнистости – Ra , Rz , $Rmax$, Rp , Rv , Rq , Sm , S , tm , $tg\alpha_i$, l_0 , ρ_m , v , b , Δ , Wa , Wz , $Wmax$, ρ_w ; строится график относительной кривой опорной поверхности профиля шероховатости детали.

Более широкими возможностями обладает мобильная измерительно-информационная система ИИС-3 измерения геометрических параметров качества поверхностей деталей [123, 130, 263, 270 и др.]. В состав разработанной системы (рисунок 3.14) входят индуктивный датчик с приводом движения (от профилометра мод. 170622 («Калибр») или др., блок аппаратно-программного интерфейса (АПИ) и ПК.



Рисунок 3.14 – Информационно-измерительная система ИИС-3 для измерения параметров шероховатости и волнистости поверхностей

ИИС-3 может работать в двух режимах:

1. Передача измеряемой ИД информации осуществляется в ПК непосредственно в процессе измерения. Блок АПИ подключается к ПК через порт USB.
2. Измерение геометрических параметров производится без подключения к ПК. Датчик с приводом, установленный на специальных опорах в рабочей зоне ТС управляется блоком АПИ. Измеренная информация регистрируется в его памяти и выводится на мини-дисплей на лицевой панели. Сохранённая информация может затем передаваться для дальнейшей обработки в ПК.

Пользовательская программа для работы с ИИС-3 обеспечивает: 1) запись

результатов измерений в файл; 2) расчёт параметров шероховатости и волнистости; 3) спектральный анализ профилограмм; 4) построение гистограммы распределения ординат профиля шероховатости и корреляционной функции с соответствующими характеристиками.

В окне «Расчёт параметров» (рисунок 3.15) предусматривается выбор участка профилограммы для расчёта её параметров, длина которого может варьироваться, выбор типа цифрового фильтра и его характеристик при необходимости расчёта параметров W_i волнистости поверхности. В центральной части окна выводятся профилограмма выбранного участка поверхности и график относительной кривой опорной поверхности профиля шероховатости, по которому с помощью перемещаемого курсором перекрестия можно определить относительную опорную длину профиля t_p на любом уровне p (на рисунок 3.15: $t_{40} = 0,12$). В нижней части окна выводятся расчётные значения параметров шероховатости.

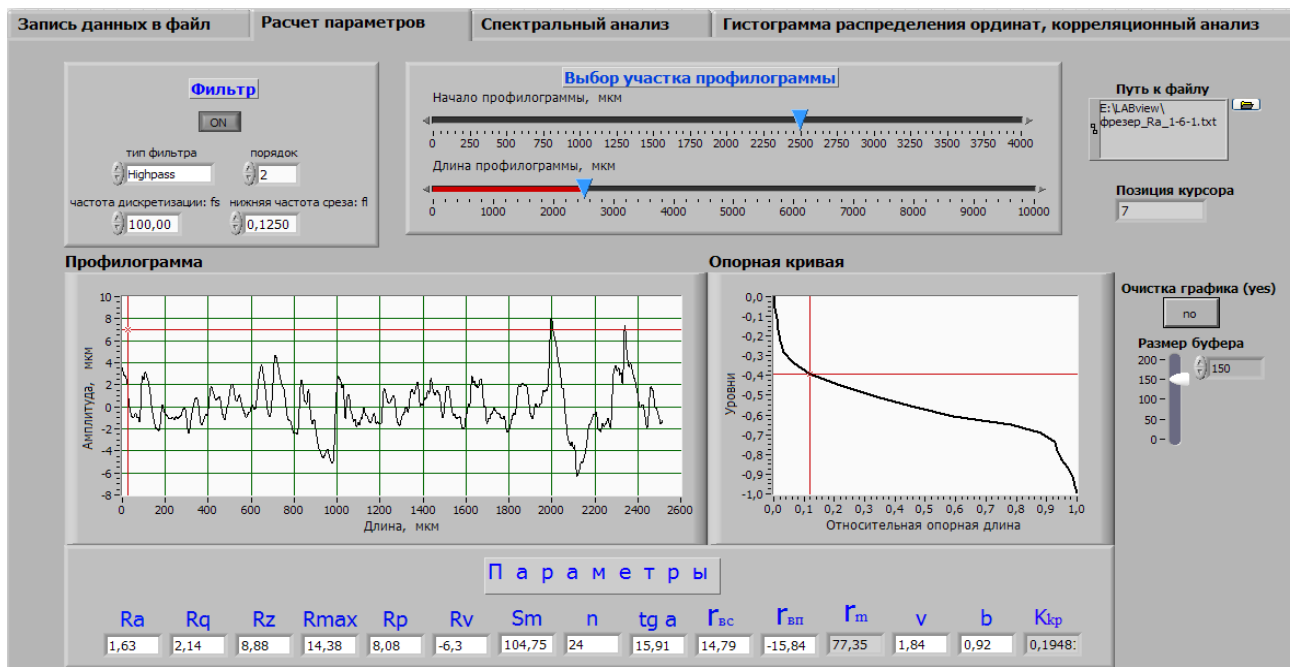


Рисунок 3.15 – Окно пользователя «Расчёт параметров»

На рисунке 3.16 показаны фрагменты окон пользователя с графиками спектра мощности, амплитудного спектра и гистограммы распределения ординат профиля. При расчёте гистограмм можно варьировать число интервалов, а в протоколе выводятся значения средней величины, стандартного отклонения, дисперсии,

моды, асимметрии, эксцесса и центрального момента профиля поверхности.

Корреляционная функция рассчитывается в одной из трёх модификаций (выбираются пользователем): смещённая, несмещённая и без нормализации.

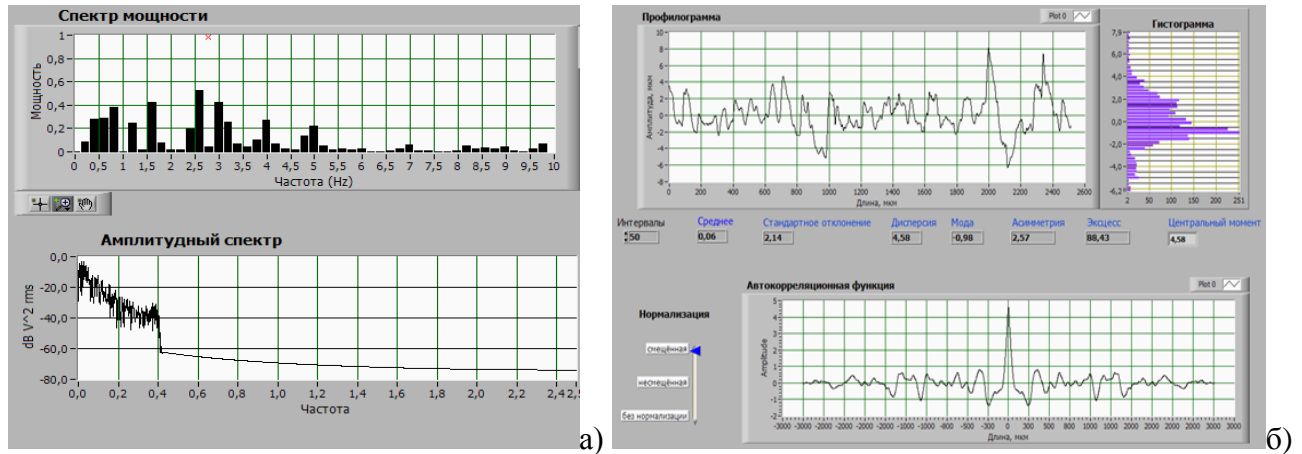


Рисунок 3.16 – Окна пользователя: а – спектральный анализ; б – гистограмма распределения ординат, корреляционный анализ

3.2.2. Средства оптико-микроскопического анализа поверхностей деталей

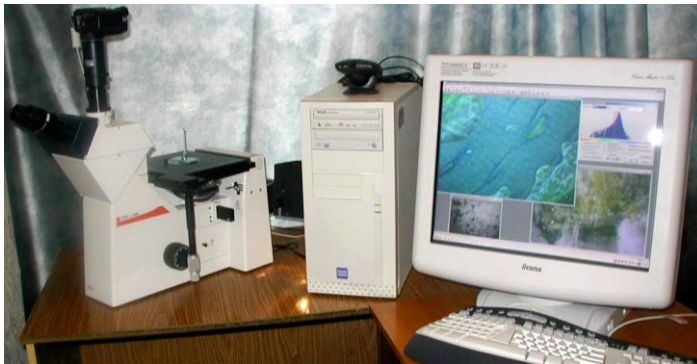


Рисунок 3.17 – Система сканирующей микроскопии на базе ммикроскопа Leica DM IRM HC

Для оценочных исследований поверхностей деталей визуальным анализом микрофотографий применялись микротвердомер ПМТ-3М и панорамный микроскоп МБС-2 с микрофотонасадками.

Для исследования поверхностей деталей с количественной оценкой топографических параметров применялась компьютеризированная система сканирующей микроскопии на базе инвертированного металлографического микроскопа Leica DM IRM HC (рисунок 3.17) [3, 239]. Анализ полученных изображений осуществляет программа ImageScore, применяемая для статистической обработки полученной информации о состоянии

поверхности и визуализации полученных результатов. ImageScore позволяет оценивать параметры отражательной способности поверхностей деталей, которая может являться как эксплуатационной характеристикой, так и комплексной характеристикой, оценивающей состояние профиля шероховатост, то есть, когда её количественные показатели регламентированы в технической документации [130, 252, 253, 273 и др.]. В простейшем случае отражательная способность характеризуется яркостью.

Пример такого анализа с помощью ImageScore включает микрофотографию выбранного участка поверхности, гистограмму его яркости и соответствующий профиль яркости (рисунок 3.18).

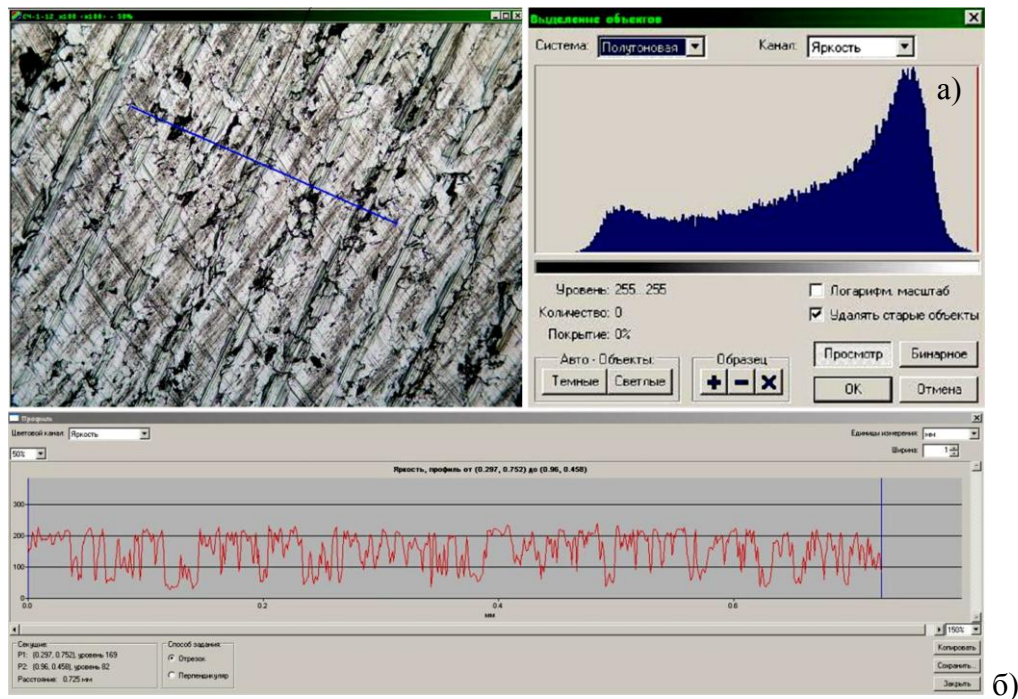


Рисунок 3.18 – Пример микроанализа поверхности детали с применением программного комплекса ImageScore: а – гистограмма распределения яркости по выделенному участку поверхности детали (синяя линия на микрофотографии поверхности); б – профиль яркости по выделенному участку поверхности

Компьютеризация отечественных средств металлографической микроскопии поверхностей позволит при минимальной себестоимости расширить границы исследований поверхностной структуры деталей, обработанных в различных технологических системах.

Была разработана система микроструктурного анализа поверхностей дета-

лей на базе применения отечественных микроскопов: металлографических МИМ-10 и МЕТАМ РВ, МБС-2, ПМТ-3М и др., позволяющих регистрировать увеличенный фрагмент поверхности детали или образца, цифровой видео- и фотоаппаратуры и ПК [119, 130, 238, 262, 273 и др.]. При создании системы использовался модульный принцип построения с открытым программным обеспечением (рисунок 3.19).

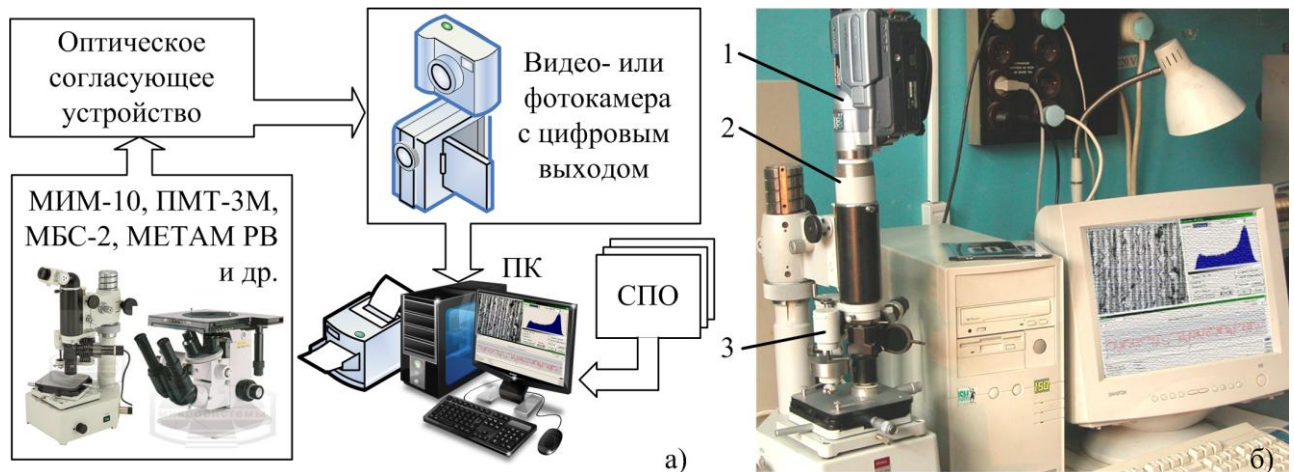


Рисунок 3.19 – Компьютеризированная система микроструктурного анализа поверхностей деталей: а – блок-схема системы; б – общий вид; 1 – цифровая видеокамера; 2 – оптическое согласующее устройство; 3 – микротвердомер

Изображение через оптическое согласующее устройство передаётся через цифровую фото- или видеокамеру на ПК для последующей обработки и анализа.

Видеоизображения позволяют детально изучать кинетику исследуемых процессов на поверхности физического (склерометрия и др.) и химического (коррозия, нанесение плёнок и др.) воздействий.

Разработанная система микроструктурного анализа включает микротвердомер ПМТ-3М, цифровую видеокамеру, согласующее устройство с ПК.

3.3. Выводы к третьей главе

В главе 3 решены задачи 3 и, частично 7, сформулированные в главе 1. Результаты решения этих задач позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработан комплексный подход к экспериментальным исследованиям ТС металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных

свойств поверхностей деталей машин, позволяющий унифицировать процедуры получения и анализа результатов в лабораторных и производственных условиях.

2. Обосновано применение инструмента, оборудования, исследуемых технологических систем и средств измерений.

3. Разработаны компьютеризированные измерительные системы оценки геометрических параметров качества поверхностей деталей и системы металлографического анализа на базе отечественной измерительной техники и их элементов, микроскопов, цифровой фото- и видеотехники, предусматривающие возможность как стационарного применения, так и непосредственно в рабочей зоне ТС.

ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАМИ УПРУГОГО ДЕЙСТВИЯ С УЧЁТОМ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ

При отделочно-упрочняющей обработке ППД применяются инструменты упругого действия (рисунок 3.3, 3.7д, е). Такой инструмент является механическим устройством с подпружиненной массой и смазкой, представляющим собой колебательную систему второго порядка с демпфированием, динамические характеристики которой оказывают влияние на формирование параметров качества обрабатываемой поверхности, особенно геометрических.

К настоящему времени имеется ряд работ, в которых вопросы динамики процессов обработки методами ППД рассматриваются с позиций нелинейной механики [74, 75, 98 – 100 и др.], в данной работе динамика указанных процессов рассматривается с позиций теории автоматического регулирования.

4.1. Частотные характеристики процессов обработки поверхностей деталей одноинденторными инструментами упругого действия

4.1.1. Обработка плоских поверхностей с фасонным дифференцируемым профилем в направлении вектора скорости обработки

Плоские поверхности с фасонным профилем характерны для плоских кулачков, применяющихся в копировальных и других устройствах. В силу своей непрерывности они дифференцируемы и могут быть представлены в виде суммы синусоид в соответствии с теорией рядов Фурье. В связи с этим, анализ влияния динамики процессов обработки ППД на формирование параметров КПС можно осуществить методами теории автоматического регулирования линейных систем

[70, 154, 218 и др.], так как волнистость поверхности тоже интерпретируется синусоидами.

Считается, что при обработке ППД инструментом упругого действия исходная волнистость поверхности копируется, что не всегда соответствует действительности, так как обработка ППД – процесс динамический, определяемый амплитудно- и фазо-частотными характеристиками, и влияющий на нестабильность формирования параметров качества поверхности [52, 53 и др.].

Динамика процессов ППД определяется:

- конструктивными параметрами инструмента упругого действия: массой подвижных частей, жёсткостью упругого элемента, вязкостью смазки и др.;

- технологическими факторами процесса ППД: геометрическими параметрами качества поверхности, полученными после предварительной обработки (макроотклонения, волнистость, отклонения от круглости), режимами ППД (скорость, подача, сила воздействия индентора на обрабатываемую поверхность).

Известно, что через динамические системы входной сигнал (в рассматриваемом случае – волнистость, полученная после обработки, предшествующей ППД) может проходить без искажений, с усилением или с ослаблением, что определяется частотными характеристиками процесса. Это определяет влияние динамики процессов взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью на формирование геометрических параметров качества поверхностей.

ТС алмазного выглаживания (АВ) инструментом упругого действия является многомассовой замкнутой системой с упругими связями между элементами. На рисунке 4.1а представлена модель инструмента-выглаживателя, упругого действия, обрабатывающего волнистую плоскую поверхность. Со стороны многомассовой станочной системы через корпус выглаживателя с жёсткостью c_1 упругого элемента действуют колебания ξ на ТС АВ, которая характеризуется жёсткостью c_2 системы «оборудование – корпус выглаживателя».

Так как жёсткость c_1 упругого элемента выглаживателя значительно меньше жёсткости c_2 технологического оборудования ($c_1 \ll c_2$) с определённой погрешностью принимается допущение, что $\xi = 0$.

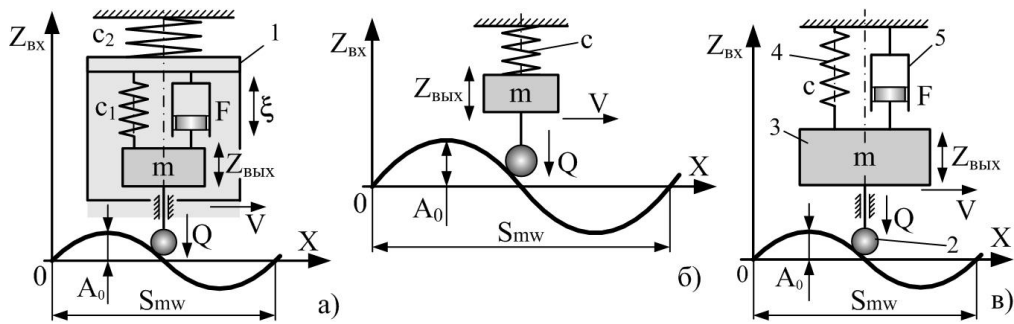


Рисунок 4.1 – Динамические модели ТС АВ инструментами упругого действия: а – общая динамическая модель ТС; б – простейшая динамическая модель; в – динамическая модель с демпфированием; 1 – корпус инструмента; 2 – индентор; 3 – подвижная часть инструмента с массой m ; 4 – упругий элемент (пружина); 5 – демпфирующий элемент (смазка)

Простейшая динамическая модель процесса АВ инструментом упругого действия без учёта демпфирования (рисунок 4.1б) представляет собой одномассовую систему с подвижными элементами массой m , которые прижимаются к поверхности пружиной с жёсткостью c , создавая силу Q воздействия индентора на поверхность.

Простейшую динамическую модель инструмента ППД упругого действия можно представить в виде одномассовой колебательной системы без демпфирования (рисунок 4.1б) с подвижными элементами массой m и пружиной с жёсткостью c . Такая модель может быть принята для ТС алмазного выравнивания поверхности с минимальными значениями W_{max} волнистости, низкими скоростью V обработки и силой Q воздействия индентора на поверхность.

Модель на рисунке 4.1 отличается от простейшей наличием смазки между трущимися поверхностями элементов инструмента ППД, влияние которой с достаточной степенью достоверности можно рассматривать как вязкое демпфирование. В этом случае демпфирующая сила F пропорциональна скорости.

Сечение поверхности в направлении обработки X (рисунок 4.1) характеризуется волнистостью, полученной в процессе предварительной обработки, профиль которой можно представить как синусоиду с шагом S_{mw} и амплитудой $A_0 = 0,5W_{max}$, уравнение которой определяется выражением:

$$Z_{ex} = A_0 \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (4.1)$$

где A_0 – амплитуда, ω – круговая частота; φ_0 – начальный фазовый угол.

$$\omega = \frac{2\pi}{Smw} V. \quad (4.2)$$

где V – скорость обработки, связанная с координатой X зависимостью $X = Vt$.

Принимая $\varphi_0 = 0$ и подставив (4.2) в (4.1), получим:

$$Z_{ex} = \frac{Wmax}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{Smw} X\right). \quad (4.3)$$

Сложные профили поверхности можно представить при условии их дифференцируемости в виде суммы синусоидальных составляющих, получаемых при разложении реального профиля поверхности в ряд Фурье:

$$Z_{ex}(X) = \frac{Wmax_0}{4} + \sum_{k=1}^n \frac{Wmax_k}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{Smw_k} X + \varphi_k\right), \quad (4.4)$$

где $Wmax_0$ – максимальная высота волны для основной гармоники;

$Wmax_k$, Smw_k , φ_k – соответственно максимальная высота волны, шаг волны по средней линии и фаза k -той гармоники.

Для моделей на рисунке 4.1 колебания индентора инструмента при обработке со скоростью V вызывает наличие волнистости или иного вида отклонения от номинальной плоскости поверхности, которая характеризуется входной величиной $Z_{ex}(X)$. Колебания индентора вместе с подвижной частью инструмента ППД вдоль оси Z является выходной величиной $Z_{вых}(X)$.

На основе теории автоматического управления и математического аппарата теории колебаний [70, 154, 218 и др.] можно установить влияние скорости обработки, параметров волнистости поверхности и динамических характеристик инструмента на колебания индентора $Z_{вых}(X)$. Для этого принимается допущение равенства частот ω входной и выходной величин.

Закономерность движения подвижных частей в линейных упругих системах определяется уравнением, в основу которого положен принцип Д'Аламбера:

$$m_k \ddot{Z}_k + \sum_i \delta_{ki} Z_i = Q_k(t), \quad (4.5)$$

где m_k – масса рассматриваемой точки системы; δ_{ki} – коэффициенты влияния; Z_i – текущая координата i -той точки; $Q_k(t)$ – сила, приложенная в k -той точке системы.

Это уравнение справедливо при условии, что масса m_k , перемещается по одной координате и отсутствуют силы сопротивления, пропорциональные скорости движения.

Тогда, дифференциальное уравнение свободных колебаний подвижной части инструментов ППД упругого действия с вертикальной осью (рисунок 4.1 в) имеет вид:

$$m\ddot{Z} + F\dot{Z} = mg - (mg + cZ), \quad (4.6)$$

где Z – величина перемещения индентора по координате X ; F – коэффициент вязкого трения; $cZ = Q$ – сила воздействия индентора на поверхность при жесткости упругого элемента c .

Уравнение свободных колебаний с вязким демпфированием подвижной части инструмента:

$$\ddot{Z} + 2n\dot{Z} + \omega_0^2 Z = 0. \quad (4.7)$$

где $\omega_0 = c / m$ – собственная частота колебаний подвижной части инструмента ППД; $2n = F / m$.

Известные методы решения уравнений данного типа [218 и др.] позволяют получить следующие значения Z :

$$Z_1 = c_1 e^{-nX} \cos \omega_D X, \quad Z_2 = c_2 e^{-nX} \cos \omega_D X,$$

суммирование которых позволяет получить зависимость:

$$Z = e^{-nX} (c_1 \cos \omega_D X + c_2 \sin \omega_D X), \quad (4.8)$$

где c_1 и c_2 – постоянные интегрирования; множитель e^{-nX} указывает на экспоненциальный характер затухания колебаний индентора инструмента (рисунок 4.2), ω_D – круговая частота затухающих колебаний при демпфировании:

$$\omega_D = \sqrt{\omega_0^2 - n^2}. \quad (4.9)$$

По зависимости (4.10) определяется период затухающих колебаний:

$$\tau_D = \frac{2\pi}{\omega_D} \frac{1}{\sqrt{1 - n^2 / \omega_0^2}} [\text{с}]. \quad (4.10)$$

Период затухающих колебаний вдоль координаты X можно определить, умножив обе части уравнения (4.10) на скорость V :

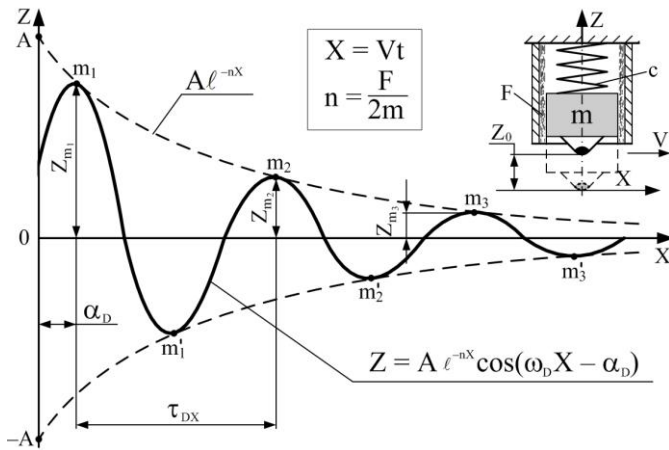


Рисунок 4.2 – Затухающие колебания индентора в зависимости от длины обработки X

Тогда уравнение (4.8) примет вид:

$$Z = e^{-nX} \left(Z_0 \cos \omega_D X + \frac{\dot{Z}_0 + nZ_0}{\sqrt{\omega_0^2 - n^2}} \sin \omega_D X \right), \quad (4.13)$$

или в эквивалентной форме:

$$Z = A e^{-nX} \cos(\omega_D X - \alpha_D), \quad (4.14)$$

где A – максимальное значение амплитуды:

$$A = \sqrt{c_1^2 + c_2^2} = \sqrt{Z_0^2 + \frac{(\dot{Z}_0 + nZ_0)^2}{\omega_0^2 - n^2}}; \quad (4.15)$$

$$\alpha_D = \arctg \frac{c_2}{c_1} = \arctg \left(\frac{\dot{Z}_0 + nZ_0}{Z_0 \sqrt{\omega_0^2 - n^2}} \right). \quad (4.16)$$

График на рисунке 4.2 представляет собой полигармоническое движение с уменьшающейся по экспоненциальному закону с амплитудой Ae^{-nX} , фазовым углом α_D и периодом τ_{DX} .

Скорость демпфирования колебаний зависит от коэффициента демпфирования n/ω_0 . Отношение двух соседних амплитуд колебаний индентора (рисунок 4.2) составляет:

$$\frac{Z_{mi}}{Z_{m(i+1)}} = \frac{Ae^{-nX_i}}{Ae^{-n(X_i + \tau_{DX})}} = e^{n\tau_D} = e^\delta. \quad (4.17)$$

$$\tau_{DX} = V\tau_D = \frac{2\pi}{\omega_0} \frac{V}{\sqrt{1 - \frac{n^2}{\omega_0^2}}} \text{ [м]}. \quad (4.11)$$

Постоянные интегрирования c_1 и c_2 определяются из условия, что в точке обработки $X = 0$ индентор смещается на величину Z_0 с начальной скоростью \dot{Z}_0 .

$$c_1 = Z_0; \quad c_2 = \frac{\dot{Z}_0 + nZ_0}{\sqrt{\omega_0^2 - n^2}}. \quad (4.12)$$

Здесь δ – логарифмический декремент затухания, который при экспериментальных исследованиях с целью повышения точности следует определять отношением амплитуд, разделённых k циклами [221]:

$$\delta = \frac{1}{k} \ln \frac{Z_{mi}}{Z_{m(i+k)}}. \quad (4.18)$$

Значения Z_{mi} и $Z_{m(i+k)}$ при исследованиях процессов ППД инструментами упругого действия можно определять методом осциллографирования с использованием индуктивных датчиков.

Уравнение вынужденных колебаний индентора, возникающих при обработке инструментами упругого действия волнистых поверхностей определяется из уравнения (4.7)

$$\ddot{Z} + 2n\dot{Z} + \omega_0^2 Z = k \frac{W_{max}}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{Smw} X\right), \quad (4.19)$$

в правой части которого учитывается возмущающее воздействие волнистости.

В динамической модели процесса АВ передаточная функция $K(p)$ инструмента (динамический элемент) связывает входные и выходные сигналы $Z(p)$ (рисунки 4.2 а):

В основе динамической модели процесса АВ лежит передаточная функция $K(p)$ инструмента как динамического элемента (рисунки 4.2 а), связывающая входную и выходную величины модели:

$$Z_{вых}(p) = K(p)Z_{вх}(p), \quad (4.20)$$

где $Z_{вх}(p)$, $Z_{вых}(p)$ – изображения входного и выходного сигнала; p – оператор Лапласа.

Передаточная функция инструмента ППД как устойчивого колебательного звена рассматриваемой динамической системы определяется из уравнения (4.19):

$$K(p) = \frac{k}{p^2 + 2np + \omega_0^2}. \quad (4.21)$$

Если на вход динамической системы (инструмента ППД) подается сигнал в виде синусоиды с постоянными значениями амплитуды и частоты (4.2), то после затухания переходных процессов на выходе системы также возникнет сигнал в

виде синусоиды с той же частотой, но с другими амплитудой и фазой φ (рисунок 4.3а):

$$Z_{\text{вых}}(X) = A \sin\left(\frac{2\pi}{Smw} X + \varphi\right). \quad (4.22)$$

Из равенства частот $\omega_{\text{вх}} = \omega_{\text{вых}}$ следует, что период колебаний индентора по оси Z инструмента при установившемся процессе обработки равен шагу волнистости Smw .

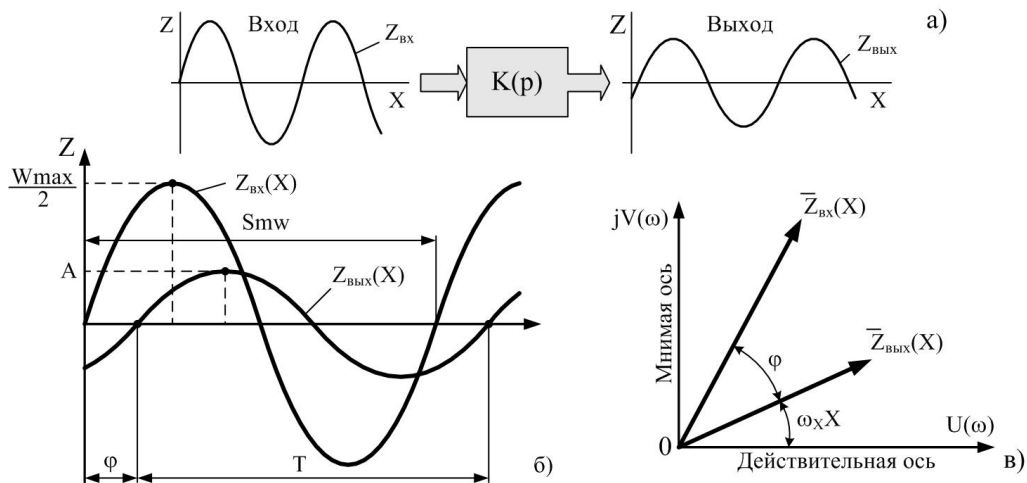


Рисунок 4.3 – Модель преобразования входных воздействий волнистости $Z_{\text{вх}}(X)$ в колебания индентора $Z_{\text{вых}}(X)$ (а) и представление входных и выходных величин в виде векторов на комплексной плоскости (б, в)

При векторной форме представления (рисунок 4.3в) входной $Z_{\text{вх}}(X)$ и выходной $Z_{\text{вых}}(X)$ сигналы определяются как

$$\bar{Z}_{\text{вх}}(X) = \frac{W_{\text{max}}}{2} (\cos \omega_X X + j \sin \omega_X X) = \frac{W_{\text{max}}}{2} e^{j\omega_X X}, \quad (4.23)$$

$$\bar{Z}_{\text{вых}}(X) = A e^{j(\omega_X X + \varphi_{\text{вых}})}. \quad (4.24)$$

Здесь $\omega_X = 2\pi / Smw$ – круговая частота волнистости обрабатываемой поверхности; $\varphi_{\text{вых}}$ – фазовый угол между волнистостью и колебаниями индентора; $j = \sqrt{-1}$.

Заменяя в выражении передаточной функции символ p на $(j\omega)$ получим амплитудно-фазовую характеристику системы $K(j\omega)$. Амплитудно-фазовая частотная характеристика инструмента ППД:

$$K(j\omega) = \frac{\bar{Z}_{\text{вых}}(X)}{\bar{Z}_{\text{вх}}(X)} = \frac{2A}{W_{\text{max}}} e^{j(\varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}})}. \quad (4.25)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ):

$$K(\omega_X) = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}} = \frac{2A}{W_{\text{max}}};$$

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ):

$$\varphi(\omega_X) = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}}.$$

Функции $K(\omega_X)$ и $\varphi(\omega_X)$ позволяют при известном значении волнистости W_{max} обрабатываемой поверхности определить амплитуду A и фазу φ колебаний индентора.

$$K(j\omega_X) = \frac{k}{(j\omega_X)^2 + j2n\omega_X + \omega_{0X}^2}. \quad (4.26)$$

После преобразований в общем случае имеем:

$$K(j\omega_X) = U(\omega_X) + jV(\omega_X), \quad (4.27)$$

где $U(\omega_X)$ и $jV(\omega_X)$ – вещественная и мнимая частотные характеристики. Тогда:

$$K(\omega_X) = \sqrt{U^2(\omega_X) + V^2(\omega_X)}, \quad (4.28); \quad \varphi(\omega_X) = \arctg \frac{V(\omega_X)}{U(\omega_X)}. \quad (4.29)$$

Уравнения колебательного звена имеют вид:

$$T_1^2 \ddot{Z}_{\text{вых}} + T_2^2 \dot{Z}_{\text{вых}} + Z_{\text{вых}} = k Z_{\text{вх}}, \quad (4.30)$$

$$T^2 \ddot{Z}_{\text{вых}} + 2\chi \dot{Z}_{\text{вых}} + Z_{\text{вых}} = k Z_{\text{вх}}. \quad (4.31)$$

где $T_1 = T = 1/\omega_0$, $T_2 = 2\chi/\omega_0$ – постоянные времена, причем $T_2^2 - 4T_1^2 < 0$;

ω_0 – собственная частота незатухающих колебаний.

$\chi = T_2/T_1$ – постоянная затухания звена;

k – статический коэффициент усиления, равный отношению установившихся значений выходной и входной величин.

Тогда типовое характеристическое уравнение имеет вид [70]:

$$\left(\frac{1}{\omega_0}\right)^2 \ddot{Z}_{\text{вых}} + \frac{2\chi}{\omega_0} \dot{Z}_{\text{вых}} + Z_{\text{вых}} = 0. \quad (4.32)$$

Так как $2\omega_0\chi = 2n = F/m$, $\omega_0^2 = c/m$,

$$\frac{m}{c}\ddot{Z}_{\text{вbx}} + \frac{F}{c}\dot{Z}_{\text{вbx}} + Z_{\text{вbx}} = kW(X). \quad (4.33)$$

где $W(X) = Z_{\text{вx}}$ – волнистость или разложение фасонного профиля обрабатываемой поверхности в направлении X .

Передаточная функция инструмента ППД упругого действия имеет вид:

$$K(p) = \frac{k}{\frac{m}{c}p^2 + \frac{F}{c}p + 1}. \quad (4.34)$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика в комплексной форме:

$$K(j\omega) = \frac{k}{-\frac{m}{c}\omega^2 + \frac{F}{c}(j\omega) + 1}. \quad (4.35)$$

АЧХ и ФЧХ инструмента ППД, являющиеся модулем $K(\omega)$ и фазой $\varphi(\omega)$ характеристики (4.35), определяются по зависимостям [70]:

$$K(\omega) = \frac{k}{\sqrt{\left(1 - \omega^2\left(\frac{F}{c}\right)\right)^2 + \omega^2\left(\frac{m}{c}\right)}}, \quad (4.36)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(-\frac{\omega\frac{F}{c}}{1 - \omega^2\frac{m}{c}}\right). \quad (4.37)$$

В эти уравнения входят факторы c , m , F , характеризующие конструктивные параметры инструмента, частота ω , определяемая шагом Smw волнистости поверхности и технологический фактор скорости обработки. Из выражения (4.2):

$$\omega = 2\pi\frac{V}{Smw} = 2\pi\frac{\pi d n_{AB}}{1000 Smw} \frac{10^6}{Smw} = 33,32\frac{\pi^2 d n_{AB}}{Smw}, \text{ [рад/с]}, \quad (4.38)$$

где d – диаметр установки индентора в инструменте (рисунок 3.3), мм; n_{AB} – частота вращения инструмента, мин^{-1} ; Smw – шаг волнистости поверхности по средней линии, мкм.

Принимая $k = 1$ из выражений (4.36) и (4.37) получим:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(33,32 \frac{\pi^2 d n_{AB}}{Smw}\right)^2 \frac{F}{c}\right)^2 + \left(33,32 \frac{\pi^2 d n_{AB}}{Smw}\right)^2 \frac{m}{c}}}, \quad (4.39)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \left(- \frac{33,32 \frac{\pi^2 d n_{AB}}{Smw} \frac{F}{c}}{1 - \left(33,32 \frac{\pi^2 d n_{AB}}{Smw}\right)^2 \frac{m}{c}} \right). \quad (4.40)$$

Для универсализации изображений АЧХ и ФЧХ предложены коэффициент демпфирования γ и динамический коэффициент усиления β [87]:

$$\gamma = \frac{F}{F_{кр}} = \frac{F}{2m\omega_0} = \frac{F}{2m\sqrt{\frac{c}{m}}}, \quad (4.41); \quad \beta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2}\right)^2}}. \quad (4.42)$$

Динамические характеристики принятой модели инструмента ППД упругого действия представлены на рисунке 4.4.

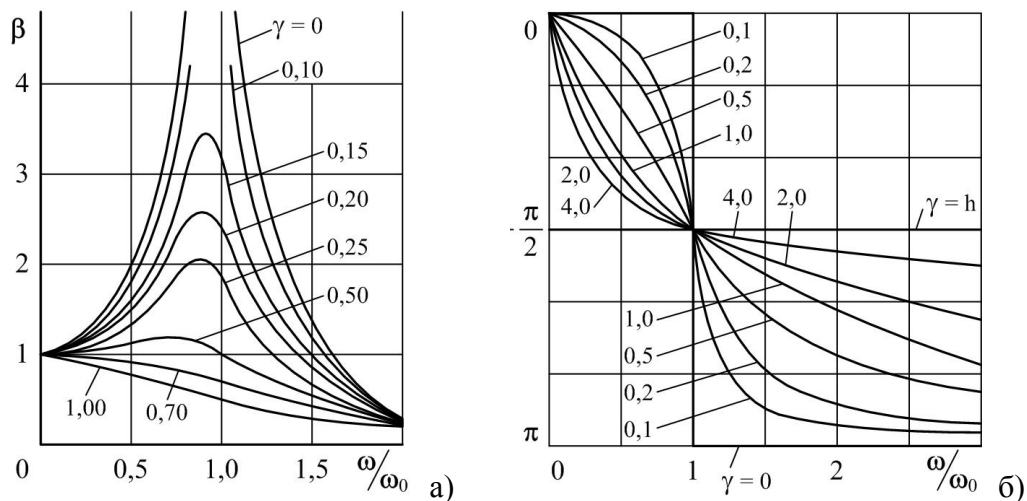


Рисунок 4.4 – Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики динамической модели инструмента упругого действия для обработки АВ

Если частота ω вынужденных колебаний индентора намного меньше значе- ний собственной частоты ω_0 , то коэффициент усиления $\beta \approx 1$. Если $\omega \gg \omega_0$, тогда $\beta \rightarrow 0$. Для обоих случаев величина демпфирования γ оказывает низкое влияние на коэффициент β . При $\omega/\omega_0 \approx 1$ коэффициент β значительно увеличивается, а в резонансной или околорезонансной зоне он становится чувствительным к изме-

нению коэффициента демпфирования. Максимальное значение коэффициент β принимает при условии:

$$\omega / \omega_0 = \sqrt{1 - 2\gamma^2}. \quad (4.43)$$

Анализ ФЧХ (рисунок 4.4б) показывает, что при $\omega/\omega_0 \ll 1$ фазовый угол $\varphi \approx 0$, а при $\omega/\omega_0 \gg 1$ $\varphi \approx \pi$. Поэтому влияние на фазовый угол демпфирования можно не принимать во внимание (кроме резонансной зоны).

4.1.2. Обработка цилиндрических поверхностей, имеющих отклонения от круглости

При обработке поверхностей деталей методами ППД инструментом упругого действия ПКПС во многом определяются давлением в контакте «поверхность – индентор», зависящим от силы Q , приложенной к индентору, и геометрических параметров индентора и поверхности детали (радиус, исходная шероховатость заготовки). В модели алмазного выглаживания цилиндрической поверхности детали (рисунок 4.5) силу Q воздействия индентора на поверхность обеспечивает предварительно сжатая с натягом Y_0 пружина 4, с жёсткостью c .

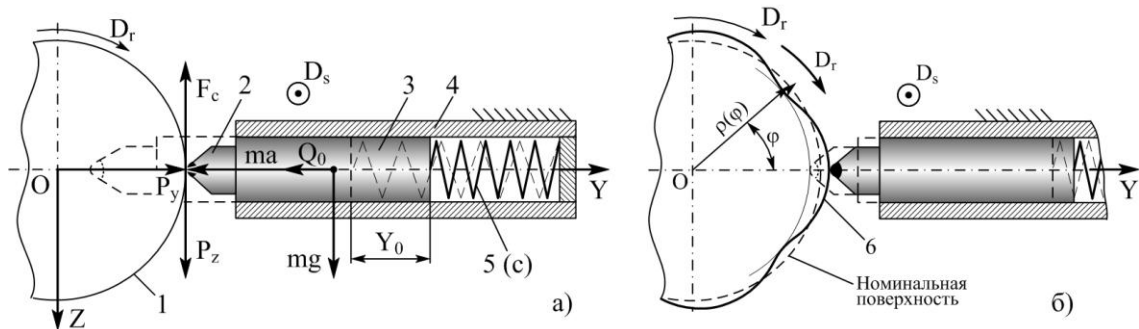


Рисунок 4.5 – Модель алмазного выглаживания наружных цилиндрических поверхностей:

- 1 – обрабатываемая деталь; 2 – вставка с алмазным индентором; 3 – ползун;
4 – корпус инструмента; 5 – пружина; 6 – поверхность с отклонениями от круглости

Если на обрабатываемой поверхности отсутствуют отклонения от круглости ($\rho(\varphi) = \text{const} = \rho_{\text{ном}}$), то сила Q определяется только значением предварительного натяжения пружины Y_0 (рисунок 4.5а). Тогда при выглаживании обеспечивается условие $Q = \text{const}$ и, соответственно, стабильное обеспечение ПКПС по всей по-

верхности детали.

При обработке фасонных поверхностей деталей (например, кулачков), или поверхностей с погрешностями формы поперечного сечения детали (отклонения от круглости), соотношение $\rho(\varphi) = \text{const}$ нарушается (рисунок 4.5б). Это вызывает перемещение индентора вдоль оси Y , изменяет динамику процесса обработки и колебания значений нормальной силы выглаживания Q . Таким образом, фактическое давление в зоне контакта индентора с поверхностью при одном и том же значении Q определяется скоростью обработки, динамическими свойствами инструмента и законом изменения профиля детали в поперечном сечении.

Для модели АВ на рисунке 4.5 можно учитывать методики расчета профиля кулачка для обеспечения заданного закона движения толкателя, представленные в работах по исследованию работы быстроходных кулачковых механизмов [61, 176].

Динамический расчёт инструментов ППД упругого действия должен решать обратную задачу: по фактически имеющемуся поперечному профилю детали б (рисунок 4.5) необходимо определить законы движения индентора 2. При этом необходимо решить следующие задачи:

1) определить условие обеспечения постоянного контакта индентора инструмента с поверхностью обрабатываемой детали;

2) определить диапазон скоростей выглаживания $V_{min} \dots V_{max}$ в пределах которого будет обеспечено постоянство силы выглаживания Q с допустимым интервалом изменения $Q_{min} \dots Q_{max}$, что позволит формировать ПКПС в заданных интервалах с требуемой надёжностью.

Профиль обрабатываемой поверхности может быть описан функцией $\rho = f(\varphi)$ (рисунок 4.5б). Положение индентора определяется координатой Y вдоль оси инструмента.

Ускорение индентора определяется уравнением

$$\ddot{y}(t) = \omega^2 f''(\varphi) = \omega^2 f''(\omega t), \quad (4.44)$$

где $y(t) = f(\omega t)$ – закон перемещения индентора; $\omega = 2\pi n$ – угловая скорость вращения детали; n – частота вращения детали (мин^{-1}).

При соблюдении условия постоянного контакта индентора с обрабатываемой поверхностью (безотрывность) соблюдается равенство

$$f(\omega t) = f(\varphi) = \rho, \quad (4.45)$$

то есть движения индентора вдоль оси инструмента Y зависит от профиля поверхности обрабатываемой детали.

Постоянный контакт индентора с поверхностью (безотрывность обработки) обеспечивается при условии динамического равновесия (отсутствии возмущающих воздействий) в соответствии с принципом Д'Аламбера:

$$P_y + Q - M \ddot{y} = 0, \quad (4.46)$$

где: P_y – реакция заготовки на индентор;

$Q = c(y + Y_0)$ – сила пружины, действующая на индентор;

Y_0 – значение предварительного натяжения пружины по оси Y (рисунок 4.5а);

$M = (m + m_{np}/3)$ – приведенная масса подвижных частей инструмента ППД;

m – масса ползуна;

m_{np} – масса пружины.

Для постоянного контакта индентора с поверхностью должно выполняться условие $P_y \geq 0$. Для случая $P_y = 0$:

$$M \ddot{y} \geq Q. \quad (4.47)$$

или с учётом (4.46):

$$-M\omega^2 f''(\omega t) \leq Q + cy, \quad (4.48)$$

где Q – сила пружины при $y = 0$ (обеспечивается настройкой), c – жёсткость пружины.

Условие, при котором сила Q выглаживания обеспечивается в заданных пределах $Q_0 \pm \Delta Q$:

$$Q_0 - \Delta Q \leq Q_0 + cf(\omega t) + M\omega^2 f''(\omega t) \leq Q_0 + \Delta Q. \quad (4.49)$$

В работе [53] на основе этого условия графоаналитическим методом рассчитываются угловые скорости вращения различных кулачков и эксцентриков и диапазон действующих сил в процессе АВ их поверхностей.

Модель процесса АВ представлена на рисунке 4.6.

Сечение номинальной поверхности детали имеет форму окружности 7 с радиусом ρ_0 . Сечение фактической поверхности детали определяется волнистой кривой с максимальной высотой W_{max} и угловым шагом волны φ_s . Номинальный профиль 7 является средней линией m_w волнистости, которая определяет фактический текущий радиус заготовки $\rho(\varphi)$.

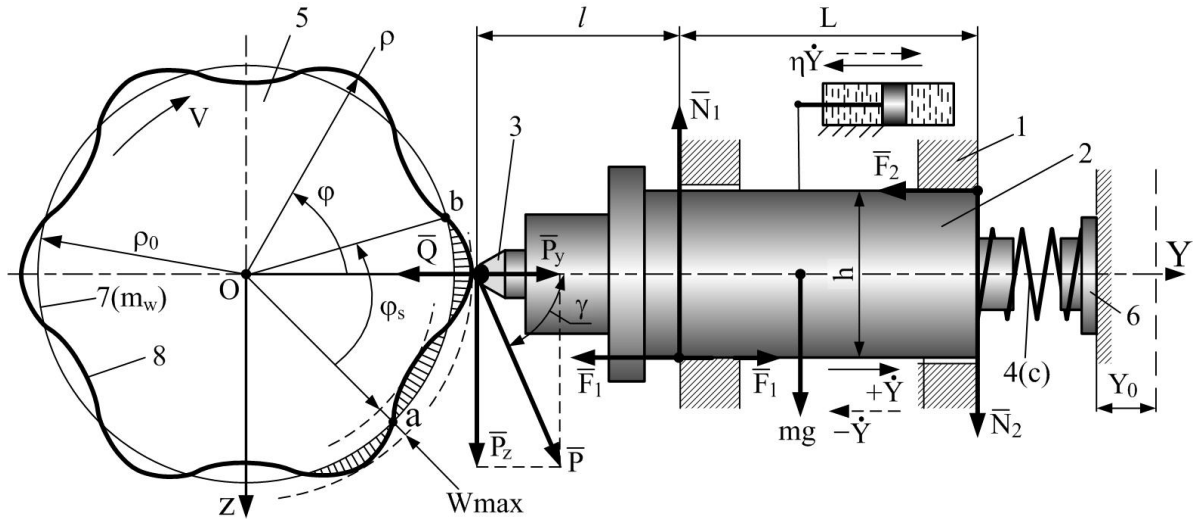


Рисунок 4.6 – Модель процесса АВ наружной цилиндрической поверхности детали: 1 – корпус; 2 – ползун 3 – индентор; 4 – пружина; 5 – обрабатываемая деталь; 6 – подвижного упор; 7 – номинальный профиль поверхности детали; 8 – поверхность с отклонениями от круглости

В представленной модели действуют следующие силы:

$Q_0 = cY_0$ – заданное значение силы выглаживания;

Q – сила действия индентора на поверхность, формирующая величину контактного давления;

$m\ddot{y}$ – сила инерции подвижных частей инструмента;

\bar{P}_y – сила реакции поверхности детали на индентор;

\bar{P}_z – сила сопротивления воздействию индентора на поверхность;

\bar{P} – результирующая сила сопротивления воздействию индентора;

mg – вес подвижных частей инструмента;

\bar{N}_1, \bar{N}_2 – силы реакций в опорах ползуна;

\bar{F}_1, \bar{F}_2 – силы трения скольжения, действующие при движении ползуна;

$\eta\dot{Y}$ – сила вязкого сопротивления, обусловленная наличием смазки, и пропорциональная скорости движения ползуна.

Из условия равновесия ползуна 2 значения реакций N_1 и N_2 рассчитываются по зависимостям:

$$N_1 = (L + h)P \sin \gamma / L; \quad N_2 = hP \sin \gamma / L. \quad (4.50)$$

Критический угол давления $\gamma_{кр}$ определяется из условия заклинивания ползуна 2 инструмента:

$$\operatorname{tg} \gamma_{кр} = 1 / f(1 + 2h/L). \quad (4.51)$$

Модель процесса АВ цилиндрической поверхности детали (рисунок 4.6) характеризуется как нелинейная колебательная система с одной степенью свободы, совершающая вынужденные колебания, при наличии сил вязкого сопротивления и трения [154, 218 и др.].

Уравнение движения подвижной части системы с одной степенью свободы определяется по зависимости:

$$m\ddot{y} + F(y, \dot{y}, t) = 0, \quad (4.52)$$

где $F(y)$ – силы, зависящие от перемещения (силы упругости), $F(\dot{y})$ – силы вязкого сопротивления, зависящие от скорости; $F(t)$ – возмущающие силы.

При обработке поверхностей с отклонениями формы, на индентор как будут действовать вынужденные колебания, вызываемые силой $P = P(t)$. Тогда уравнение вынужденных колебаний ползуна инструмента без учёта сил трения и вязкого сопротивления и с учётом зависимости $\omega_0^2 = c/m$ имеет вид:

$$\ddot{Y} + \omega_0^2 Y = \frac{P(t)}{m}. \quad (4.53)$$

При обработке поверхности отклонения от круглости создают кинематические возбуждения $f(t)$ (например волнистость W_{max} с шагом $\varphi_0 \rho_0$ или отклонения от круглости). Приведенная возмущающая сила $P(t) = cf(t)$, следовательно [154]:

$$\ddot{Y} + \omega_0^2 Y = \frac{cf(t)}{m}, \quad (4.54)$$

а с учётом вязкого сопротивления:

$$\ddot{Y} + 2n\dot{Y} + \omega_0^2 Y = \frac{cf(t)}{m}. \quad (4.55)$$

Профиль 8 поверхности обрабатываемой детали (рисунок 4.6) можно пред-

ставить после разложения в ряд Фурье в виде суммы синусоид. Тогда величина $f(t)$ является гармоническим возмущающим колебанием, а $P(t) = cf(t)$ – гармонической возмущающей силой, выражаемой уравнением

$$P = P_0 \sin(\omega t) = \frac{cf_0(t)}{m} \sin(\omega t), \quad (4.56)$$

Установившиеся колебания индентора определяются по уравнению (4.56):

$$Y = a \sin(\omega t - \gamma), \quad (4.57)$$

$$a = \frac{Y_{cm}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4\omega^2 n^2}{\omega_0^4}}}, \quad (4.58); \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{2\omega n}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (4.59)$$

где

$$Y_{cm} = \frac{P_0}{c} = \frac{P_0}{m\omega_0^2}. \quad (4.60)$$

Выражение (4.58) является АЧХ инструмента.

Коэффициент динамичности

$$\mu = \frac{a}{Y_{cm}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4\omega^2 n^2}{\omega_0^4}}}. \quad (4.61)$$

Без учета сил неупругого сопротивления коэффициент динамичности определяется по зависимости [154]:

$$\mu = \frac{1}{\left|1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right|}. \quad (4.62)$$

При $\omega = \omega_0$ наблюдается резонанс, когда $\mu \rightarrow \infty$ (рисунок 4.7 а).

Для случая (4.61) при $\omega = \omega_0$ резонанс наблюдается при уменьшении отношения $2n/\omega_0$ (рисунок 4.7б).

Смещение коэффициента динамичности μ в сторону от абсциссы $\omega/\omega_0 = 1$ незначительно, поэтому можно приближённо определить $\mu_{max} = \omega_0 / (2n)$ [154]. Следовательно максимум коэффициента динамичности обратно пропорционален

коэффициенту n .

Так как силы вязкого сопротивления значительно возрастают только в окколорезонансной зоне (рисунок 4.7б), то для коэффициента динамичности μ в удалении от резонанса можно принять кривую, построенную без учёта вязкого сопротивления, а в резонансной зоне принять $\mu = \mu_{max}$ (рисунок 4.7 в). Тогда в ряде случаев достаточно ограничиться только вычислением резонансной амплитуды индентора инструмента.

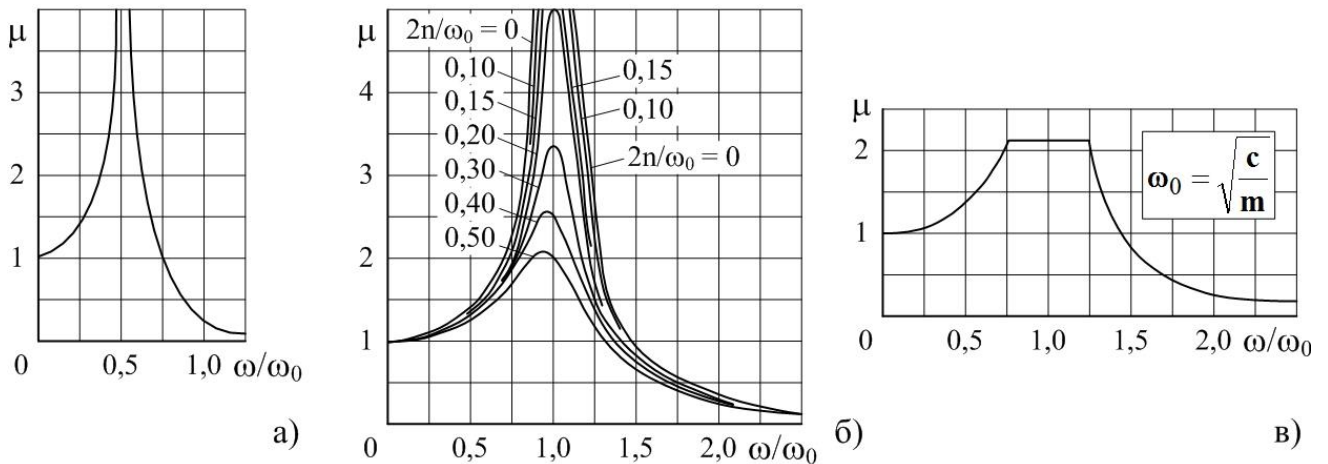


Рисунок 4.7 – Коэффициент усиления μ как функция отношения частот ω/ω_0 : а – без учёта, б – с учётом сил сопротивления; в – упрощённая зависимость

Выражение (4.59) является ФЧХ инструмента, определяющей угол γ отставания перемещения ползуна от изменения возмущающей силы. Угол γ также зависит от отношения частот ω/ω_0 .

При малых частотах ω угол γ невелик. При $\omega = \omega_0$ (резонанс) $\gamma = \pi/2$, то есть при максимальной силе перемещение равно нулю. При высоких частотах $\gamma \approx \pi$ и максимуму силы соответствует минимум перемещения.

Вязкое сопротивление влияет на общую силу, передающуюся от ползуна к корпусу, а значит и на силу воздействия индентора на поверхность обрабатываемой при ППД (рисунок 4.5). Эта сила состоит из двух слагаемых, соответствующих упругой и вязкой связи:

$$N = cY + \eta \dot{Y}.$$

Так как $Y = \mu Y_{ст} \sin(\omega t - \gamma)$ и $\dot{Y} = \mu \omega Y_{ст} \cos(\omega t - \gamma)$, получим

$$N = c\mu Y_{cm} \left[\sin(\omega t - \gamma) + \frac{2n\omega}{\omega_0^2} \cos(\omega t - \gamma) \right]. \quad (4.63)$$

Для максимального значения N :

$$N_{max} = \mu P_0 \sqrt{1 + \frac{4n^2\omega^2}{\omega_0^4}} = \mu_y P_0,$$

где μ_y – коэффициент усиления

$$\mu_y = \mu \sqrt{1 + \frac{4n^2\omega^2}{\omega_0^4}}. \quad (4.64)$$

4.2. Физическое моделирование процессов обработки поверхностей одноинденторными инструментами упругого действия

4.2.1. Обработка плоских фасонных поверхностей с дифференцируемым профилем в направлении вектора скорости обработки

Для подтверждения адекватности предложенных динамических моделей проводилась обработка АВ поверхностей деталей с волнистостью.

Плоские поверхности деталей из стали 45 выглаживались на вертикально-фрезерном станке 6Р13Ф3 с ЧПУ. Материал образцов позволяет четко различать изменения топографии поверхности при варьировании режимов обработки и динамическом воздействии инструмента (участки ударов и очаги пластической деформации)

На призматических заготовках размерами 60×300×60 мм формировались модели волнистой поверхности фрезерованием продольных канавок.

Высота волны W_{max} составляла 350 мкм, шаг по средней линии Smw – 8000 и 5500 мкм. Обеспечивалась шероховатость $Ra = 1$ мкм.

Кинематика процесса фрезерования определила отличие полученной волнистости от синусоидальной формы: радиус ρ_v вершины значительно больше радиу-

са ρ_{en} впадины.

Выглаживание осуществлялось инструментом упругого действия, конструкция которого представлена на рисунке 3.3.

Масса подвижных частей инструмента ППД $m = 1,63$ кг.

Жёсткость цилиндрической пружины $c = 2,66$ Н/мм.

Сила выглаживания составляла $Q = 30$ Н при радиусе вершины алмазного индентора $r = 2$ мм.

Подача инструмента $S = 0,1$ мм/об.

В качестве СОТС использовалось масло «Индустриальное-20».

Собственная частота инструмента ППД, определяющая условия резонанса:

$$f_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} = \sqrt{\frac{2,66 \cdot 10^3}{1,63}} = 40,4 \text{ Гц} \quad \text{или} \quad \omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi \cdot 40,4 = 253,8 \text{ рад/с.}$$

Поверхности обрабатывались с частотой вращения выглаживающего инструмента 80, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630 мин^{-1} . При диаметре вращения индентора $D = 40$ мм диапазон изменения скоростей составил 10...79,2 м/мин, а вариация частот вынужденных колебаний индентора находилась в пределах $f = 20,9...240$ Гц, включая резонансную частоту f_0 .

Характер контакта индентора с обрабатываемой поверхностью в процессе обработки определялся анализом профилограмм и микрофотографий.

На рисунке 4.8а представлена микрофотография исходной волнистой поверхности с шагом 5500 мкм, на которой видны следы предварительной обработки фрезерованием на выступах и впадинах модели волны.

На микрофотографии (рисунок 4.8б) видны переходы от участков выглаженной поверхности к участкам поверхности, полученным фрезерованием. Вектор скорости АВ на этой и других микрофотографиях направлен вверх.

Видны следы ударного контактирования индентора с обрабатываемой поверхностью в виде проекций темных пятен, так как выглаживание осуществлялось с отрывом индентора от гребня волны.

Микрофотографии участков обработанных АВ поверхностей представлены на рисунках 4.9 – 4.11. Анализ показывает, что с ростом скорости обработки, а,

следовательно, частоты воздействия профиля волны на индентор, длины участков контакта индентора с поверхностью уменьшается.

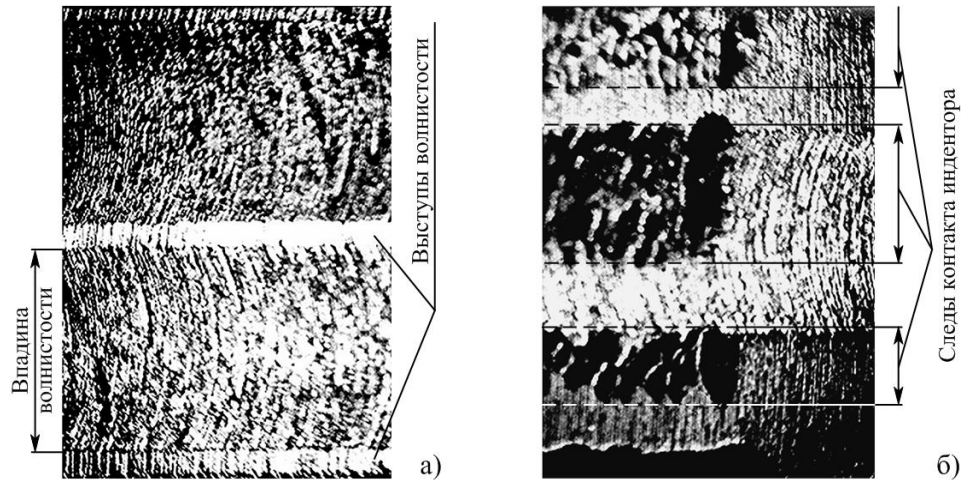


Рисунок 4.8 – Микрофотографии поверхностей образцов с волнистостью: а – волнистость поверхности с шагом 5500 мкм до выглаживания; б – переход от выглаженной поверхности к поверхности после фрезерования (шаг волны 8000 мкм), $f = 52,3$ Гц, $n = 200$ мин⁻¹

При обработке на дорезонансной частоте ($f = 20,9$ Гц, рисунок 4.9 а) наблюдается постоянный (безотрывный) контакт индентора с поверхностью, что обеспечивает требуемое качество обработки по всей обрабатываемой поверхности. На рисунке 4.9б так же видно отсутствуют следов вибраций и ударов. При частотах волновых возмущений в околорезонансной области происходит отрыв индентора от обрабатываемой поверхности (рисунок 4.9 в, г).

При росте частоты более 52,3 Гц (рисунок 4.9 г; 4.10) при обработке индентор начинает «отлетать» от поверхности, с дальнейшим увеличением частоты f растут величины «пролета» индентора над поверхностью и ударные нагрузки.

Установлено, что движение индентора по траектории с подбрасыванием характерно для частот возмущающих воздействий до частот $f = 105$ Гц при шаге волны $S_{mw} = 8000$ мкм (рисунок 4.10 в) и $f = 120$ Гц при шаге волны $S_{mw} = 5500$ мкм (рисунок 4.11а, б).

При соотношении частот $f / f_0 = 4,5 \dots 6$, когда коэффициент усиления β и значение АЧХ $K(\omega)$ близки к нулю, обработка осуществляется только ударным воздействием индентора на вершины волн при отсутствии контакта с поверхностью впадин волн (рисунок 4.11 в, г), что подтверждает теоретические выводы.

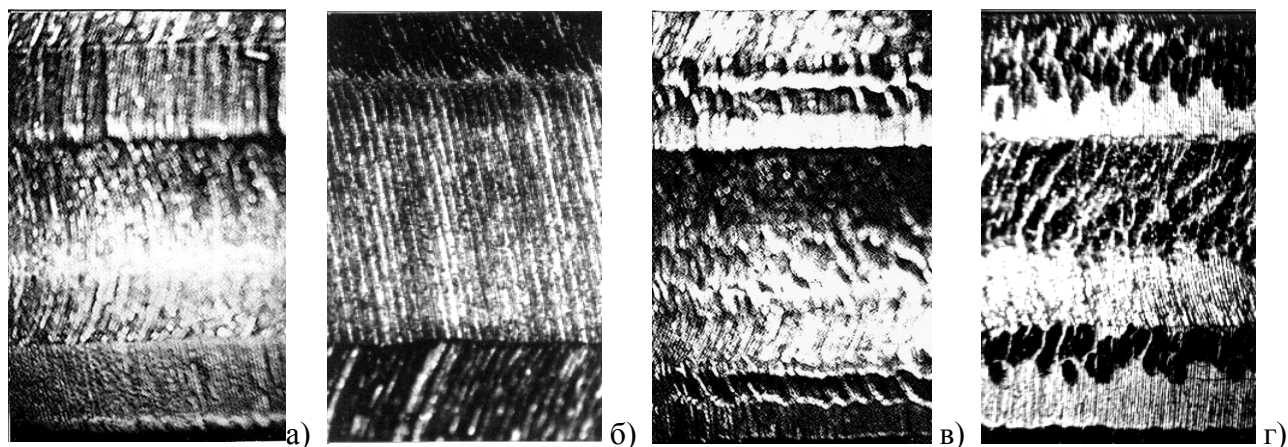


Рисунок 4.9 – Микрофотографии участков поверхностей с шагом волны $S_{mw} = 8000$ мкм после обработки АВ с частотами возмущения индентора f :
а – 20,9 Гц; б – 20,9 Гц; в – 41,9 Гц; г – 52,3 Гц

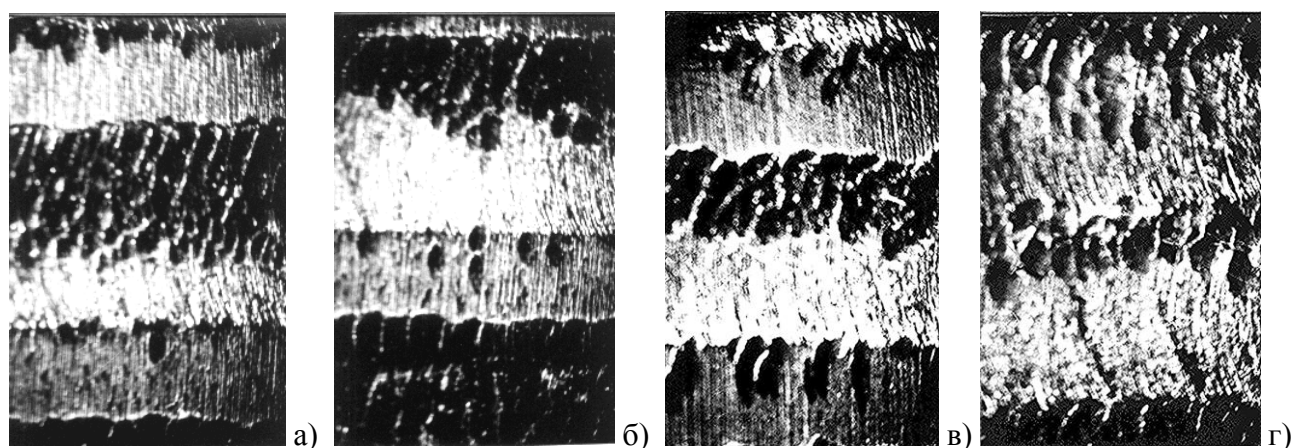


Рисунок 4.10 – Микрофотографии участков поверхностей с шагом волны $S_{mw} = 8000$ мкм (а, б, в) и $S_{mw} = 5500$ мкм (г) после обработки АВ с частотами возмущения индентора f : а – 65,5 Гц; б – 85,2 Гц; в – 105 Гц; г – 152 Гц

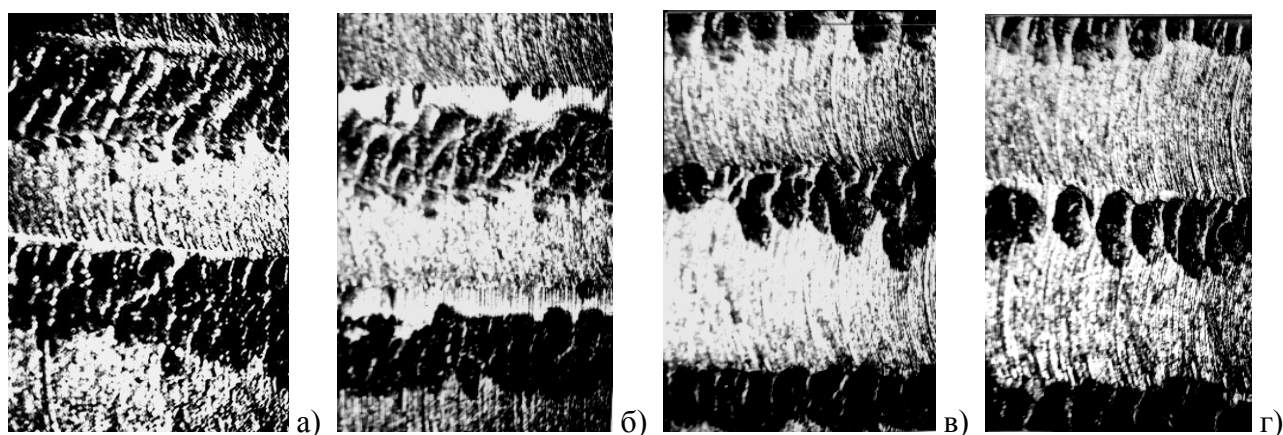


Рисунок 4.11 – Микрофотографии участков поверхностей с шагом волны $S_{mw} = 5500$ мкм после обработки АВ с частотами возмущения индентора f :
а – 95 Гц; б – 120 Гц; в – 190 Гц; г – 240 Гц

Анализ микрофотографий и волнограмм волнистых поверхностей деталей обработанных с различными скоростями, а также АЧХ и ФЧХ инструмента ПИД (п. 4.1.1.) показал, что при АВ наблюдаются различные типы контакта индентора с поверхностью (рисунок 4.12):

- траектория 1 – постоянный контакт индентора с поверхностью при АВ;
- траектории 2, 3 – обработка с отрывом индентора от поверхности;
- траектория 4 – обработка с подбрасыванием индентора.

При траекториях движения 3, 4 происходит ударное воздействие индентора на поверхность после отрыва или подбрасывания (точки a' , b' , c'), что приводит к

образованию характерных вмятин на поверхности.

Для оценки степени постоянства контакта (безотрывности) индентора с поверхностью при обработке предлагается использовать коэффициент контактирования K_k , рассчитываемый по зависимости:

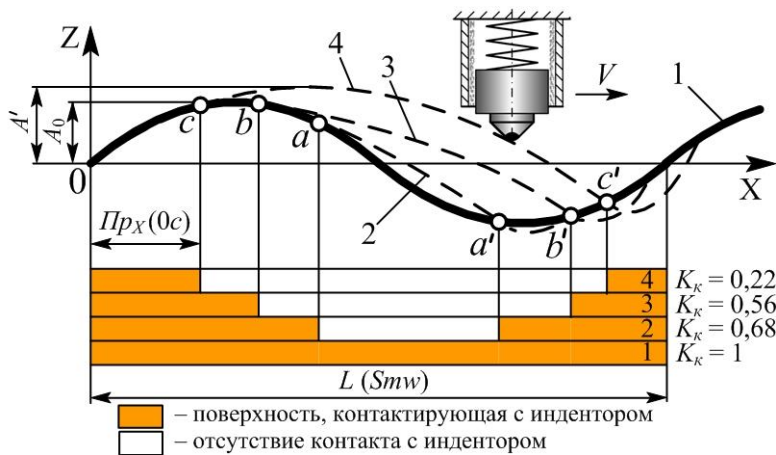


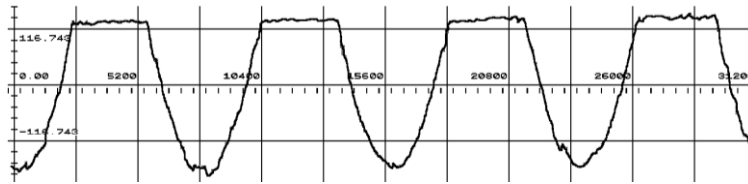
Рисунок 4.12 – Схемы движения индентора при АВ плоских волнистых поверхностей; K_k – коэффициент контактирования

$$K_k = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Пр}_X L_i}{L}, \quad (4.65)$$

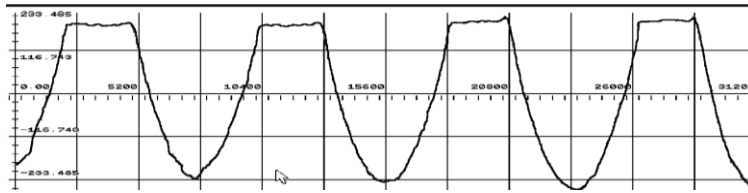
где $\text{Пр}_X L_i$ – проекция на ось X (рисунок 4.9) i -того участка поверхности, контактирующего с индентором; L – длина поверхности измерений.

Длина L поверхности измерений должна включать n волн. Для волнистой поверхности можно принять $L_{min} = (5 \dots 10) Smw$.

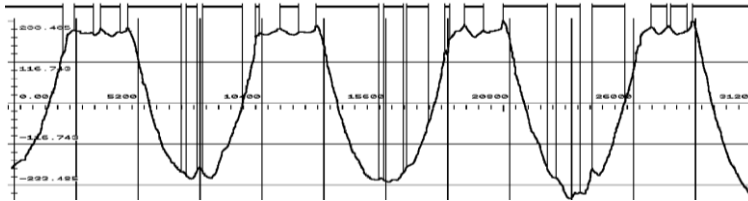
Длины проекций участков контактирования индентора с обрабатываемой поверхностью измерялись по волнограммам поверхности (рисунок 4.13). Участки поверхности, контактирующих с алмазным индентором в процессе обработки, обозначены в виде проекций сплошными линиями над волнограммой.



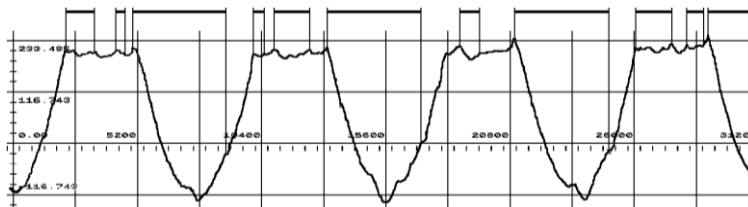
Волнограмма
исходной
поверхности



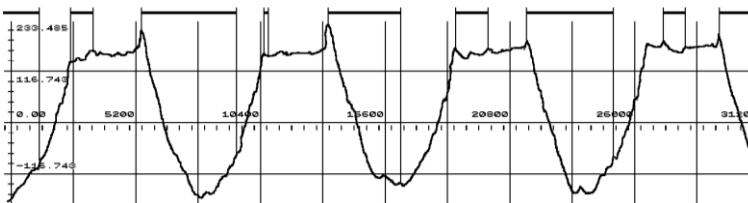
$n = 80 \text{ мин}^{-1}$
 $V = 10 \text{ м/мин}$
 $f = 20,9 \text{ Hz}$
 $\omega = 131 \text{ рад/с}$
 $K_K = 1,0$



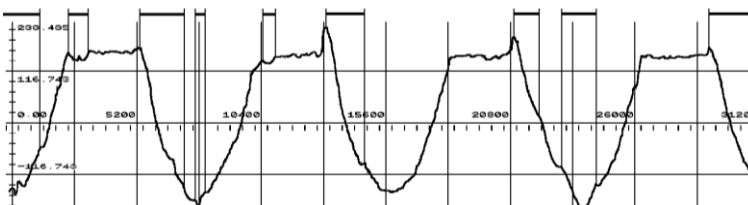
$n = 160 \text{ мин}^{-1}$
 $V = 20,1 \text{ м/мин}$
 $f = 41,9 \text{ Hz}$
 $\omega = 263 \text{ рад/с}$
 $K_K = 0,83$



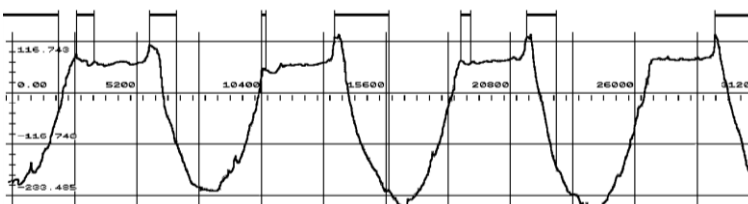
$n = 200 \text{ мин}^{-1}$
 $V = 25,1 \text{ м/мин}$
 $f = 76 \text{ Hz}$
 $\omega = 478 \text{ рад/с}$
 $K_K = 0,7$



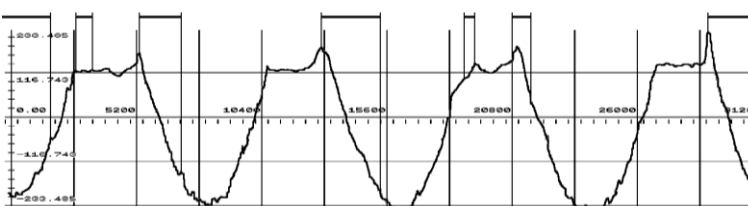
$n = 250 \text{ мин}^{-1}$
 $V = 31,4 \text{ м/мин}$
 $f = 95,2 \text{ Hz}$
 $\omega = 598 \text{ рад/с}$
 $K_K = 0,55$



$n = 315 \text{ мин}^{-1}$
 $V = 39,6 \text{ м/мин}$
 $f = 120 \text{ Hz}$
 $\omega = 754 \text{ рад/с}$
 $K_K = 0,37$



$n = 400 \text{ мин}^{-1}$
 $V = 50,2 \text{ м/мин}$
 $f = 105 \text{ Hz}$
 $\omega = 660 \text{ рад/с}$
 $K_K = 0,25$



$n = 500 \text{ мин}^{-1}$
 $V = 62,8 \text{ м/мин}$
 $f = 131 \text{ Hz}$
 $\omega = 823 \text{ рад/с}$
 $K_K = 0,23$

Рисунок 4.13 – Уменьшение суммы длин проекций участков контактирования индентора с обрабатываемой волнистой поверхностью с ростом скорости обработки

Безотрывная обработка наблюдалась до скорости обработки $V \approx 20,1$ м/мин ($\omega \approx 263$ рад/с).

Средние значения коэффициента K_k представлены в таблице 4.1. В ней приняты следующие обозначения:

- K_v, K_p – средние значения коэффициента контактирования индентора с поверхностями впадин и выступов волн, соответственно;
- K_k – среднее значение коэффициента контактирования индентора с поверхностью по всей длине измерения;
- K_ϕ – среднее значение коэффициента контактирования, полученное при анализе микрофотографий поверхности.

Таблица 4.1 – Значения коэффициента контактирования индентора с поверхностью

№ п/п	$n, \text{мин}^{-1}$	$Smw = 8 \text{ мм}$					$Smw = 5,5 \text{ мм}$	
		f, Hz	K_v	K_p	K_k	K_ϕ	f, Hz	K_k
1	80	20,9	1,0	1,0	1,0	1,0	30,5	0,93
2	160	41,9	0,75	0,5	0,63	0,58	61	0,65
3	200	52,3	0,78	0,53	0,68	0,7	76	0,7
4	250	65,5	0,73	0,39	0,59	0,57	95,2	0,55
5	315	82,5	0,45	0,15	0,33	0,35	120	0,37
6	400	105	0,39	0,1	0,25	0,28	152	0,3
7	500	131	0,26	0,2	0,23	0,25	190	0,27
8	630						240	0,22

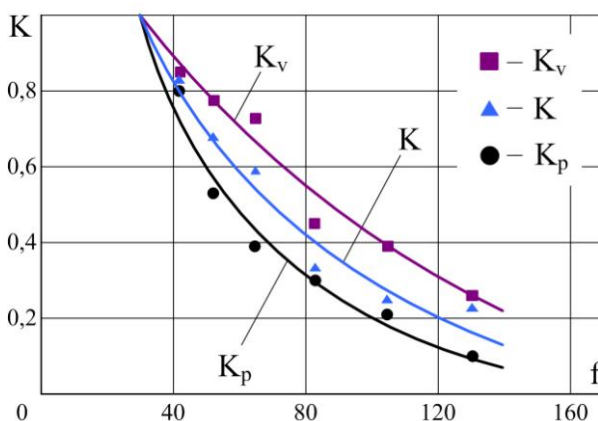


Рисунок 4.14 – Зависимость средних значений коэффициента контактирования индентора с волнистой поверхностью от частоты колебаний индентора

На рисунке 4.14 представлена графическая интерпретация данных таблицы. С ростом частоты вынужденных колебаний индентора от $f = 20$ до 160 Гц и выше, что связано с наличием волнистости обрабатываемой поверхности, значение коэффициента контактирования K_k снижается от 1 до 0,2.

4.2.2. Обработка цилиндрических поверхностей при наличии отклонений от круглости

На токарно-винторезном станке 16К20 обрабатывались поверхности с отклонениями от круглости на кольцевых образцах $\varnothing 50 \times \varnothing 40 \times 15$ мм из стали 45 (HRC 48...50), устанавливаемых на цилиндрическую оправку (рисунок 4.15а).

На плоско-шлифовальном станке создавались отклонения от круглости на поверхности в виде продольных лысок с высотой сегментов от 0,22 до 0,83 мм.

В экспериментах по исследованию влияния динамики процесса АВ на постоянство контакта индентора с поверхностью применялся инструмент упругого действия (рисунок 3.7), в котором масса подвижных частей составляла $m = 1,16$ кг, жёсткость пружины $c = 4,3 \cdot 10^3$ Н/м; собственная частота колебаний подвижных частей $\omega_0 = 60,9$ с⁻¹.

Обработка проводилась с силой выглаживания $Q = 100$ Н и продольной подаче инструмента $S = 0,1$ мм/об, скорость выглаживания изменялась, что позволило варьировать частоты вынужденных колебаний индентора (таблица 4.2). В зону обработки подавалось масло «Индустриальное-20».

Таблица 4.2 – Скоростные и частотные характеристики процесса АВ

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n , мин ⁻¹	100	125	160	200	250	315	400	500	630
f_0 , с ⁻¹	1,7	2,08	2,66	3,33	4,17	5,25	6,67	8,33	10,5
ω , с ⁻¹	10,7	13,1	16,7	21,0	26,2	33,0	41,9	52,3	65,9
ω/ω_0	0,18	0,21	0,27	0,34	0,43	0,54	0,69	0,85	1,08
V , м/мин	15,7	19,6	25,1	31,4	39,3	49,4	62,8	78,5	99,0

Исследования микротопографии обработанных образцов проводились с применением бинокулярного микроскопа (рисунок 4.15б) и информационно-измерительной системы ИИС-1 (рисунок 3.11). Измерения проводилось с дополнительной выносной опорой (рисунок 4.15 в).

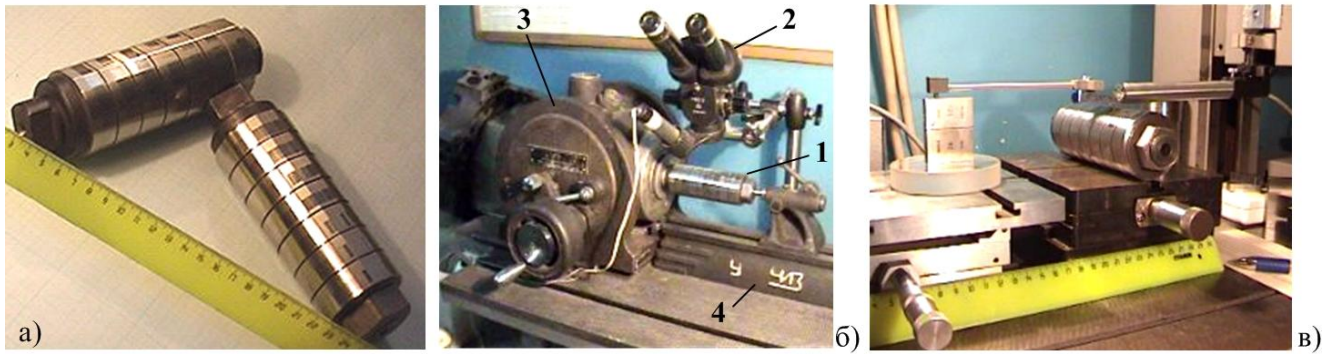


Рисунок 4.15 – Исследование результатов экспериментов по влиянию динамики процесса АВ инструментами упругого действия на качество поверхности: а – образцы на оправках; б – исследование образцов на микроскопе, 1 – образцы, 2 – микроскоп, 3 – делительная головка, 4 – инструментальная стойка; в – схема профилографирования с выносной опорой

На рисунке 4.16 в виде диаграммы (1) показано сечение образца с отклонениями от круглости и обозначениями характерных участков отклонений, совмещённое с круглограммой 2 поверхности.

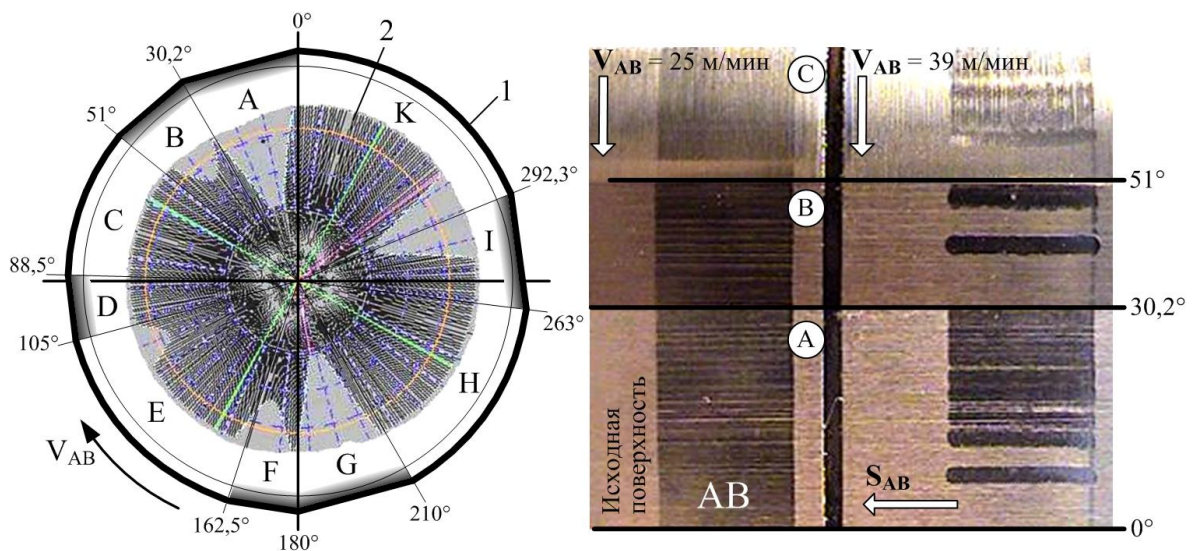


Рисунок 4.16 – Диаграмма 1 модели отклонений от круглости и её круглограмма 2 и типовые фотографии участков поверхности, обработанных с разными скоростями выглаживания V_{AB}

На диаграмме (рисунок 4.16) показаны характерные переходы между поверхностями:

- 1) переходы «цилиндр – плоскость»: С – В; К – I; Н – G; Е – D;
- 2) переходы «плоскость – цилиндр»: А – К; I – Н; F – E; D – C;
- 3) переходы «плоскость – плоскость»: В – А; G – F.

Эти переходы, а также изменение скорости обработки создают различные возмущающие воздействия на индентор выглаживающего инструмента, который

представляет собой динамическую колебательную систему.

На участках А, В, С образцов (рисунок 4.16) исходная поверхность до АВ выглядит как равномерная светлая. При скорости выглаживания 25 м/мин формируется равномерная топографическая структура поверхности, что косвенно указывает на примерно одинаковое качество обработки. При скорости АВ 39 м/мин наблюдается прерывистость обработки поверхности в виде характерных полос.

На рисунке 4.17 представлены микротопографии поверхностей образцов с отклонения от круглости после алмазного выглаживания с различными скоростями обработки $V_{AB} = 15,5 \dots 100$ м/мин.

Аналогично, как и в случае АВ плоских поверхностей инструментами упругого действия, можно выделить два типа контакта индентора с обрабатываемой поверхностью: 1) при обработке индентор контактирует с поверхностью; 2) контакт индентора с поверхностью отсутствует (фаза полёта);

Результаты исследования динамики процесса АВ инструментом упругого действия цилиндрической поверхности детали с отклонения от круглости на характер контакта индентора с поверхностью, аналогичны результатам подобных исследований при АВ плоских поверхностей деталей с волнистостью.

Изменение характера контакта индентора с поверхностью при обработке деталей инструментами упругого действия указывает на необходимость понятия *технологической устойчивости процесса* по параметрам качества.

Если в качестве критерия технологической устойчивости принять условие $R(t) = \text{const}$, где $R(t)$ – параметры качества поверхности обрабатываемой детали (геометрические, физико-механические и др.), то на практике постоянство значений $R(t)$ обеспечить очень сложно, так как при обработке действует значительное число неучтённых факторов, в том числе случайных. Предлагается ввести некоторую зону нечувствительности $\Delta\delta$, (как в теории автоматического регулирования), и тогда условие технологической устойчивости примет вид:

$$R(t) = R(t_{\text{зад}}) (1 \pm \delta), \quad (4.66)$$

где $R(t_{\text{зад}})$ – заданные значения параметров качества поверхности с допустимым регламентируемым отклонением δ .

$\frac{V}{\text{М}} / \text{МИН}$	← Направление скорости выглаживания					
	Лыска «Г»	Цилиндр «К»	Лыска «А»	Лыска «В»	Цилиндр «С»	
15,7						
25,2						
39,3						
31,4						
49,5						
63,0						
79,5						
99,0						
	263°	292° 0°	30°	51°	φ° 88°

Рисунок 4.17 – Фотографии участков поверхностей образцов с моделями макроотклонений, обработанных с разными скоростями алмазного выглаживания V_{AB}

Таким образом, для процессов обработки ППД инструментами упругого действия **технологическая устойчивость** – это способность обеспечивать требуемые значения параметров R качества поверхностного слоя с регламентированными отклонениями $\pm\delta R$ с заданной надёжностью $P(R_i \in (R_i \pm \delta R_i))$ непрерывно по всей обрабатываемой поверхности детали.

Результаты моделирования процессов обработки поверхностей с отклоне-

ниями от круглости показывают правильность выбора такой концепции в определении технологической устойчивости процесса ППД инструментами упругого действия.

Так при росте скорости обработки V_{AB} сильно изменяется топография получаемой поверхности (рисунок 4.17), и технологический процесс переходит от устойчивого ($V_{AB} < 25$ м/мин) к неустойчивому ($V_{AB} > 25$ м/мин).

На рисунке 4.18 показаны профилограммы участков поверхности цилиндрических деталей, с одинаковой исходной шероховатостью (рисунок 4.18а) и обработанную алмазным выглаживанием со скоростями $V_{AB} = 25, 63$ и 99 м/мин.

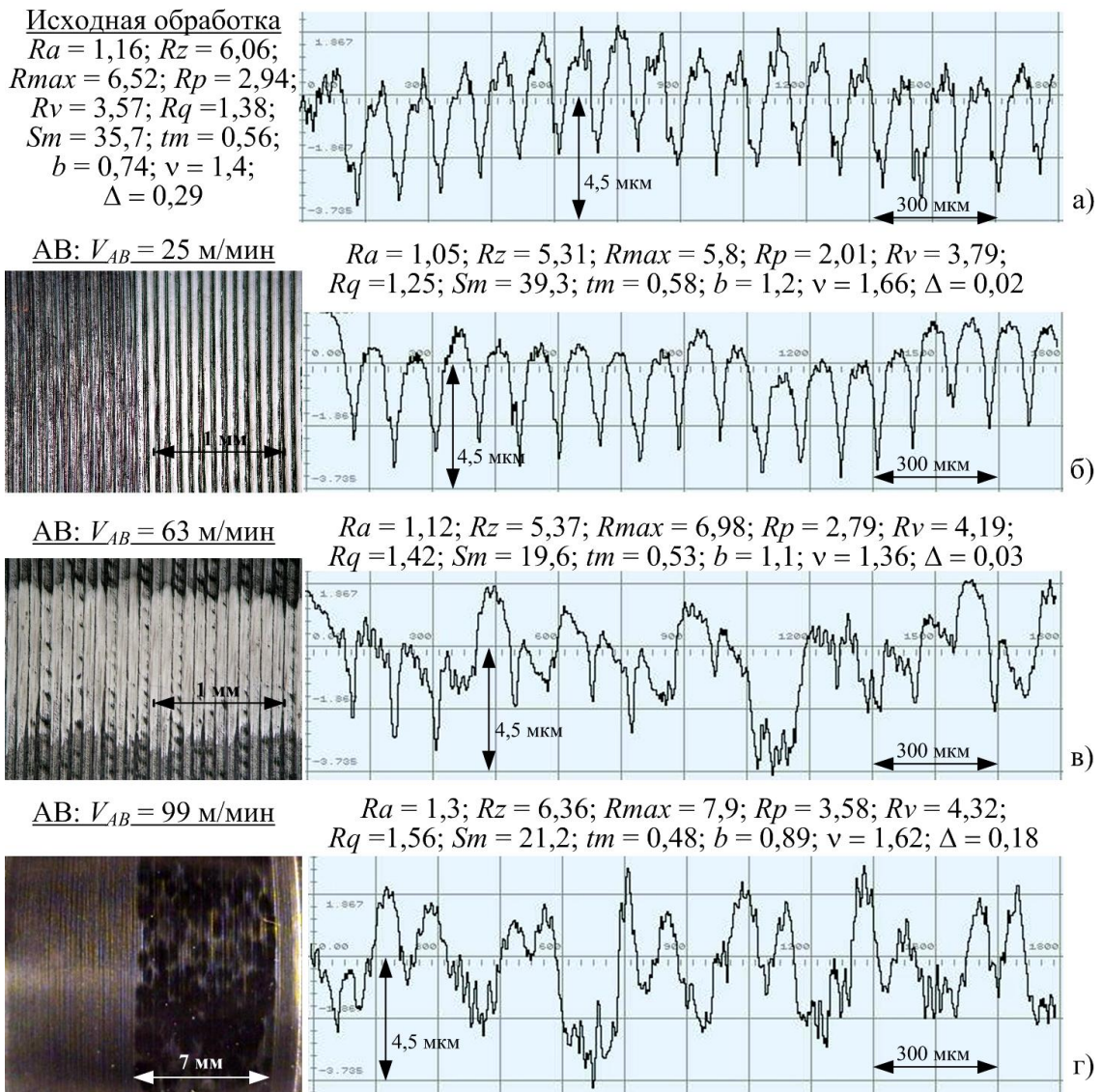


Рисунок 4.18 – Микропрофили цилиндрических поверхностей с макроотклонениями после АВ с силой $Q = 100$ Н: а – исходная поверхность; б – после технологически устойчивого режима обработки; в – после обработки на границе технологической устойчивости; г – после обработки с технологически неустойчивым режимом

Технологический процесс находится в устойчивом состоянии при скорости $V_{AB} = 25$ м/мин, в неустойчивом – а при скоростях $V_{AB} = 63$ и 99 м/мин. При $V_{AB} = 63$ м/мин неустойчивость процесса обработки проявляется в упорядоченных пятнах контакта поверхности (светлая полоса). При обработке со скоростью $V = 99$ м/мин следы ударов индентора на поверхности носят неупорядоченный характер (рисунок 4.18 г).

Анализ профилограмм показывает, обработка в режимах технологически устойчивого процесса обеспечивает минимальные высотные параметры шероховатости. При неустойчивых процессах обработки их значения возрастают, а значение R_{max} выше соответствующего значения для исходной поверхности. Переход от технологически устойчивого процесса обработки к неустойчивому приводит к росту параметра Δ Крагельского-Комбалова, следовательно, износостойкость поверхности снижается.

Таким образом, установлено, что, технологическая устойчивость процесса обработки поверхностей деталей инструментами упругого действия зависит от внешних возмущений (геометрические параметры качества поверхности) и от конструктивных характеристик инструмента и технологических факторов обработки. Для обеспечения высокой технологической устойчивости необходимо определить соответствующие критерии.

4.3. Критерии обеспечения технологической устойчивости процессов поверхностного пластического деформирования поверхностей деталей инструментами упругого действия

4.3.1. Обработка плоских поверхностей деталей с дифференцируемым фасонным профилем в направлении вектора скорости

Для обеспечения технологической устойчивости необходимо определить условие обеспечения постоянного контакта индентора с обрабатываемой поверхностью и выявить диапазон скоростей обработки, в пределах которого будет обес-

печено сохранение силы выглаживания Q в допустимом регламентируемом диапазоне (Q_{\min}, Q_{\max}), который необходимо выдерживать с целью формирования параметров качества в заданных интервалах.

Процесс АВ считается технологически устойчивым при движении индентора без отрыва от обрабатываемой волнистой поверхности, при этом изменение силы обработки Q не превышает допустимых значений.

Сила выглаживания при обработке плоских поверхностей определяется уравнением:

$$Q = m\ddot{Z} + F\dot{Z} + c(Z - Z_0) + mg . \quad (4.67)$$

Значения силы Q выглаживания будут изменяться незначительно или оставаться постоянными ($Q = \text{const}$) при условии, которое определяется выражениями:

$$mg \gg m\ddot{Z} + F\dot{Z} + cZ \quad \text{или} \quad cZ_0 \gg m\ddot{Z} + F\dot{Z} + cZ . \quad (4.68)$$

Если в инструменте массу подвижной части относительно мала, то $Q = cZ_0$, если в инструменте ППД большая подвижная масса, а силы выглаживания невелики – $Q = mg$.

При идеализированном представлении волнистости обрабатываемой поверхности в виде синусоиды (4.3) решение (4.68) при равенстве нулю левой части уравнения имеет вид:

$$Z = \frac{W_{\max}}{2} e^{-nt} \sin\left(\frac{2\pi}{Smw} X\right) - \frac{W_{\max}}{2} - \frac{mg}{c} . \quad (4.69)$$

Дифференцируя это уравнение при $n = 0$ (процесс без затухания) и подставляя результат в (4.67) получим условие, при котором обеспечивается безотрывная обработка волнистой поверхности:

$$\left(\frac{c}{m} - \left(\frac{2\pi V}{Smw}\right)^2\right) \sin\left(\frac{2\pi}{Smw} X\right) + \lambda \frac{c}{m} \geq 0 . \quad (4.70)$$

или сокращённом в виде:

$$(\omega_0^2 - \omega^2) \sin \omega t + \lambda \omega_0^2 \geq 0 .$$

где, $\lambda = Z_0 / W_{\max}$ – коэффициент, учитывающий, во сколько раз величина предварительного натяжения пружины больше высоты волнистости обрабатываемой

поверхности.

Для обеспечения контакта индентора с поверхностью, необходимо, чтобы $\lambda \geq 1$. Тогда:

$$\omega^2 \leq 2\lambda\omega_0^2. \quad (4.71)$$

Это условие определяет критическую частоту обработки, при которой происходит отрыв индентора от обрабатываемой поверхности:

$$\omega_{кр} \leq \sqrt{\frac{2\lambda c}{m}} = \sqrt{\frac{2Z_0}{Wmax} \frac{Q}{Z_0} \frac{g}{G}} = \sqrt{\frac{2Q}{m Wmax}}, \quad (4.72)$$

Выражая $\omega_{кр}$ через технологические параметры обработки, получим:

$$\left(\frac{2\pi V}{Smw}\right) \leq \sqrt{\frac{2Q}{m Wmax}}. \quad (4.73)$$

Так как $\omega = 2\pi V / Smw$, то при известных параметрах волнистости поверхности и заданной силе Q выглаживания допустимая из условия безотрывности индентора скорость обработки V должна удовлетворять неравенству, которое определяет критерий технологической устойчивости процесса ППД плоских поверхностей с волнистостью инструментами упругого действия:

$$V \leq \frac{Smw}{2\pi} \sqrt{\frac{2Q}{m Wmax}}. \quad (4.74)$$

В силу динамического характера процесса обработки сила выглаживания изменяется. При $n \neq 0$ справедливо неравенство:

$$\omega_0^2 + \sin\left(\frac{\omega}{V} X + \varphi\right) \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \omega^2} \geq 0. \quad (4.75)$$

Если $\sin\left(\frac{\omega}{V} X + \varphi\right) = -1$, что является нежелательным по критерию отрыва индентора от обрабатываемой поверхности, то

$$\omega^2 \leq 2\omega_0^2 - 4n^2. \quad (4.76)$$

Чем больше величина затухания n , тем больше вероятность отрыва индентора от поверхности.

Силу выглаживания при динамических режимах работы инструмента упру-

того действия можно найти из уравнения:

$$\ddot{Z} + 2n\dot{Z} + \omega_0^2(Z + Z_0) + g = \frac{Q}{m} . \quad (4.77)$$

При $n = 0$ экстремальные значения силы обработки составляют:

$$Q_{\text{экстр}} = Q \pm \frac{W_{\text{max}}}{2} m \left(\frac{2\pi V}{Smw} \right)^2 . \quad (4.78)$$

Таким образом, на изменение критической силы при обработке ППД инструментом упругого действия влияют параметры волнистости обрабатываемой поверхности. Кроме того, рост коэффициента затухания способствует росту динамических сил при обработке, что приводит к возникновению неустойчивости формирования параметров качества по обрабатываемой поверхности.

4.3.2. Обработка цилиндрических поверхностей деталей с исходной продольной волнистостью или дифференцируемыми отклонениями от круглости

Условия технологической устойчивости процесса обработки ППД инструментом упругого действия как плоских поверхностей, так и цилиндрических идентичны, но критерии её обеспечения зависят от схемы обработки и конструктивно-технологических факторов.

Критерии технологической устойчивости процесса АВ наружных цилиндрических поверхностей с отклонениями от круглости (профили кулачков и др.) или поверхностей с продольной волнистостью должны учитывать следующие характеристики движения индентора:

– Y, \dot{Y}, \ddot{Y} – перемещение, скорость и ускорение вершины индентора в точке контакта с обрабатываемой поверхностью при жёсткой кинематической связи, то есть, это параметры движения точки контакта;

– $Y_1, \dot{Y}_1, \ddot{Y}_1$ – то же самое при отсутствии жёсткой кинематической связи индентора с поверхностью обработки (при отрыве индентора от поверхности), то есть, это параметры движения вершины индентора.

При обработке АВ с постоянным контактом индентора с поверхностью:

$$Y = Y_1; \dot{Y} = \dot{Y}_1; \ddot{Y} = \ddot{Y}_1. \quad (4.79)$$

При обработке с отрывом индентора от обрабатываемой поверхности:

$$Y_1 \neq Y; \dot{Y}_1 = \text{var}; \ddot{Y}_1 = \text{var}. \quad (4.80)$$

При $Y_1 > Y$ индентор движется с отскоком или подскоком относительно поверхности и величиной пластической деформации поверхности можно пренебречь. Если $Y_1 < Y$ – индентор после фазы «полета» совершает ударное воздействие на обрабатываемую поверхность.

Во втором случае (4.80) скорость \dot{Y}_1 и ускорение \ddot{Y}_1 индентора зависят от предварительного натяжения пружины в инструменте ($Q = cY_0$), времени «полета» индентора от контакта до контакта с поверхностью, определяемое шагом волнистости Smw и скоростью обработки; ускорение \ddot{Y} в момент отрыва зависит от силы трения и вязкого демпфирования.

Анализ работ [154, 218, 320, 321 и др.] показывает, что определение закона движения индентора является сложной задачей.

Модель продольного профиля цилиндрической поверхности с продольными отклонениями от круглости представлена на рисунке 4.19 как синусоида с шагом, кратным длине окружности номинальной обработки πD_0 в виде развертки. Такой профиль представлен уравнениями:

$$Y = a \sin(\omega t + \varphi_0) = Y = \frac{Wmax}{2} \sin\left(2\pi \frac{V}{Smw} t + \gamma_0\right). \quad (4.81)$$

где a – амплитуда; $\omega = 2\pi/T$ – круговая частота; T – период колебаний, равный шагу волны по средней линии Smw ; φ_0 – начальный фазовый угол; γ_0 – угол сдвига фаз, который для упрощения расчетов принимается равным нулю.

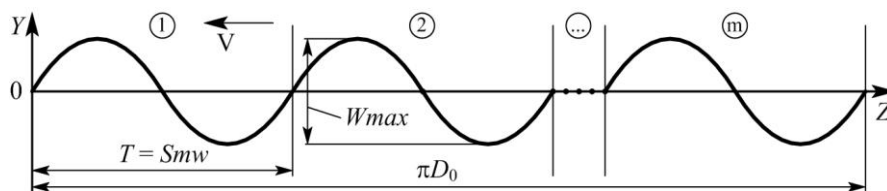


Рисунок 4.19 – Модель профиля цилиндрической поверхности в виде развёртки окружности с номинальным диаметром D_0 с наложенной исходной волнистостью: V – скорость обработки; $Wmax$, Smw – максимальная высота и шаг волны по средней линии

При обработке АВ индентор действует на поверхность с силой:

$$Q_{\Sigma} = c(Y_0 + Y) + m\ddot{Y}, \quad (4.82)$$

где, c – жесткость пружины инструмента; Y_0 – величина предварительного натяга пружины; Y – текущая ордината точки контакта обрабатываемой поверхности с индентором; $m\ddot{Y}$ – сила инерции.

Если допустить, что $Y \ll Y_0$, то:

$$Q_{\Sigma} = cY_0 + m\ddot{Y} = Q_0 + m\ddot{Y}. \quad (4.83)$$

Безотрывность индентора от поверхности при обработке ППД инструментом упругого действия соблюдается при условии $P_Y \geq 0$ или $Q_{\Sigma} \geq 0$ при $P_Y = Q_{\Sigma}$, где P_Y – сила при ППД поверхности по оси Y инструмента или реакция на индентор со стороны обрабатываемой поверхности.

Для случая, когда $\sin(\omega t + \gamma_0) = 1$ получим $Q_0 - m\ddot{Y} \geq 0$ или $Q_0 = cY_0 \geq m\ddot{Y}$:

$$\frac{c}{m}Y_0 \geq a\omega^2 \quad \text{или} \quad \frac{c}{m}Y_0 \geq \frac{Wmax}{2} \left(\frac{2\pi V}{Smw} \right)^2. \quad (4.84)$$

Из (16) получим ограничение максимальной скорости обработки при АВ из условия безотрывной обработки, являющееся критерием технологической устойчивости процесса ППД инструментами упругого действия цилиндрических поверхностей с исходной продольной волнистостью или отклонениями от круглости:

$$V_{max} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \sqrt{\frac{(cY_0)Smw^2}{m Wmax}}. \quad (4.85)$$

Полученное условие позволит обеспечить технологическую устойчивость ТС АВ за счет режимов обработки (сила $Q_0 = cY_0$ и скорость V) и конструктивных параметров инструмента упругого действия (масса m подвижных частей инструмента и жёсткость c пружины) с учетом параметров качества поверхности, обеспеченных на предыдущем этапе обработки ($Wmax$, Smw).

Анализ условия (4.85) показывает, что для повышения допустимой скорости обработки при сохранении технологической устойчивости процесса необходимо:

1) обеспечить низкие значения параметров волнистости $Wmax$ и Smw по-

верхности перед обработкой ППД;

2) снижать массу m подвижных частей в инструменте ППД;

3) обеспечить максимально допустимое значение силы обработки за счет жёсткости пружины c и ее предварительного натяга Y_0 в инструменте.

При выполнении условия (4.85) сила выглаживания может колеблется в широких пределах, что нестабильности процесса формирования ПКПС. Поэтому необходимо указывать интервал допустимых значений сил обработки (Q_{\min} , Q_{\max}), который может задаваться симметричным относительно номинального значения силы Q_0 или несимметричным.

При симметричном интервале $Q \in (Q_0 \pm \delta Q_0)$, $1 \geq \delta \geq 0$ (рисунок 4.20 а):

$$Q_0 - m\ddot{Y} \geq (1 - \delta)Q_0. \quad (4.86)$$

После преобразований получим ограничение максимальной скорости, обеспечивающей одновременно верхнюю и нижнюю границы интервала $Q_0 \pm \delta Q_0$:

$$V_{max1} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \sqrt{\delta \frac{(cY_0)Smw^2}{m Wmax}}. \quad (4.87)$$

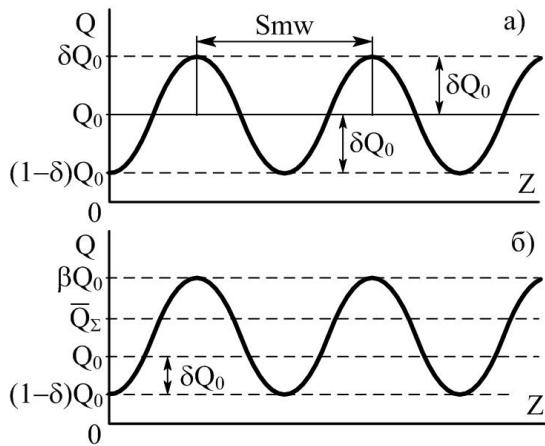


Рисунок 4.20 – Регламентация силы воздействия индентора на поверхность при обработке ППД: а – симметричная; б – несимметричная

При несимметричной регламентации силы Q (рисунок 4.20 б) для нижней границы интервала δQ_0 ограничение скорости совпадает с зависимостью (4.85), а для верхней границы интервала βQ_0 ограничение принимает вид: $Q_0 + m\ddot{Y} \leq \beta Q_0$, где $\beta > 1$ – коэффициент допустимого превышения номинальной силы Q_0 обработки (выбирается из условий ограничения возможного перенаклёпа поверхностного слоя и др.). После преобразований

второго ограничения получим условие:

$$V_{max2} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \sqrt{(\beta + 1) \frac{(cY_0)Smw^2}{m Wmax}}, \quad (\beta \geq 0). \quad (4.88)$$

Таким образом, при несимметричной регламентации интервала допуска

значений силы выглаживания Q максимальная скорость V_{max} должна удовлетворять критериям (4.87) и (4.88).

Для практического использования полученных критериев технологической устойчивости необходимо, чтобы скорость обработки V при расчётах определялась в [м/мин]. Для этого правые части зависимостей (4.85), (4.87) и (4.88) надо умножить на 60.

Фактическое значение скорости обработки выбирается из условия

$$V_{факт} \leq \min(V_{max1}, V_{max2}). \quad (4.89)$$

Значения допустимых скоростей обработки, обеспечивающих технологическую процесса ППД инструментами упругого действия удобно выбирать по диаграммам, полученным по условию (4.85) (рисунок 4.21).

Допустимые значения скоростей обработки расположены ниже кривых критического значений, а выше кривых находятся значения скоростей, при которых возможен отрыв индентора от обрабатываемой поверхности.

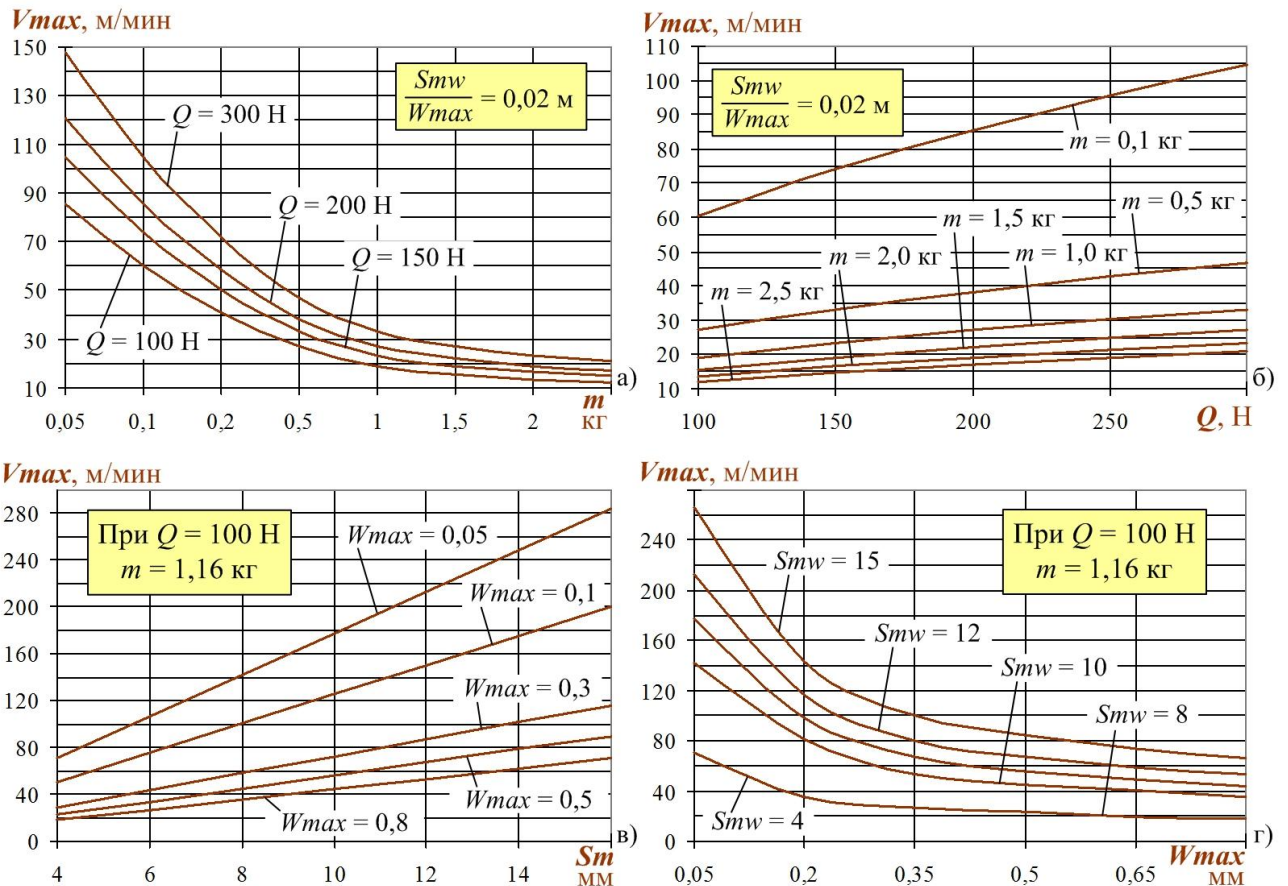


Рисунок 4.21 – Диаграммы для определения допустимой скорости АВ инструментами упругого действия цилиндрических поверхностей деталей с отклонениями от круглости в виде синусоидальных волн с параметрами W_{max} , Smw из условия непрерывности обработки

Диаграммы построены для:

- 1) различных значений силы обработки Q и массы m подвижных частей инструмента ППД и постоянного значения отношения Smw^2/W_{max} (рисунок 4.21 а);
- 2) различных значений массы m подвижных частей инструмента ППД и силы Q и при постоянных значениях отношения Smw^2/W_{max} (рисунок 4.21 б);
- 3) различных значений максимальной высоты волны W_{max} и шага волнистости по средней линии Sm при постоянных значениях силы $Q = 100$ Н, и массы $m = 1,16$ кг подвижных частей инструмента ППД (рисунок 4.21 в);
- 4) различных значений шага волны по средней линии Sm и высоты волны W_{max} при постоянных значениях силы $Q = 100$ Н и массы $m = 1,16$ кг (рисунок 4.21 г).

Полученные диаграммы могут использоваться для оперативного определения максимально допустимой скорости обработки ППД инструментом упругого действия, обеспечивающей технологически устойчивый процесс обработки.

Если требуется проводить обработку ППД с ограничениями скорости, определяемыми по зависимостям (4.87) или (4.88), то значения критических скоростей обработки, полученные с помощью диаграммы (рисунок 4.21), умножают на коэффициенты $\sqrt{\delta}$ или $\sqrt{\beta+1}$.

На практике реальный профиль поверхности характеризуется волнистостью с различными высотными и шаговыми параметрами, но его главной особенностью является непрерывность или дифференцируемость.

Поэтому при определении условий обработки ППД поверхностей деталей с волнистостью и отклонениями от круглости с использованием предложенных критериев технологической устойчивости, рекомендуется применять разложение реального профиля поверхности в ряд Фурье, при котором, используя принцип суперпозиции, выделяются основные синусоидальные составляющие профиля.

Тогда входной величиной динамических моделей процессов АВ плоских и цилиндрических поверхностей деталей будет периодический сигнал, представляющий собой сумму синусоидальных составляющих, полученных при разложении профиля поверхности в ряд Фурье, определяемый по зависимости (4.4).

4.4. Программное обеспечение расчёта динамических характеристик процессов алмазного выглаживания инструментами упругого действия

Для расчета динамических характеристик и критических значений режимов процесса алмазного выглаживания поверхностей деталей инструментами упругого действия, характеризующих технологическую устойчивость ТС разработано программное обеспечение [130], предназначенное для расчёта условий, обеспечивающих постоянный контакт индентора с обрабатываемой поверхностью, и значений $\omega_{кр}(m)$, $\omega_{кр}(c)$, $\omega_{кр}(m, c)$, а также построения АЧХ и ФЧХ инструмента и траектории движения индентора в зависимости от скорости обработки и параметров волнистости обрабатываемой поверхности.

В главном окне программы (рисунок 4.22) задаются значения массы m подвижных частей инструмента (кг); жёсткости c пружины (Н/мм); предварительного натяжения Z_0 , пружины (мм); диаметра D установки индентора в инструменте (мм); высоты W_{max} и шага S_{mw} по средней линии волнистости поверхности (мм).

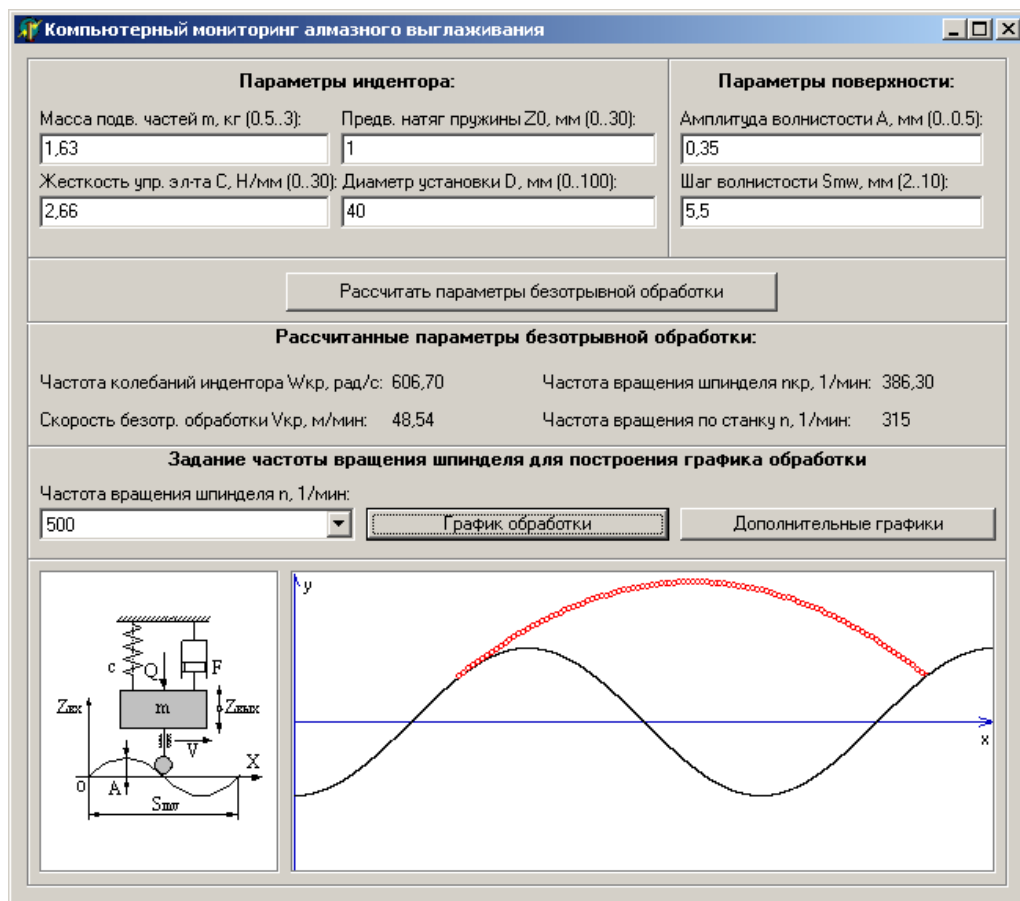


Рисунок 4.22 – Вид главного окна программы

По результатам расчёта параметров безотрывной обработки на экране отображаются значения критической частоты колебаний индентора $\omega_{кр}$, рад/с; скорости безотрывной обработки $V_{кр}$, м/мин; частоты вращения инструмента $n_{кр}$, мин⁻¹; частота вращения шпинделя станка n , мин⁻¹ (рисунок 4.22).

При этих значениях обеспечивается постоянный контакт индентора с обрабатываемой поверхностью.

В нижней части главного окна программы показана траектории движения индентора для заданных условий обработки.

В окне, открываемом ссылкой «Дополнительные графики», строятся:

- 1) график зависимости частоты колебаний индентора при обработке от массы подвижных частей инструмента $\omega_{кр}(m)$ (рисунок 4.23 а);
- 2) график зависимости частоты колебаний индентора при обработке от жёсткости пружины инструмента $\omega_{кр}(c)$ (рисунок 4.23 а);
- 3) комбинированный график зависимости частоты колебаний индентора при обработке от массы подвижных частей и жёсткости пружины инструмента $\omega_{кр}(c, m)$ (рисунок 4.24 а);
- 4) АЧХ и ФЧХ ТС.

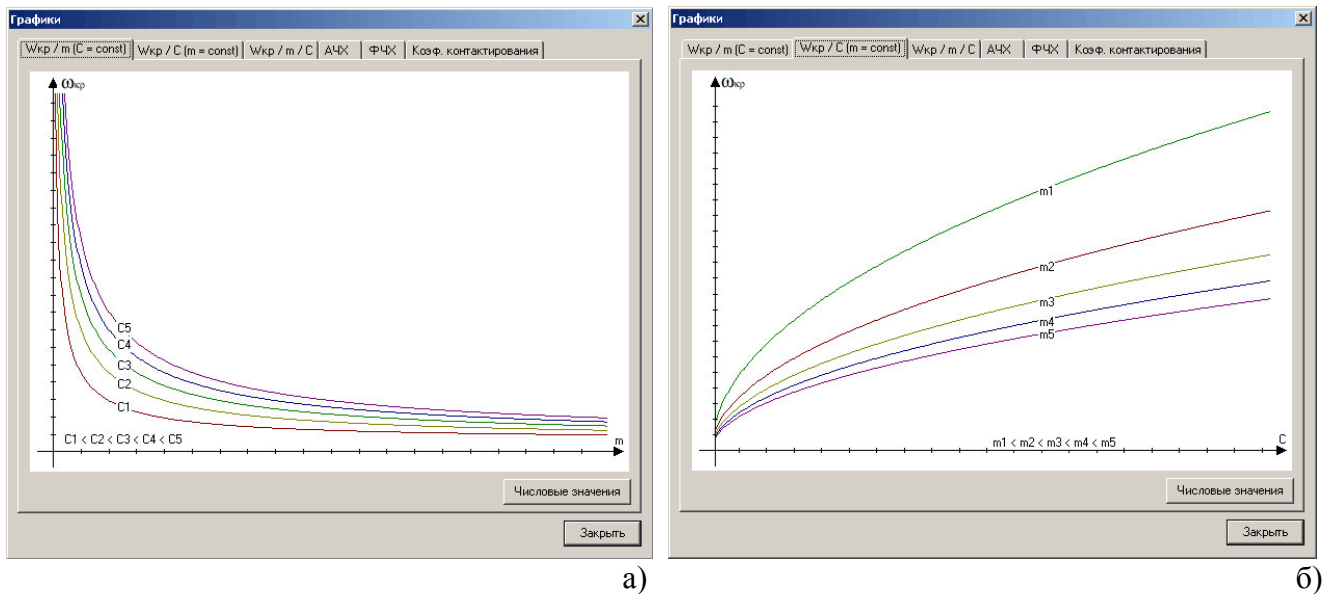


Рисунок 4.23 – Зависимость критической частоты колебаний индентора: а – от массы подвижных частей инструмента упругого действия для различных значений жёсткости пружины; б – от жёсткости пружины для различных масс подвижных частей инструмента упругого действия

При выборе ссылки «Числовые значения» открывается окно «Значения функции» (рисунок 4.24 б), в котором отображаются числовые значения соответствующих функций.

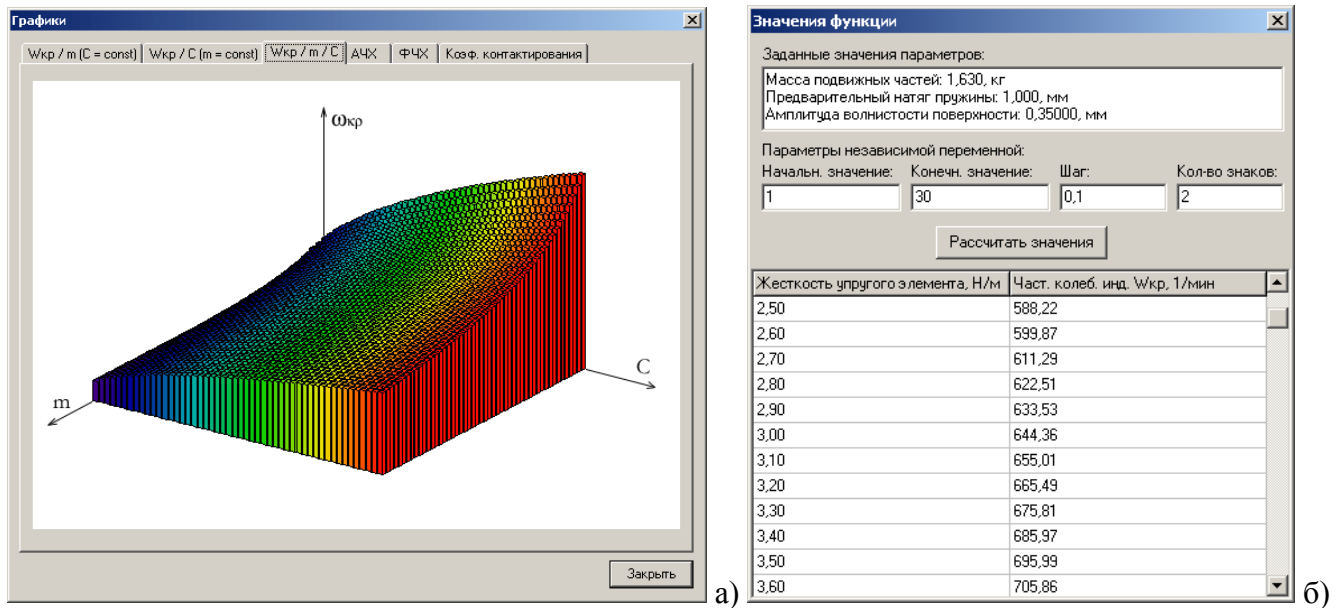


Рисунок 4.24 – Зависимость критической частоты колебаний индентора, от массы подвижных частей инструмента упругого действия и жёсткости пружины (а); окно числовых значений функций зависимости частоты колебаний индентора от жёсткости упругих элементов системы

4.5. Выводы к четвертой главе

Результаты исследований, изложенные в данной главе представляют собой решение пятой задачи, поставленной в главе 1. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. На основе теории автоматического управления разработаны модели динамики процесса обработки ППД инструментами упругого действия плоских и цилиндрических поверхностей деталей с продольной по вектору скорости обработки волнистостью и макроотклонениями,

2. На основе моделей процесса алмазного выглаживания плоских поверхностей с волнистостью или цилиндрических с отклонениями от круглости инструментами упругого действия получены уравнения вынужденных колебаний индентора с амплитудно- и фазочастотными характеристиками, учитывающие конструктивные параметры инструмента (масса m подвижных частей, жёсткость c пружины, коэффициент F вязкого трения при демпфировании) и технологические

факторы (максимальная высота W_{max} и шаг по средней линии S_{mw} волнистости или отклонений от круглости, скорость V и сила Q выглаживания).

3. Анализ процессов контактирования индентора инструмента упругого действия с волнистыми поверхностями в процессе обработки плоских и цилиндрических деталей позволяет сделать заключение об адекватности разработанных динамических моделей процесса выглаживания.

4. В результате физического моделирования АВ плоских и цилиндрических поверхностей деталей установлено, что в зависимости от конструктивных особенностей устройств ППД упругого действия (m, c, F), параметров качества предварительной обработки (W_{max}, S_{mw}) и режимов алмазного выглаживания (V, Q), возможны два варианта обработки: без отрыва и с отрывом индентора от обрабатываемой поверхности. В связи с этим предложено понятие технологической устойчивости процессов ППД инструментами упругого действия поверхностей деталей с возмущениями в виде исходной волнистости или отклонений от круглости.

5. Установлено, что в условиях технологической неустойчивости процесса ППД обрабатываемые поверхности формируются с неравномерной шероховатостью и волнистостью, причем значения высотных параметров могут быть в 1,5...3 раза превышать соответствующие значения для исходной поверхности.

6. Получены критерии технологической устойчивости обработки ППД инструментами упругого действия, определяющие допустимую скорость обработки V с учетом параметров волнистости обрабатываемой поверхности W_{max} и S_{mw} , конструктивных параметров инструмента (m, c), допустимых относительных пределов вариации силы обработки (δ, β).

Даны примеры диаграмм для определения максимально допустимой скорости АВ, удовлетворяющей полученным критериям, пригодных к практическому применению в условиях производства.

7. Разработана программа расчёта частотных характеристик процесса обработки ППД инструментами упругого действия плоских волнистых поверхностей деталей, которая позволяет рассчитывать критические скорости безотрывной обработки, а также строить АЧХ и ФЧХ инструмента.

ГЛАВА 5. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ С СИНТЕТИЧЕСКИМИ СВЕРХТВЁРДЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ

В исследованиях, связанных с качеством поверхностного слоя деталей машин [9, 41, 155, 162, 182, 189, 209, 210, 223, 286, 310, 319, 320, 321 и др.], отмечаются статистически значимые корреляционные связи между геометрическими параметрами качества поверхности и эксплуатационными характеристиками поверхностей деталей машин.

В связи с этим в работе рассматриваются вопросы формирования параметров шероховатости поверхностей деталей и надёжность их технологического обеспечения методами лезвийной обработки (торцевое фрезерование, точение) и алмазного выглаживания инструментами, оснащёнными ССТМ, а также комбинированной антифрикционной обработки.

5.1. Параметрическая надёжность технологических систем обработки плоских поверхностей деталей из чугуна

5.1.1. Формирование шероховатости при обработке плоских поверхностей деталей торцевым фрезерованием композитом 10

Для построения моделей формирования геометрических параметров качества плоских поверхностей из чугуна СЧ 20 в ТС торцевого фрезерования композитом 10 в качестве управляющих факторов рассматривались подача $S_{z\text{фр}}$, мм/зуб, скорость фрезерования $V_{\text{фр}}$, м/мин и их взаимодействие $S_{z\text{фр}} V_{\text{фр}}$.

Геометрические параметры режущей части резцовой вставки из композита 10 стандартные.

Область факторного пространства (ОФП) и матрица планирования полного

факторного эксперимента (ПФЭ) 2² представлена в приложении 1.

В качестве параметров отклика моделей (выходных параметров) рассматривались параметры шероховатости обработанной поверхности, так как они вносят значительный вклад в формирование эксплуатационных свойств поверхностей деталей (глава 1, п. 1.1)

Значения параметров волнистости поверхности детали, обработанной торцевым фрезерованием композитом 10, пренебрежительно малы.

Физико-механические свойства не исследовались из-за незначительной вариации в связи с высокими скоростями обработки как на нижних, так и на верхних уровнях ОФП планируемого эксперимента.

Описание технологической оснастки, применяемой в исследованиях представлено в главе 3 (п. 3.1.1).

Для исследования параметров шероховатости образцов, использовались измерительно-информационные системы ИИС-1 и ИИС-2 и средства оптико-микроскопического анализа поверхностей (п. 3.2).

5.1.1.1. Модели формирования параметров шероховатости

Средние значения полученных параметров шероховатости представлены в таблице 5.1. Их анализ и анализ профилограмм профилей шероховатости обработанных поверхностей (приложение 2) показывает, что высотных, шаговых и других характеристики меняются в широких диапазонах значений.

Таблица 5.1 – Параметры шероховатости поверхностей после торцевого фрезерования композитом 10 плоской поверхности заготовки из чугуна СЧ 20

№ опыта	<i>Ra</i> мкм	<i>Rz</i> мкм	<i>Rmax</i> мкм	<i>Rp</i> мкм	<i>Sm</i> мкм	ρ мкм	<i>b</i>	<i>v</i>	Δ
1	11,46	50,37	54,54	28,64	193,06	31,96	0,93	1,21	1,69
2	1,88	8,12	10,68	5,15	93,68	40,22	0,74	1,51	0,25
3	2,53	12,99	14,88	7,59	54,32	24,46	0,81	1,39	0,68
4	11,70	51,48	57,80	28,13	206,96	32,69	0,82	1,23	1,97

Исследовались корреляционные связи между параметрами шероховатости. Знание степени корреляции между ними позволит назначать минимальное число параметров для их технологического обеспечения.

Коэффициенты парной корреляции рассчитывались по известной методике [62, 65, 194 и др.]:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N (Y_{in} - \bar{Y}_i) \cdot (Y_{jn} - \bar{Y}_j)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (Y_{in} - \bar{Y}_i)^2 \cdot (Y_{jn} - \bar{Y}_j)^2}}, \quad (5.1)$$

где r_{ij} – коэффициент парной корреляции между i -тым и j -тым параметрами качества; Y_{in} , Y_{jn} – значения i -того и j -того параметра в n -ом опыте; \bar{Y}_i , \bar{Y}_j – средние значения i -того и j -того параметров; N – число опытов.

В таблице 5.2. представлены результаты оценки парной корреляции между параметрами шероховатости поверхностей деталей из чугуна СЧ20 после обработки торцевым фрезерованием композитом 10.

Таблица 5.2 – Коэффициенты парной корреляции параметров шероховатости поверхностей деталей из чугуна, обработанных торцевым фрезерованием

Параметр	Ra	Rz	$Rmax$	Rp	Sm	ρ	b	v	Δ
Ra	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	-0,05	0,72	-0,95	0,98
Rz	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	-0,09	0,73	-0,96	0,98
$Rmax$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	-0,07	0,71	-0,95	0,99
Rp	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	-0,08	0,75	-0,96	0,98
Sm	0,96	0,95	0,96	0,95	1,00	0,22	0,57	-0,83	0,91
ρ	0,05	-0,09	-0,07	-0,08	0,22	1,00	-0,43	0,35	-0,21
b	0,72	0,73	0,71	0,75	0,57	-0,43	1,00	-0,84	0,70
v	0,95	-0,96	-0,95	-0,96	-0,83	0,35	-0,84	1,00	-0,97
Δ	0,98	0,98	0,99	0,98	0,91	-0,21	0,70	-0,97	1,00

При построении графов корреляционных связей каждый параметр шероховатости в виде вершины в случае статистически значимой корреляционной связи r соединяются ребрами с другими параметрами. Ребра в виде сплошных линий ха-

рактируют положительно значимую связь, в виде пунктирных линий – отрицательную связь (рисунок 5.1).

100%-ная корреляция между всеми исследуемыми параметрами шероховатости установлена при коэффициенте корреляции $r_{94;0,05}^{табл} = 0,2$ (рисунок 5.1). При росте значения r число корреляционных связей уменьшается, при $r = 0,5$, параметр ρ становится тупиковой вершиной, при $r = 0,9$, определяющим наиболее тесную функциональную связь между параметрами качества, параметр опорной кривой b тоже становится тупиковой вершиной. При коэффициенте r , близким к 1 можно говорить о линейности связей между исследуемыми параметрами.

При значении коэффициента $r = 0,5$ появляется тупиковая вершина при параметре ρ , при $r = 0,9$ тупиковой вершиной становится параметр опорной кривой b .

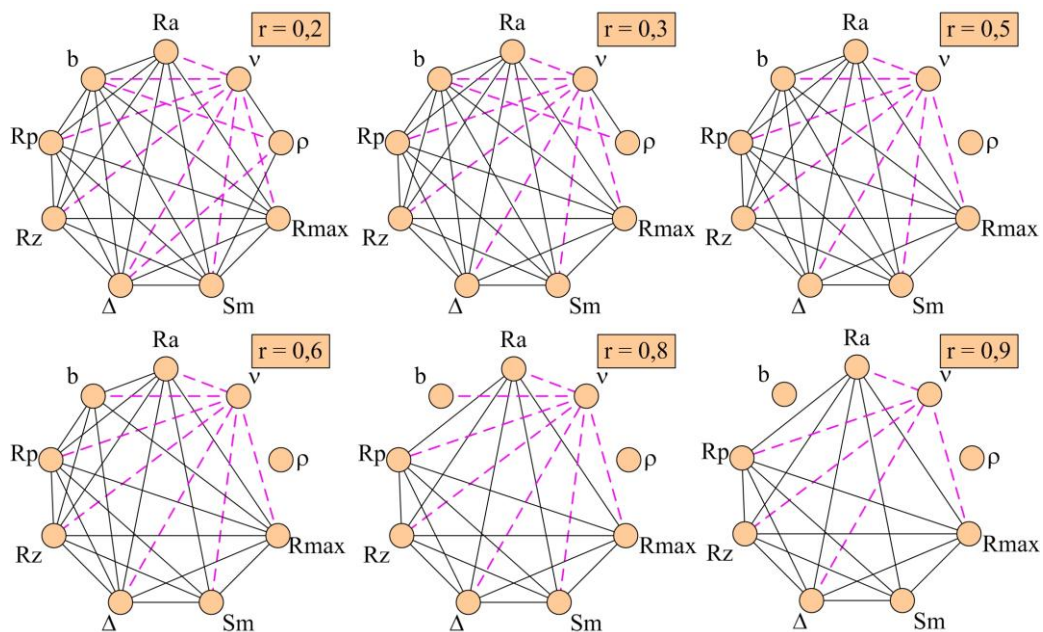


Рисунок 5.1 – Графы корреляционных связей параметров шероховатости поверхностей деталей из чугуна после обработки торцевым фрезерованием композитом 10

Одной из характеристик графа является степень вершины $\deg Y_i$, соответствующая числу рёбер инцидентных вершине [149, 328 и др.].

При коэффициенте корреляции $r = 0,2$ для параметров b, v, Sm, Δ $\deg Y_i = 8$, для $Ra, Rp, Rz, Rmax$ – $\deg Y_i = 7$, для ρ $\deg Y_i = 4$. При коэффициенте $r = 0,9$ $\deg Ra = \deg Rp = \deg Rz = \deg Rmax = \deg \Delta = 6$; $\deg v = \deg Sm = 5$; $\deg b = \deg \rho = 0$.

Следовательно, при требовании технологически обеспечить группу параметров достаточно назначить один из высотных параметров, например Ra , и параметры b и ρ .

В таблице 5.3. представлены характеристики графов корреляционных связей: n_{max} – максимально возможное число корреляционных связей в графе; n – фактическое число корреляционных связей; $[\deg Y_i]$ – максимально возможная степень вершины; $\overline{\deg Y_i}$ – действительная средняя степень вершины:

$$\overline{\deg Y_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \deg Y_i}{[\deg Y_i] + 1}. \quad (5.2)$$

Таблица 5.3 – Характеристики графов корреляционных связей между параметрами шероховатости поверхностей, полученных после торцевого фрезерования композитом 10

$r_{94; 0,05}^{табл}$	n_{max}	n	$\frac{n}{n_{max}}$	$[\deg Y_i]$	$\overline{\deg Y_i}$	$\frac{\overline{\deg Y_i}}{[\deg Y_i]}$
0,2	36	32	0,89	8	7,11	0,89
0,3	36	30	0,83	8	6,67	0,83
0,5	36	28	0,78	8	6,22	0,78
0,7	36	27	0,75	8	6,00	0,75
0,8	36	22	0,61	8	4,89	0,61
0,9	36	20	0,55	8	4,44	0,55

По результатам обработки экспериментальных данных, методика которой изложена в п. 2.3, строились физико-статистические модели (2.52) влияния факторов обработки на формирование параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна торцевым фрезерованием композитом 10.

Например, модель формирования параметра Ra имеет вид:

$$Ra = 1,61 \frac{S_{z\phi p}^{0,7}}{V_{\phi p}^{0,08} (S_{z\phi p} V_{\phi p})^{0,83}} = \frac{1,61}{V_{\phi p}^{0,91} S_{z\phi p}^{0,13}}. \quad (5.3)$$

Модели формирования других параметров получаются аналогично. Характеристики этих моделей представлены в таблицах П.3.1 и П.3.2 приложения 3.

Анализ степени влияния управляющих факторов на формирование параметров шероховатости по T -критерию показывает их высокую статистическую значимость ($t_{0,5}^{мабл} = 2,78$). Проверка адекватности моделей по критерию Фишера показала, что при уровне значимости $\alpha = 0,05$ значение $F^{мабл} = 6,59$.

Максимальная относительная ошибка прогнозирования величин исследуемых параметров шероховатости в полученных моделях составляет от 0,1 до 2 %. Исключение составляет параметр Крагельского-Комбалова Δ , для которого относительная ошибка прогнозирования составляет 15,6 %, что обусловлено тем, что он рассчитывается по четырем параметрам $Rmax$, ρ , b , v , носящих случайный характер.

На рисунке 5.2 представлены результаты ранжирования управляющих факторов обработки по степени влияния на формирование параметров шероховатости, проводимого методом Парето.

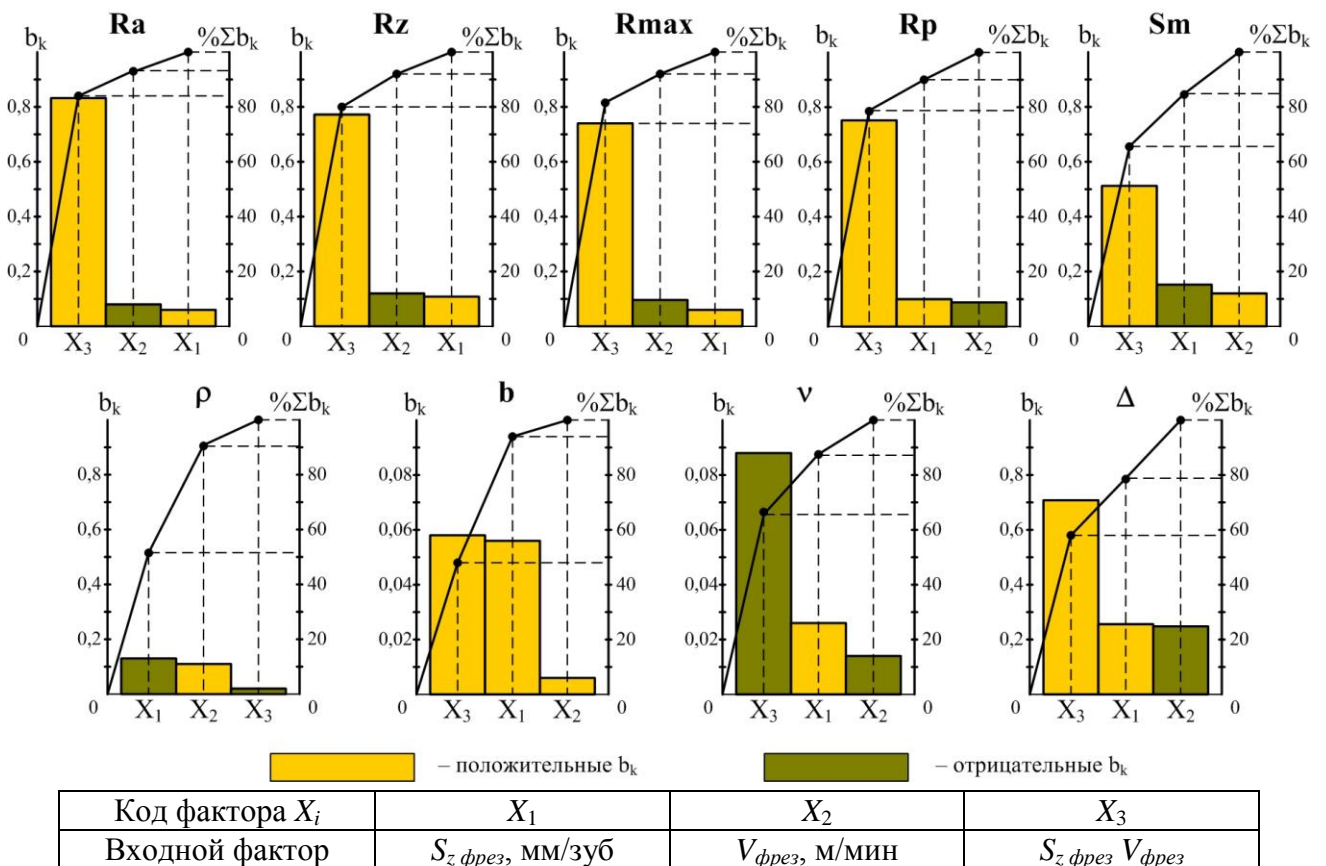


Рисунок 5.2 – Ранжирование факторов обработки по степени влияния на формирование параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна в ТС торцевого фрезерования композитом 10

Наибольшее влияние на формирование параметров шероховатости, кроме параметра ρ , оказывает фактор взаимодействия подачи и скорости фрезерования $X_3 = S_{z\text{фрез}} V_{\text{фрез}}$, изменяющегося в пределах от 48 % до 83 %.

5.1.1.2. Параметрическая надёжность технологической системы торцевого фрезерования композитом 10 поверхностей деталей из чугуна

Параметрическая надёжность ТС торцевого фрезерования композитом 10 чугунных деталей определялась как вероятность выполнения задания по параметру качества Y_i в δ %-ом интервале допуска (глава 2, п. 2.2):

$$P = P\{(\bar{Y}_i - \delta\bar{Y}_i) \leq Y_i \leq (\bar{Y}_i + \delta\bar{Y}_i)\}, \quad (5.4)$$

где Y_i – значение параметра качества; \bar{Y}_i – среднее значение параметра качества, регламентируемое в конструкторской документации; δ – допустимая величина отклонения значения параметра качества от среднего значения.

Если данное условие не выполняется, то состояние технологической системы оценивается как параметрический отказ.

Параметрическая надёжность ТС оценивалась по результатам статистических испытаний по схеме Монте-Карло (гл. 2), проводимых машинным экспериментом над полученными физико-статистическими моделями формирования параметров качества соответствующими методами обработки деталей.

Параметры моделей с характеристиками законов распределения коэффициентов регрессии представлены в таблице П.3.2 (приложение 3).

Результаты расчётов вероятностей выполнения задания, проведенных для центра факторного пространства эксперимента (при средних значениях управляющих факторов) показывают, что, например, для значения $\delta = 20$ %, высотные параметры обеспечиваются с вероятностью P от 0,45 для R_p до 0,88 для R_z , а параметры v , b , Sm , ρ , Δ (рисунок 5.3б) обеспечиваются с вероятностью P от 0,1 для Δ до 0,55 для v . Сравнительно низкая вероятность технологического обеспечения параметра Δ объясняется его зависимостью от других параметров шероховатости.

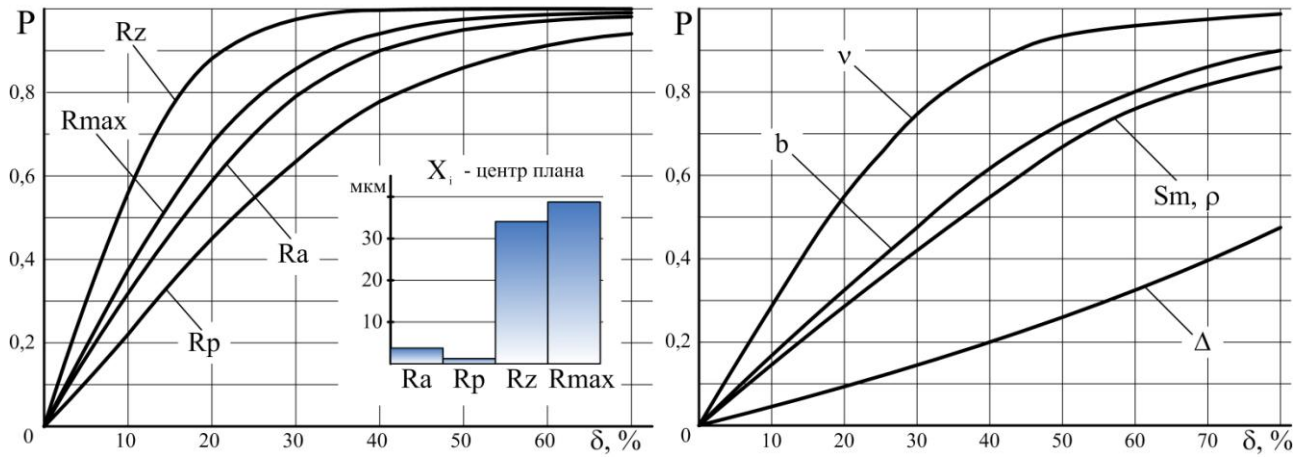
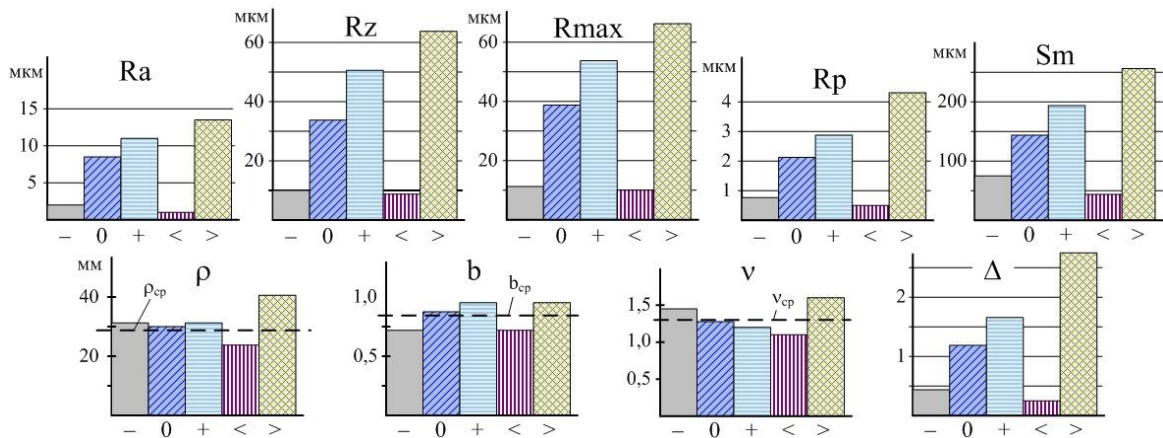


Рисунок 5.3 – Вероятность технологического обеспечения параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна в ТС торцевого фрезерования композитом 10

В исследуемой ОФП значения высотных параметров шероховатости изменяются в относительно широких пределах (рисунок 5.4).

Для рисунка 5.4 приняты следующие обозначения: 0 – центр ОФП (значения входных факторов модели принимают средние значения); (–), (+) – минимальные и максимальные значения входных факторов модели; (<), (>) – точки ОФП, обеспечивающие получение минимальных и максимальных значений выходных параметров моделей.



(–) – $X_i = \min$; (+) – $X_i = \max$; 0 – X_i в центре плана; < – $Y_i = \min$; > – $Y_i = \max$

Рисунок 5.4 – Интервалы значений параметров шероховатости, обеспечиваемых торцевым фрезерованием композитом 10 плоских поверхностей деталей из чугуна

Наибольший диапазон изменений значений характерен для высотных параметров Ra , Rp , Rz , $Rmax$ и шагового параметра Sm , что соответствует физической природе формирования микронеровностей [189 и др.]. Также в широких пределах

изменяется параметр Δ .

Для параметров ρ , b , v отмечены незначительные диапазоны изменения значений, что косвенно позволяет брать их средние значения для рассматриваемого метода обработки при проведении приближённых расчётов.

В таблице 5.4 представлены значения вероятностей технологического обеспечения параметров шероховатости фрезерованием композитом 10 плоских поверхностей деталей из чугуна СЧ20 для различных точек ОФП и при различных значениях δ .

Таблица 5.4 – Вероятности выполнения задания ТС торцевого фрезерования композитом 10 по обеспечению параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна СЧ20

ОФП	$\pm\delta$	Ra мкм	Rz мкм	$Rmax$ мкм	Rp мкм	Sm мкм	ρ мкм	b	v	Δ
–	0,1	0,34	0,59	0,39	0,24	0,16	0,13	0,18	0,31	0,05
	0,2	0,63	0,91	0,71	0,48	0,31	0,27	0,35	0,58	0,10
	0,25	0,74	0,96	0,81	0,58	0,38	0,33	0,43	0,69	0,13
	0,5	0,96	0,99	0,98	0,88	0,70	0,63	0,75	0,94	0,28
+	0,1	0,31	0,54	0,35	0,22	0,14	0,12	0,16	0,28	0,05
	0,2	0,58	0,87	0,65	0,43	0,28	0,24	0,31	0,53	0,09
	0,25	0,68	0,93	0,76	0,52	0,35	0,30	0,39	0,63	0,12
	0,5	0,94	0,99	0,96	0,84	0,65	0,58	0,71	0,92	0,25
0	0,1	0,32	0,57	0,37	0,23	0,15	0,13	0,16	0,29	0,05
	0,2	0,59	0,88	0,67	0,45	0,29	0,25	0,33	0,55	0,10
	0,25	0,71	0,95	0,78	0,54	0,36	0,31	0,40	0,65	0,12
	0,5	0,95	0,99	0,97	0,86	0,67	0,60	0,73	0,93	0,26
<	0,1	0,31	0,55	0,36	0,22	0,16	0,14	0,18	0,31	0,05
	0,2	0,58	0,87	0,65	0,43	0,31	0,27	0,35	0,58	0,09
	0,25	0,69	0,94	0,76	0,52	0,39	0,34	0,43	0,68	0,12
	0,5	0,94	0,99	0,97	0,85	0,71	0,64	0,75	0,94	0,25
>	0,1	0,34	0,59	0,39	0,25	0,14	0,12	0,16	0,28	0,05
	0,2	0,49	0,90	0,70	0,47	0,27	0,24	0,31	0,53	0,10
	0,25	0,73	0,96	0,81	0,57	0,34	0,29	0,39	0,64	0,13
	0,5	0,96	0,99	0,98	0,88	0,64	0,58	0,71	0,92	0,28

5.1.2. Формирование параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна в технологических системах торцевого фрезерования композитом 10 и алмазного выглаживания

5.1.2.1. Закономерности формирования параметров шероховатости поверхностей деталей алмазным выглаживанием

Эксперименты показали, что после АВ поверхностей деталей из чугуна СОТС на обработанной поверхности чугунной детали приобретает тёмный оттенок, что указывает на наличие графитовых включений в смазке, вытесняемых из металлической основы чугуна на поверхность при структурных изменениях материала поверхности в процессе АВ.

В работах [41, 182, 217, 309 и др.] по исследованиям механизма пластической деформации поверхностей деталей из чугуна (нетермообработанного с перлитной металлической основой) при обработке методами ППД также указывается на явление частичного вытеснения и удаления графита в СОТС (рисунок 5.5). При

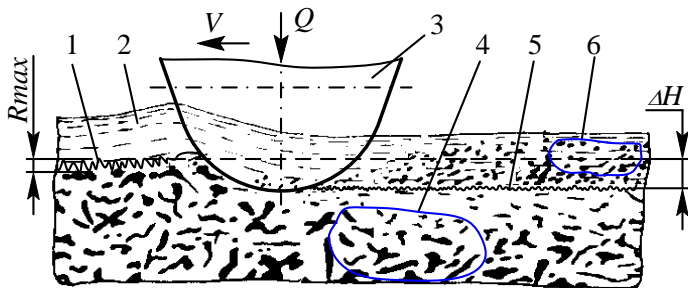


Рисунок 5.5 – Формирование поверхности детали из чугуна АВ: 1 – необработанная поверхность; 2 – СОТС; 3 – алмазный индентор; 4 – включения графита в металлической основе чугуна; 5 – поверхность после АВ; 6 – частицы графита, вытесненные в СОТС из зоны деформирования

этом сплошность поверхностного слоя увеличивается.

На основании модели АВ на рисунке 5.5 [308] предполагается, что значение параметра шероховатости R_{max} поверхности до АВ при некоторых режимах выглаживания будет меньше величины пластического деформирования поверхностного слоя ΔH .

Проводился микроскопический анализ поверхностей деталей из чугуна СЧ20, обработанных АВ после торцевого фрезерования композитом 10. На топографической схеме поверхности детали (рисунки 5.6, 5.7, 5.8) отмечены три типичных участка с характерными следами обработки: α – поверхность обработан-

ная торцевым фрезерованием композитом 10; β – поверхность после АВ без пересекающихся следов движения индентора (начало и конец технологического перехода; γ – типичный участок выглаженной поверхности. Также можно выделить граничные участки: α – β , α – γ , β – γ .

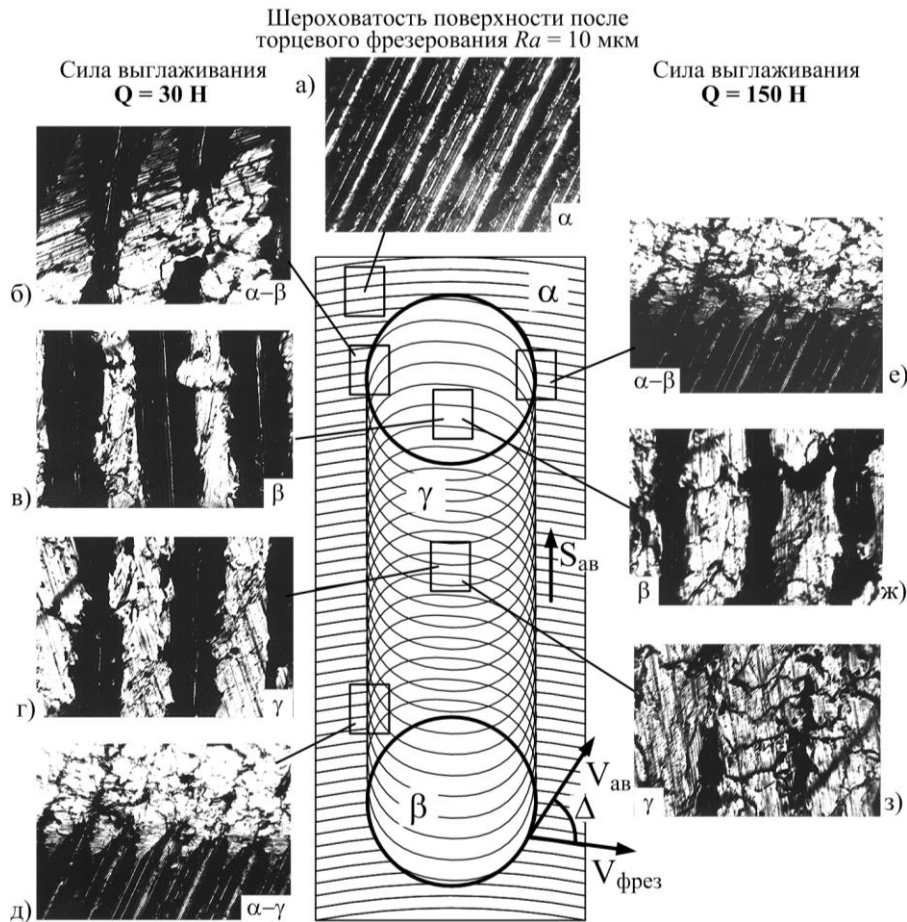


Рисунок 5.6 – Участки плоской поверхности детали из чугуна СЧ20, обработанной торцевым фрезерованием композитом 10 ($Ra_{фр} = 10 \text{ мкм}$) с последующим АВ ($Q = 30$ и 150 Н)

Топография участка γ характерна для реальных функциональных поверхностей деталей, на которых формируются эксплуатационные свойства. Участки β характерны для поверхностей деталей технологической оснастки, применяемой для обработки деталей АВ (фальшобразцы) или для поверхностей деталей типа «направляющие скольжения» в местах сопряжения с корпусными деталями (передняя бабка и т. д.).

На граничных участках α – β наблюдается влияние условий АВ на изменение сплошности поверхности деталей.

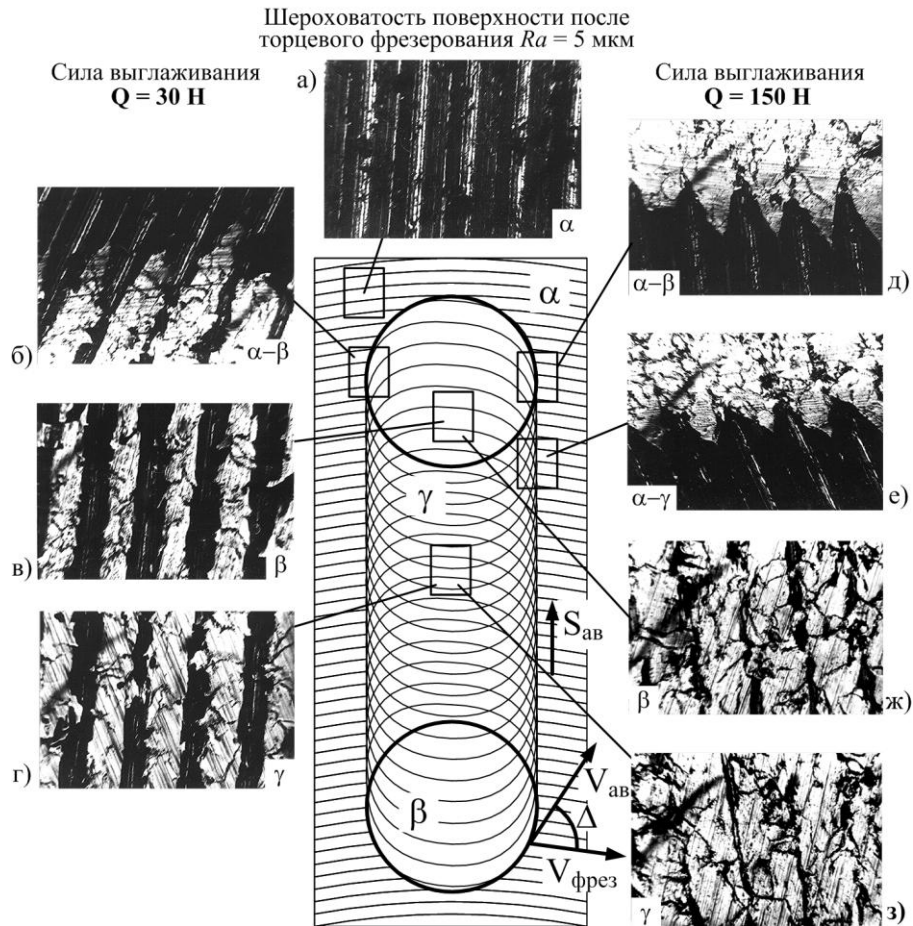


Рисунок 5.7 – Участки плоской поверхности детали из чугуна СЧ 20, обработанной торцевым фрезерованием композитом 10 ($Ra_{фр} = 5 \text{ мкм}$) с последующим АВ ($Q = 30$ и 150 Н)

Темный фон на фотографиях указывает на графитовые включения в материале поверхности детали, светлый фон говорит о малом количестве графита в поверхностном слое. При снижении шероховатости поверхности, обработанной торцевым фрезерованием, до значения $Ra_{фр} = 1 \text{ мкм}$ в поверхностном слое увеличивается содержание графитовых включений (рисунки 5.6 а, 5.7 а, 5.8 а).

На фотографиях (рисунки 5.6, 5.7, 5.8) видно, что сплошность поверхности зависит от величины параметров шероховатости поверхности, обработанной фрезерованием ($Ra_{фр} = 10 - 1 \text{ мкм}$) и силы выглаживания $Q = 30 - 150 \text{ Н}$ при радиусе алмазного индентора $r_{инд} = 3 \text{ мм}$.

Сплошность поверхности γ увеличивается при снижении параметра шероховатости $Ra_{фр}$ поверхности, полученной после фрезерования, и при увеличении силы выглаживания Q (рисунки 5.6 г,з; 5.7 г,з; 5.8 г,з). То же самое подтверждает анализ фотографий граничных участков $\alpha-\gamma$.

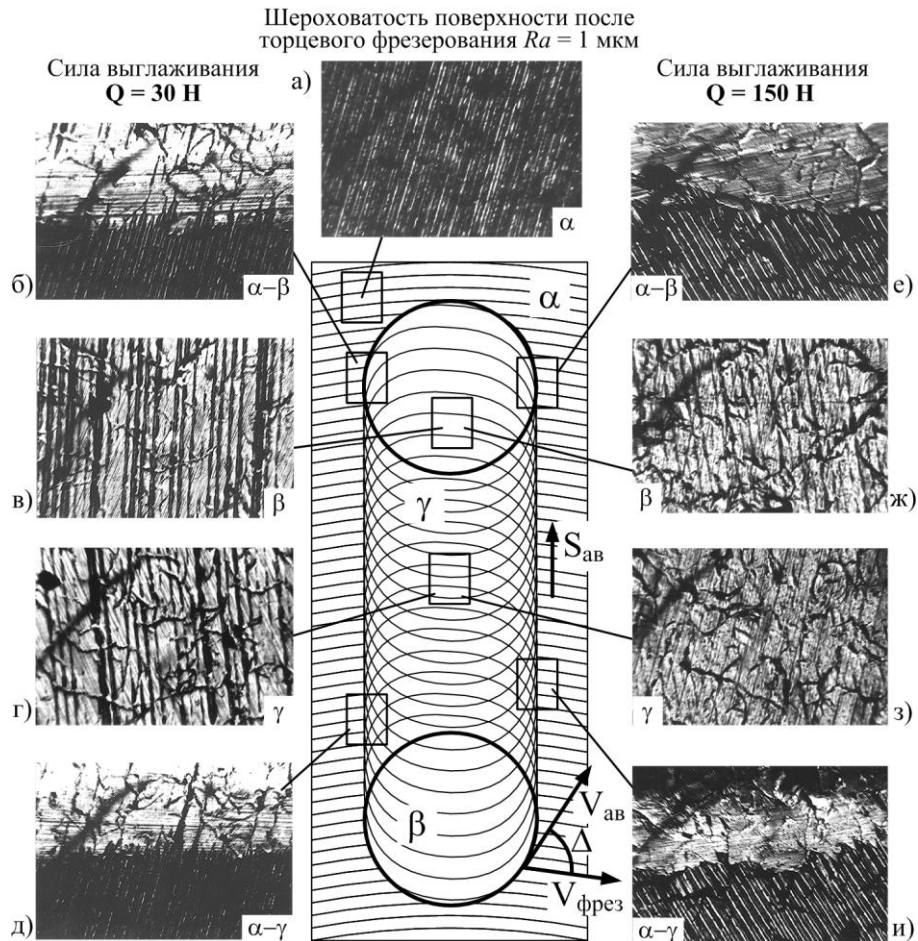


Рисунок 5.8 – Участки плоской поверхности детали из чугуна СЧ 20, обработанной торцевым фрезерованием композитом 10 ($Ra_{фрез} = 1 \text{ мкм}$) с последующим АВ ($Q = 30$ и 150 Н)

Оценивалось влияние угла Δ между вектором скорости выглаживающего индентора V_{AB} и вектором скорости фрезерования вершиной режущего зуба $V_{фрез}$ на сплошность обработанной поверхности (рисунки 5.6 б,в; 5.7 б,в; 5.8 б,в).

При шероховатости поверхности $Ra_{фрез} = 10$ и 5 мкм увеличение угла Δ приводит к увеличению сплошности выглаженной поверхности.

При снижении шероховатости до $Ra_{фрез} = 1 \text{ мкм}$ угол Δ практически не влияет на изменение сплошности обработанной поверхности.

Таким образом, для обеспечения высокой сплошности поверхности необходимо обеспечить низкие значения параметров шероховатости поверхности перед обработкой АВ или увеличить угол Δ .

Снижение шероховатости $Ra_{фрез}$ приводит к повышению трудоемкости изготовления деталей. Изменение угла Δ связано с рациональным выбором диамет-

ра торцевой фрезы и диаметра расположения индентора в алмазном выглаживателе, что является более эффективным решением с экономической точки зрения.

В экспериментальных исследованиях ТС торцевого фрезерования композитом 10 и последующего алмазного выглаживания плоских поверхностей деталей из чугуна были определены следующие управляющие факторы:

– для торцевого фрезерования композитом 10: подача $X_1 = S_{zфрез}$, мм/зуб; скорость фрезерования $X_2 = V_{фрез}$, м/мин; $X_6 = X_1 X_2 = S_{zфрез} V_{фрез}$;

– для алмазного выглаживания: сила АВ $X_3 = Q$, Н; подача на индентор – $X_4 = S_{AB}$, мм/об; $X_7 = X_3 X_5 = Q V_{AB}$ (м/мин) – взаимодействие, характеризующее мощность воздействия индентора на поверхность в процессе АВ.

Эксперимент проводился по плану в виде дробной реплики 2^{5-1} от ПФЭ типа 2^5 и представлен в приложении 4. Границы ОФП для значений факторов X_3 , X_4 , X_5 определялись с учётом рекомендаций [9, 31, 42, 62, 63, 69, 151, 222 и др.], а также на основе результатов предварительных экспериментов.

Описание технологической оснастки, применяемой в исследованиях представлено в главе 3 (п. 3.1.1).

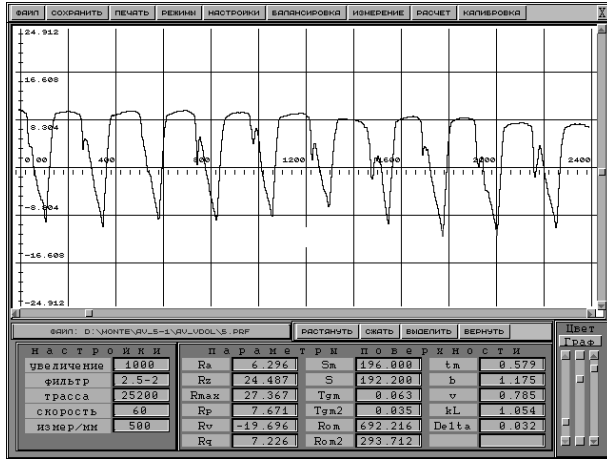
Выглаживание осуществлялось с использованием в качестве СОТС масла «Индустриальное-30», которое наносилось на поверхность в виде сплошной плёнки непосредственно перед обработкой.

Профилограммы поверхностей (рисунок 5.9), полученных по условиям обработки для некоторых точек ОФП эксперимента, показывают, что параметры шероховатости и форма микропрофиля меняются в широких диапазонах значений, что предполагает высокую гибкость процесса формирования ЭС поверхностей деталей за счёт варьирования управляющими факторами.

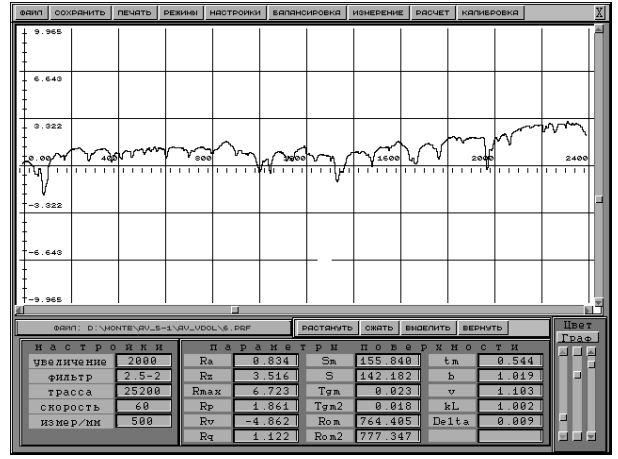
Профилограммы остальных поверхностей деталей представлены в приложении 5.

Графики относительных опорных кривых поверхностей (рисунок 5.10), обработанных по условиям опытов 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13; 14 матрицы планирования экспериментов показывают, что относительная несущая способность профиля шеро-

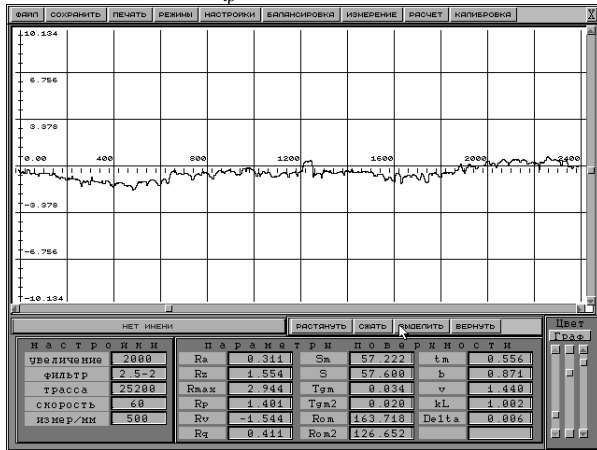
ховатости растет при интенсификация условий АВ. Аналогичные результаты отражены в работах по исследованию методов ПД [38, 162, 189, 209, 210, 223, 309, 310 и др.].



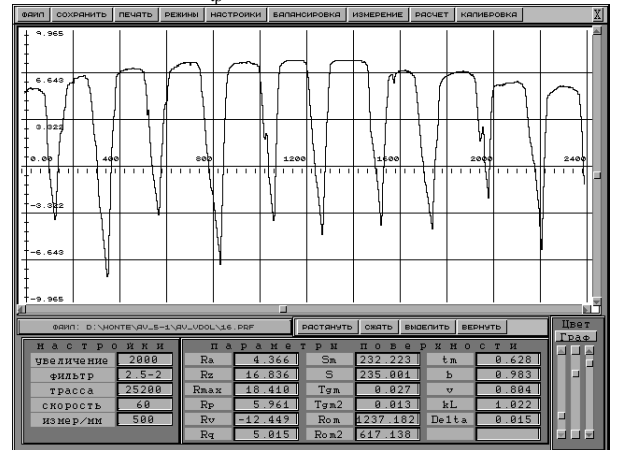
а)
 $Q = 50 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,16 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 35,2 \text{ м/мин}$



б)
 $Q = 50 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,16 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}$



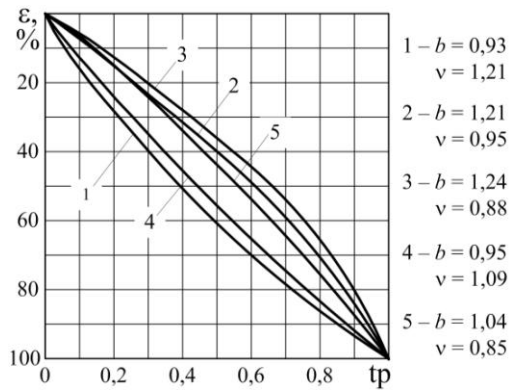
в)
 $Q = 150 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}$



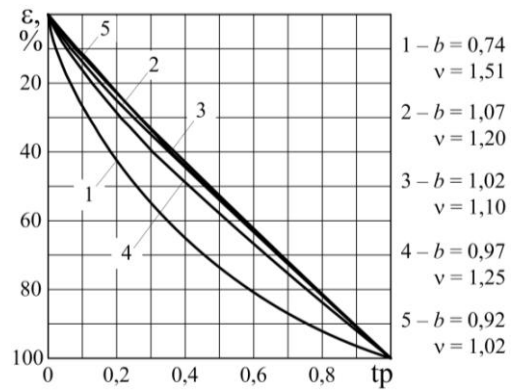
г)
 $Q = 50 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}$

Рисунок 5.9 – Профилограммы поверхностей и опорные кривые поверхностей деталей из чугуна, обработанных АВ после торцевого фрезерования композитом 10 по номерам опытов матрицы планирования (таблица П.4 приложения 4): а – № 5; б – № 6; в – № 11; г – № 16

В качестве выходного параметра исследуемой ТС рассматривалась величина остаточной деформации поверхности ΔH , которая должна учитываться при расчетах точности размеров обрабатываемых деталей.



- 1 – торцевое фрезерование композитом 10
 $S_{z\text{ фрез}} = 0,25$ мм/зуб; $V_{\text{фрез}} = 622$ м/мин
 2, 3, 4, 5 – алмазное выглаживание:
 2 – $Q = 150$ Н; $S_{AB} = 0,16$ мм/об; $V_{AB} = 87,9$ м/мин;
 3 – $Q = 50$ Н; $S_{AB} = 0,16$ мм/об; $V_{AB} = 35,2$ м/мин;
 4 – $Q = 150$ Н; $S_{AB} = 0,025$ мм/об; $V_{AB} = 35,2$ м/мин;
 5 – $Q = 50$ Н; $S_{AB} = 0,025$ мм/об; $V_{AB} = 87,9$ м/мин



- 1 – торцевое фрезерование композитом 10
 $S_{z\text{ фрез}} = 0,05$ мм/зуб; $V_{\text{фрез}} = 622$ м/мин;
 2, 3, 4, 5 – АВ плоских поверхностей:
 2 – $Q = 150$ Н; $S_{AB} = 0,16$ мм/об; $V_{AB} = 35,2$ м/мин;
 3 – $Q = 50$ Н; $S_{AB} = 0,16$ мм/об; $V_{AB} = 87,9$ м/мин;
 4 – $Q = 150$ Н; $S_{AB} = 0,025$ мм/об; $V_{AB} = 87,9$ м/мин;
 5 – $Q = 50$ Н; $S_{AB} = 0,025$ мм/об; $V_{AB} = 35,2$ м/мин

Рисунок 5.10 – Относительные опорные кривые профиля поверхностей деталей из чугуна, обработанных АВ после торцевого фрезерования композитом 10 по номерам опытов матрицы планирования (таблица П.4 приложения 4): а – 1, 5, 9, 13; б – 2, 6, 10, 14

Профилограммы, по которым определялась величина ΔH , представлены в приложении 6. По представленным на рисунке 5.11 профилограммам видно, что для условий проведенного эксперимента величина остаточной деформации ΔH изменяется в широких пределах от 4,3 до 65,5 мкм.

В некоторых опытах (рисунок 5.11 б, в) значение ΔH превышает значение параметра R_{max} поверхности, обработанной фрезерованием. Такое явление более характерно при обработке сталей, но может проявляться и при обработке чугуна, несмотря на его низкие пластические свойства.

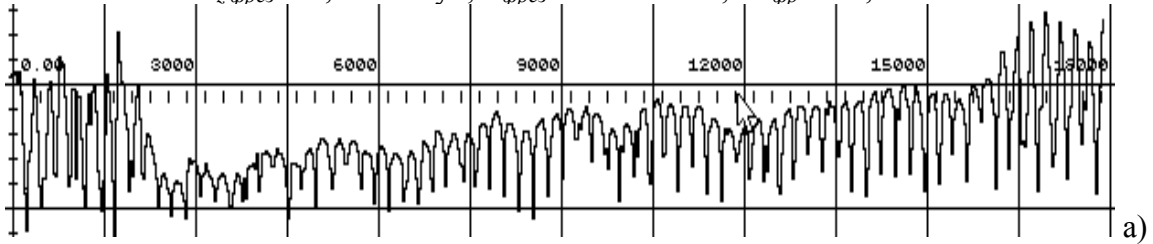
В таблице 5.5. представлены средние экспериментальные значения параметров шероховатости и остаточной деформации ΔH поверхностей деталей, обработанных по условиям экспериментов, представленных в таблице П.4 приложения 4.

Оценивались корреляционные связи между исследуемыми параметрами шероховатости (таблица 5.6), графы которых представлены на рисунке 5.12.

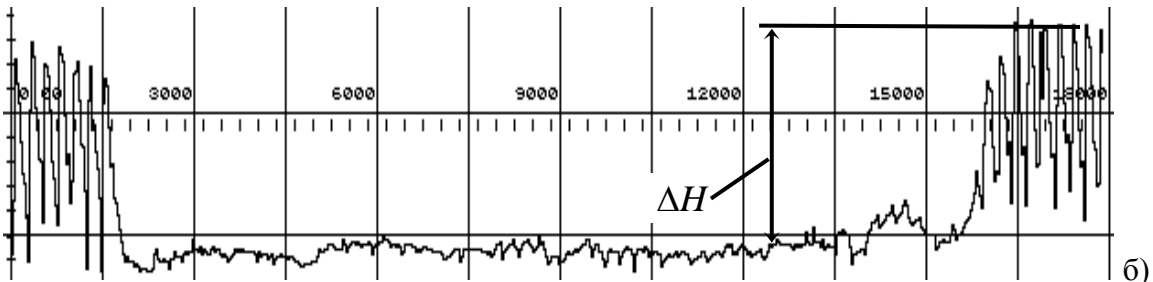
С ростом коэффициента r парной корреляции число рёбер у графов снижается, и, начиная с величины $r = 0,6$ появляются изолированные вершины ρ , ΔH , а при значении $r = 0,9$ добавляются b , v , Δ .

Предварительное торцевое фрезерование композитом 10

$$S_{z \text{ фрез}} = 0,25 \text{ мм/зуб}; V_{\text{фрез}} = 622 \text{ м/мин}; Ra_{\text{фр}} = 11,5 \text{ мкм}$$



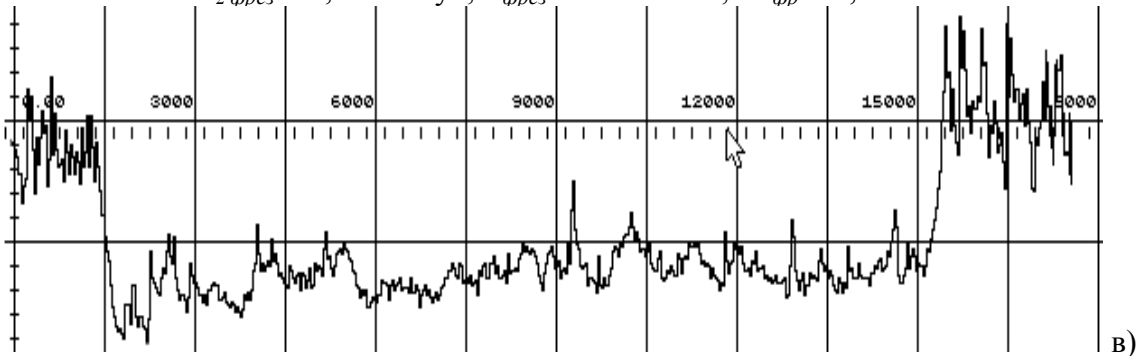
$$\text{AB: } Q = 50 \text{ Н}; S_{AB} = 0,16 \text{ мм/об}; V_{AB} = 35,2 \text{ м/мин}; Ra = 7 \text{ мкм}; \Delta H = 21,8 \text{ мкм}$$



$$\text{AB: } Q = 150 \text{ Н}; S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}; V_{AB} = 35,2 \text{ м/мин}; Ra = 1 \text{ мкм}; \Delta H = 65,4 \text{ мкм}$$

Предварительное торцевое фрезерование композитом 10

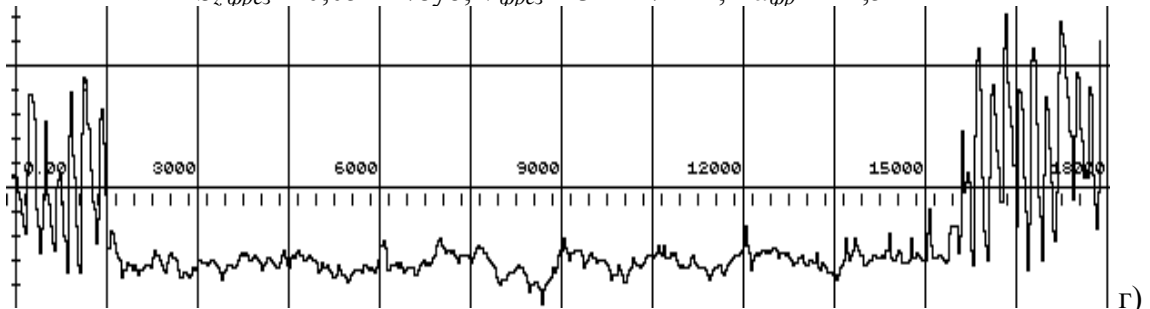
$$S_{z \text{ фрез}} = 0,25 \text{ мм/зуб}; V_{\text{фрез}} = 311 \text{ м/мин}; Ra_{\text{фр}} = 2,5 \text{ мкм}$$



$$\text{AB: } Q = 150 \text{ Н}; S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}; V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}; Ra = 0,4 \text{ мкм}; \Delta H = 23,4 \text{ мкм}$$

Предварительное торцевое фрезерование композитом 10

$$S_{z \text{ фрез}} = 0,05 \text{ мм/зуб}; V_{\text{фрез}} = 311 \text{ м/мин}; Ra_{\text{фр}} = 11,5 \text{ мкм}$$



$$\text{AB: } Q = 150 \text{ Н}; S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}; V_{AB} = 35,2 \text{ м/мин}; Ra = 1 \text{ мкм}; \Delta H = 52,1 \text{ мкм}$$

Рисунок 5.11 – Профилограммы участков поверхностей деталей из чугуна с остаточной деформацией профиля после обработки торцевым фрезерованием композитом 10 и последующего АВ по номерам опытов матрицы планирования (таблица П.4 приложения 4): а – № 5; б – № 9; в – № 11; г – № 12

Таблица 5.5 – Средние значения параметров шероховатости, полученных после обработки плоских поверхностей деталей из чугуна торцевым фрезерованием композитом 10 и последующим АВ

№ опыта	Ra мкм	Rz мкм	$Rmax$ мкм	Rp мкм	Sm мкм	ρ мкм	b	v	Δ	ΔH мкм
1	2,30	14,54	17,24	3,48	183,47	1684,1	1,21	0,95	0,009	32,67
2	0,54	2,13	3,99	1,62	56,07	429,7	1,07	1,25	0,003	8,07
3	0,44	2,87	4,26	1,31	42,74	364,2	0,98	1,23	0,007	17,7
4	3,13	15,44	21,67	4,13	190,82	1457,1	1,30	0,91	0,006	53,90
5	6,93	25,57	28,40	7,45	214,18	542,3	1,24	0,88	0,036	21,80
6	0,53	2,50	4,45	1,47	42,74	898,0	0,89	1,28	0,003	4,3
7	1,01	5,41	6,81	1,91	52,74	378,9	0,90	1,29	0,019	10,60
8	7,35	26,79	31,06	8,98	233,07	447,5	1,16	0,83	0,060	39,10
9	0,98	7,02	9,69	1,98	101,20	1862,5	0,85	1,39	0,004	65,40
10	0,39	1,14	2,68	1,03	45,03	454,9	0,97	1,26	0,004	6,50
11	0,35	2,04	3,06	1,07	37,78	180,8	0,86	1,43	0,016	23,40
12	0,97	6,23	10,30	1,99	80,94	1201,9	0,82	1,40	0,007	52,10
13	4,54	18,56	21,58	5,22	218,77	934,4	0,89	0,85	0,014	45,50
14	0,49	1,89	3,59	1,11	56,67	1951,7	0,92	1,10	0,002	12,27
15	0,61	3,87	5,24	1,56	45,52	476,1	1,01	1,23	0,012	10,80
16	5,09	20,54	24,40	5,71	219,31	899,2	1,21	0,74	0,011	44,60

Таблица 5.6 – Коэффициенты парной корреляции параметров шероховатости, полученных после обработки плоских поверхностей деталей из чугуна торцевым фрезерованием композитом 10 и последующим АВ

Фактор	Ra	Rz	$Rmax$	Rp	Sm	ρ	b	v	Δ	ΔH
Ra	1,00	0,98	0,97	0,99	0,92	-0,07	0,63	-0,84	0,72	0,45
Rz	0,98	1,00	0,99	0,98	0,97	0,04	0,67	-0,86	0,66	0,57
$Rmax$	0,97	0,99	1,00	0,97	0,97	0,09	0,68	-0,85	0,62	0,62
Rp	0,99	0,98	0,97	1,00	0,92	-0,07	0,64	-0,83	0,75	0,46
Sm	0,92	0,97	0,97	0,92	1,00	0,20	0,68	-0,89	0,49	0,66
ρ	-0,07	0,04	0,09	-0,07	0,20	1,00	0,03	-0,13	-0,43	0,50
b	0,63	0,67	0,68	0,64	0,68	0,03	1,00	-0,76	0,29	0,17
v	-0,84	-0,86	-0,85	-0,83	-0,89	-0,13	-0,76	1,00	-0,38	-0,35
Δ	0,72	0,66	0,62	0,75	0,49	-0,43	0,29	-0,38	1,00	0,07
ΔH	0,45	0,57	0,62	0,46	0,66	0,50	0,17	-0,35	0,07	1,00

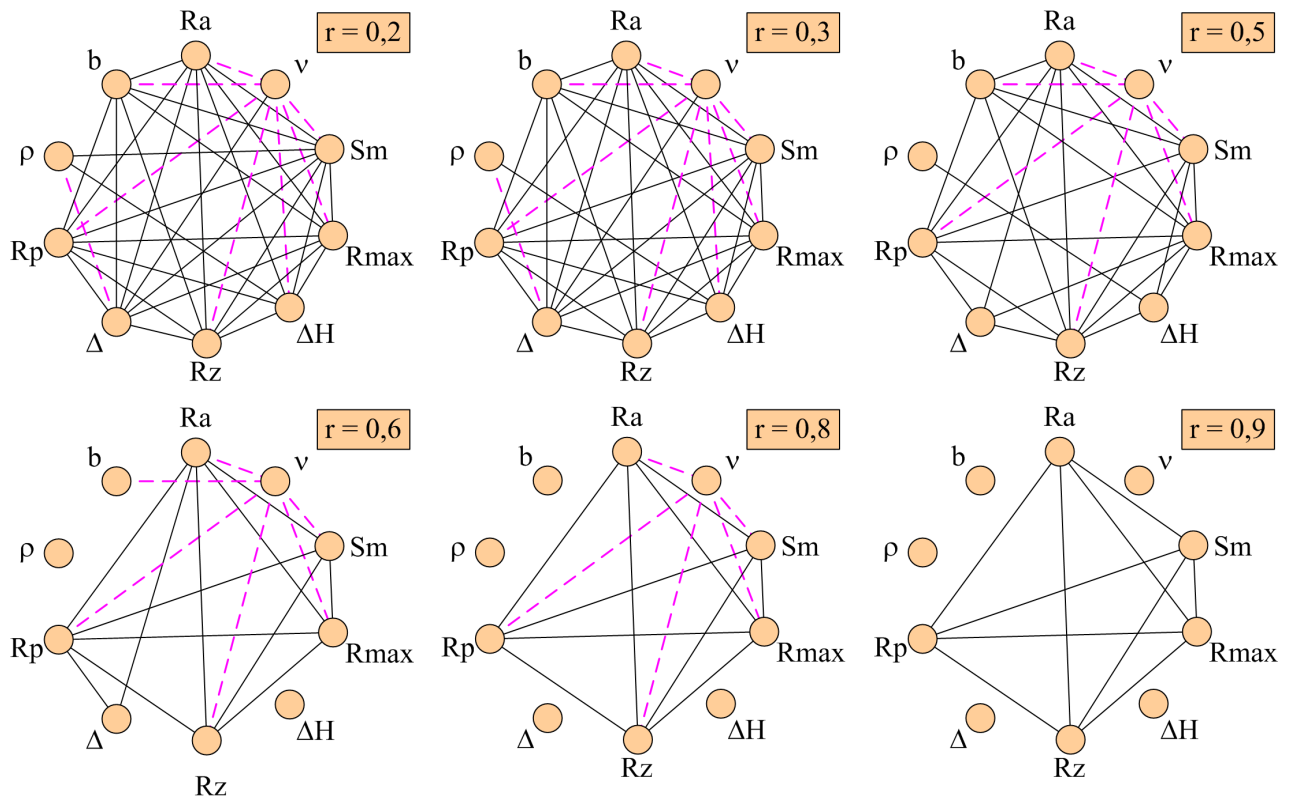


Рисунок 5.12 – Графы корреляционных связей параметров шероховатости, полученных после обработки поверхностей деталей из чугуна торцевым фрезерованием композитом 10 и последующего алмазного выглаживания

В таблице 5.7 представлены характеристики графов корреляционных связей. При снижении значения коэффициента парной корреляции средняя степень вершины $\overline{\deg Y_i}$ изменяется от 7,4 до 2.

При обработке фрезерованием обеспечивается более тесная корреляционная связь между параметрами шероховатости так как при $r = 0,9$ $\overline{\deg Y_i} = 4,44$ (таблица 5.3), так как при лезвийной обработке металлов обеспечивается высокая степень регулярности профиля шероховатости, параметры которого рассчитываются с высокой точностью.

Исследовались корреляционные связи параметров шероховатости поверхностей, обработанных фрезерованием, с параметрами шероховатости поверхностей, обработанных АВ. В таблице 5.8 представлены коэффициенты взаимной парной корреляции между такими параметрами.

На рисунке 5.13 показано, что при увеличении коэффициента парной корреляции количество корреляционных связей уменьшается.

Таблица 5.7 – Характеристики графов корреляционных связей параметров шероховатости поверхностей деталей, обработанных торцевым фрезерованием композитом 10 и последующим АВ

$r_{94; 0,05}^{табл}$	n_{max}	n	$\frac{n}{n_{max}}$	$[deg Y_i]$	$\overline{deg Y_i}$	$\frac{\overline{deg Y_i}}{[deg Y_i]}$
0,2	45	37	0,82	9	7,40	0,82
0,3	45	35	0,78	9	7,00	0,78
0,5	45	29	0,64	9	5,80	0,64
0,7	45	18	0,40	9	3,60	0,40
0,8	45	15	0,33	9	3,00	0,33
0,9	45	10	0,22	9	2,00	2,22

Таблица 5.8 – Коэффициенты парной корреляции параметров шероховатости поверхностей деталей из чугуна, обработанных торцевым фрезерованием композитом 10, с параметрами шероховатости поверхностей, обработанных торцевым фрезерованием и последующим АВ

Параметры шероховатости		после АВ									
		Ra	Rz	$Rmax$	Rp	Sm	ρ	b	v	Δ	ΔH
после фрезерования	Ra	0,72	0,81	0,84	0,73	0,86	0,41	0,44	-0,59	0,32	0,93
	Rz	0,71	0,81	0,84	0,72	0,86	0,40	0,44	-0,58	0,33	0,93
	$Rmax$	0,72	0,81	0,85	0,73	0,86	0,40	0,45	-0,59	0,33	0,93
	Rp	0,71	0,81	0,84	0,72	0,86	0,41	0,43	-0,58	0,33	0,93
	Sm	0,70	0,78	0,82	0,71	0,85	0,49	0,46	-0,61	0,24	0,88
	ρ	0,02	-0,07	-0,04	-0,02	0,02	0,36	0,07	-0,12	-0,30	-0,11
	b	0,48	0,58	0,56	0,47	0,60	0,25	0,19	-0,34	0,27	0,72
	v	-0,67	-0,78	-0,80	-0,68	-0,80	-0,29	-0,38	0,51	-0,38	-0,90
	Δ	0,70	0,80	0,84	0,72	0,83	0,32	0,44	-0,56	0,38	0,91

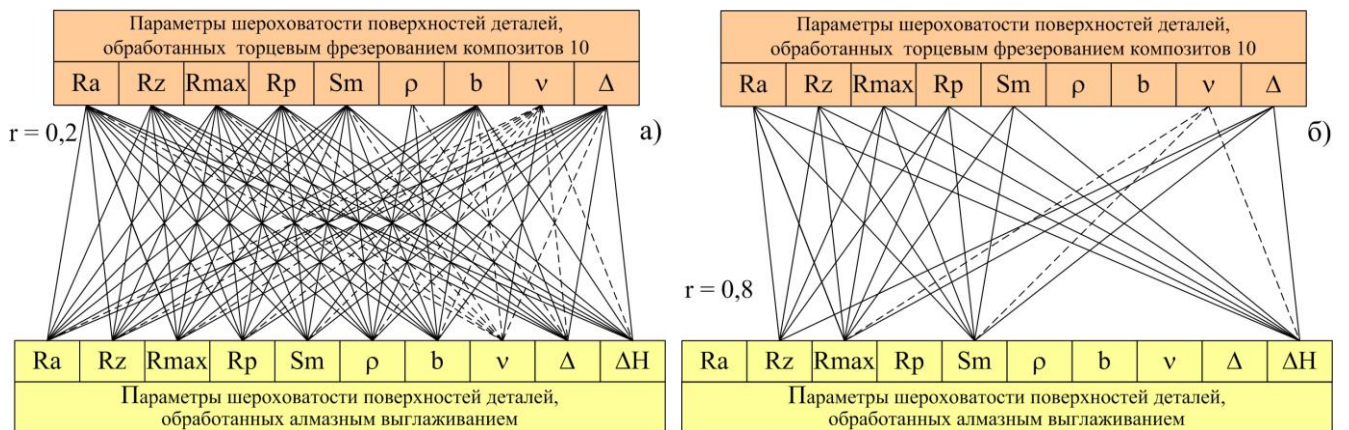


Рисунок 5.13 – Графы корреляционных связей между параметрами шероховатости поверхностей деталей, обработанных торцевым фрезерованием композитом 10 и параметрами шероховатости поверхностей, обработанных АВ

По таблице 5.9, в которой представлены характеристики графов при различных значениях коэффициентов r , видно, что значение средней степени вершины $\overline{\deg Y_i}$ резко снижается от 8,11 до 0 при $r = 0,9$. Это объясняется нелинейностью пластических деформаций металла поверхности при АВ детали.

Таблица 5.9 – Характеристики графов корреляционных связей параметров шероховатости поверхностей деталей из чугуна, обработанных торцевым фрезерованием, с параметрами шероховатости поверхностей, обработанных торцевым фрезерованием и последующим АВ

$r_{94; 0,05}^{табл}$	n_{max}	n	$\frac{n}{n_{max}}$	$[\deg Y_i]$	$\overline{\deg Y_i}$	$\frac{\overline{\deg Y_i}}{[\deg Y_i]}$
0,2	81	73	0,90	9	8,11	0,90
0,3	81	69	0,85	9	7,67	0,85
0,5	81	45	0,56	9	5,00	0,56
0,7	81	34	0,42	9	3,78	0,42
0,8	81	19	0,23	9	2,11	0,23
0,9	81	0	0,00	9	0,00	0,00

5.1.2.2. Модели формирования параметров шероховатости поверхностей деталей алмазным выглаживанием после торцевого фрезерования композитом 10

На рисунке 5.14 представлены интервалы изменения параметров шероховатости при обработке различными методами. АВ обеспечивает широкий диапазон варьирования параметров Ra , Rp , Rz , $Rmax$, Sm . АВ поверхности, обработанной шлифованием периферией круга изменяет параметры шероховатости в сравнительно узком диапазоне значений [141]. Таким образом, обработка шлифованием поверхностей под алмазное выглаживание рекомендуется при изготовлении деталей, к которым предъявляются повышенными требованиями к точности.

По результатам обработки экспериментальных данных строились физико-статистические модели формирования параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна в ТС торцевого фрезерования композитом 10 и АВ.

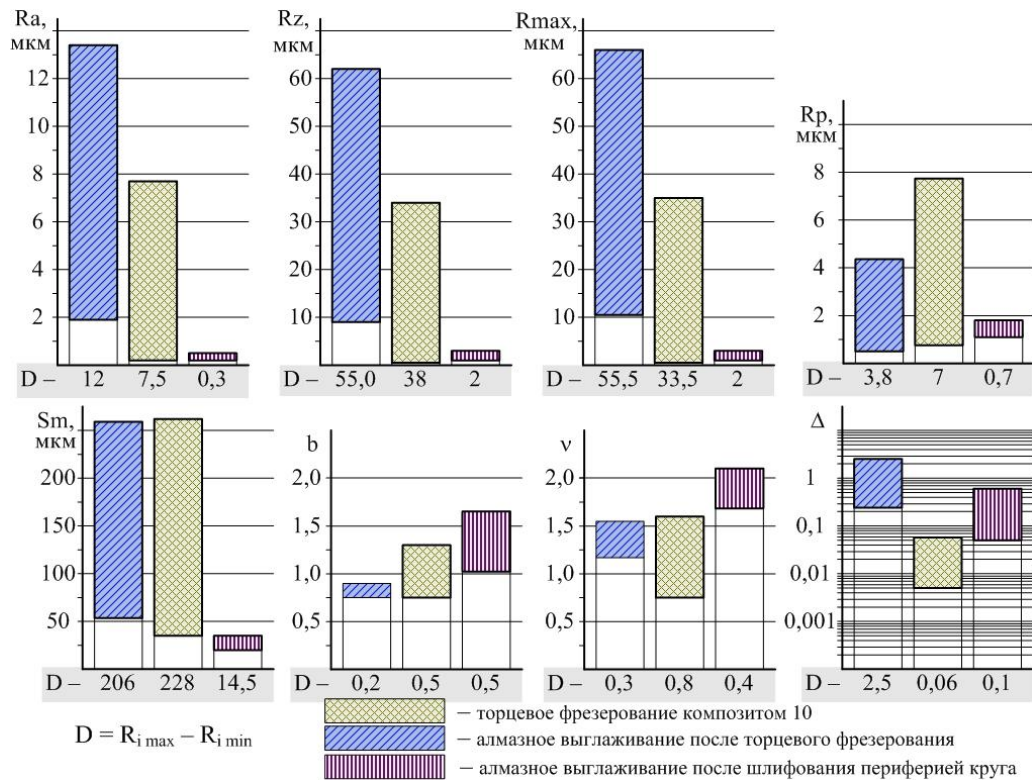


Рисунок 5.14 – Интервалы значений параметров шероховатости, обеспечиваемых в различных ТС обработки плоских поверхностей деталей из чугуна

Модель формирования параметров шероховатости имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Y_i &= \beta_{i0} S_{z\phi p}^{\beta_{i1}} V_{\phi p}^{\beta_{i2}} Q^{\beta_{i3}} S_{AB}^{\beta_{i4}} V_{AB}^{\beta_{i5}} (S_{z\phi p} V_{\phi p})^{\beta_{i6}} (QV_{AB})^{\beta_{i7}} = \\
 &= \beta_{i0} S_{z\phi p}^{(\beta_{i1}+\beta_{i6})} V_{\phi p}^{(\beta_{i2}+\beta_{i6})} Q^{(\beta_{i3}+\beta_{i7})} S_{AB}^{\beta_{i4}} V_{AB}^{(\beta_{i5}+\beta_{i7})}
 \end{aligned} \quad (5.5)$$

Характеристики этих моделей представлены в таблицах П.7.1 и П.7.2 приложения 7.

Адекватность моделей экспериментальным данным подтверждает анализ значений критериев Стьюдента, Фишера и Кохрена.

На рисунке 5.15 представлены результаты ранжирования управляющих факторов обработки по степени влияния на формирование параметров шероховатости, проводимого методом Парето.

В большинстве случаев наибольшее влияние на формирование параметров шероховатости оказывает фактор взаимодействия $X_6 = S_{z\phi pрез} V_{\phi pрез}$, причем он носит положительный характер.

Определялись кумулятивные кривые накопленного процента влияния факторов обработки на параметры шероховатости, (рисунок 5.16), позволяющие вы-

явить факторы, обеспечивающие 70 %-ый вклад в формирование параметров.

К ним относятся факторы взаимодействия подачи и скорости при фрезеровании $S_{z\text{ фрез}}V_{\text{фрез}}$, силы выглаживания Q , подачи при выглаживании S_{AB} , взаимодействия силы и скорости АВ.

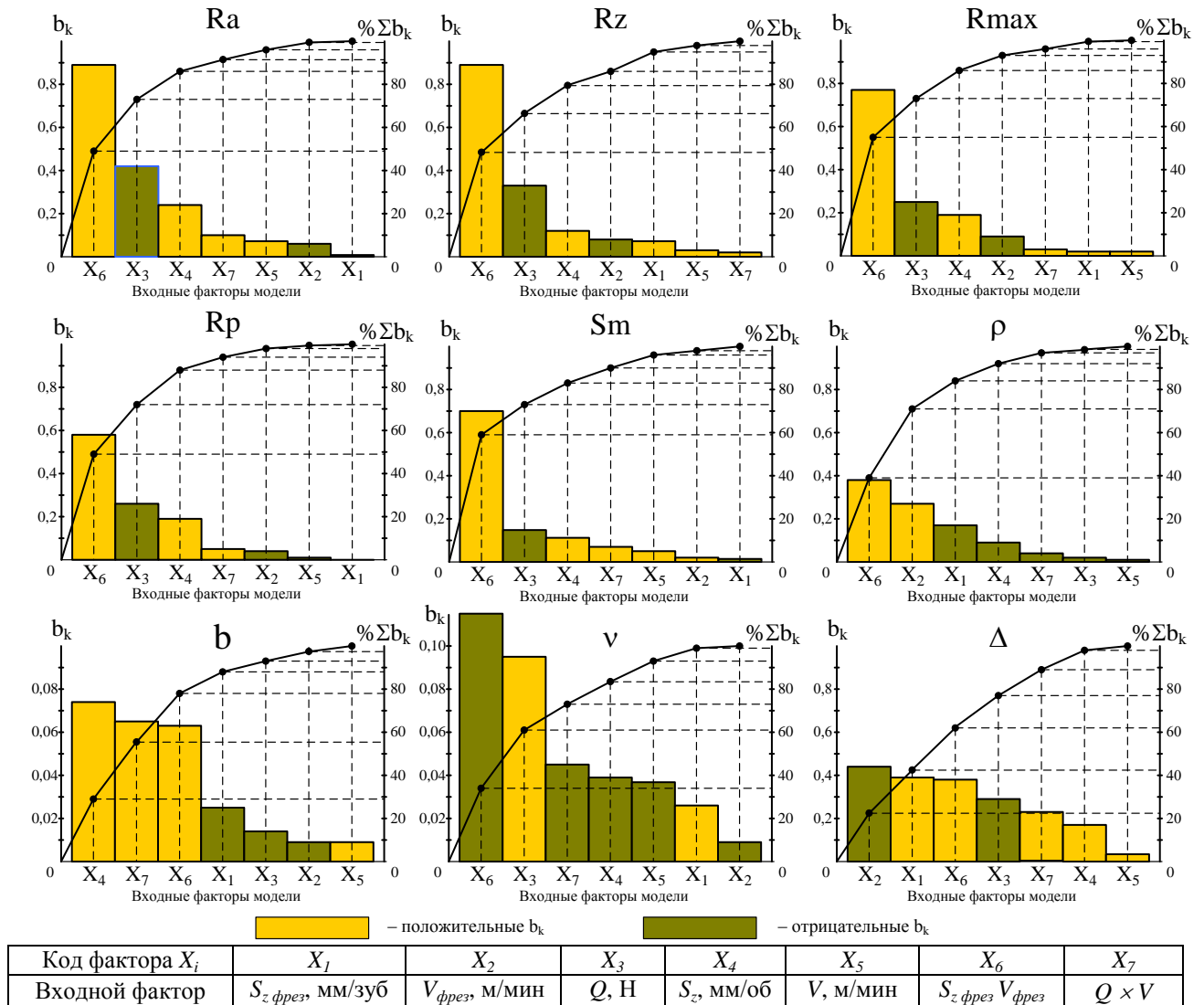


Рисунок 5.15 – Ранжирование управляющих факторов обработки по степени влияния на формирование параметров шероховатости плоских поверхностей деталей алмазным выглаживанием после торцевого фрезерования композитом 10

5.1.2.3. Параметрическая надёжность технологической системы торцевого фрезерования композитом 10 и последующего алмазного выглаживания поверхностей деталей из чугуна

На рисунке 5.16 представлены графики изменения вероятности выполнения

задания ТС торцевого фрезерования композитом 10 и последующего алмазного выглаживания плоских поверхностей деталей из чугуна для центра ОФП экспериментальных исследований, в зависимости от значения δ .

При $\delta = 20\%$ вероятность обеспечения значений высотных параметров шероховатости изменяется от 0,53 для R_p до 0,72 для R_a , а для остальных параметров от 0,25 для ρ и Δ до 0,72 для v .

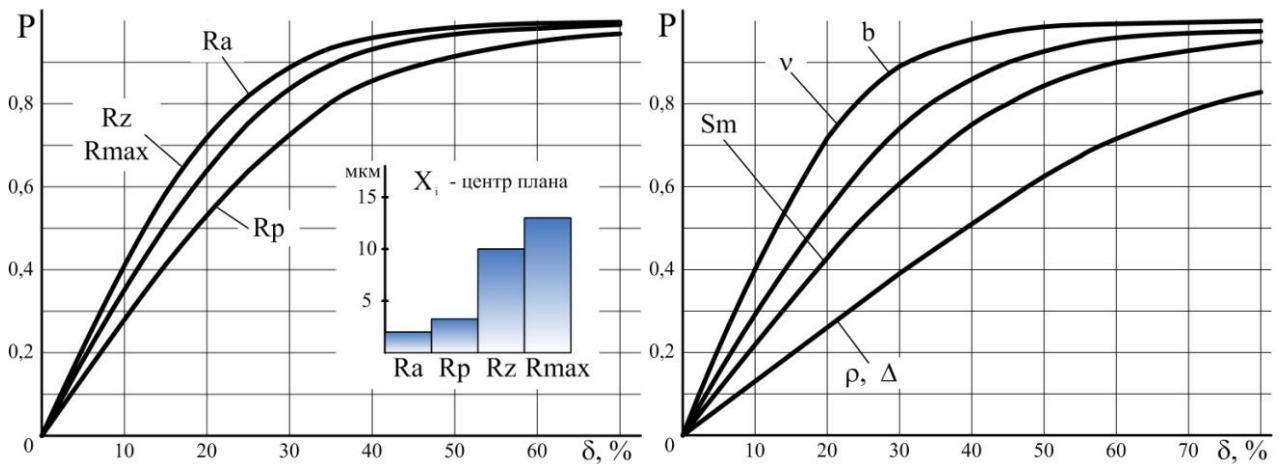


Рисунок 5.16 – Вероятность технологического обеспечения параметров шероховатости торцевым фрезерованием композитом 10 и АВ плоских поверхностей деталей из чугуна

Высотные параметры R_a , R_z , R_{max} обеспечиваются с вероятностью $P = 0,9$ при δ до 35 %, параметры R_p , S_m , b , v обеспечиваются с вероятностью $P = 0,9$ при значении δ от 30 до 60 %.

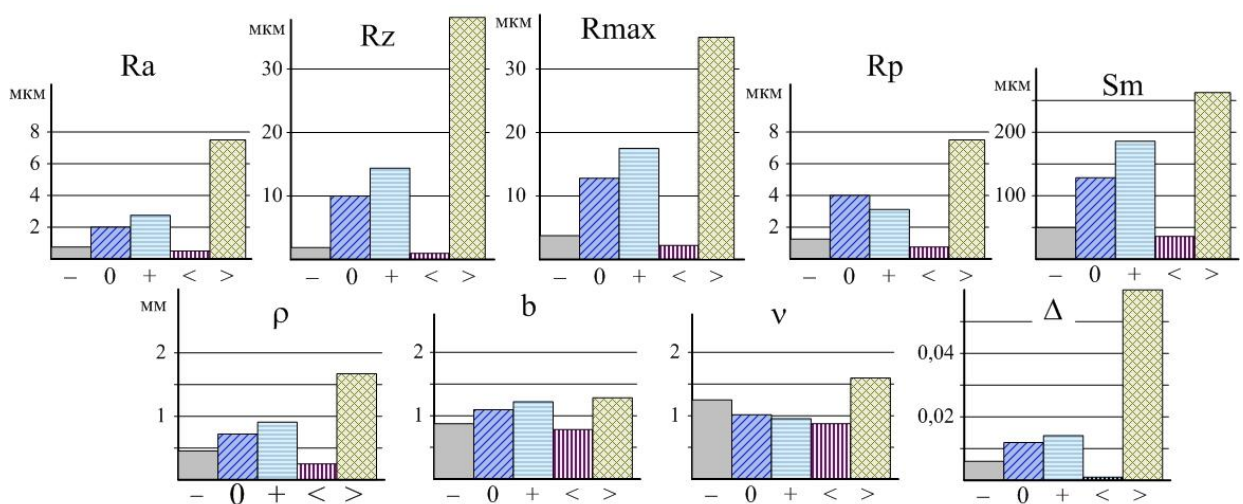
Также на рисунке 5.16 представлен диапазон значений высотных параметров шероховатости, обеспечиваемых ТС в центре ОФП.

В таблице 5.10 представлены значения вероятностей технологического обеспечения параметров шероховатости в ТС фрезерованием композитом 10 с последующим алмазным выглаживанием поверхностей деталей из чугуна СЧ20 для различных точек ОФП и при различных значениях δ .

Для параметров R_a , R_z , R_{max} , R_z , S_m , Δ установлен достаточно большой диапазон варьирования для различных точек ОФП (рисунок 5.17).

Таблица 5.10 – Вероятности формирования параметров шероховатости плоских поверхностей деталей торцевым фрезерованием композитом 10 с последующим АВ

ОФП	$\pm\delta$	Ra МКМ	Rz МКМ	$Rmax$ МКМ	Rp МКМ	Sm МКМ	ρ МКМ	b	v	Δ	ΔH
–	0,1	0,45	0,39	0,38	0,31	0,24	0,15	0,44	0,39	0,17	0,24
	0,2	0,77	0,69	0,68	0,58	0,46	0,29	0,76	0,70	0,34	0,46
	0,25	0,86	0,79	0,79	0,68	0,55	0,36	0,86	0,80	0,42	0,56
	0,5	0,99	0,98	0,98	0,94	0,87	0,67	0,99	0,98	0,74	0,87
+	0,1	0,39	0,34	0,33	0,27	0,21	0,12	0,3	0,26	0,15	0,21
	0,2	0,70	0,62	0,61	0,51	0,41	0,25	0,69	0,50	0,30	0,40
	0,25	0,81	0,73	0,72	0,61	0,51	0,31	0,80	0,60	0,37	0,49
	0,5	0,98	0,96	0,96	0,91	0,83	0,60	0,98	0,90	0,68	0,82
0	0,1	0,41	0,36	0,35	0,28	0,22	0,13	0,41	0,29	0,16	0,22
	0,2	0,73	0,65	0,64	0,53	0,43	0,26	0,72	0,54	0,31	0,43
	0,25	0,83	0,75	0,75	0,64	0,53	0,33	0,82	0,65	0,39	0,53
	0,5	0,99	0,97	0,97	0,92	0,85	0,62	0,98	0,93	0,70	0,84
<	0,1	0,41	0,35	0,35	0,28	0,23	0,13	0,41	0,26	0,16	0,21
	0,2	0,72	0,64	0,64	0,54	0,45	0,27	0,72	0,50	0,31	0,41
	0,25	0,83	0,75	0,75	0,64	0,55	0,33	0,82	0,60	0,39	0,51
	0,5	0,99	0,97	0,97	0,92	0,86	0,63	0,98	0,90	0,70	0,83
>	0,1	0,43	0,37	0,36	0,29	0,22	0,13	0,41	0,39	0,16	0,23
	0,2	0,74	0,66	0,66	0,54	0,42	0,27	0,73	0,69	0,32	0,45
	0,25	0,84	0,77	0,76	0,65	0,51	0,33	0,83	0,80	0,40	0,54
	0,5	0,99	0,97	0,97	0,92	0,84	0,63	0,99	0,98	0,71	0,86



(-) – $X_i = \min$; (+) – $X_i = \max$; 0 – X_i в центре плана; < – $Y_i = \min$; > – $Y_i = \max$

Рисунок 5.17 – Интервалы значений параметров шероховатости, обеспечиваемых в ТС торцевого фрезерования композитом 10 с последующим АВ плоских поверхностей деталей из чугуна

5.2. Параметрическая надёжность технологических систем обработки цилиндрических поверхностей деталей из стали 45

5.2.1. Модели формирования параметров шероховатости и параметрическая надёжность чистового точения композитом 10 цилиндрических поверхностей деталей

Одной из целей исследования является создание технологии повышения износостойкости поверхностей деталей на основе применения мягких приработочных плёнок и обработки ППД АВ. Предложенная в работе технология комбинированной антифрикционной обработки поверхностей деталей (ФАБО) является трехступенчатой ТС, которая реализуется по методике, изложенной в главе 3.

На 1 этапе ФАБО предлагается применять обработку поверхностей деталей чистовым точением токарным инструментом, оснащённым композитом 10. На этом этапе должны формироваться требуемые геометрические параметры качества поверхности для эффективного нанесения материалов приработочных плёнок.

Поэтому необходимо исследовать технологические возможности процесса чистового точения композитом 10 цилиндрических поверхностей деталей и определить его параметрическую надёжность.

В качестве управляющих факторов приняты шероховатость предварительно обработанной поверхности Ra_{np} ; глубина t резания, мм; подача S инструмента, мм/об; скорость V точения м/мин; геометрия режущей части токарного инструмента (углы в плане φ и φ_1 , передний угол γ , радиус вершины r , радиус округления режущей кромки $\rho_{кр}$).

Область факторного пространства и результаты моделирования формирования параметров шероховатости поверхностей деталей из стали 45 (HRC 45...50) чистовым точением композитом 10 представлены в приложении 9.

Эксперимент проводился по плану в виде дробной реплики типа 2^{9-5} от ПФЭ типа 2^5 .

На рисунке 5.18 представлены результаты ранжирования факторов обработ-

ки по степени влияния на формирование параметров шероховатости, проведенного анализом Парето коэффициентов b'_i моделей (2.52), рассчитанных для кодированных значений (+1, -1) аргументов X_i .

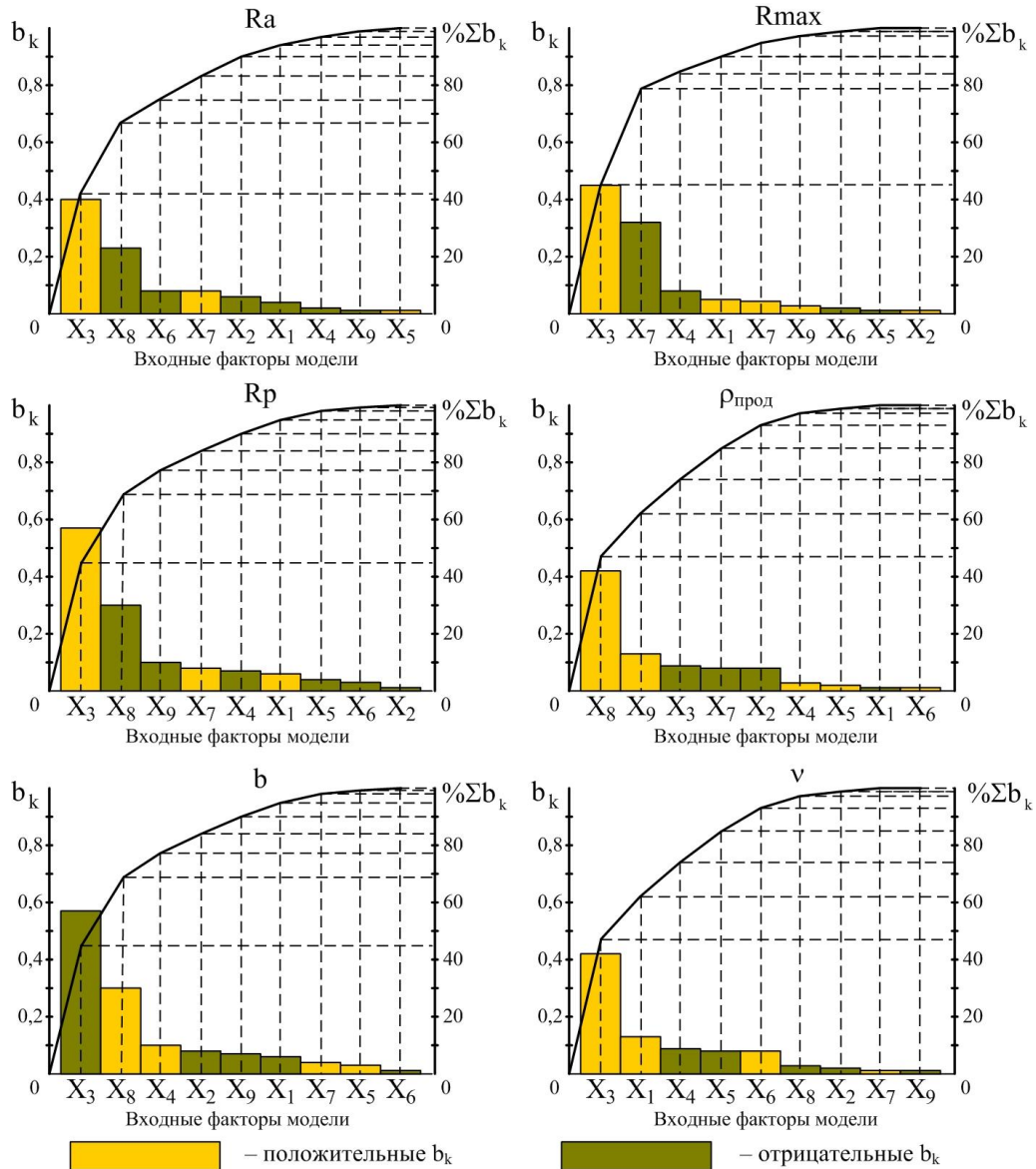


Рисунок 5.18 – Ранжирование факторов обработки по степени влияния на формирование параметров шероховатости плоских поверхностей деталей чистовым точением композитом 10:

$$X_1 - Ra_{np}; X_2 - t; X_3 - S; X_4 - V; X_5 - \varphi; X_6 - \varphi_1; X_7 - \gamma; X_8 - r; X_9 - \rho_{кр}$$

Выявлены факторы с суммарным влиянием на результаты обработки 75 %: для параметра Ra – это факторы S, r, φ, γ ; для параметра $Rmax$ – S, γ ; для параметра Rp – $S, r, \rho_{кр}$; для продольного радиуса микронеровностей r_{np} – $r, \rho_{кр}, S, \gamma$.

На втором этапе ФАБО необходимо обеспечить условия для формирования на поверхности мягкой прирабочной плёнки толщиной 0,2...0,6 мкм.

Процесс фрикционного латунирования обеспечивается при условии, что в зоне контакта фрикционного стержня с обрабатываемой поверхностью происходит микрорезание материала стержня, определяемым выражением [96, 106 и др.]:

$$R_{max} / \rho \geq 0,5(1 - 2\tau_0 / \sigma_T), \quad (5.6)$$

где R_{max} – максимальная высота шероховатости; ρ – средний радиус вершины микронеровностей; τ_0 – сдвиговая прочность адгезионной связи материала фрикционного стержня; σ_T – предел текучести материала стержня.

Таким образом, необходимо обеспечить параметры шероховатости R_{max} и ρ с интервалом допустимых значений типа (2.42).

Определялась параметрическая надежность рассматриваемой ТС по параметрам шероховатости. На рисунке 5.19 представлены результаты расчётов вероятности выполнения задания для центра ОФП эксперимента в ТС чистового точения композитом 10 поверхностей деталей из стали 45.

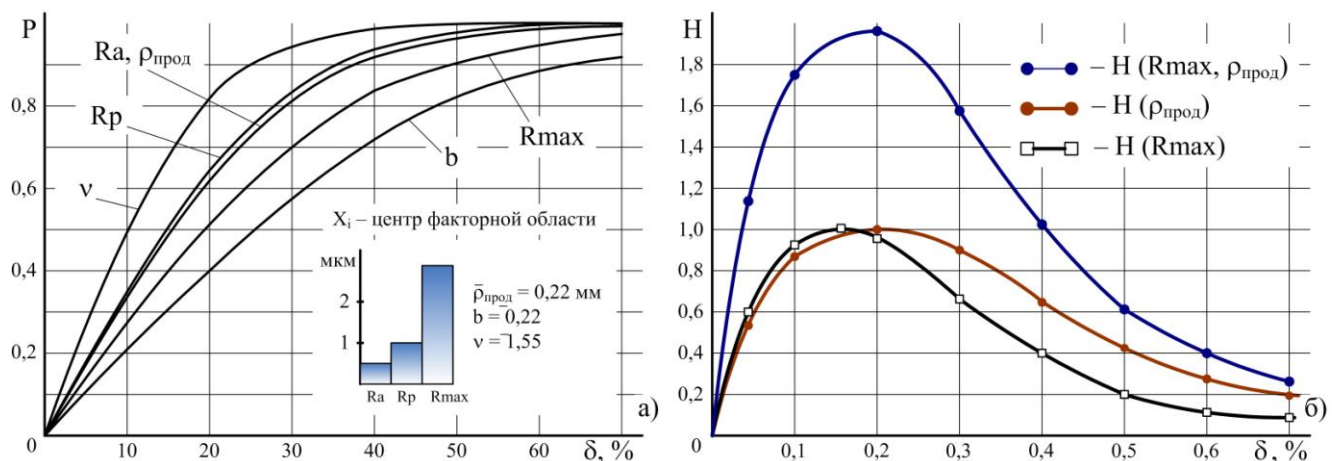


Рисунок 5.19 – Вероятность технологического обеспечения параметров шероховатости чистовым точением композитом 10 поверхностей деталей из стали 45 (а) и изменение информационной энтропии в зависимости от δ для параметров R_{max} и $\rho_{\text{прод}}$ (б)

При значении $\delta = 0,3$ вероятность формирования параметров шероховатости изменяется от 0,57 для b до 0,95 для v . Для параметра R_{max} ($R_{max} = 2,88$ мкм) вероятность обеспечения $P = 0,7$ при $\delta = 0,3$, для среднего радиуса вершин выступов микронеровностей в продольном направлении $\rho_{\text{прод}}$ ($\rho_{\text{прод}} = 0,22$ мм) – $P = 0,81$. С вероятностью $P = 0,9$ параметр R_{max} обеспечивается при $\delta = 0,5$, а параметр $\rho_{\text{прод}}$ при $\delta = 0,38$.

Так как для обеспечения условия микрорезания в зоне контакта фрикционного стержня с поверхностью в процессе ФАБО необходимо обеспечить два параметра (R_{max} и ρ_{prod}), то для рассматриваемой ТС можно определить 4 состояния: параметры обеспечиваются с вероятностью P или не обеспечиваются ($1 - P$).

Такая неопределённость системы показателей R_{max} и ρ_{prod} обусловлена зависимостью надёжности P от величины δ . Она оценивается показателем информационной энтропии, который для многопараметрических систем определяется выражением [134 и др.]:

$$H(\overline{Y_1, Y_S}) = - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^S P_{ik} \log_2 P_{ik} = \sum_{k=1}^S H(Y_k). \quad (5.7)$$

где P_{ik} – вероятности возможных n состояний параметра Y_k ($k = \overline{1, S}$); $H(Y_k)$ – информационная энтропия однопараметрической системы для параметра Y_k .

Анализ зависимостей информационной энтропии от параметра изменения параметра δ для различных систем (рисунок 5.19б) показывает, что максимальная неопределённость выполнения условия (2.42) возникает при $\delta = 0,15 - 0,2$.

Итак, для повышения надёжности обеспечения параметров шероховатости на первом этапе ФАБО необходимо в соответствии с условием (2.42) назначать отклонения параметров R_{max} и ρ_{prod} $\delta > 0,2$. Увеличение значения δ ограничивается условием (5.6)

В работе также исследовались технологические возможности процесса чистового точения композитом 10 цилиндрических поверхностей деталей без учета геометрических параметров режущей части инструмента, так как на первом этапе ФАБО применяются стандартные резцы-вставки (рисунок 3.7 г) (главный угол в плане $\varphi = 60^\circ$, ТУ 2-037-194-85).

В качестве управляющих факторов приняты скорость резания V , подача S , глубина резания t и жёсткость ТС j . Строились модели формирования параметров продольной и поперечной шероховатости.

В таблице 5.11 указаны значения ОФП эксперимента.

Таблица 5.11 – Область факторного пространства эксперимента по исследованию процесса точения композитом 10 цилиндрических деталей

Код фактора	Факторы и уровни их варьирования			
	X_1	X_2	X_3	X_4
	V, м/мин	S, мм/об	t, мм	j
–	65	0,05	0,1	2,5
+	200	0,15	0,25	1,62

Например, модель формирования параметра Ra поперечной шероховатости поверхности детали, обрабатываемой точением композитом 10, представлена зависимостью:

$$Ra_{non} = 41,16 \frac{S^{0,65} t^{0,28}}{V^{0,05} j^{0,18}} \quad (5.8)$$

Параметры моделей формирования параметров шероховатости при чистовом точении композитом 10 представлены в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Коэффициенты моделей формирования параметров шероховатости поверхности при чистовом точении композитом 10*

Коэфф.	Параметры шероховатости						
	Ra , мкм	Rp , мкм	$Rmax$, мкм	Rq , мкм	ρ , мм	b	ν
b_0	$\frac{41,16}{26,15}$	$\frac{88,7}{21,7}$	$\frac{180,0}{42,3}$	$\frac{65,2}{32,1}$	$\frac{0,02}{62,5}$	$\frac{1,10}{2,92}$	$\frac{1,58}{1,59}$
b_1	$\frac{-0,05}{-0,45}$	$\frac{-0,07}{-0,24}$	$\frac{-0,10}{-0,25}$	$\frac{-0,12}{-0,44}$	$\frac{0,16}{-0,83}$	$\frac{-0,01}{-0,03}$	$\frac{-0,06}{0,01}$
b_2	$\frac{0,65}{0,73}$	$\frac{0,51}{0,62}$	$\frac{0,45}{0,62}$	$\frac{0,65}{0,75}$	$\frac{-0,08}{1,48}$	$\frac{0,06}{0,23}$	$\frac{-0,09}{0,03}$
b_3	$\frac{0,28}{0,57}$	$\frac{0,24}{0,53}$	$\frac{0,26}{0,43}$	$\frac{0,25}{0,56}$	$\frac{0,11}{-0,85}$	$\frac{0,08}{0,35}$	$\frac{0,02}{-0,06}$
b_4	$\frac{-0,18}{-0,90}$	$\frac{-0,19}{-0,10}$	$\frac{-0,20}{-0,18}$	$\frac{-0,17}{-0,12}$	$\frac{-0,17}{-0,15}$	$\frac{0,05}{0,04}$	$\frac{0,02}{0,02}$

* – в числителе поперечная шероховатость; в знаменателе продольная шероховатость

На рисунке 5.20 представлены результаты расчётов вероятности выполнения задания для центра ОФП исследований процессов формирования продольной и поперечной шероховатости в ТС точения композитом 10 цилиндрических деталей. Также на рисунке 5.20 показаны диапазоны значений некоторых формируемых чистовым точением параметров шероховатости в рассматриваемой ОФП.

Вероятность технологического обеспечения параметров шероховатости в поперечном направлении А выше, чем вероятность обеспечения таких параметров в продольном направлении В.

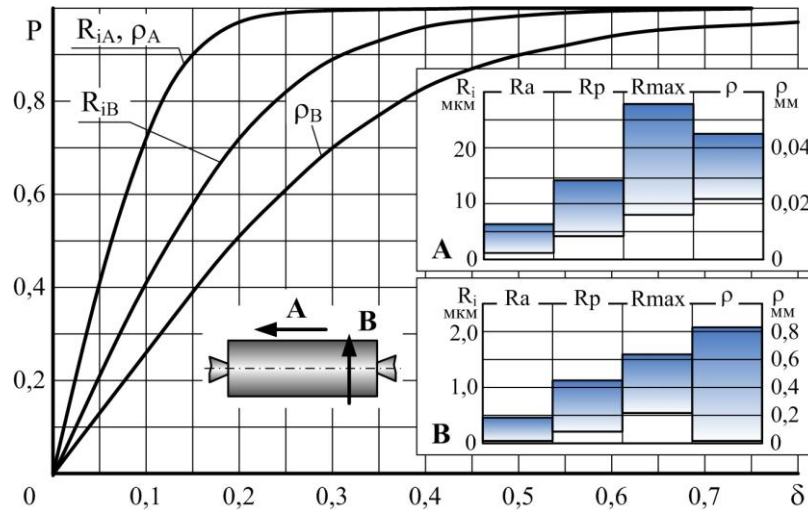


Рисунок 5.20 – Вероятность технологического обеспечения параметров шероховатости поверхностей деталей из стали 45 в поперечном (А) и продольном (В) направлениях при чистовом точении композитом 10

5.2.2. Модели формирования параметров шероховатости и параметрическая надёжность алмазного выглаживания поверхностей цилиндрических деталей

В рамках исследуемой ТС комбинированной антифрикционной обработки алмазное выглаживание выполняется на заключительном этапе с целью окончательного формирования требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей, в том числе, шероховатости (рисунок 3.6). После обработки поверхности точением композитом 10 на втором этапе ФАБО выполняется её модификация нанесением мягких приработочных плёнок (МПП) из медесодержащих материалов фрикционным и химическим способами, при этом толщина плёнки изменяется в пределах $0,2 \dots 0,6$ мкм.

Алмазным выглаживанием обеспечивается формирование микропрофиля, исключая процесс микрорезания контактирующих поверхностей деталей в соединениях трения-скольжения и требуемых триботехнических характеристик, в частности параметров износостойкости.

При исследовании технологических возможностей АВ в рамках ФАБО с целью построения моделей формирования параметров шероховатости поверхностей в качестве управляющих факторов рассматривались факторы 1-го и 2-го этапов обработки ФАБО и непосредственно факторы АВ. Это позволяет в рамках теории технологической наследственности оценить степень влияния каждого из этапов ФАБО на процесс формирования параметров качества [127, 190, 202, 344 и др.].

В качестве факторов, учитывающих влияние чистового точения композитом 10, определены: скорость резания V , м/мин; подача S , мм/об; глубина резания t , мм; жёсткость j технологической системы, кН/мм.

Фактором, учитывающим влияние 2-го этапа, связанного с нанесением МПП, является материал покрытия M_n . Для ОФП планируемого эксперимента при фрикционном латунировании назначался условный код 1,5, при химическом меднении назначался условный код 3,0.

Факторы АВ – сила выглаживания Q_{AB} при радиусе индентора $r = 3,5$ мм, Н; скорость V_{AB} обработки, м/мин; подача S_{AB} , мм/об.

Область факторного пространства матрица планирования активного факторного эксперимента в виде дробной реплики типа 2^{8-4} от ПФЭ типа 2^8 представлены в приложения 9.

Средние экспериментальные значения полученных параметров шероховатости представлены в приложении 10.

В рамках проводимых исследований решался вопрос сохранности МПП на поверхности после её алмазного выглаживания. На рисунке 5.21 представлены некоторые результаты металлографического анализа топографии обработанной АВ поверхности, проводимого с применением оптической системы микроструктурного анализа поверхностей деталей (глава 3, п. 3.2.2). По цветовым оттенкам поверхностей на фотографиях а – г рисунка 5.21 видно, что МПП после АВ сохраняется. Это характерно и для остальных опытов плана эксперимента.

Толщина МПП после АВ меньше толщины МПП, полученной на втором этапе ФАБО, но это не сказывается на положительном воздействии на процесс приработки функциональных поверхностей деталей соединений трения-скольжения, так

как требуемая величина прирабочной плёнки может составлять от 7 до 11 атомов [36, 37, 162 и др.].

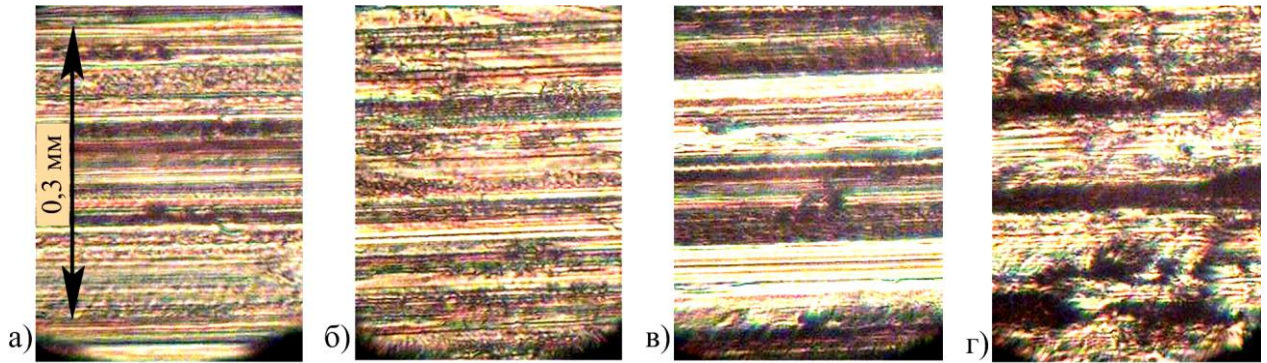


Рисунок 5.21 – Топография поверхностей после нанесения мягкой прирабочной плёнки и последующего алмазного выглаживания образцов по номерам опытов матрицы планирования (приложение 9): а – № 06; б – № 07; в – № 10; г – № 12

По результатам экспериментов построены модели формирования параметров шероховатости в исследуемой ТС, которые удовлетворяют требованиям, установленным критериям Стьюдента, Кохрена и Фишера. Характеристики моделей представлены в приложении 11.

Так, модель формирования параметра Ra поверхности детали, обрабатываемой алмазным выглаживанием после нанесения мягкой прирабочной плёнки и последующего алмазного выглаживания, представлена зависимостью:

$$Ra = 14K \frac{S^{0,41} t^{0,25} S_{AB}^{0,1}}{V^{0,05} j^{0,21} Q_{AB}^{0,1} V_{AB}^{0,6}}, \quad (5.10)$$

где $K = 1,5^{1,05} = 1,53$ – при химическом меднении поверхности; $K = 3,0^{1,05} = 3,17$ – при фрикционном латунировании поверхности.

На рисунке 5.22 представлены результаты оценки вероятности выполнения задания для центра ОФП исследований ТС алмазного выглаживания поверхностей деталей после точения композитом 10 и нанесения мягкой прирабочной плёнки, а также диапазоны значений некоторых формируемых параметров шероховатости.

Сравнительно низкая вероятность обеспечения параметров Ra и Rp объясняется наличием МПП, толщина которой носит случайный характер, особенно во впадинах микропрофиля поверхности.

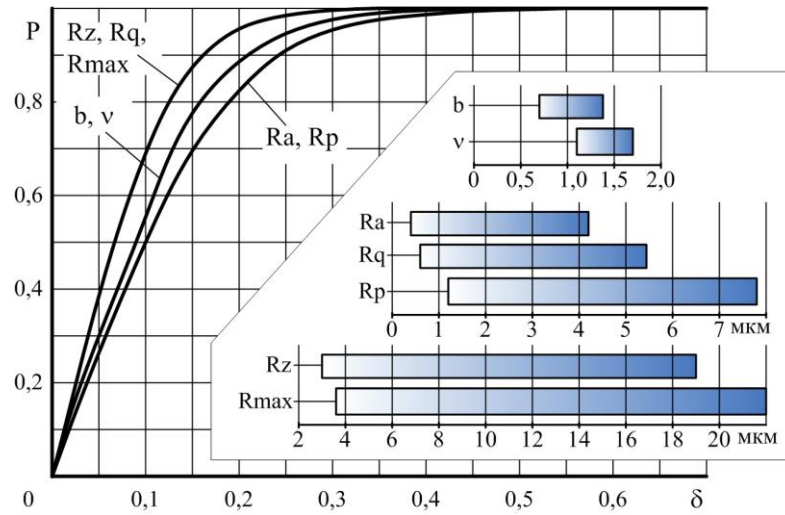


Рисунок 5.22 – Вероятности технологического обеспечения параметров шероховатости поверхностей деталей из стали АВ после точения композитом 10 с нанесением мягкой прирабочной плёнки и интервалы обеспечения параметров шероховатости

Оценивалось влияние управляющих факторов исследуемой технологической системы на формирование параметров шероховатости, результаты которого представлены на рисунке 5.23.

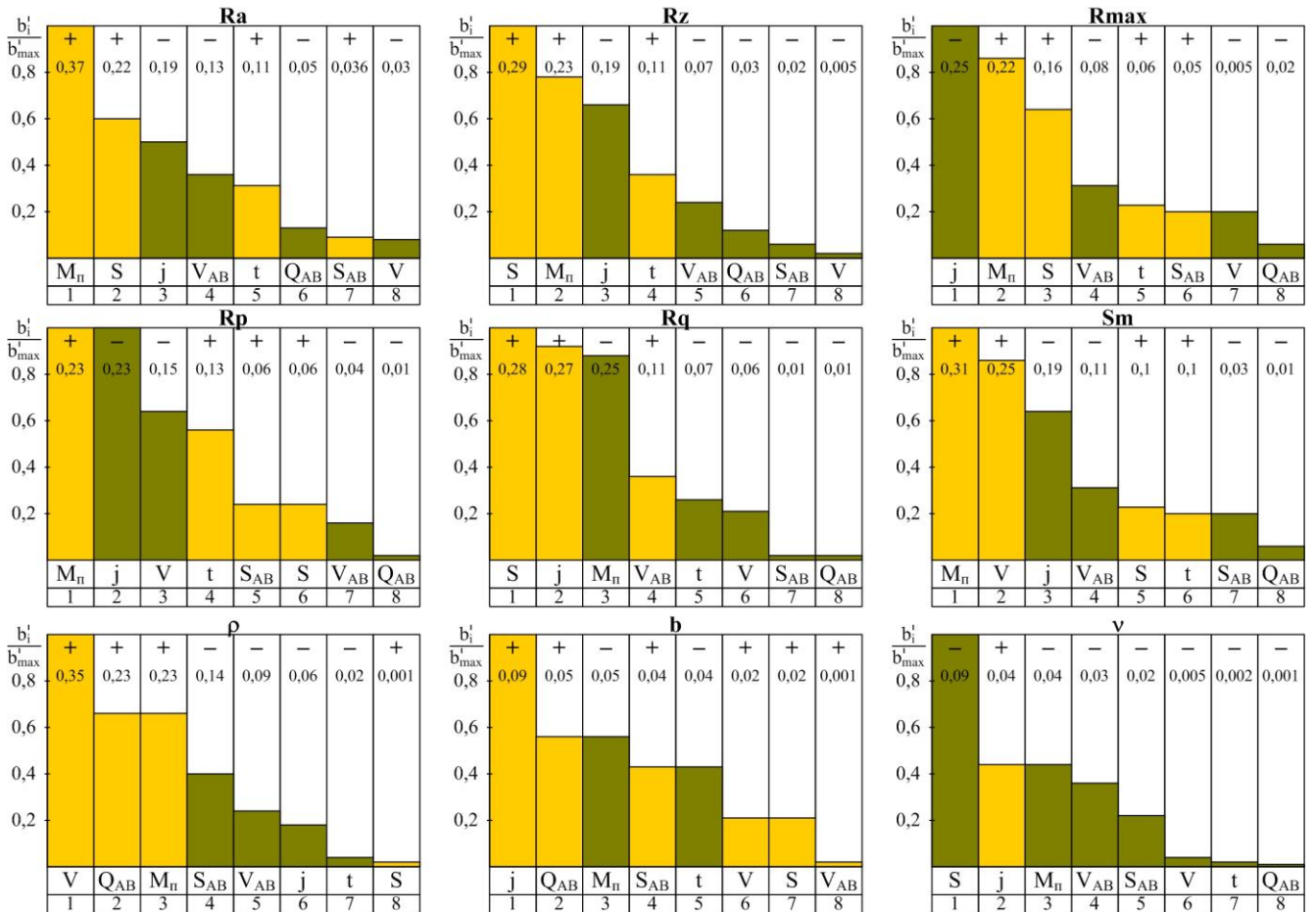


Рисунок 5.23 – Диаграммы стратификации факторов по параметрам шероховатости обрабатываемых поверхностей

Анализ диаграмм показывает, что большее влияние на формирование параметров шероховатости оказывают факторы 1-го и 2-го этапа ТС ФАБО, то есть проявляется механизм технологического наследования.

Это факт не является признаком неэффективности АВ в рамках ФАБО, так как факторы операций точения композитом 10 и нанесения МПП стратифицируются только при условии последующего АВ, обеспечивающего высокие несущую способность и физико-механические параметры поверхностного слоя (напряжённо-деформированное состояние).

5.2.3. Параметрическая надёжность комбинированной антифрикционной обработки цилиндрических поверхностей деталей по параметрам отклонений от круглости

Измерения отклонений от круглости поверхностей деталей, обработанных в ТС КАФО, проводились по результатам экспериментов, проводимых в соответствии с матрицей планирования (приложение 9) после нанесения МПП и после алмазного выглаживания.

Для каждого из рассматриваемых этапов строились модели формирования параметров отклонений от круглости (ГОСТ 24642-81):

- максимальная величина отклонения от круглости $EFK (F)$;
- среднее арифметическое отклонение от круглости $EFKa (Fa)$;
- среднее квадратическое отклонение от круглости $EFKq (Fq)$;
- параметр, характеризующий овальность $TFE (a/b)$.

На рисунке 5.24 представлены круглограммы поверхностей деталей, обработанных на различных стадиях ФАБО.

Отклонения от круглости поверхностей деталей, обработанных точением композитом 10 с последующим нанесением МПП, оцениваются в виде «игольчатого» характера (рисунок 5.24 а), нерегулярного характера (рисунок 5.24 в), в виде огранки (рисунок 5.24 д), в виде овальности (рисунок 5.24 ж).

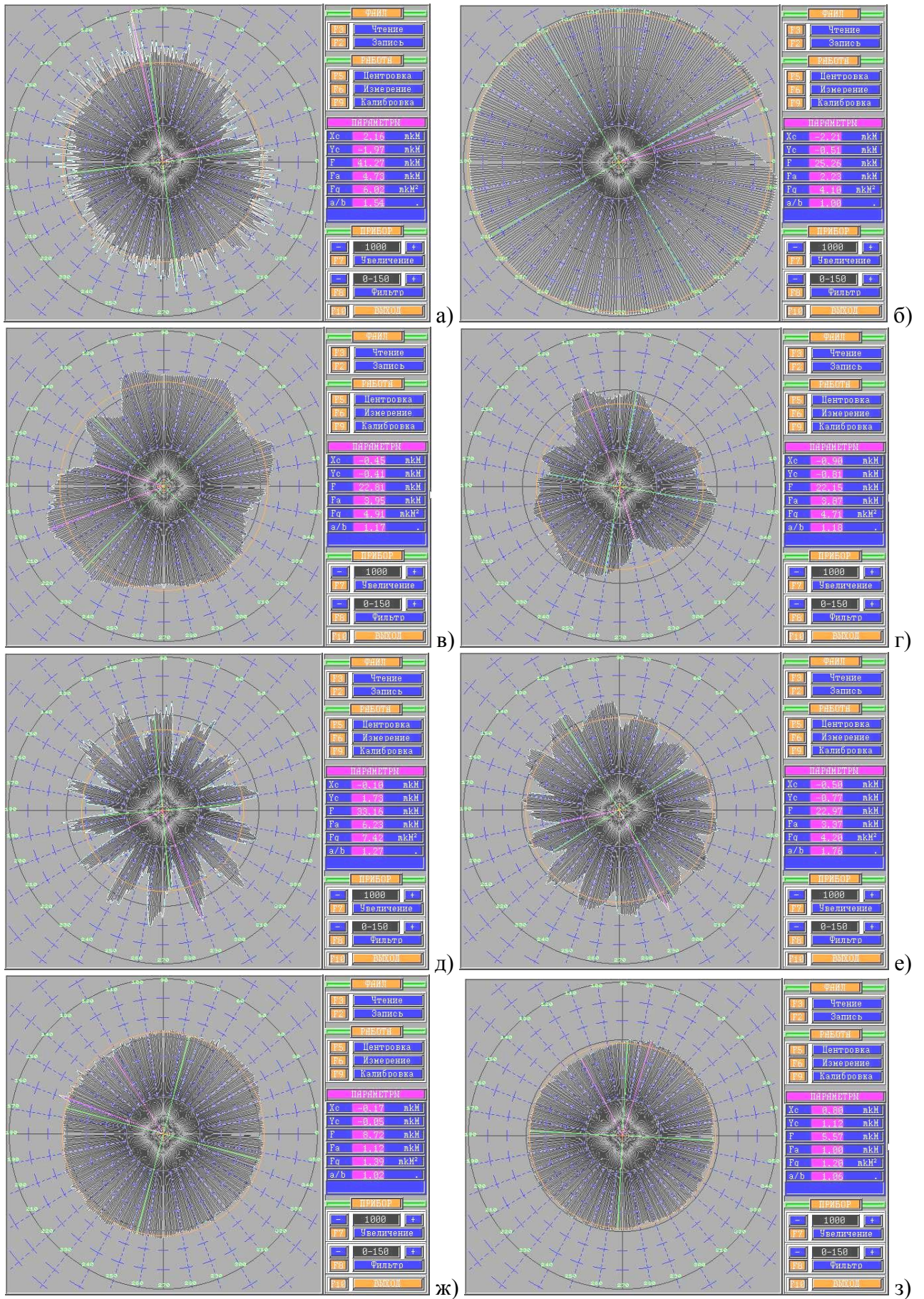


Рисунок 5.24 – Круглограммы поверхностей деталей, обработанных чистовым точением композитом 10 с нанесением МПП (а, в, д, ж) и последующим АВ (б, г, е, з)

Круглограммы поверхностей деталей, обработанных последующим АВ, показывают, что меняются числовые значения параметров отклонений от круглости, исчезла «игольчатая» структура на рисунке 5.24 б, но в целом сохранились характерные визуальные признаки поверхности, передающиеся от предыдущих этапов обработки в соответствии с теорией технологической наследственности.

Построение моделей формирования параметров отклонений от круглости осуществлялось с учётом управляющих факторов чистового точения композитом 10 и видов нанесения МПП – скорости резания V , подачи S , глубины резания t , жёсткости j технологической системы, способа обеспечения МПП M_n .

Средние экспериментальные значения параметров отклонений от круглости поверхностей деталей, обработанных чистовым точением композитом 10 с последующим нанесением МПП представлены в приложении 12.

Полученные модели формирования параметров отклонений от круглости адекватны и пригодны для практического использования:

$$\left. \begin{aligned} EFK &= 33,33K_1 \frac{V_T^{0,06} S_T^{0,044} t^{0,31}}{j^{0,27}}; & EFKa &= 0,87K_2 \frac{V_T^{0,36} S_T^{0,13} t^{0,06}}{j^{0,31}}; \\ EFKq &= 1,4K_3 \frac{V_T^{0,32} S_T^{0,1} t^{0,11}}{j^{0,32}}; & TFE &= K_4 \frac{V_T^{0,08} S_T^{0,14}}{t^{0,25} j^{0,19}}. \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

При фрикционном латунировании:

$$K_1 = 1,46; K_2 = 2,53; K_3 = 2,36; K_4 = 1,36.$$

При химическом меднении:

$$K_1 = 1,21; K_2 = 1,41; K_3 = 1,37; K_4 = 1,12.$$

Модели получены для ОФП экспериментов, обеспечивающих формирование следующих параметров отклонений от круглости: $EFK = 10 - 35$ мкм; $EFKa = 1,36 - 8,0$ мкм; $EFKq = 1,7 - 9,45$ мкм.

На рисунке 5.25 представлены результаты оценки влияния факторов обработки на формирование параметров отклонений от круглости.

Факторы жёсткости j ТС и нанесения покрытия M_n оказывают наибольшее влияние на формирование параметров отклонений от круглости обрабатываемых деталей. Снизить значения отклонений от круглости позволит повышение жёст-

кости j ТС, применение фрикционного латунирования, а также снижение значений факторов V, S, t обработки чистовым точением композитом 10.

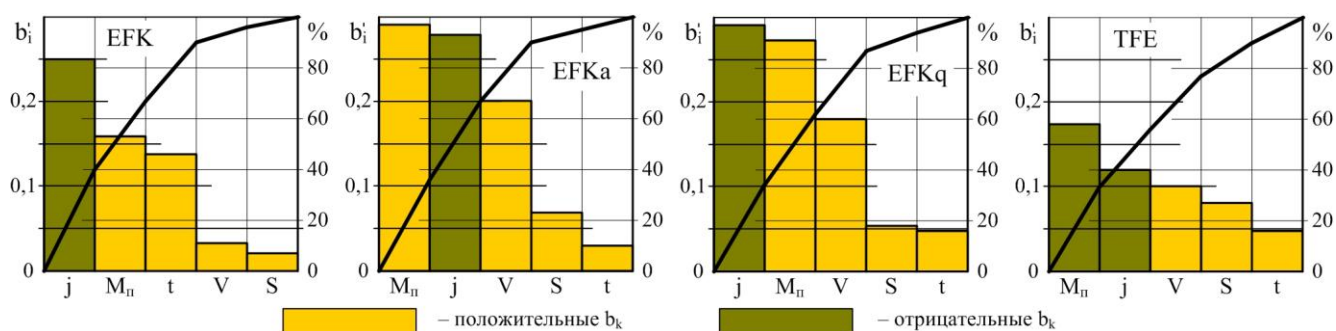


Рисунок 5.25 – Анализ Парето степени влияния управляющих факторов на формирование параметров отклонений от круглости точением композитом 10 с последующим нанесением мягкой приработочной плёнки

При оценке влияние на изменение параметров отклонений от круглости алмазного выглаживания строились физико-статистические модели с учетом управляющих факторов процесса АВ – силы Q_{AB} , и скорости V_{AB} обработки и подачи инструмента S_{AB} .

Анализ круглограмм на рисунке 5.24 показывает, что алмазное выглаживание поверхностей с МПП позволяет снизить параметры отклонений от круглости.

Так как АВ осуществляется инструментом упругого действия, то в режимах технологической устойчивости ТС погрешности формы обрабатываемой поверхности копируются (глава 4, п. 4.2.2). Если АВ проводится в режимах технологической неустойчивости процесса с возможностью отрыва индентора от обрабатываемой поверхности и последующим контактом с выступающими областями профиля, то значения параметров отклонений от круглости снижаются (рисунок 5.24 в–г, д–е).

Следовательно, при АВ осуществляется трансформация уже сформированных на этапах точения композитом 10 и нанесения МПП отклонений от круглости силовым воздействием индентора при неустойчивом процессе обработки.

На рисунке 5.26 для наглядности представлен пример совмещения круглограммы поверхности, обработанной точением композитом с последующим МПП, с круглограммой поверхности после АВ, на котором видно, что при АВ происхо-

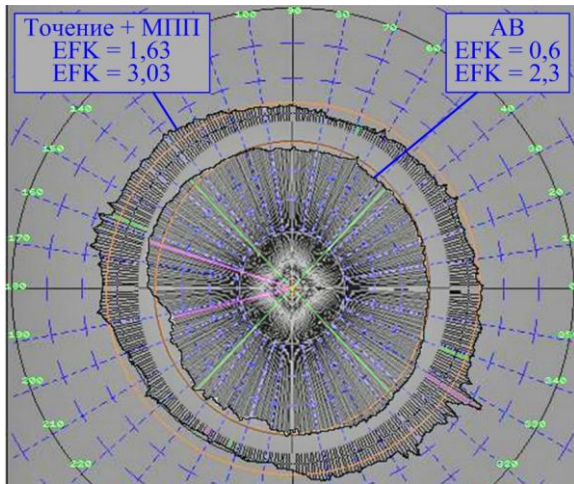


Рисунок 5.26 – Круглограммы поверхностей после обработки точением с нанесением МПП и после АВ

дит сглаживание резко выступающих отклонений при сохранении общего контура сечения.

Оценить степень влияния управляющих факторов АВ на трансформацию отклонений от круглости можно с помощью коэффициента, определяемого по зависимости:

$$K_i = F_{ABi} / F_{T+MППi} \quad (5.9)$$

где F_{ABi} – значение параметра отклонения от круглости после алмазного выглаживания; $F_{T+MППi}$ – значение параметра отклонения от круглости после точения композитом 10 с последующим нанесением МПП.

Для соответствующих отклонений от круглости коэффициенты имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} K_{EFK} &= \frac{EFK_{AB}}{EFK_{T+MПП}}; & K_{EFKa} &= \frac{EFKa_{AB}}{EFKa_{T+MПП}}; \\ K_{EFKq} &= \frac{EFKq_{AB}}{EFKq_{T+MПП}}; & K_{TFE} &= \frac{TFE_{AB}}{TFE_{T+MПП}}. \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

Средние экспериментальные значения коэффициентов (5.10) представлены в приложении 12.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены модели:

$$\left. \begin{aligned} K_{EFK} &= 0,46 \frac{V_{AB}^{0,15}}{Q_{AB}^{0,19} S_{AB}^{0,33}}; & K_{EFKa} &= 14,6 \frac{S_{AB}^{0,02}}{Q_{AB}^{0,04} V_{AB}^{0,63}}; \\ K_{EFKq} &= \frac{2,33}{Q_{AB}^{0,14} V_{AB}^{0,17} S_{AB}^{0,16}}; & K_{TFE} &= \frac{7,1}{Q_{AB}^{0,13} V_{AB}^{0,47} S_{AB}^{0,26}}. \end{aligned} \right\} \quad (5.11)$$

Полученные модели являются адекватными, так как при критическом значении критерия Фишера $F = 6,04$ расчётные значения для моделей (5.11) составляют $F_{EFK} = 2,6$; $F_{EFKa} = 5,7$; $F_{EFKq} = 3,0$; $F_{TFE} = 5,4$.

Модели получены для ОФП экспериментов, проводимых по условиям, указанным в приложении 9 и обеспечивающих следующие предельные интервалы коэффициентов: $K_{EFK} = 0,56 - 0,95$; $K_{EFKa} = 0,58 - 0,81$; $K_{EFKq} = 0,64 - 0,91$; $K_{TFE} = 0,65 - 1,1$.

На рисунке 5.27 представлены результаты оценки параметрической надёжности обеспечения параметров отклонений от круглости F_{EFK} и F_{EFKa} после точения композитом 10 и нанесения МПП (кривая 1) и после последующего АВ (кривая 2).

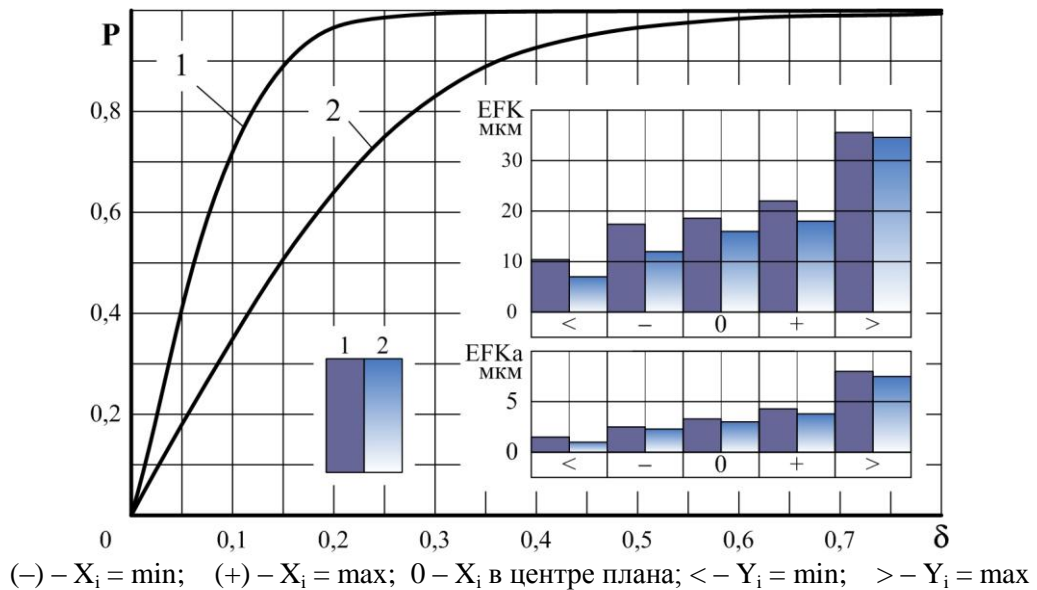


Рисунок 5.27 – Вероятности технологического обеспечения параметров отклонений от круглости F_{EFK} и F_{EFKa} и интервалы их значений: 1 – после точения композитом 10 и нанесения мягкой приработочной плёнки; 2 – после АВ

Здесь же показаны интервалы значений F_{EFK} и F_{EFKa} , формируемых в различных точках ОФП, после точения композитом 10 и нанесения МПП и после последующего АВ (кривая 2).

На рисунке 5.28 в виде диаграмм Парето представлен анализ влияния управляющих факторов АВ на коэффициенты (5.10).

На коэффициенты K_{EFKa} , K_{EFKq} и K_{TFE} наибольшее влияние на их значение оказывает скорость V_{AB} . Характер влияния отрицательный, то есть с повышением скорости АВ значения коэффициентов снижаются, а, следовательно, снижаются значения параметров отклонений от круглости.

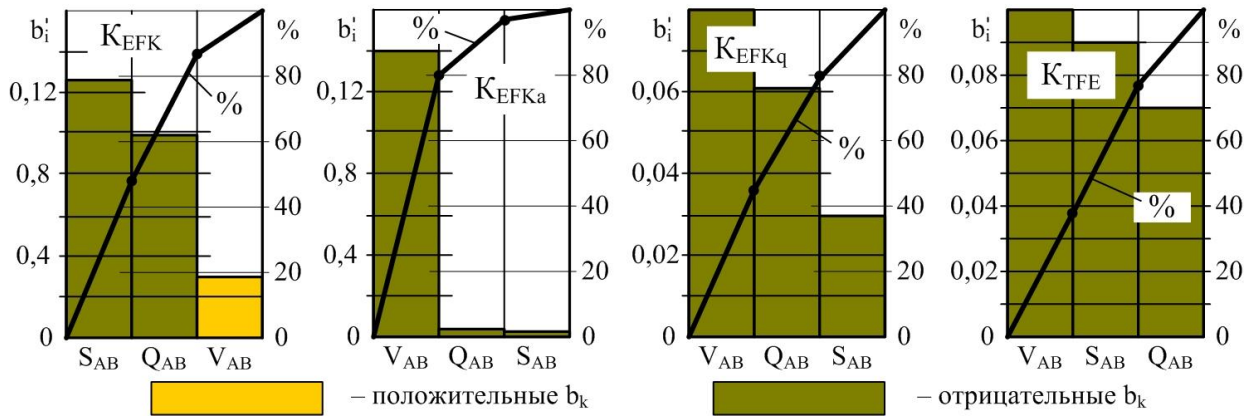


Рисунок 5.28 – Диаграммы Парето влияния факторов АВ на коэффициенты снижения параметров отклонений от круглости, полученных после точения и нанесения МПП

Таким образом, АВ инструментом упругого действия для уменьшения отклонений от круглости поверхности необходимо проводить с режимами технологической неустойчивости ТС, когда скорость выглаживания превышает допустимые значения, определяемые условиями (4.85), (4.87), (4.88) (рисунок 4.21).

5.3. Выводы к пятой главе

В пятой главе представлены результаты исследований, на основе которых разработаны модели формирования параметров качества поверхностей деталей машин в процессе обработки и определены методом имитационного моделирования показатели параметрической надёжности рассматриваемых технологических систем по параметрам шероховатости и отклонений от круглости обрабатываемых поверхностей, что соответствует задачам 6 и 7 достижения целей исследований, поставленных в главе 1.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что между параметрами шероховатости имеют место тесные корреляционные связи для всех исследуемых ТС. При увеличении значимости коэффициента корреляции r теснота связей снижается, причём для алмазного выглаживания это снижение более интенсивное. Так, при $r = 0,9$ для ТС торцевого фрезерования композитом 10 в графе корреляционных связей параметров шероховатости имеется одна изолированная вершина (b), а для ТС торцевого фрезеро-

вания композитом 10 с последующим АВ – пять вершин (b , v , ρ , Δ , ΔH).

2. Анализ микрофотографий поверхностей образцов из чугуна, обработанных алмазным выглаживанием, показал, что на увеличение их сплошности оказывают снижение значений параметров шероховатости поверхности, полученных на предварительных этапах обработки, и увеличение силы алмазного выглаживания

3. На основе статистического моделирования получены адекватные модели формирования параметров шероховатости в ТС обработки 1) плоских поверхностей деталей из чугуна торцевым фрезерованием композитом 10 и торцевым фрезерованием композитом 10 с последующим АВ; 2) цилиндрических поверхностей деталей из стали 45 точением композитом 10 с последующим нанесением мягких прирабочных плёнок и алмазным выглаживанием на каждом из трех этапов. Для каждой ТС были определены факторы обработки, оказывающие наибольшее влияние на формирование параметров шероховатости и отклонений от круглости.

4. Установлено, что надёжность ТС обеспечения различных параметров шероховатости поверхностей изменяется в широких пределах. Так, для высотных параметров в диапазоне отклонений $\delta = 0,2$ вероятность их обеспечения изменяется в пределах: а) для торцевого фрезерования композитом 10 от 0,45 для R_p до 0,88 для R_z ; б) для торцевого фрезерования композитом 10 с последующим АВ от 0,53 для R_p до 0,72 для R_a ; в) для точения композитом 10 цилиндрических поверхностей от 0,52 для R_{max} до 0,65 для R_p ; г) для АВ после точения композитом 10 и нанесения мягких прирабочных плёнок от 0,83 для R_a и R_p до 0,95 для R_z и R_{max} .

5. Величина остаточной деформации ΔH поверхности, обработанной АВ после торцевого фрезерования композитом 10 изменяется в пределах от 4,3 до 65,5 мкм и может превышать величину R_{max} поверхности до обработки АВ, что объясняется вытеснением графитовых включений из поверхностного слоя детали.

6. Созданы базы данных по коэффициентам моделей формирования параметров шероховатости и их статистическим характеристикам, а также по надёжности технологического обеспечения параметров шероховатости для исследуемых ТС.

7. Установлено, что при обработке цилиндрических поверхностей алмазным выглаживанием прирабочная плёнка из мягких материалов не удаляется с поверхности во всем диапазоне значений факторов обработки ($Q = 100 \dots 300$ Н; $V = 65 \dots 100$ м/мин, $S = 0,075 \dots 0,15$ мм/об).

8. Уменьшение исходной величины отклонений от круглости в процессе обработки точением композитом 10 с нанесением МПП и последующим алмазным выглаживанием инструментом упругого действия подтверждает теоретические выводы о технологической устойчивости процессов ППД, изложенных в главе 4.

ГЛАВА 6. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СОЕДИНЕНИЙ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ И ПУТИ ЕЁ ПОВЫШЕНИЯ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

6.1. Технологическое обеспечение триботехнических характеристик поверхностей цилиндрических деталей соединений трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой

Решение поставленных задач связано с рассмотрением вопросов формирования триботехнических характеристик функциональных поверхностей в процессе приработки цилиндрических деталей в соединениях трения скольжения «Сталь 45 (HRC 48...50) – бронза ОЦС 5-5-5 или антифрикционный чугун АЧС-1».

Исследовалось влияние условий формирования триботехнических свойств поверхностей деталей, обработанных методом ФАБО, технологические особенности которой рассмотрены в 5 главе. Выбор материалов исследуемых материалов и технология антифрикционной обработки обоснованы в п. 3.1.2.

Требовалось установить взаимосвязь параметров триботехнических параметров поверхностей деталей с факторами обработки на этапах ФАБО, к которым относятся режимы чистового точения композитом $10 V, S, t$; жёсткость j ТС; вид материал мягкой приработочной пленки M_n ; режимы АВ Q_{AB}, V_{AB}, S_{AB} .

В качестве факторов, определяющих процессы износа поверхностей деталей (трибоэлементов) в соединениях трения скольжения, установлены:

- V_c – скорость относительного скольжения поверхностей трибоэлементов, м/мин;
- P – величина номинальной погонной нагрузки на трибосопряжение в процессе приработки, Н/мм;
- ΔP – интервал изменения значения номинальной погонной нагрузки на трибосопряжение в процессе приработки при моделировании динамических усло-

вий эксплуатации, %;

– $M_{\text{вкл}}$ – материал вкладыша.

Таким образом, в исследуемой триботехнической системе учитываются двенадцать управляющих факторов.

Матрица планирования в виде регулярной дробной реплики типа 2^{12-8} (приложение 13) представляет собой комплексный план исследований по схеме активного эксперимента рассматриваемой триботехнологической системы, включающей трёхступенчатую антифрикционную обработку (ФАБО) (рисунок 3.6) и факторы процесса приработки.

При кодировании фактора материал вкладыша X_9 , присваивался условный код 5,0 для бронзы ОЦС 5-5-5, условный код 2,0 для антифрикционного чугуна АЧС-1.

Эксперименты проводились на установке, схема которой представлена на рисунке 3.10.

Для определения параметрической надёжности исследуемой ТС требуется построить физико-статистические модели формирования триботехнических характеристик, к которым относятся:

- 1) f_1, f_0 – коэффициенты трения в начале и в конце приработки;
- 2) h_{01}, h_{02} – величины начального износа поверхностей вала и вкладыша, мкм;
- 3) L_{01}, L_{02} – пути приработки для вала и вкладыша, м;
- 4) I_1, I_0 – интенсивности изнашивания поверхностей вала и вкладыша.

Так как в процессе проводимых экспериментов вал вращается, а вкладыш неподвижен длины пути приработки поверхностей вала и вкладыша отличаются. Зазор в соединении определяет вид контакта поверхностей трибоэлементов, характеризующийся дугой. Так как вкладыш неподвижен, то точки дуги контакта его поверхности постоянно трутся о поверхность подвижного вала, а каждая точка трущейся поверхности вала входит в дугу контакта и выходят из неё периодически. Следовательно, путь трения дуги контакта поверхности вкладыша пути трения поверхности вала. Чем больше зазор в сопряжении, тем больше эта разница.

В работе решается вопрос оценки степени влияния управляющих факторов процесса приработки поверхностей деталей на формирование эксплуатационных параметров шероховатости, влияющей, в свою очередь, на эксплуатационные показатели соединений трения скольжения при дальнейшей нормальной эксплуатации.

Также решался вопрос сохранения МПП на поверхности вала после приработки.

На рисунке 6.1 и в приложении 14 представлены микрофотографии поверхностей вала с гистограммами и профилями яркости, на которых по цветовым оттенкам видно, что мягкая прирабочная плёнка на поверхности, обработанной АВ в процессе ФАБО (рисунок 5.21), сохраняется в конце приработки вала (рисунок 6.1 в). Это является положительным фактом, так как для мягкой прирабочной плёнки её «живучесть» или время удержания на поверхности трибоэлемента является важным фактором.

Сохранение плёнки на поверхности происходит независимо от значений управляющих факторов исследуемой ТС и параметров шероховатости вала и вкладыша до и после приработки (рисунок 6.1 а).

Гистограммы распределения яркостей топографии участков поверхностей на фотографиях рисунка 6.1 и приложения 14 носят дискретный характер. Это связано с характером распределения МПП по поверхности микропрофиля – на вершинах толщина слоя пленки меньше и они на гистограмме яркости имеют светлый тон. Тон впадин, в которые переносится материал пленки более темный.

Во впадинах микропрофиля процессе после АВ распределяется большая часть материала МПП и в процессе приработки и эксплуатации вала с вкладышем впадины являются ее «поставщиками» на другие участки трущейся поверхности.

Также анализ микрофотографий (рисунок 6.1) показывает, что после приработки топография поверхности вала принимает более упорядоченный характер. Это связано с кинематикой процесса приработки, обусловленной многократным прохождением контактирующих поверхностей вала и вкладыша относительно друг друга.

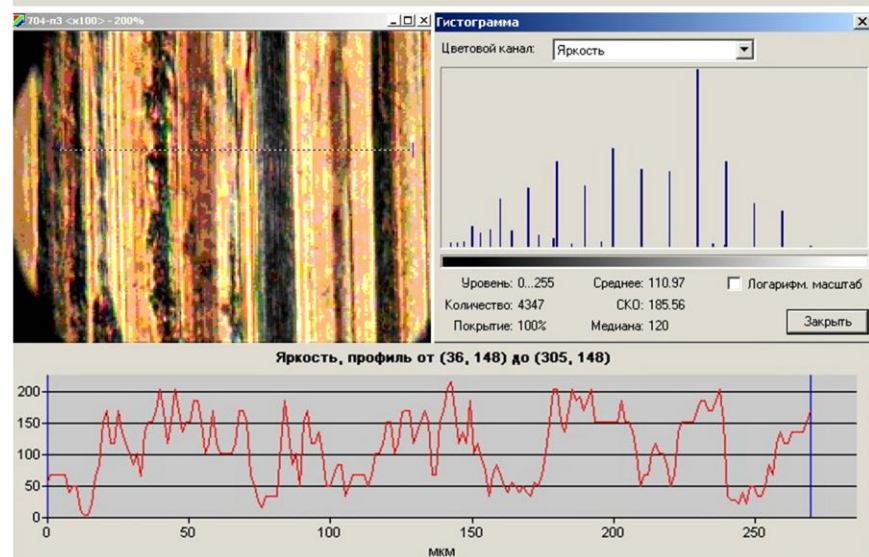
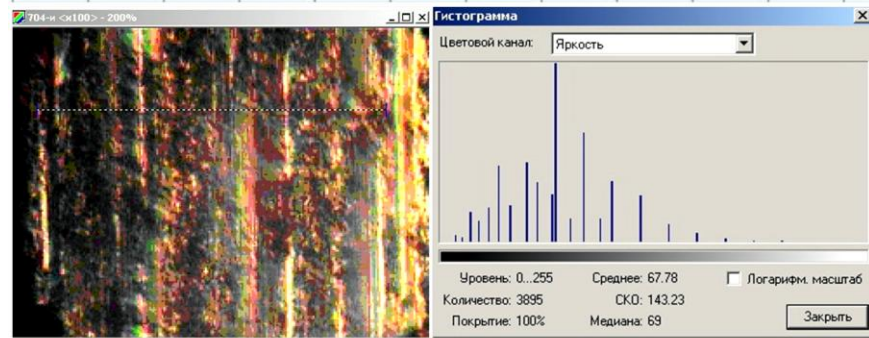
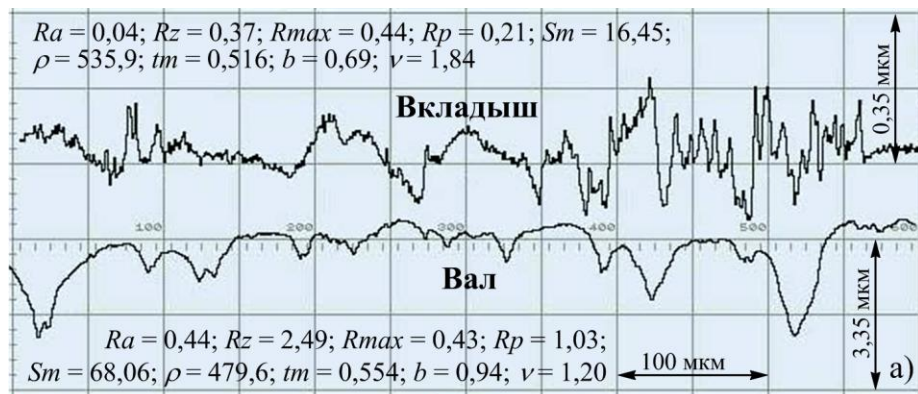


Рисунок 6.1 – Результаты анализа поверхностей трибоэлементов (опыт № 4 плана эксперимента, приложение 14): а – профилограммы поверхностей вала и вкладыша после приработки; б, в – гистограммы, профили яркости и микрофотографии поверхности вала до приработки (б) и после приработки (в) ($V_{np} = 50$ м/мин; $P_{np} = 30$ Н/мм; $\Delta P = \pm 15\%$)

На рисунке 6.2 представлены типовые фрагменты осциллограмм (опыт № 14, в соответствии с приложением 13) зависимости силы трения F_0 от нагрузки P для пары трения, анализ которых говорит о том, что коэффициент трения f , про-

порциональный F_0 , также зависит от величины нагрузки, от скорости относительного скольжения V_c и от пути приработки.

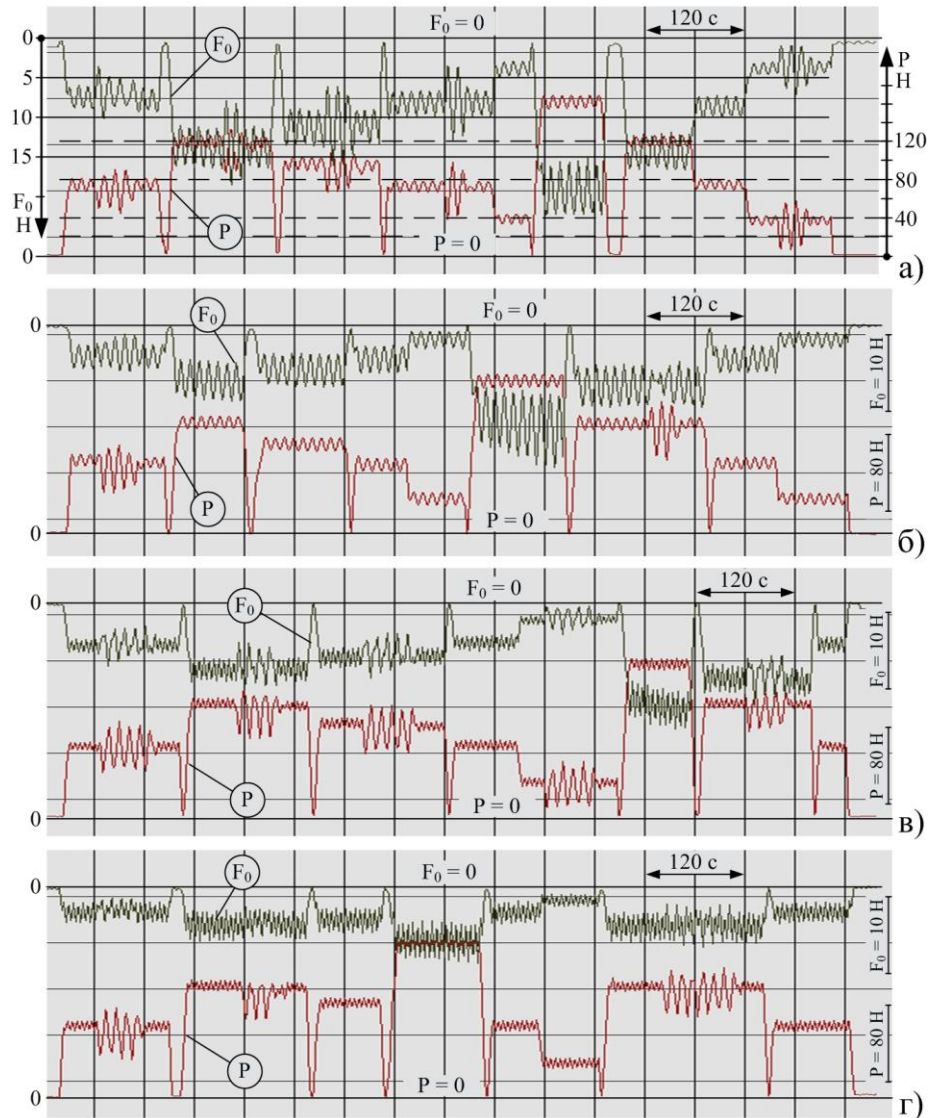


Рисунок 6.2 – Типовые фрагменты осциллограмм зависимости силы трения F_0 от нагрузки P для пары трения: а – в начале приработки, $V_c = 18$ м/мин; б – в конце приработки, $V_c = 18$ м/мин; в – в начале приработки, $V_c = 90$ м/мин; г – в конце приработки, $V_c = 90$ м/мин

Результаты экспериментов, представленные на рисунке 6.3, показывают, что величина коэффициента f снижается с ростом скорости V_c относительного скольжения, она больше в начале процесса приработки и снижается к концу, причем интенсивность уменьшения значения f в начале приработки меньше, а в конце приработки увеличивается.

Например, при нагрузке $P = 50$ Н/мм (рисунок 6.3) в процессе приработке для скорости $V_c = 10$ м/мин коэффициент трения снижается в 1,07 раза, а для ско-

рости $V_c = 90$ м/мин от снижается в 1,83 раза. Таким образом, в процессе приработки коэффициент f снижается с 0,088 до 0,048. Такое изменение наблюдается и при других значениях номинальной погонной нагрузки P на сопряжение.

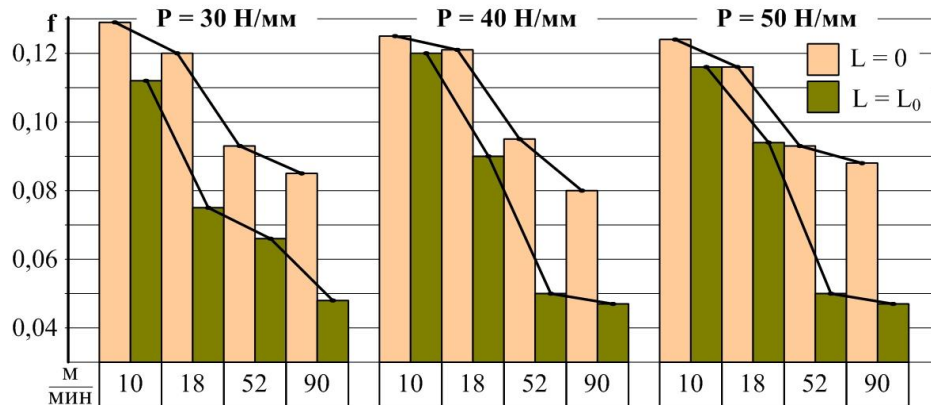


Рисунок 6.3 – Величина коэффициента трения f при изменении скорости относительного скольжения V_c для различных величин нагрузки на сопряжение P в начале ($L = 0$) и в конце ($L = L_0$) процесса приработки (опыт № 12 плана эксперимента, приложение 13)

На рисунке 6.4 и в приложении 15 представлены графики зависимости линейного износа h_{01} поверхностей валов значения коэффициента трения f от длины пути трения L_{01} . Здесь же указаны границы для 80 % доверительных интервалов.

На микрофотографиях поверхностей валов до и после приработки (рисунок 6.4) по цветовым оттенкам видно, что мягкая приработочная плёнка сохраняется на поверхности после завершения процесса приработки при всех условиях эксперимента (приложение 13).

Начальные точки коэффициента трения на графиках соответствуют моменту их первой регистрации, то есть начале пути приработке при $L = 0$ значения f принимает близкое к зарегистрированному, а не стремится к бесконечности, как это кажется по графику (рисунок 6.4).

На рисунке 6.5 представлены графики зависимостей линейного износа h_{02} поверхностей вкладышей и температуры t в зоне контакта поверхностей вала и вкладыша от пути L_{02} трения для различных опытов плана эксперимента (приложение 13).

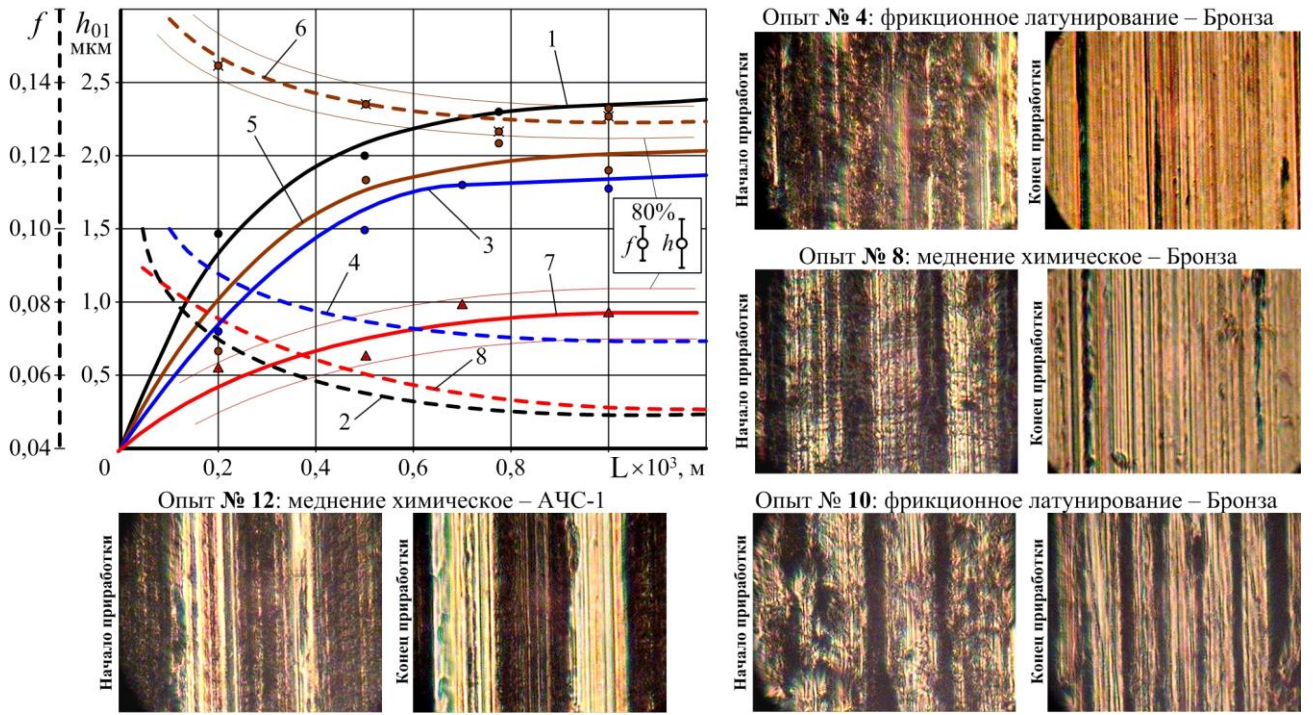


Рисунок 6.4 – Графики зависимости линейного износа h_{01} валов (1, 3, 5, 7) и коэффициента трения f (2, 4, 6, 8) от длины пути трения L_{01} для опытов эксперимента (приложение 13) и микрофотографии поверхностей трения валов в начале и конце приработки: кривые 1, 2 – опыт № 4; кривые 3, 4 – опыт № 8; кривые 5, 6 – опыт № 10; кривые 7, 8 – опыт № 12

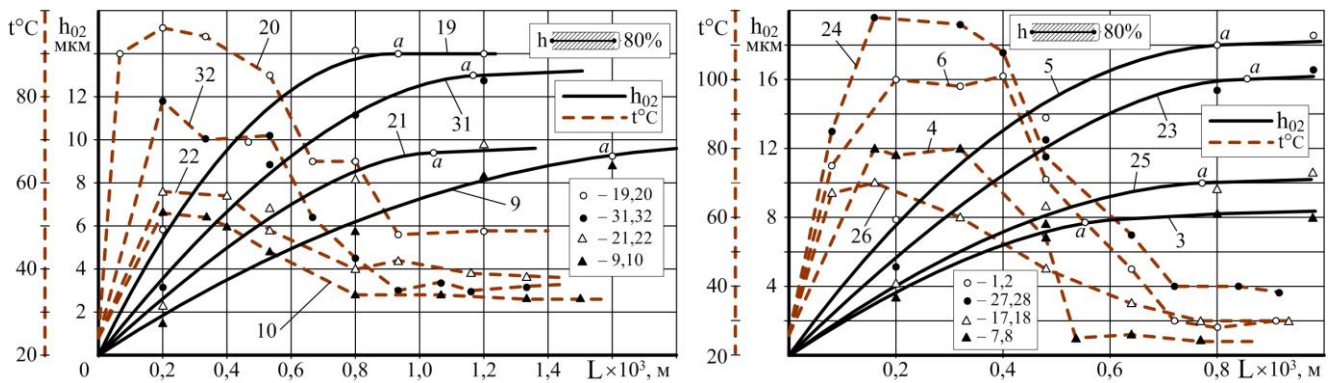


Рисунок 6.5 – Графики зависимостей линейного износа h_{02} вкладышей h (3, 5, 9, 19, 21, 31, 23, 25) и температуры t в зоне контакта вала и вкладыша (4, 6, 10, 20, 22, 24, 26, 32) от пути трения L_{02} для опытов эксперимента (приложение 13): 9, 10 – опыт № 3; 19, 20 – опыт № 5; 21, 22 – опыт № 7; 31, 32 – опыт № 14; 3, 4 – опыт № 8; 5, 6 – опыт № 10; 23, 24 – опыт № 09; 25, 26 – опыт № 15; точка a – завершение процесса приработки

Кривые линейного износа поверхностей валов и вкладышей на графиках рисунков 6.4 и 6.5 аппроксимируются параболической зависимостью $h = \alpha L^\beta$ (мкм), где α и β – коэффициенты параболической аппроксимации, которые можно определить методом наименьших квадратов.

Температура в зоне контакта поверхностей вала и вкладыша в процессе

приработки изменяется от комнатной до максимальной, которая в зависимости от условий эксперимента колеблется в пределах 58...120 °С.

6.2. Параметрическая надёжность триботехнологической системы по триботехническим характеристикам поверхностей деталей соединений трения скольжения

После обработки экспериментальных данных построены адекватные физико-статистические модели формирования триботехнических характеристик:

$$Y_i = b_0 K_1 K_2 V^{b_1} S^{b_2} t^{b_3} j^{b_4} Q_{AB}^{b_6} S_{AB}^{b_7} V_{AB}^{b_8} V_c^{b_{10}} P^{b_{11}} \Delta P^{b_{12}}, \quad (6.1)$$

где Y_i – i -ая триботехническая характеристика; K_1 , – коэффициенты, учитывающие способ формирования МПП на поверхности трибоэлемента; K_2 – материал вкладыша; b_k – коэффициенты модели.

В таблице 6.1 представлены коэффициенты моделей (6.1) и расчётные значения критерия Фишера $F_{расч}$.

Таблица 6.1 – Параметры моделей формирования триботехнических характеристик

Ко-эфф.	b_0	K_1		K_2		b_1	b_2	b_3	b_4	b_6	b_7	b_8	b_{10}	b_{11}	b_{12}	$F_{расч}$
		ЛФ	МХ	Бр	АЧС											
f_1	2,0	1,31	1,10	1,11	1,05	-0,06	0,04	-0,05	0,02	-0,07	0,47	-0,05	-0,32	-0,09	–	1,3
f_0	2,82	1,64	1,20	0,92	0,96	0,03	0,20	0,19	0,11	-0,14	0,28	-0,03	-0,35	0,03	0,62	0,5
h_{01}	3,74	1,20	1,07	1,23	1,09	0,31	0,15	0,02	0,04	-0,38	0,32	0,68	0,05	0,74	-0,19	5,6
h_{02}	8,08	1,10	1,04	1,28	1,11	0,07	0,27	0,09	-0,07	-0,16	-0,04	0,05	0,04	0,10	-0,40	4,7
$I_1 \times 10^{-12}$	316	1,77	1,23	0,87	0,94	0,08	0,22	0,21	0,13	-0,17	0,43	-0,05	-0,43	-0,10	0,76	2,8
$I_2 \times 10^{-11}$	147	1,80	1,24	0,94	0,97	0,08	0,22	0,14	0,14	-0,13	0,25	-0,06	-0,4	0,02	0,64	2,1

Так как табличное значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ $F_{табл} = 6,59$, то полученные модели адекватны.

В приложении 16 представлены средние экспериментальные значения триботехнических характеристик, формируемых в триботехнической системе.

На рисунке 6.6 представлены результаты анализа Парето и ранжирования управляющих факторов триботехнологической системы по степени влияния на триботехнические характеристики f_1, f_0, h_{01} поверхностей деталей соединений.

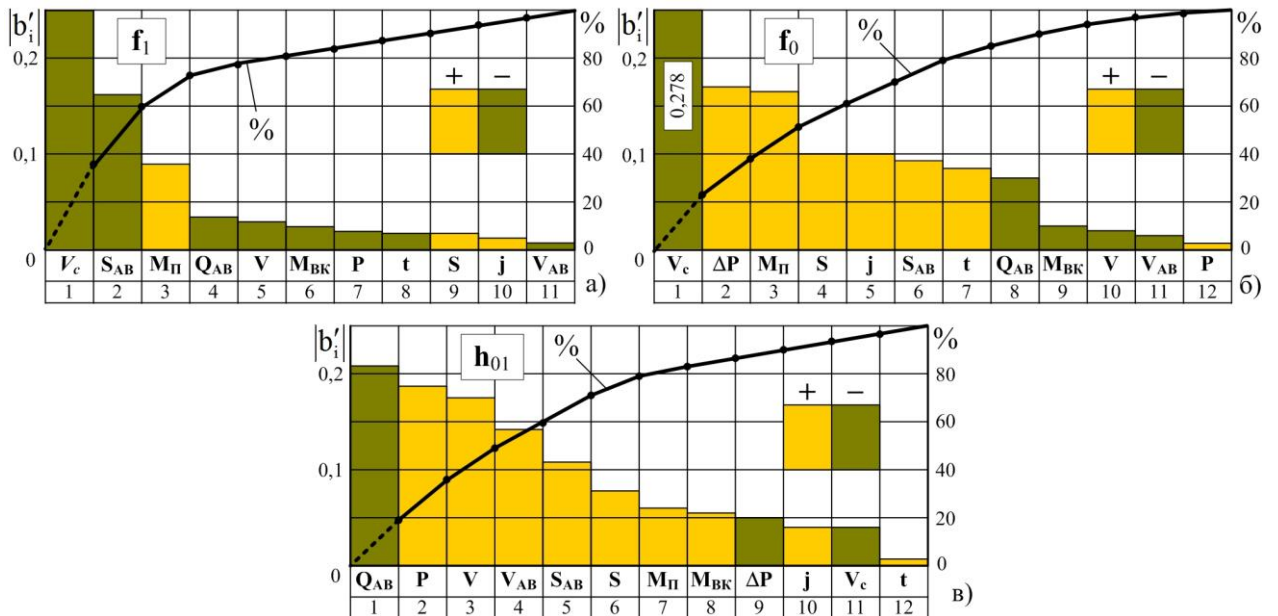


Рисунок 6.6 – Диаграммы Парето степени влияния управляющих факторов триботехнологической системы на формирование: а – коэффициента трения f_1 поверхностей в начале приработки; б – коэффициента трения f_0 поверхностей в конце приработки; в – величину начального износа поверхности вала h_{01}

По результатам анализа Парето можно сделать следующие выводы.

На износ поверхности вала наибольшее влияние на износ поверхности вала оказывают режимы АВ Q_{AB}, V_{AB}, S_{AB} , скорость V точения композитом 10 на этапе чистовой обработки, и величина погонной нагрузки на сопряжение.

Для снижения коэффициентов трения f_1 и f_0 процесс приработки следует вести с максимально допустимой скоростью относительного скольжения V_c .

Жёсткость j ТС точения композитом 10 поверхностей деталей оказывает положительное влияние на формирование триботехнических характеристик, то есть повышение j приводит к росту коэффициентов трения и износу поверхности, что является нежелательным.

Это объясняется тем, что обработка деталей в ТС с высокой жёсткостью позволяет обеспечить характеристики качества поверхности выше, чем требуется условиями эксплуатации. Поэтому процесс приработки должен снижать уровни

этих характеристик до эксплуатационных значений.

При изготовлении деталей обычно требуется обеспечивать сразу целый комплекс эксплуатационных характеристик соединения.

Анализ показал, что в исследуемой триботехнологической системе обеспечить требуемые значения всех триботехнических характеристик статистически невозможно, так как управляющие факторы оказывают на исследуемые характеристики несогласованное влияние.

Согласованность влияния можно оценить, рассчитав коэффициент ранговой конкордации ω , который при полном согласованном влиянии факторов равен единице. Оценить статистическую значимость коэффициента ω можно через критерий χ^2 . Если $\chi^2_{расч} > \chi^2_{табл}$ коэффициент конкордации значим.

Результаты оценки согласованности влияния факторов ТС на формирование различных групп триботехнических характеристик представлены на рисунке 6.7.

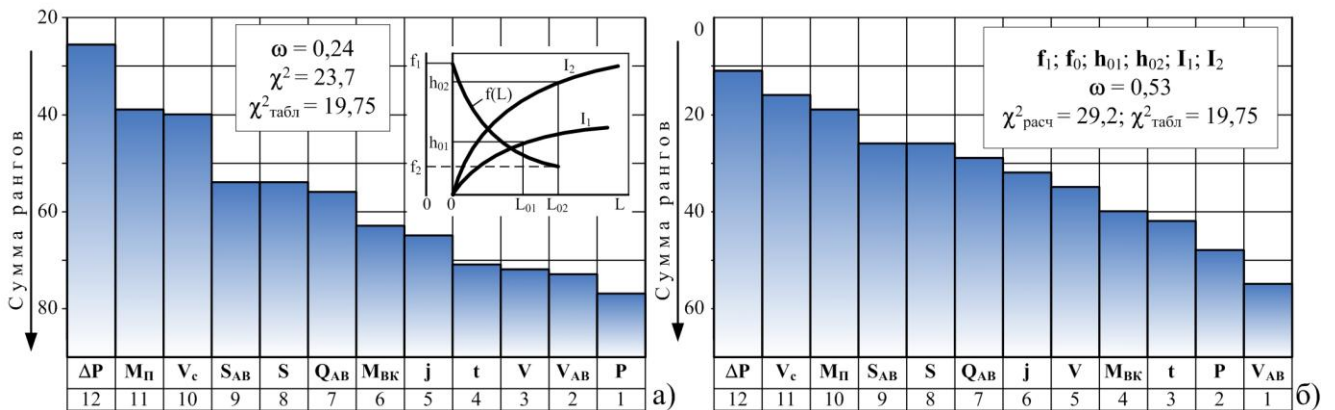


Рисунок 6.7 – Диаграммы рангов управляющих факторов триботехнологической системы, обеспечивающих комплекс триботехнических характеристик:

а – $f_1, f_0, h_{01}, + h_{02}, L_{01}, L_{02}, I_1, I_2$; б – $f_1, f_0, h_{01}, h_{02}, I_1, I_2$

Ранжирование на рисунке 6.7а показывает при оценке влияния управляющих факторов системы на исследуемые характеристики коэффициент конкордации $\omega = 0,24$ при $\chi^2_{расч.} = 23,7$ ($\chi^2_{табл.} = 19,75$). То есть обеспечение всего комплекса триботехнических характеристик будет среднестатистически малоэффективным. Если уменьшить число управляемых характеристик в общем комплексе (рисунок 6.7б), то коэффициент ранговой конкордации $\omega = 0,53$ при $\chi^2_{расч} = 29,2$.

Следовательно, можно обеспечить комплекс рассматриваемых триботехнических характеристик за счёт факторов исследуемой триботехнологической системы.

На рисунке 6.10 представлены результаты расчётов вероятности формирования триботехнических характеристик для центра ОФП исследований в триботехнологической системе, а также интервалы их обеспечения при заданных ограничениях значений управляющих факторов (приложение 13).

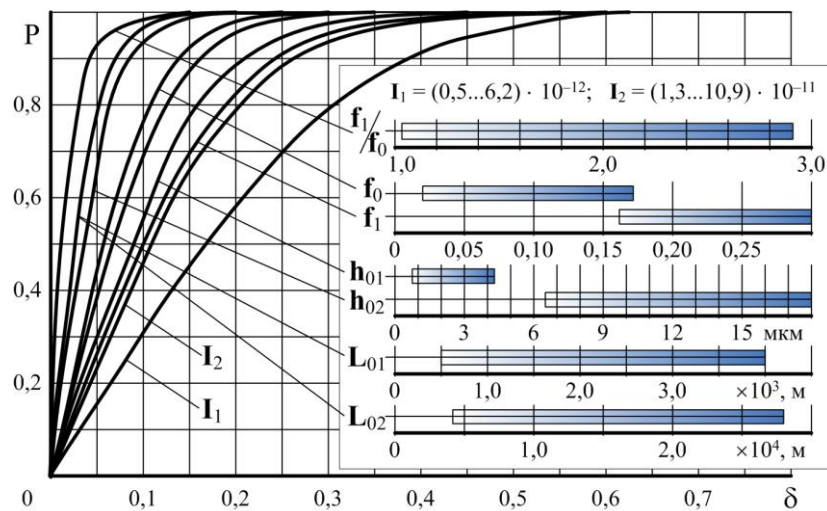


Рисунок 6.8 – Вероятность технологического обеспечения триботехнических характеристик в зависимости от величины δ в триботехнологической системе и диаграмма их варьирования

С наибольшей вероятностью обеспечивается отношение f_1/f_0 , с наименьшей – интенсивности износа I_1 и I_2 . Высокую вероятность обеспечения имеет коэффициент трения после приработки при $\delta = 0,1$ $P = 0,76$.

Несмотря на то, что интенсивности изнашивания поверхностей вала и вкладыша I_1 и I_2 обеспечиваются с самой низкой вероятностью, их абсолютное значение мало и, в соответствии с рекомендациями [36] исследуемые соединения относятся к парам трения скольжения с высоким классом износостойкости.

Делить влияние управляющих факторов на формирование триботехнических характеристик по технологическим или эксплуатационным признакам считается нецелесообразным, так как триботехнологическая система исследуется как единая ТС.

К настоящее время применяют сравнительно много технологических методов обеспечения и повышения триботехнических характеристик соединений деталей машин [114, 116, 235]. В таблице 6.2 представлены краткие характеристики некоторых из них. Для каждого метода указывается коэффициент повышения износостойкости, изменяемый в пределах от 1,2 до 16.

Самый высокий коэффициент обеспечивается технологией плазменного напыления (8, 9, таблица 6.2), применяемая из-за своей специфики в ограниченных условиях. Ряд методов требует подвода дополнительной энергии (5...10, 12, 13), что вызывает нагрев детали.

Таблица 6.2 – Технологические методы повышения износостойкости поверхностей

№ п. п.	Методы обработки	Характеристика метода обработки поверхности							Коэффициент повышения износостойкости
		Поверхности		Необходимость дополнительной обработки	Специальная подготовка поверхностей	Низкая стойкость инструмента	Нагрев детали до высокой температуры	Подвод дополнительной энергии	
		Цилиндрические	Плоские						
1	Оптимизация режимов лезвийной обработки	+	+						1,2
2	ППД шариками и роликами	+	+						2 – 3
3	Алмазное выглаживание	+							1,5
4	Алмазное выглаживание поверхностей с хромовыми покрытиями	+							1,3
5	ЭМО выглаживанием	+				+	+	+	3 – 4
6	ЭМО обкаткой (жёсткий режим)	+				+	+	+	3,2
7	ЭМО обкаткой (финишная)	+						+	1,4 – 2
8	Плазменное напыление при нормальных температурах	+	+	+			+	+	4 – 9
9	Плазменное напыление при повышенных температурах	+	+	+			+	+	4 – 16
10	Плазменное напыление молибдена	+	+	+			+	+	1,5 – 2
11	Нанесение МПП	+			+				1,6 – 2
12	Лазерная импульсная обработка	+	+					+	5
13	Нанесение покрытий КИБ				+			+	3 – 5

Наиболее простыми по возможности реализации с наименьшими затратами являются методы ППД (2, 3, 4) и нанесение приработочных медесодержащих плёнок методом ФАБО (11, таблица 6.2).

Кроме указанных методов возможно применение их комбинаций, например, исследуемый в работе метод на основе применения точения композитом 10, ФАБО и последующего АВ. Конечно, существует множества альтернатив этому виду комбинации методов, например, комбинированная обработка на основе нанесения покрытий (нитриды титана др.) методом катодно-ионной бомбардировки в вакууме (КИБ) и обработки ППД и др.

Исследуемая в работе комбинированная технологическая система имеет ряд технологических преимуществ:

- рассматриваемая технология реализуется без использования дорогостоящего технологического оборудования;
- для нанесения покрытий не требуется специальной обработки и подготовки обрабатываемой поверхности;
- отсутствует воздействие повышенных температур на обрабатываемые поверхности, и как следствие, отсутствует коробление;
- на размеры обрабатываемой детали отсутствуют ограничения.

Рассматриваемая в работе комбинированная технология, включающая три операции $1 + 11 + 3$ (таблица 6.2), предполагает повысить износостойкость с коэффициентом $K_{nu} = 1,2 \cdot (1,6 \dots 2) \cdot 1,5 = 2,88 \dots 3,6$.

Предлагаемая технология рекомендуется для обработки охватываемых поверхностей трибоэлементов в подшипниках скольжения, то есть деталей тел вращения типа валов, стержней с наружной цилиндрической поверхностью, входящих в подкласс 715000 классификатора деталей ЕСКД.

6.3. Формирование микрорельефов на поверхностях деталей поверхностным пластическим деформированием программным способом

В рамках задач, решение которых способствует достижению поставленных целей исследований (гл. 1), рассматриваются особенности и расширенная классификация микрорельефов, реализуемых при обработке в ТС с компьютерными системами ЧПУ, включающая как традиционные [319, 320, 321], так и новые типы микрорельефов, получение которых традиционными способами невозможно (квазирегулярные, с переменной плотностью, интенсивностью и др.). Представлены алгоритмические модели формирования ряда конкретных микрорельефов.

Решаются вопросы компьютерного моделирования топографии поверхностей деталей при нанесении микрорельефов методом ППД программным способом. Анализируются их преимущества и области применения.

6.3.1. Классификация микрорельефов, получаемых методом поверхностного пластического деформирования программным способом

Технологии нанесения различных микрорельефов или систем канавок на поверхности обрабатываемых деталей являются распространенными и эффективными методами повышения эксплуатационных свойств (износостойкости и контактной жёсткости), маслоёмкости поверхностей деталей машин, декоративной обработки [154, 155, 319, 320, 321].

Наряду с целым рядом преимуществ этот метод в случае реализации его на универсальном оборудовании имеет ряд недостатков:

- реализация метода требует наличия сложной технологической оснастки, обеспечивающей требуемую кинематику движения индентора инструмента;
- необходимо обеспечивать постоянные значения основных параметров микрорельефа поверхности, определяемых кинематикой обработки;
- могут возникать резонансные явления на поверхности детали в процессе

трения скольжения;

– невозможность управления показателями качества поверхности и параметрами микрорельефа в процессе обработки.

Устранить указанные недостатки позволит применение станков с компьютерными системами ЧПУ, что позволит развить существующие технологии формирования поверхностей трения с высокими эксплуатационными характеристиками нанесением на них различных микрорельефов.

Предлагаемый метод технологического обеспечения микрорельефов основан на программировании траектории движения индентора обрабатывающего инструмента в ПК с последующей её отработкой программы и передачей ее в ЧПУ станка. Это позволит формировать микрорельефы различных по конфигурации типов и топографических характеристик, с разной степенью и глубиной упрочнения поверхностного слоя детали.

Такой подход позволяет расширить классификацию микрорельефов.

Типы микрорельефов могут быть синусоидальными и несинусоидальными.

Синусоидальный микрорельеф может быть регулярным, квазирегулярным, стохастическим (рисунок 6.9). Квазирегулярный и стохастический микрорельеф могут быть обеспечены только на станках с ЧПУ.

Регулярный синусоидальный микрорельеф формируется по синусоидальной траектории с постоянными параметрами по всей длине обрабатываемой поверхности.

Если параметры траектории изменяются по известному закону, то обеспечивается квазирегулярный микрорельеф, в частности микрорельеф с амплитудной модуляцией, когда амплитуда модулируется по синусоидальной зависимости координаты обработки.

Для стохастических микрорельефов характерно случайное значение отдельных параметров (период, амплитуда) или их комбинаций. В предлагаемой классификации различают три типа стохастического микрорельефа:

– А-стохастический, когда случайной является величина амплитуды, изменяющаяся для каждого периода;

- Т-стохастический, когда случайной величиной является период синусоиды, изменяющейся по длине обработки;
- АТ-стохастический, когда амплитуда и период синусоиды являются одновременно случайными величинами.

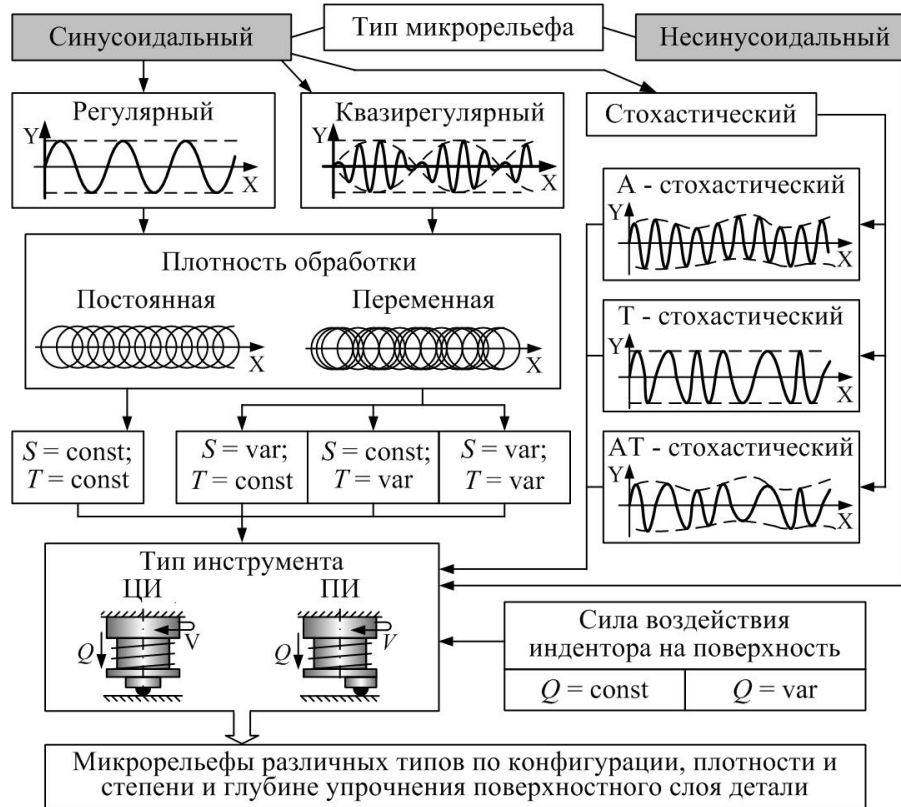


Рисунок 6.9 – Типы микрорельефов, реализуемые методом ППД программным способом

Несинусоидальные микрорельефы формируются инструментом, центр которого движется по непрерывной траектории, которая имеет кусочно-линейное или непрерывное аналитическое описание, отличающееся от синусоиды.

В рамках предлагаемой классификации микрорельефов предусматривается формирование микрорельефов с постоянной или переменной плотностью обработки, что позволяет обеспечить изменение параметров качества поверхности по заданному закону, управлять степенью и глубиной наклёпа в пределах технологического перехода, при изменении силы ППД поверхности ($Q = Var$).

Различные типы микрорельефа обеспечиваются также за счёт применения инструментов с индентором, расположенным периферийно (ПИ), или с центральным индентором (ЦИ) (рисунок 6.9).

6.3.2. Модели траектории движения инструмента при реализации микрорельефов

Для обеспечения микрорельефов обработкой ППД программным способом необходимо разработать модели, основой которых являются аналитические уравнения траектории движения индентора инструмента ППД, учитывающие конструктивные, технологические и кинематические факторы

Сначала в системе координат обрабатываемой детали XOY рассчитывается координата движения центра индентора X_A, Y_A (точка А, рисунок 6.10).

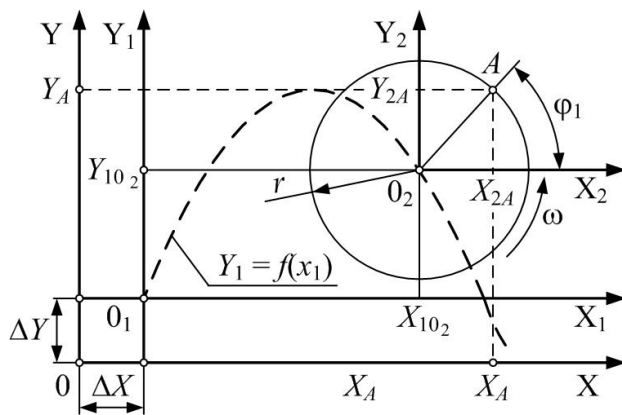


Рисунок 6.10 – Расчётная схема моделирования траектории движения индентора при формировании микрорельефа

Индентор совершает движение, получаемое в результате сложения движений индентора вокруг центра инструмента O_2 в системе координат $X_2O_2Y_2$, центра инструмента O_2 по зависимости $Y_1 = f(x_1)$ в системе координат $X_1O_1Y_1$ и центра O_1 в системе координат XOY .

Тогда система уравнений, описывающих синусоидальный микрорельеф, формируемый при обработке плоских поверхностей, определяется следующим образом:

$$\begin{cases} X_A = X_{10_2} + X_{2A} + \Delta X \\ Y_A = Y_{10_2} + Y_{2A} \end{cases}, \quad (6.2)$$

где X_{10_2}, Y_{10_2} определяются функцией $Y_1 = f(X_1)$;

ΔX – величина, определяемая технологическими параметрами ТС;

X_{2A}, Y_{2A} – координаты точки, движущейся с угловой скоростью ω по окружности с радиусом r :

$$\begin{cases} X_{2A} = r \cos(p \frac{2\pi}{T} X_1) \\ Y_{2A} = r \sin(p \frac{2\pi}{T} X_1) \end{cases}, \quad (6.3)$$

где P – число оборотов индентора вокруг точки O_2 за период T функции $Y_1 = f_1(x_1)$.

Процесс моделирования и реализации микрорельефов при обработке ППД на станках с компьютерными системами ЧПУ предусматривает три этапа: непосредственно моделирование, синтез управляющей программы и обработку с формированием микрорельефов.

На этапе моделирования необходимо определить исходные данные с целью получения микрорельефа с заданными параметрами.

В качестве исходных данных, позволяющих рассчитать программным способом траекторию движения индентора, формирующего регулярный синусоидальный микрорельеф, принимаются (рисунок 6.11):

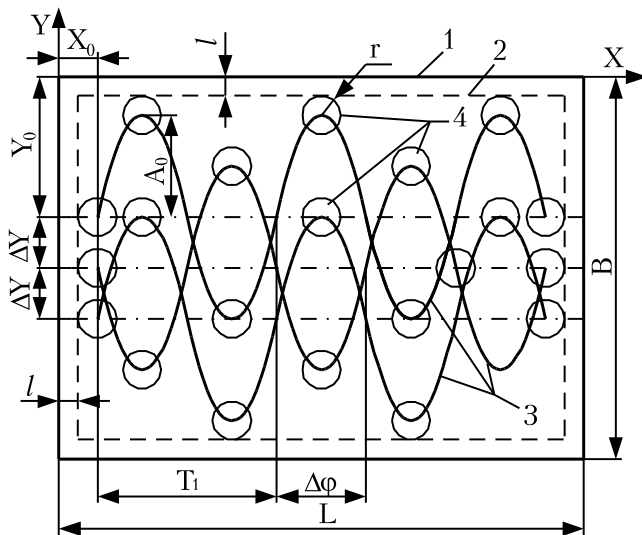


Рисунок 6.11 – Траектория движения индентора для формирования синусоидального регулярного микрорельефа

– l – величина, определяющая контур 2 фактически обрабатываемой поверхности;

– r – радиус вращения индентора относительно оси инструмента;

– N – число «дорожек» обработки;

– n – число полных периодов синусоиды на фактической длине обработки $L - 2l$;

– k – коэффициент перекрытия

«дорожек» обработки в долях размаха амплитуды синусоиды;

– $\Delta\varphi$ – величина фазового сдвига между двумя смежными «дорожками»;

– j – число интервалов интерполяции в пределах одного периода.

Остальные элементы траектории движения индентора рассчитываются по следующим зависимостям:

– амплитуда A_1 и период T_1 колебаний:

$$A_1 = \frac{B - 2(l + r)}{2(1 + R(N - 1))}, \quad T_1 = \frac{L - 2(l + r)}{n}; \quad (6.4)$$

– величины ΔY и ΔX :

$$\Delta Y = 2(i-1)kA_1 - (1-r+A_1), \quad i = 1, \bar{N}; \quad \Delta X = 1+r. \quad (6.5)$$

Уравнение траектории движения оси инструмента при формировании синусоидального регулярного микрорельефа:

$$Y_1 = A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{T_1} X_1 + (i-1)\Delta\varphi\right) + \Delta Y. \quad (6.6)$$

Микрорельеф будет формироваться следами обработки 3 или 4 (рисунок 6.10) в зависимости от конструкции инструмента – с центральным или периферийно расположенным относительно оси.

Квазирегулярный рельеф (рисунок 6.12) формируется при движения индентора по синусоидальной траектории 3, амплитуда которой модулируется также по синусоидальной зависимости (траектория 5). Такой микрорельеф невозможно реализовать традиционными методами вибронакатывания устройством ППД с «жесткой» кинематикой по методу проф. Ю. Г. Шнейдера.

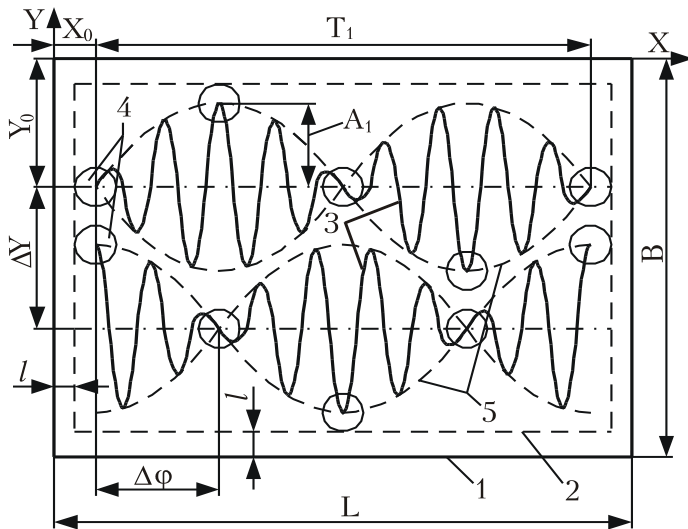


Рисунок 6.12 – Траектория движения индентора для формирования квазирегулярного микрорельефа

тора по синусоидальной траектории 3, амплитуда которой модулируется также по синусоидальной зависимости (траектория 5). Такой микрорельеф невозможно реализовать традиционными методами вибронакатывания устройством ППД с «жесткой» кинематикой по методу проф. Ю. Г. Шнейдера.

В качестве исходных данных, используемых при расчете

параметров синусоидального регулярного микрорельефа дополнительно используется коэффициент $k_1 = T_1 / T_2$, который показывает число периодов основной гармоники (траектория 3) в периоде огибающей синусоиды 5. Величина $\Delta\varphi$ на рисунке 6.12 характеризует фазовый сдвиг синусоид 5 при обработке смежных «дорожек».

Уравнение траектории движения оси инструмента при формировании квазирегулярного синусоидального микрорельефа:

$$Y_i = A \left(\sin\left(\frac{2\pi}{T_1} X_i + (i+1)\Delta\varphi\right) + \Delta Y \right) \sin\left(\frac{k_1 2\pi}{T_1} X_i\right). \quad (6.7)$$

Интерес представляют микрорельефы «Треугольник» и «Сота» (рисунок

6.13), относящихся к классу несинусоидальных микрорельефов, и формируемых инструментом, центр которого движется по непрерывной траектории с аналитически непрерывным или кусочно-линейным описанием.

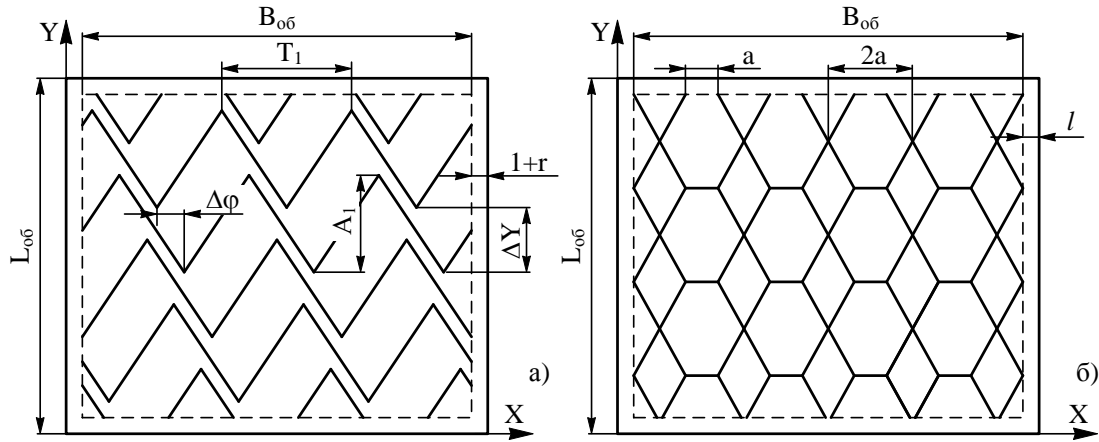


Рисунок 6.13 – Несинусоидальные микрорельефы: а – «Треугольник»; б – «Сота»

В качестве исходные данные для описания микрорельефа «Треугольник» используют те данные, что и для описания синусоидального регулярного микрорельефа, включая уравнения для расчета A_1 , T_1 , ΔY , ΔX (6.4 – 6.5). При определении траектории движения индентора в процессе приращения координаты X отыскиваются локальные экстремумы функции (6.6), затем между ними строится прямая.

Для формирования микрорельефа «Сота» рассчитывается площадь обработки, определяющая количество «ячеек». Используются следующие исходные данные (рисунок 6.13 б):

- $L_{об}$, $B_{об}$ – размеры поверхности обработки;
- l – технологическая длина фактического размера поверхности обработки;
- r – радиус вращения индентора;
- N_v – число ячеек по вертикали.

Зная ширину обрабатываемой поверхности $B_{об} = B - 2l - 2r$ и число ячеек N_v , определяется размер ячейки:

$$a = \frac{(L - 2l - 2r)}{2N_v}. \quad (6.8)$$

Число ячеек, которое можно разместить на фактической длине обработки:

$$N_H = \frac{L_{об}}{a\sqrt{3}}, \quad (6.9)$$

где $L_{об} = (L - 2l - 2r)$.

Число N_H округляется в меньшую сторону до целого числа.

Затем организуется цикл, состоящий из перемещений инструмента в пределах одной ячейки профиля и повторяющийся требуемое число раз в зависимости от числа ячеек по горизонтали и вертикали.

При формировании микрорельефов методами ППД программным способом управлять физико-механическими свойствами поверхности можно изменяя значение силы воздействия индентора инструмента на обрабатываемую поверхность или значение подачи инструмента по заданному закону в пределах технологического перехода. Такая обработка позволяет обеспечить износостойкость детали с изменяющимися по площади поверхности показателями, определяемыми из условий эксплуатации узла трения, что обеспечит равномерность величины износа или других ЭС по всей длине поверхности детали.

Программный метод обработки позволяет реализовать качественно новый тип микрорельефов – стохастические микрорельефы. В этом случае значения амплитуд A и A_1 в зависимостях (6.6), (6.7) являются случайными величинами с требуемым законом распределения:

$$A = \text{random}(A_0, A_{max}). \quad (6.10)$$

Значение A_{max} определяется по зависимости (6.6), A_0 задается при проектировании микрорельефа. Значения амплитуд в интервале A_0, A_{max} генерируются программным путём в соответствии с заданным законом распределения с использованием процедуры формирования квазислучайных чисел.

Также случайным образом изменяют и другие параметры микрорельефа.

6.3.3. Формирование микрорельефов методом поверхностного пластического деформирования программным способом

Эффективным при проектировании топографической структуры микрорелье-

ефа поверхности является метод компьютерного моделирования, на основе программного обеспечения, позволяющего построить по исходным данным топографию поверхности с микрорельефом и определить необходимые параметры траектории индентора при обработке ППД.

Несмотря на то, что каждый тип микрорельефа рассчитывается по характерному алгоритму, существует общий принцип работы программ для расчёта и моделирования топографии поверхностей с микрорельефами.

Топография поверхности детали определяется траекторией движения индентора инструмента в процессе обработки.

Если для формирования микрорельефов применяется инструмент с центрально расположенным индентором, то программируется базовая траектория движения центра инструмента.

Если индентор расположен в инструменте периферийно, то траектория его движения является суммой базовой траектории движения центра вращения инструмента и собственной траектории индентора (окружность радиуса r).

На рисунке 6.14 представлена блок-схема работы программы моделирования микрорельефа.

В начале работы вводятся, необходимые для расчёта траектории движения индентора данные. Общими для различных микрорельефов являются размеры де-

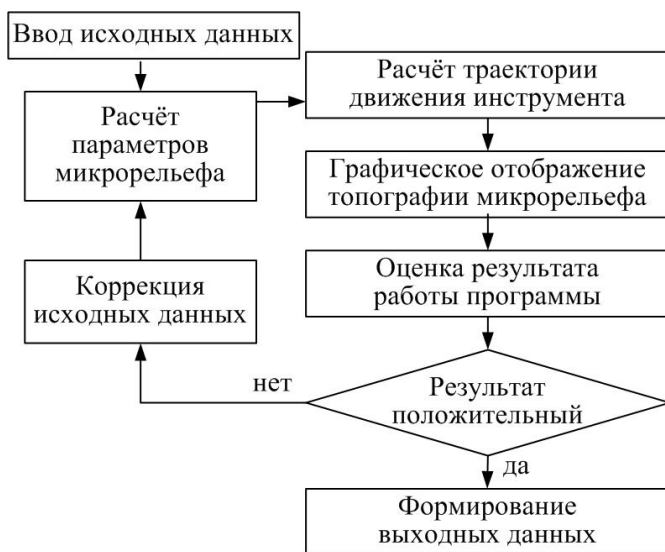


Рисунок 6.14 – Блок-схема работы программы моделирования микрорельефа

тали, технологическая величина l , определяющая фактическую площадь обработки поверхности, радиус вращения индентора r . Дополнительно вводятся значения рабочей и ускоренной подач и величина отвода инструмента при ускоренном перемещении.

Затем смоделированная топография микрорельефа визуализируется и рассчитываются координаты тра-

ектории движения индентора.

Разработаны программы расчёта следующих типов траекторий движения индентора:

- 1) «Меандр» и «Синусоида» для обработки плоских поверхностей;
- 2) «Синусоида», «Спираль Архимеда» для обработки плоских фланцевых поверхностей в форме кольца.

При работе программы «Меандр» кроме величин L , B , l , r в качестве исходных данных вводятся:

- N – число базовых траекторий движения индентора (число «дорожек»);
- n – число оборотов индентора на всей длине обработки ($L - 2l$), об.

Частота вращения шпинделя n_1 при этом определяется по зависимости:

$$n_1 = \frac{n S_{мин}}{L - 2l},$$

где $S_{мин}$ – минутная подача по оси X рабочего органа станка, мм/мин.

Исходными данными при моделировании траектории «Синусоида» (рисунок 6.15 б, в), наряду с величинами L , B , l , N и радиуса вращения индентора указывают:

- коэффициент k_{over} перекрытия амплитуд базовой траектории;
- величину сдвига фазы f_1 синусоиды базовой траектории при обработке следующей «дорожки»;
- коэффициент $ka1$ амплитудной модуляции синусоиды базовой траектории;
- число $n1$ периодов синусоиды базовой траектории на длине обработки;
- величину сдвига $fa1$ фазы модуляции обрабатываемой «дорожки» относительно предыдущей;
- коэффициент $kt1$ вариации периода синусоиды базовой траектории с переменным периодом;
- угол $ft1$ сдвига фазы при вариации периода при частотной модуляции;
- число $n2$ оборотов вращения индентора за один период базовой траектории, об/пер;
- коэффициент $kt2$ вариации числа оборотов $n2$ за один период базовой тра-

ектории;

- число $nt2$ периодов вариации $n2$ за один период базовой траектории;
- величина $ft2$ сдвига фазы последующего периода вариации $n2$.

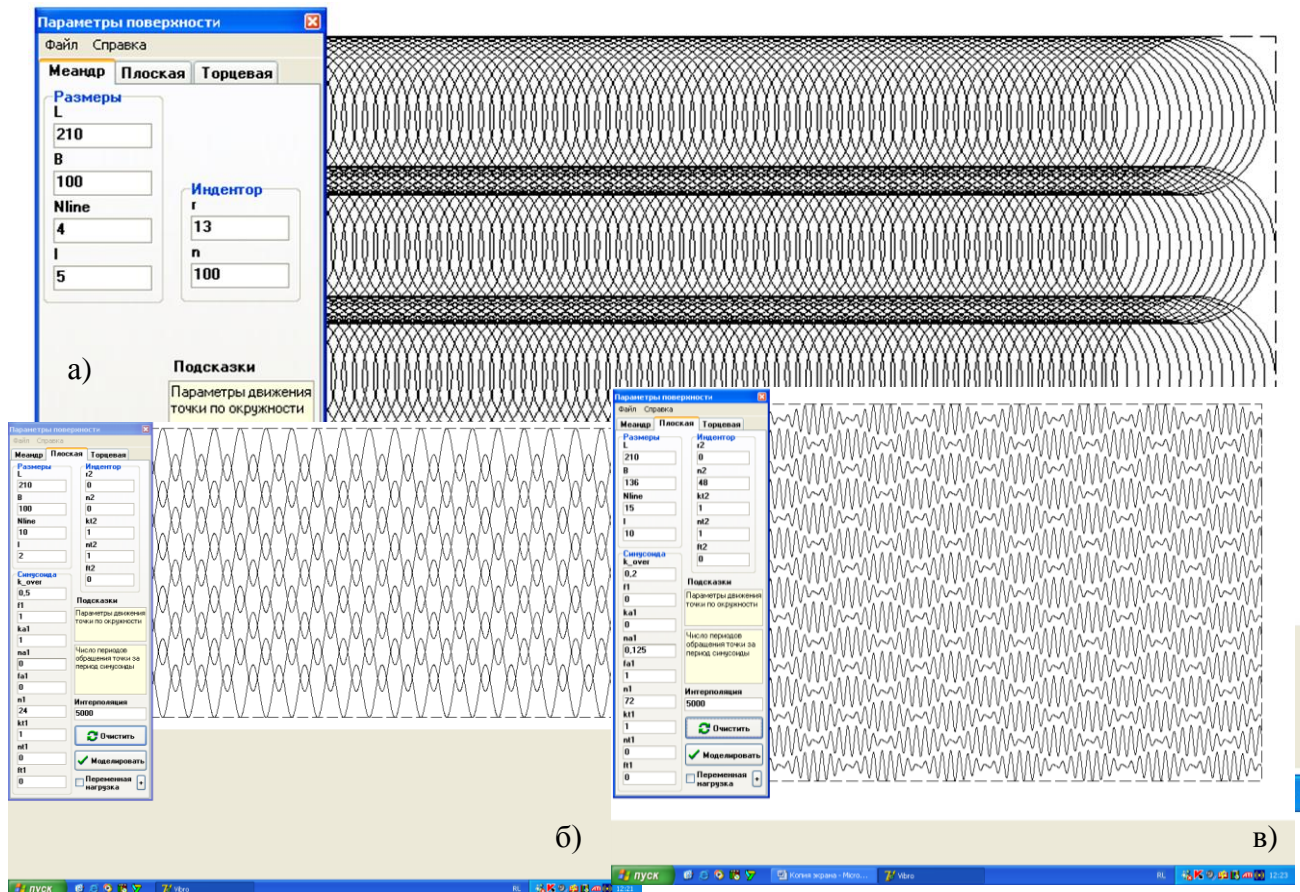


Рисунок 6.15 – Окна моделирования топографии поверхности при ППД с базовыми траекториями индентора: а – «Меандр»; б – «Синусоида» без амплитудной модуляции; в – «Синусоида» с модуляцией

Топография микрорельефа на рисунке 6.15б рассчитывается на основе уравнения (6.6), а топография на рисунке 6.14 в на основе уравнения (6.7).

При обработке торцевых поверхностей деталей с целью обеспечения герметичности фланцевых соединений рекомендуется формировать замкнутый микрорельеф.

Разработаны программы с использованием базовых траекторий «Синусоида» и «Спираль Архимеда» (рисунок 6.16) для формирования соответствующих микрорельефов на торцевых поверхностях.

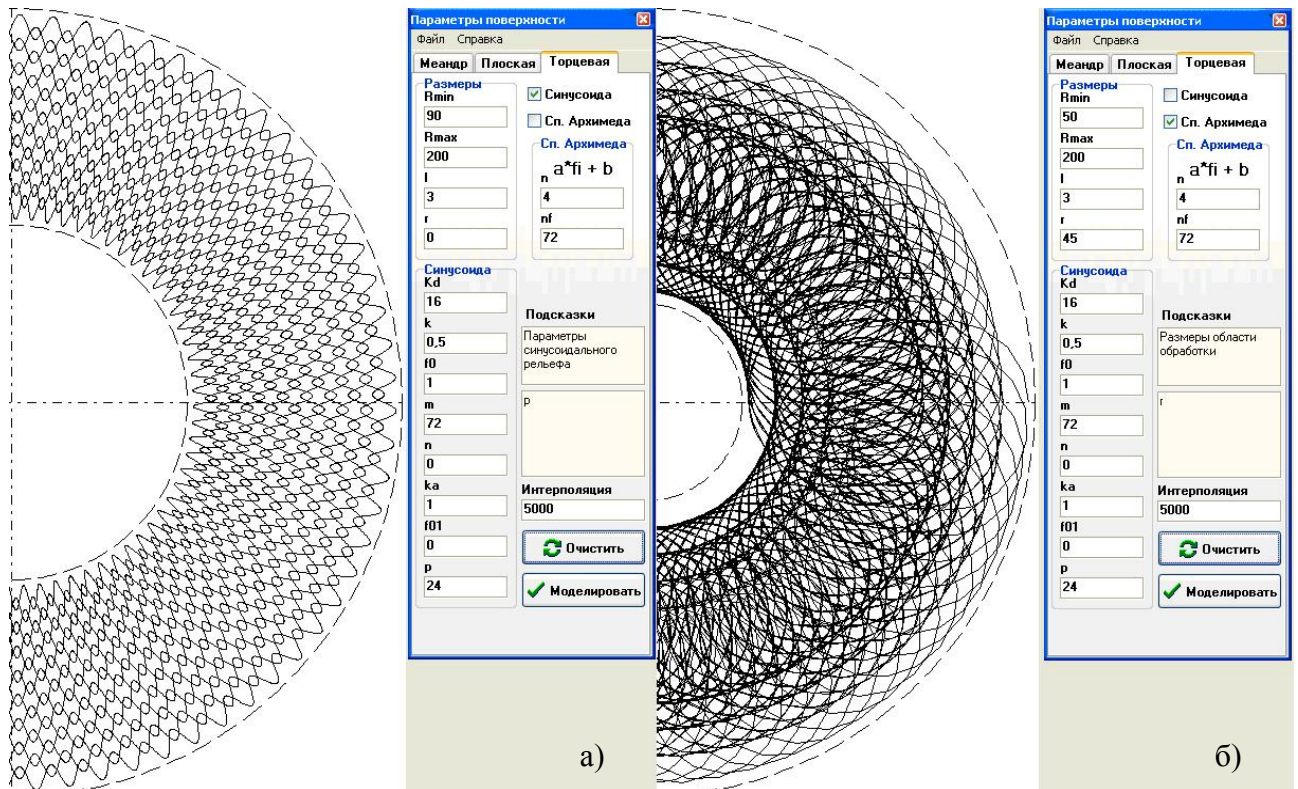


Рисунок 6.16 – Фрагменты окон моделирования топографии микрорельефов плоских поверхностей фланцев с использованием базовых траекторий:
 а – «Синусоида» ($r = 0$); б – «Спираль Архимеда» ($r > 0$)

В случае на рисунке 6.16а необходимы следующие исходные данные:

- минимальный $Rmin$ и максимальный $Rmax$ радиусы поверхности фланца;
- технологический размер l , определяющий минимальный $(Rmin + l)$ и максимальный $(Rmax - l)$ радиусы обрабатываемой поверхности;
- радиус r вращения индентора инструмента, мм;
- число Kd базовых траекторий в пределах обрабатываемой поверхности $(Rmax - Rmin - 2l)$;
- коэффициент k перекрытия амплитуд синусоид базовых траекторий;
- фазовый угол $f0$ смещения синусоиды траектории движения индентора относительно предыдущей синусоиды;
- число t периодов синусоид базовой траектории;
- число n периодов амплитудной модуляции синусоиды для одной базовой траектории;
- коэффициент ka перекрытия максимальных амплитуд модуляции;
- фазовый сдвиг $f01$ модулирующей синусоиды относительно предыдущей

базовой траектории;

– число оборотов p индентора по собственной траектории радиуса r за один период базовой траектории.

При моделировании топографии микрорельефа с использованием базовой траектории «Спираль Архимеда» (рисунок 6.16б) в качестве исходных данных, кроме величин R_{max} , R_{min} , r и l дополнительно задаются:

– число n полных витков спирали в пределах радиальной протяжённости обработки ($R_{max} - R_{min} - 2l$);

– число nf оборотов индентора от начала до конца базовой траектории.

Анализ результатов моделирования позволил получить практические выводы и рекомендации выбору топографии поверхности, формируемой ППД.

Микрорельеф по схеме «Меандр» (рисунок 6.17) может быть получен с различным числом дорожек обработки с различными коэффициентами перекрытия или за счет изменения радиуса собственной траектории индентора. Интенсивность обработки можно управлять тремя способами: изменяя число оборотов n индентора (рисунок 6.17 б, в), изменением подачи инструмента по базовой траектории и изменяя силу воздействия индентора на поверхность (перемещение инструмента упругого действия по оси Z).

Например, маслоёмкость поверхности на рисунке 6.17б будет выше, по сравнению, с поверхностью на рисунке 2.17а, так как число следов обработки в виде микроканалов кругового сечения больше.

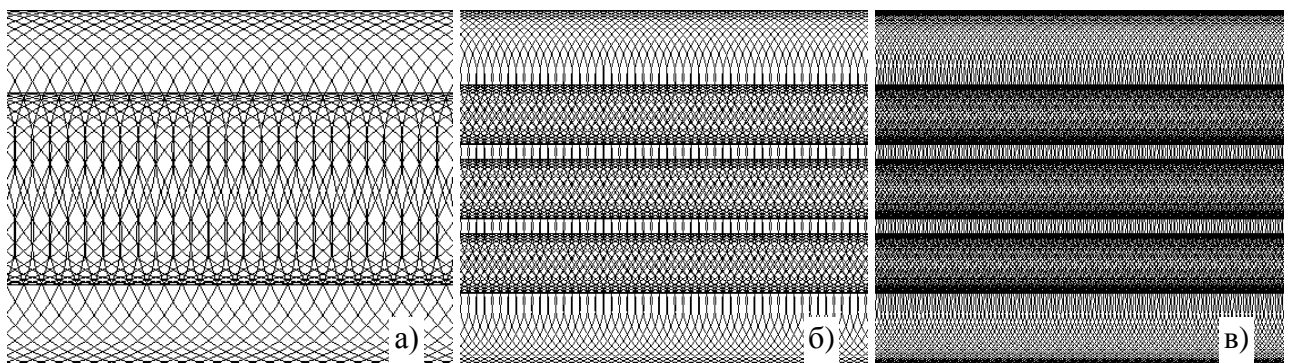


Рисунок 6.17 – Участки плоских поверхностей деталей, обработанных по схеме «Меандр», $L = 200$; $B = 100$; $l = 5$; $N = 4$: а – $r = 25$ мм; $n = 50$; б – $r = 15$ мм; $n = 100$; в – $r = 15$ мм; $n = 200$

Реализовать любые из возможных разновидностей микрорельефов, предложенных Ю. Г. Шнейдером [319], можно инструментом для ППД с центрально расположенным индентором с использованием в качестве базовой траектории синусоиды (рисунок 6.18а).

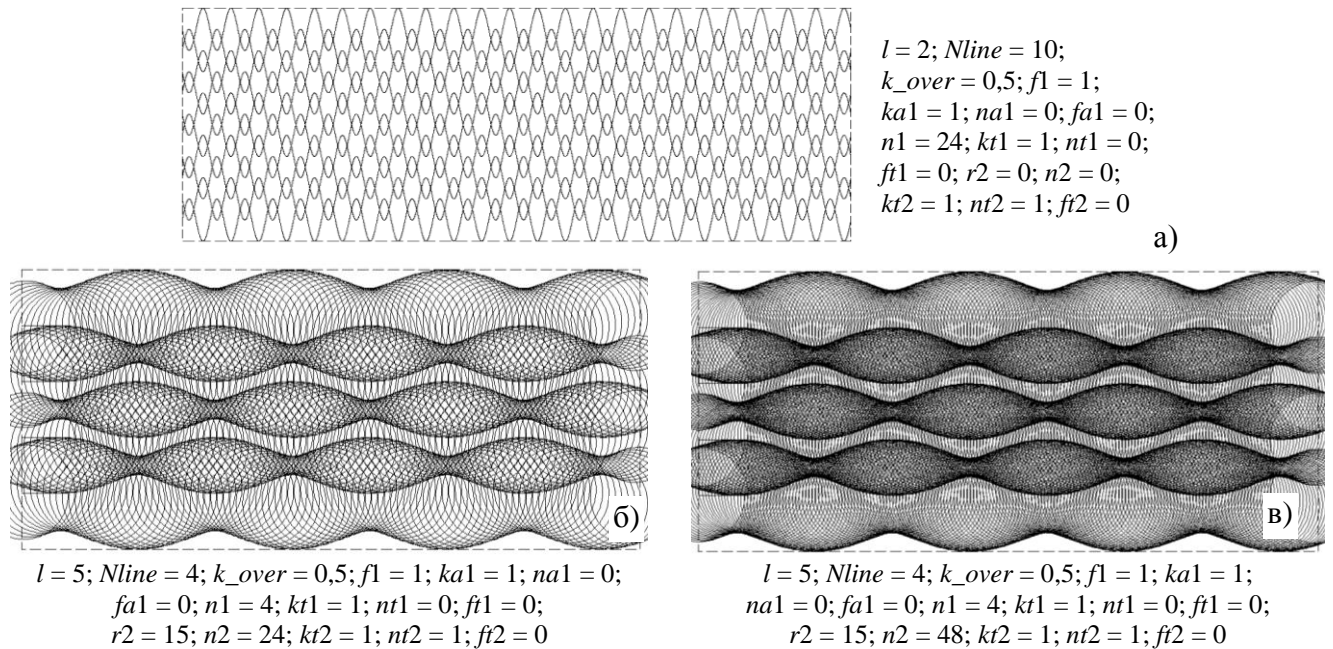


Рисунок 6.18 – Участки плоских поверхностей с микрорельефами, формируемыми по схеме «Синусоида» без амплитудной модуляции базовой траектории:

Применение инструмента с индентором, расположенным периферийно относительно оси, позволило получить микрорельефы, с повышенной интенсивностью воздействия на поверхность (рисунок 6.18б, в). При моделировании топографии этих поверхностей базовая траектория движения инструмента определялась как синусоида без амплитудной модуляции, а собственная траектория формировалась вращением индентора вокруг оси инструмента.

Новый класс квазирегулярных микрорельефов формируется при условии, если промодулировать по амплитуде синусоидой базовую траекторию движения инструмента. На рисунке 6.19 представлены примеры таких микрорельефов.

Они дают возможность гашения резонансных явлений на поверхностях деталей в процессе трения скольжения, которые могут быть инициируемы регулярными микрорельефами, например, в виде синусоиды или другой периодической кривой.

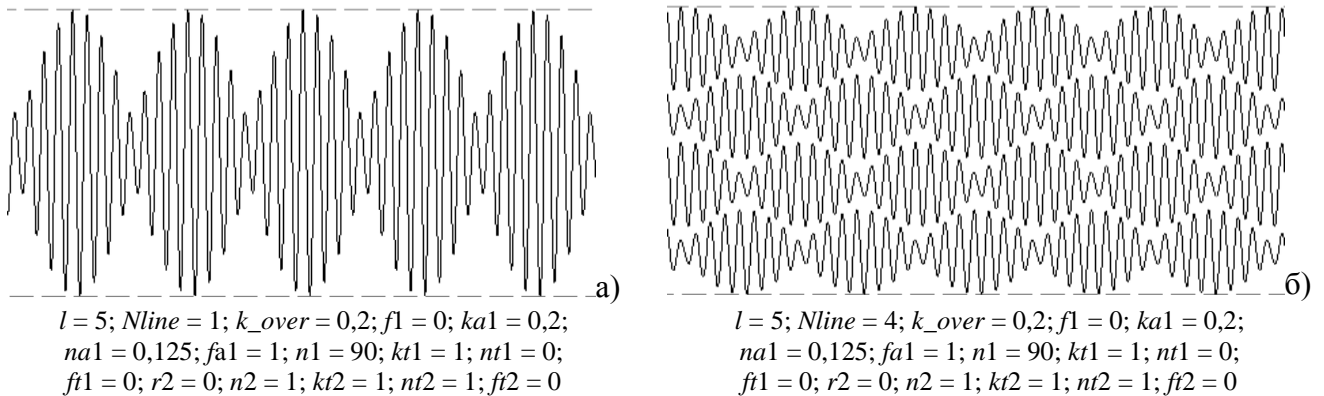


Рисунок 6.19 – Микрорельефы, формируемые с использованием в качестве базовой траектории синусоиды, промодулированной по амплитуде:
 а – 1 дорожка обработки; б – 4 дорожки обработки

В случае удовлетворительного моделирования топографии проектируемого микрорельефа поверхности сгенерированная программа обработки инструментом ППД упругого действия обеспечивает формирование микрорельефа на компьютеризированном станке с ЧПУ.

В приложении 17 представлен в качестве примера листинг программы «Синусоида», реализация которой предполагает обработку ППД плоских поверхностей деталей на станке FQW-400 с компьютеризированной системой ЧПУ типа CNC-H646.

Также разработаны программы обработки ППД с формированием микрорельефов на торцевых поверхностях деталей типа «Фланец».

На рисунке 6.20 представлены фотографии плоских поверхностей деталей с различными микрорельефами, полученными ППД на станке FQW-400 с компьютеризированной системой ЧПУ типа CNC-H646. Микрорельефы 1, 2, 3 получены ППД инструментом с центральным расположением индентора I и II, микрорельефы 4, 5 сформированы инструментом с периферийно расположенным индентором III.

На рисунке 6.21 представлены некоторые этапы формирования микропрофилей на плоских поверхностях деталей ППД программным способом. На рисунке 6.21а представлена покадровая визуализация движения индентора на экране монитора в процессе моделирования микропрофилей и общий вид процесса формирования микрорельефа инструментом упругого действия при алмазном выглажи-

вании плоской поверхности детали [280, 290, 294, 295].

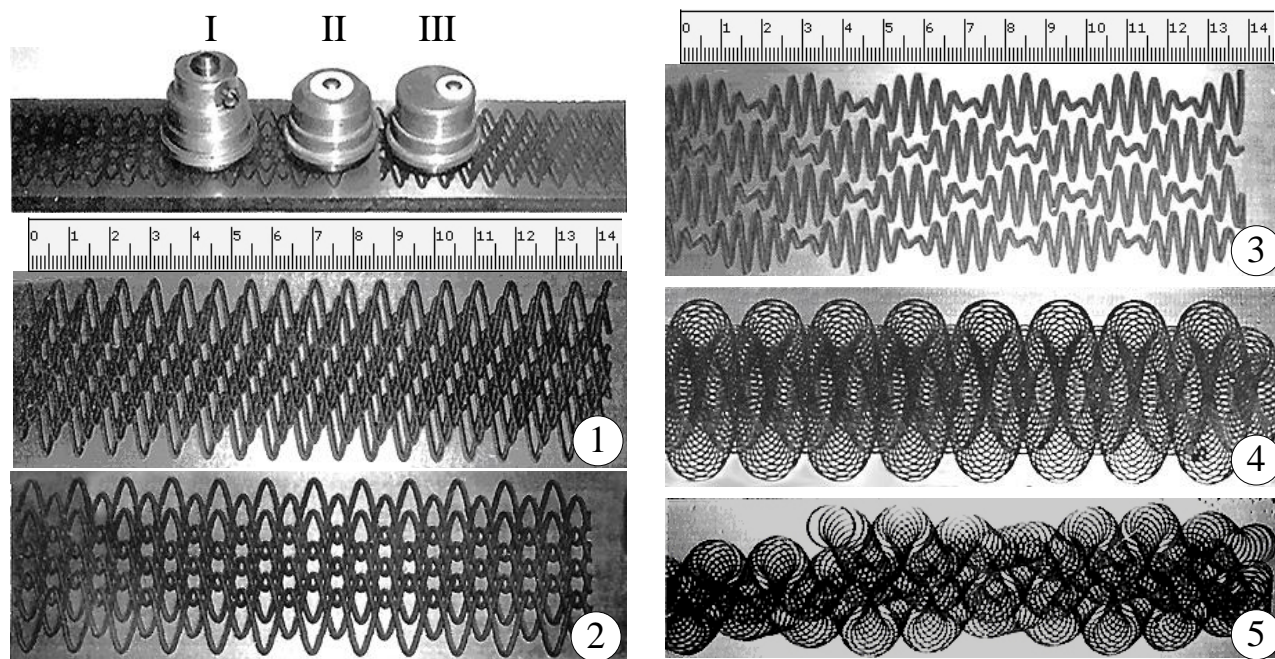


Рисунок 6.20 – Микропрофили на поверхностях деталей, обработанных ППД программным способом фрагменты

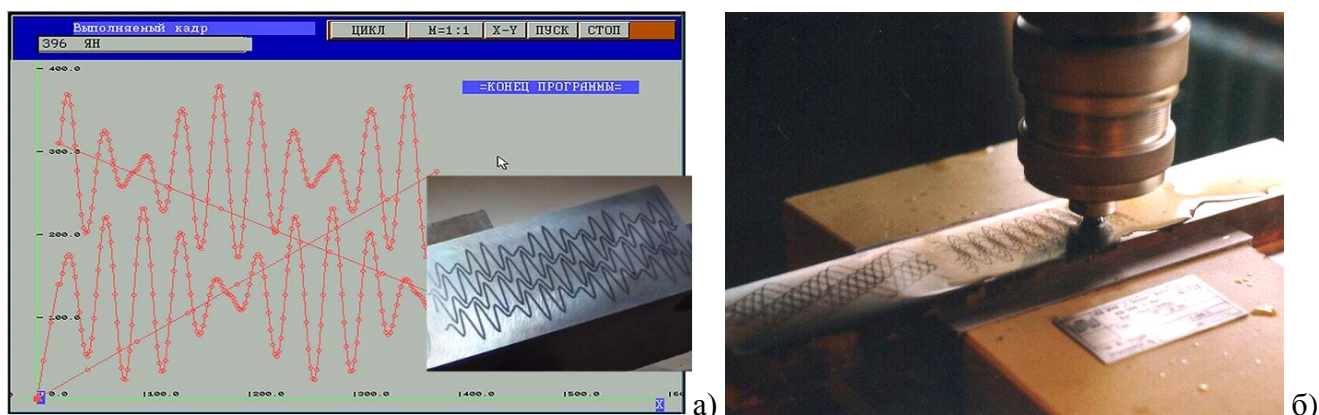


Рисунок 6.21 – Пример применения ППДПС на станке с ЧПУ: а – покадровая визуализация процесса обработки на мониторе; б – реализация процесса ППД методом АВ

Параметры микрорельефа поверхности детали определяются её эксплуатационными свойствами, которые должны гарантировать надёжное функционирование детали при выполнении предъявленных к ней требований инженерии поверхности. Примерами таких задач могут быть:

- обеспечение маслоёмкости поверхности, которая зависит от плотности формируемого на поверхности и параметров поперечного сечения остаточного следа индентора на поверхности обработанной ППД детали;

- удержание в зазорах в высокоскоростных соединениях деталей с гидродинамической и газовой смазкой смазочных материалов и формирование требуемых физических параметров (число Рейнольдса и др.) их потоков;
- формирование заданных параметров ЭС (износостойкость, контактная жёсткость и др.) поверхностей деталей за счёт плотности микрорельефа, параметров поперечного сечения остаточного следа индентора и величины наклёпа поверхности;
- обеспечение герметичности соединений как при наличии третьего упругого тела (уплотнения типа «лабиринт»), так и без него;
- обеспечение эстетичности деталей методами ОУО ППД.

6.4. Выводы к шестой главе

Результаты исследований, изложенные в главе 6, решают задачи 6, 7 и 8, поставленные в главе 1 (п. 1.8), на основании чего можно сделать следующие выводы.

1. Анализ результатов экспериментов показал, что мягкая приработочная плёнка сохраняется на поверхности деталей на протяжении всего процесса приработки, подтверждает эффективность предлагаемой комбинированной технологии обработки на основе применения точения композитом 10, нанесения МПП и АВ.

2. Получены зависимости триботехнических характеристик поверхностей деталей соединений трения скольжения, работающих со смазкой (величина начального износа, путь приработки, коэффициент трения, интенсивность износа), от пути трения, а также построены модели формирования триботехнических характеристик в зависимости от величины управляющих факторов исследуемой триботехнологической системы.

3. Установлено, что управляющие факторы триботехнологической системы оказывают согласованное влияние при формировании комплекса триботехнических характеристик, включающего величину суммарного начального износа сопряжения ($h_{01} + h_{02}$); коэффициенты трения в начале f_1 и конце f_0 приработки; ин-

тенсивности нормального изнашивания вала I_1 и вкладыша I_2 , при коэффициенте ранговой конкордации $\omega = 0,53$.

4. Определена параметрическая надёжность исследуемой триботехнологической системы формирования в процессе приработки эксплуатационных характеристик цилиндрических поверхностей деталей, обработанных точением композитом 10, нанесением МПП и последующим АВ. Определены интервалы значений триботехнических характеристик, обеспечиваемых в исследуемой триботехнологической системе.

5. Реализованы новые технологии формирования микрорельефов на поверхностях деталей обработкой ППД одноинденторными инструментами жесткого и упругого действия программным способом в компьютеризированных ТС с ЧПУ.

6. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение позволяют осуществлять подбор параметров и моделировать микрорельефы поверхностей деталей в процессе технологического проектирования.

Отдельные материалы шестой главы опубликованы в работах автора [129, 130, 131, 132, 134, 139, 245, 255, 268, 275, 283, 290, 302, 345].

ГЛАВА 7. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЗАКОНОМЕРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Процессы формирования ПКПС при обработке деталей обычно характеризуются постоянством условий функционирования ТС и значений режимов обработки, поэтому полученные значения параметров качества также остаются постоянными по всей поверхности в пределах допуска, регламентированного конструкторской документацией. Постоянство режимов обработки обусловлено принципами проектирования технологических операций на основе технологических переходов, которые в соответствии с ГОСТ 3.1109-82 «..., выполняются одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах...».

В процессе эксплуатации на функциональные поверхности деталей машин действует множество факторов, приводящих к их изнашиванию, большинство из которых случайны по природе возникновения. В таком случае при одинаковых значениях параметров качества по всей поверхности возможно неравномерное изменение эксплуатационных свойств поверхности детали.

Неравномерный износ («выработка») направляющих продольных элементов соединений трения скольжения технологического оборудования и оснастки (станины, планки, штанги и др.) является типичным примером такого изменения. Он связан с наличием изменяющихся эксплуатационных воздействий (скорости скольжения, нагрузки, длительность действия фактора и др.) на функциональные поверхности с равномерным распределением параметров качества. Вследствие этих процессов снижается точность технологического оборудования и, соответственно, его работоспособность, что может привести к параметрическому отказу ТС.

Равномерное изнашивание поверхностей деталей при изменяющихся эксплуатационных нагрузках можно обеспечить в ТС формирования параметров качества поверхности при изменяющихся значениях управляющих факторов (кинематических, силовых, электрофизических и др.) в процессе обработки, например,

скорости и подачи инструмента, силы ППД и т. д.

Применение ТС, позволяющих обеспечить заданный закон распределения параметров качества по поверхности, подразумевает программное управление (CNC, NCNC и др.) режимами обработки в пределах перехода.

В седьмой главе рассматриваются принципы технологического обеспечения заданных законов формирования изменяющихся по обрабатываемой поверхности параметров качества в ТС с компьютерным управлением ЧПУ.

7.1. Моделирование эксплуатационных воздействий на функциональные поверхности деталей в соединениях трения скольжения

Обеспечить максимальную наработку до отказа по критерию износостойкости соединения можно, если известны особенности эксплуатации функциональных поверхностей деталей.

Примерами соединений трения скольжения являются плоские и цилиндрические продольные направляющие механизмов, цилиндрические подшипники скольжения, соединения «кулачок – толкатель» кулачковых механизмов и др.

На рисунке 7.1 показаны модели контактного взаимодействия поверхностей вала 1 и вкладыша 2 в цилиндрическом подшипнике трения скольжения, который работает при вращающемся вале и неподвижном вкладыше (рисунок 7.1а) или при вращающемся вкладыше и неподвижном вале (рисунок 7.1б).

Скорость V относительного скольжения поверхностей постоянная.

Зазор Δ в соединении определяет контакт поверхностей по дуге $\cup(ab) = r\psi$, определяемой центральным углом ψ , номинальным диаметром D деталей, зазором Δ и физико-механическими свойствами материалов вала и вкладыша. На разрезах А–А показана эпюра распределения давления p по дуге контакта.

Поверхность вала, вращающегося с угловой скоростью ω_1 , изнашивается равномерно по всей образующей окружности, поверхность вкладыша изнашивается только в пределах дуги контакта $\cup(ab)$ (схема I). Если вращается вкладыш, то неравномерно изнашивается поверхность вала по дуге контакта $\cup(ab)$ (схема II).

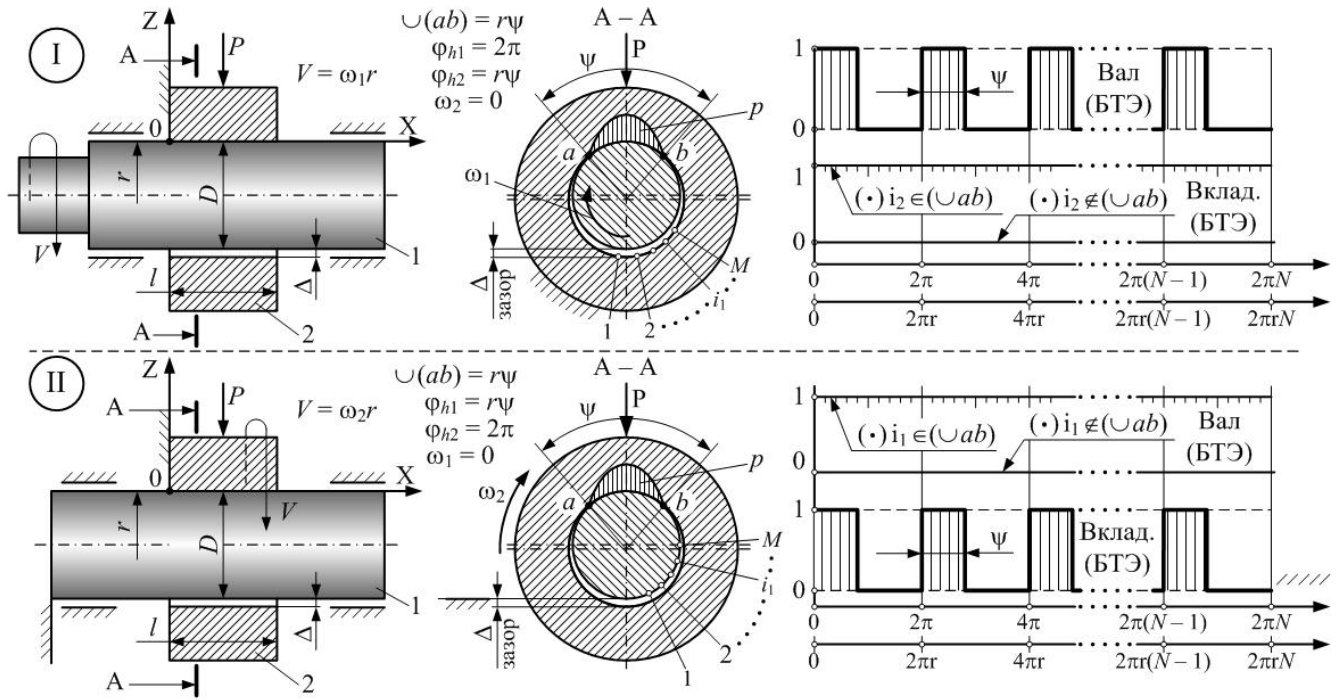


Рисунок 7.1 – Модели контактных взаимодействий поверхностей вала 1 и вкладыша 2 в цилиндрическом подшипнике трения скольжения и диаграммы процессов контактирования поверхностей вала и вкладыша

В зависимости от подвижности в системе координат XOZ вал или вкладыш можно рассматривать как базовый трибоэлемент (БТЭ) с постоянной ориентацией в системе координат (неподвижный) и мобильный трибоэлемент (МТЭ) (подвижности).

Триботехнические характеристики МТЭ и БТЭ (коэффициент трения, величина износа и др.) определяются технологическими и эксплуатационными факторов (нагрузки, скорости относительного скольжения, путь трения) (глава 6, п. 6.1).

На диаграммах процессов контактирования поверхностей вала и вкладыша (рисунок 7.1) представлены зависимости отсутствия (0) или наличия (1) контакта элементарных точек поверхностей от угла φ поворота МТЭ.

Путь, проходимый элементарной точкой поверхности МТЭ при вращении с угловой скоростью ω_1 (или ω_2), определяется зависимостью $L = 2\pi rN$, где 2π – рабочий цикл МТЭ (1 оборот); N – общее число циклов (оборотов МТЭ). Тогда, при линейной скорости относительного скольжения $V = \omega r$, общий путь трения элементарной точки поверхности МТЭ:

$$L_{MTЭ} = l_{\cup(ab)}N = r\psi N.$$

Путь трения элементарных точек поверхности за N циклов вращения (число оборотов) меньше пути соответствующих точек БТЭ, участвующих в контакте в $2\pi/\psi$ раза.

Поверхность МТЭ изнашивается равномерно, а поверхность БТЭ изнашивается только в зоне дуги контакта (местное изнашивание, «выработка»).

На рисунке 7.2 показана схема ТС с цилиндрическими опорами трения скольжения возвратно-поступательного и вращательного движения, примером которых могут служить направляющие инструментов (борштанг) для обработки на расточных станках отверстий в деталях. Вкладыш 2 подшипника скольжения направляющей можно рассматривать как БТЭ, а корпус борштанги 1 – как МТЭ с двумя степенями свободы, определяемыми возможностью вращения вокруг оси OX со скоростью V и движением вдоль оси OX со скоростью подачи Ds .

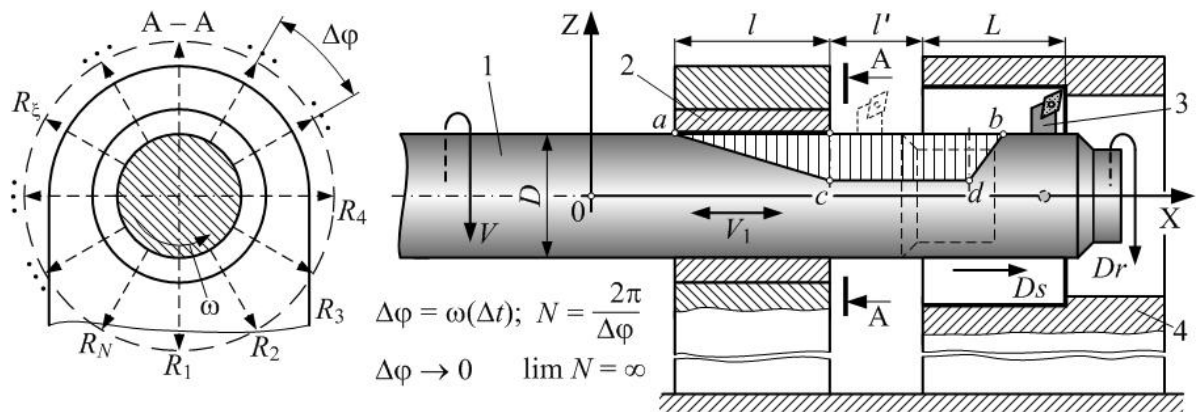


Рисунок 7.2 – Модель контактных взаимодействий поверхностей корпуса борштанги и вкладыша подшипника скольжения направляющей при растачивании отверстий:
1 – борштанга расточная; 2 – вкладыш; 3 – резец; 4 – обрабатываемая деталь

В процессе растачивания отверстия в детали 4 резцовым блоком 3 вектор реакции R_i опоры (вкладыша) 2 вращается с угловой скоростью $\omega = 2V/D$. При этом осуществляется контакт всех точек поверхности вкладыша с поверхностью корпуса борштанги (вала), а, следовательно, равномерный износ.

Длительность контакта точек поверхностей корпуса 1 и вкладыша 2 характеризуется диаграммой, представляющей собой трапецию $acdb$. Длины оснований трапеции зависят от значений размеров l , l' и L . Основание cd характерно для участка поверхности вала, контактирующего с поверхностью вкладыша большее

время в процессе операции растачивания, так как они 2 раза проходят участок контакта длиной l при рабочем и холостом ходах инструмента.

Давление на корпус борштанги, оказываемое на поверхность вала как реакция опоры (вкладыша) на силы резания расточного блока, является противоположным по направлению.

Такие особенности износа необходимо учитывать при изготовлении корпуса борштанги с целью обеспечения равномерного износа функциональной поверхности, контактирующей с поверхностью вкладыша, и, следовательно, точности обрабатываемых отверстий.

На рисунке 7.3 представлены схемы цилиндрических направляющих трения скольжения возвратно-поступательного движения, характерные для скальчатых кондукторов и направляющих элементов технологической оснастки в автоматических линиях при обработке отверстий. В данном случае наиболее интенсивные контактные нагрузки испытывает поверхность вкладыша 2, являющегося МТЭ в случае на рисунке 7.3а, или БТЭ на рисунке 7.3б. В первом случае вкладыш 2 может совершать как возвратно-поступательное движение вращательное V_1 , так и

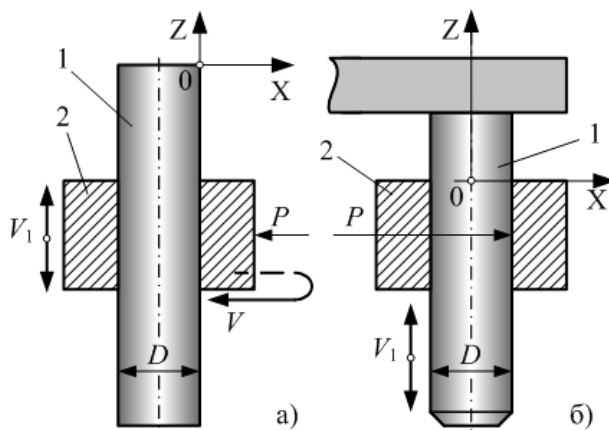


Рисунок 7.3 – Схемы цилиндрических направляющих трения скольжения возвратно-поступательного движения

чек трущихся поверхностей.

На рисунке 7.4 представлена модель возвратно-поступательной пары трения скольжения, характерной для продольных направляющих (различной конфигурации) технологического оборудования и оснастки. Направляющие скольжения рас-

совместно возвратно-поступательное V_1 и вращательное V движения, во втором случае возвратно-поступательное движение совершает скалка 1.

Зная технологические параметры работы скальчатого кондуктора или соответствующей позиции автоматической линии, по аналогичной схеме на рисунке 7.2 строят диаграммы процессов контактирования элементарных то-

смазываются как БТЭ с перемещаемым по нему МТЭ (каретки, салазки суппорта и др.). Функциональные поверхности МТЭ находятся в постоянном контакте с поверхностями БТЭ.

Эпюра интенсивности контактного взаимодействия поверхностей БТЭ и МТЭ в виде трапеции $0a'b'L'$ (рисунок 7.4) определяет длительность контакта элементарных точек. Отрезок $a'b'$ эпюры характеризует наиболее нагруженные участки БТЭ.

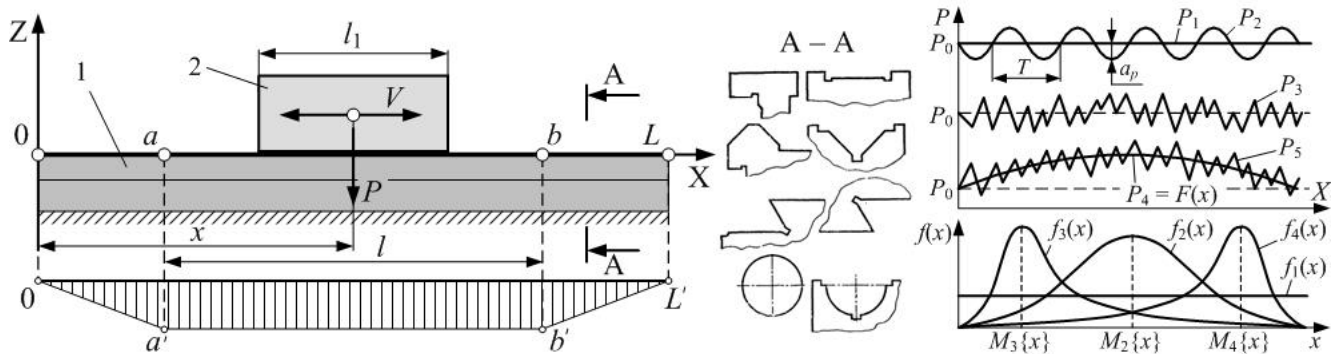


Рисунок 7.4 – Модель контактных взаимодействий поверхностей базовых 1 и мобильных 2 трибоэлементов в соединении трения скольжения; возможные виды изменений нагрузок P на поверхность БТЭ при эксплуатации и законы распределения $f(x)$ координаты положения x МТЭ

При решении вопросов технологического обеспечения износостойкости поверхностей деталей соединений трения скольжения нередко значения параметров, характеризующих эксплуатационные нагрузки, таких как давление P на единицу площади поверхности и скорость V относительного скольжения, определяются как постоянные, не изменяющиеся во времени и в пространстве, с фиксированными допустимыми отклонениями. Такая модель является идеальной.

На практике при эксплуатации пар трения скольжения на поверхность БТЭ действуют изменяющиеся в пространстве и времени нагрузки P , создаваемые МТЭ, и скорости V его перемещения. Время характеризуется текущим временем эксплуатации поверхности БТЭ в заданных условиях, а пространство длиной ab поверхности БТЭ.

Можно выделить следующие виды нагрузок P в зависимости от характера их изменения по координате X вдоль поверхности трения БТЭ (рисунок 7.4):

– $P_1 = P_0 = \text{const}$ – статические нагрузки;

- P_2 – динамические нагрузки, периодически изменяющиеся (период T , амплитуда a_p);
- P_3 – нагрузка в виде стационарной случайной функции с математическим ожиданием $M\{P\} = P_0 = \text{const}$;
- $P_4 = F(x)$ – нагрузка, изменяющаяся в соответствии с монотонной функцией или функцией с экстремумом;
- P_5 – нагрузка, изменяющаяся в соответствии с нестационарной случайной функцией с математическим ожиданием $M\{P_5\} = P_4$, зависящим от координаты x положения МТЭ 2.

Такие типы нагрузок по-разному влияют на износ поверхности трения. Так, при статической нагрузке P_1 и равномерном законе распределения её приложения $f_1(x)$ по поверхности БТЭ (рисунок 7.4) значение износа h поверхности будет постоянным в любой её точке, при условии постоянства значений ПКПС в любой её точке.

Если функция распределения $f_i(x)$ положения МТЭ отличается от $f_1(x)$, то даже при действии нагрузок P_1, P_2, P_3 значение износа h поверхности БТЭ будет изменяться по координате X , следствием чего является снижение точности соединений деталей.

Критичным случаем является действие нагрузок P_4 и P_5 на поверхность БТЭ при функции $f_2(x)$ распределения положения МТЭ. Интенсивность износа, пропорциональная значениям функции $F(X)$, может увеличиться в окрестностях точки $M_2\{x\} \pm k\sigma(x)$.

Таким образом, на равномерность износа функциональной поверхности оказывает закон изменения нагрузки $P = F(X)$ и плотности распределения $f_i(x)$ координаты точки её приложения к поверхности.

Для определения характера изменения значений нагрузки P на поверхность трения в зависимости от времени её эксплуатации можно выделить следующие закономерности (рисунок 7.5).

1. Постоянная во времени нагрузка $P = P_0 = \text{const}$.
2. Переменная нагрузка P , изменяющаяся по зависимости $P = P_0 + \Delta p \sin \omega t$,

где P_0 – номинальное значение нагрузки; Δp – отклонения её значений; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота (f – частота в герцах).

3. Импульсный характер изменения нагрузки P . Максимальное и минимальное значения нагрузки оцениваются значениями P_0 и P_{max} ; скважность импульса $c = T/\tau$, где T – период импульса; T, τ – длительность импульса.

4. Значения нагрузки P изменяются по закону треугольника от нуля до номинального значения P_0 . Нагрузка становится идеальной ударной при $\tau \rightarrow 0$.

5. Значения нагрузки P изменяются от минимального P_1 до номинального P_0 и обратно по трапецеидальному закону с периодом T_p . Каждый период действия нагрузки характеризуется четырьмя этапами: t_1 – время нагружения поверхности БТЭ с изменением нагрузки от P_1 до P_0 ; t_2 – время действия нагрузки P_0 ; t_3 – время разгрузки поверхности от P_0 до P_1 ; t_4 – время действия нагрузки P_1 .

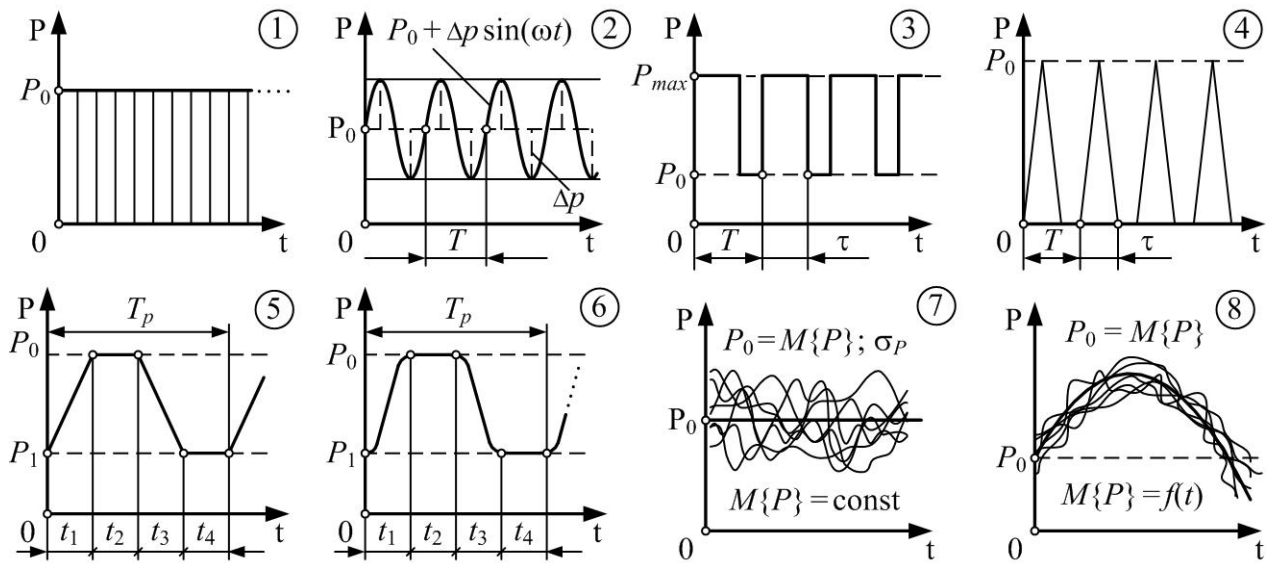


Рисунок 7.5 – Закономерности изменений значений нагрузки P на поверхность БТЭ в зависимости от времени эксплуатации соединения трения скольжения

6. Значения нагрузки P изменяются от P_1 до P_0 и обратно в аналогичных интервалах времени t_1, t_2, t_3, t_4 . В отличие от предыдущего случая, в интервалах времени t_1 и t_3 , производная функции нагрузки от времени изменяется: $dP/dt \neq \text{const}$.

7. Изменение значения нагрузки P от времени рассматривается как стационарный случайный процесс, а математическое ожидание нагрузки $M\{P\}$ близко к номинальному значению P_0 . σ_p – среднее квадратическое отклонение в выборке

значений нагрузки P в момент времени t_i эксплуатации соединения. Так как в процессе работы на поверхности соединений трения скольжения всегда действует множество случайных факторов, изменяющих величины нагрузки P , для таких систем параметры внешней нагрузки можно определить как характеристики стационарного случайного процесса по одной выборочной реализации [295].

8. Изменение значения нагрузки P от времени рассматривается как нестационарный случайный процесс, а математическое ожидание нагрузки $M\{P\}$ изменяется во времени. Параметры нагрузки можно определить только по множеству выборочных функций, формирующих процесс, что является сложной задачей с практической точки зрения. Нестационарный процесс изменения нагрузок характеризует экстремальные условия эксплуатации соединений, приводящие к нештатным ситуациям и отказам.

Характер изменения значений скорости V относительного скольжения поверхностей БТЭ и МТЭ в соединениях трения скольжения в зависимости от времени их эксплуатации также определяется рядом закономерностей, которые представлены на рисунке 7.6.

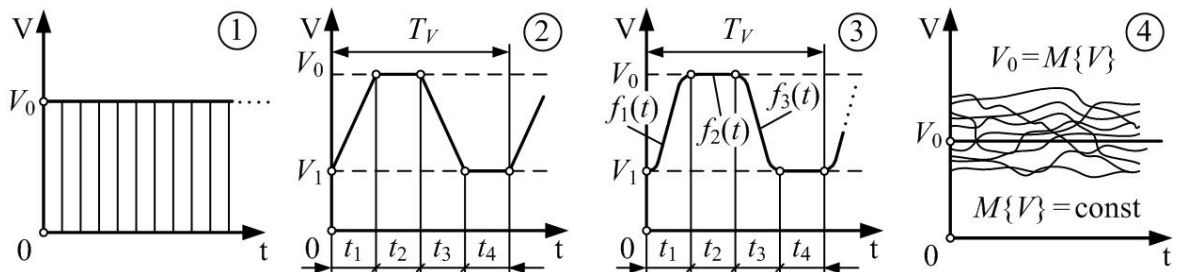


Рисунок 7.6 – Закономерности изменений значений скорости V относительного скольжения поверхностей в зависимости от времени эксплуатации соединения трения скольжения

1. Скорость $V = \text{const}$ является постоянной во времени.
2. Значения скорости V изменяются с периодом T_v от минимального V_1 до максимального V_0 и обратно. При этом можно выделить четыре характерных этапа (по аналогии с нагрузкой, график 5 на рисунке 7.5): t_1 – время роста значения скорости от V_1 до V_0 ; t_2 – скорость $V_0 = \text{const}$; t_3 – время снижения значений скорости от V_0 до V_1 ; t_4 – скорость $V_1 = \text{const}$.
3. Значения скорости V изменяются от V_1 до V_0 и обратно в аналогичных ин-

тервалах времени t_1, t_2, t_3, t_4 . Но в интервалах времени t_1 и t_3 , производная функции изменения скорости относительного скольжения (ускорение) от времени изменяется: $dV/dt \neq \text{const}$ (по аналогии с нагрузкой, график 6 на рисунке 7.5).

4. Изменение значения скорости V от времени рассматривается как стационарный случайный процесс, функция которого характеризуется математическим ожиданием номинального значения скорости $V_0 = M\{V\}$ и дисперсией $D\{V\}$.

Аналогичным образом в зависимости от координаты X приложения нагрузки вдоль поверхности трения БТЭ можно определить характер изменения значений нагрузки P (рисунок 7.7).

В случае трапецеидального закона изменения нагрузки P (график 1, рисунок 7.7) наибольшую нагрузку P_0 испытывает участок x_1x_2 , а на участках нагружения ax_1 и разгрузки x_2b нагрузка меняет значения от минимального до максимального и наоборот. Аналитический вид функций $f_{p1}(x)$, $f_{p2}(x)$ и $f_{p3}(x)$ зависит от специфики эксплуатации пар трения скольжения.

Для графика 2 на рисунке 7.7 изменение нагрузки описывается непрерывной дифференцируемой функцией.

На графике 3 (рисунок 7.7) изменение нагрузки P определяется как стационарный случайный процесс изменения её значения в зависимости от координаты X , характеристики которого аналогичны зависимости нагрузки от времени эксплуатации (график 7, рисунок 7.5)

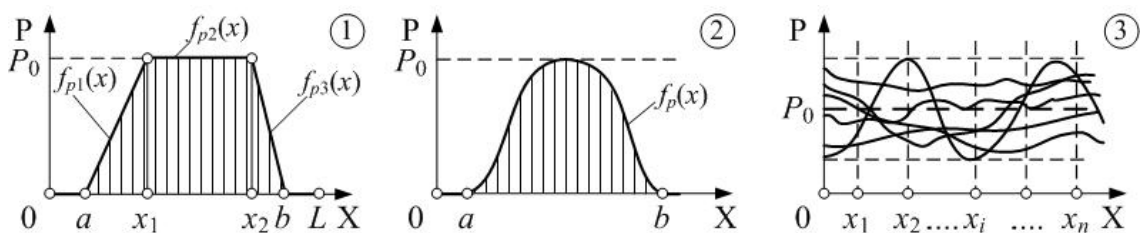


Рисунок 7.7 – Закономерности изменений значений нагрузки P в зависимости от координаты X приложения нагрузки вдоль поверхности трения БТЭ

Подобные закономерности изменения значений определены и для скорости V относительного скольжения поверхностей деталей в соединениях трения скольжения, при этом рассматриваются только абсолютные значения, так как возможно реверсное движение поверхностей относительно друг друга.

При трапецеидальном законе изменения значений скорости V (график 1, рисунок 7.8) на участках разгона ax_1 и торможения x_2b она изменяется от минимальных до максимальных величин и наоборот, на участке x_1x_2 сохраняется её постоянное значение.

Изменение скорости V , определяемое непрерывной дифференцируемой функцией, представлено на рисунке 7.8 (график 2).

Также изменение скорости V определяется как стационарный случайный процесс (график 3, рисунок 7.8). Такие случаи возможны при малых скоростях относительного движения поверхностей трибоэлементов при торможении и ускорении, что связано с процессами схватывания.

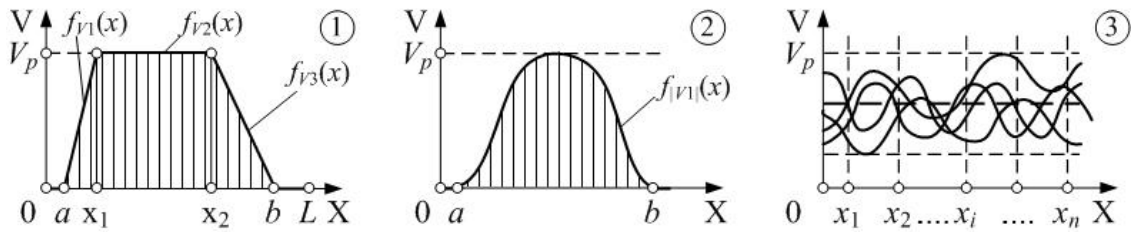


Рисунок 7.8 – Закономерности изменений значений скорости V относительного скольжения поверхностей в зависимости от координаты X приложения нагрузки вдоль поверхности трения

Представленные на рисунках 7.5 – 7.8 графики позволяют выявить общий характер изменений нагрузок P и скоростей V в зависимости от времени эксплуатации и координаты X приложения нагрузки вдоль поверхностей деталей трения скольжения. На рисунке 7.9 представлена обобщенная функция изменения значений возмущающих воздействий на поверхности трибоэлементов в зависимости от временных и пространственных факторов, то есть скорости $Y = V$ или нагрузки $Y = P$ от координаты точки приложения нагрузки X или времени эксплуатации соединения t .

Для функций $P = f(t)$; $P = f(X)$; $V = f(t)$; $V = f(X)$ выделяются четыре характерных участка: X_1 , X_2 , X_3 , X_4 (рисунок 7.9).

На участке $X_1 = 0x_a$ непрерывная возрастающая функция $Y = f_1(x)$ характеризует увеличение величин $Y = P$ (нагружение) или $Y = V$ (разгон). Значение Y в начале нагружения или разгона может быть равным нулю.

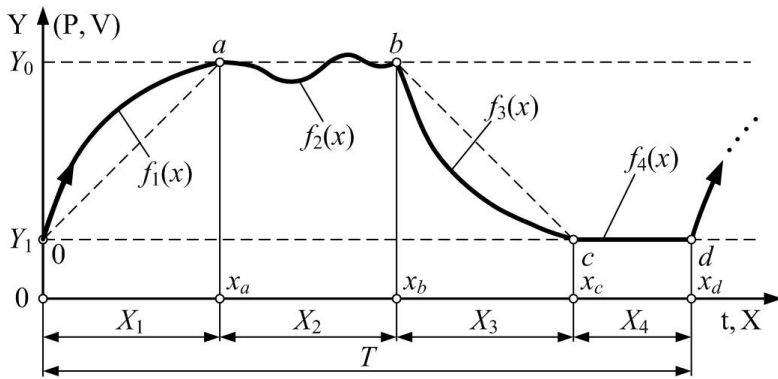


Рисунок 7.9 – Обобщенная функция изменения значений возмущающих воздействий на поверхности трибоэлементов в зависимости от временных (t) и пространственных факторов (X)

На участке $X_2 = x_a x_b$ функцией $Y = f_2(x)$ определяет номинальные значения возмущающих воздействий P и V , вид которой зависит от условий эксплуатации соединения деталей трения скольжения.

На участке $X_3 = x_b x_c$ непрерывная функция $Y = f_3(x)$

характеризует снижение величины $Y = P$ (разгрузка) или $Y = V$ (замедление) до значения Y_1 или 0 .

Участок $X_4 = x_c x_d$ характеризуется минимальным значением нагрузки P или скорости V , равным $Y = f_4(x) = \text{const}$.

Общий период возмущающих воздействий на поверхности трибоэлементов составляет $T = X_1 + X_2 + X_3 + X_4$. Длительность некоторых участков периода может быть равна нулю, что с учётом вида функции $f_i(x)$ каждого участка приводит к вырождению обобщённой функции $Y = f(t, X)$ в частные функции изменения значений возмущающих воздействий (рисунок 7.10).

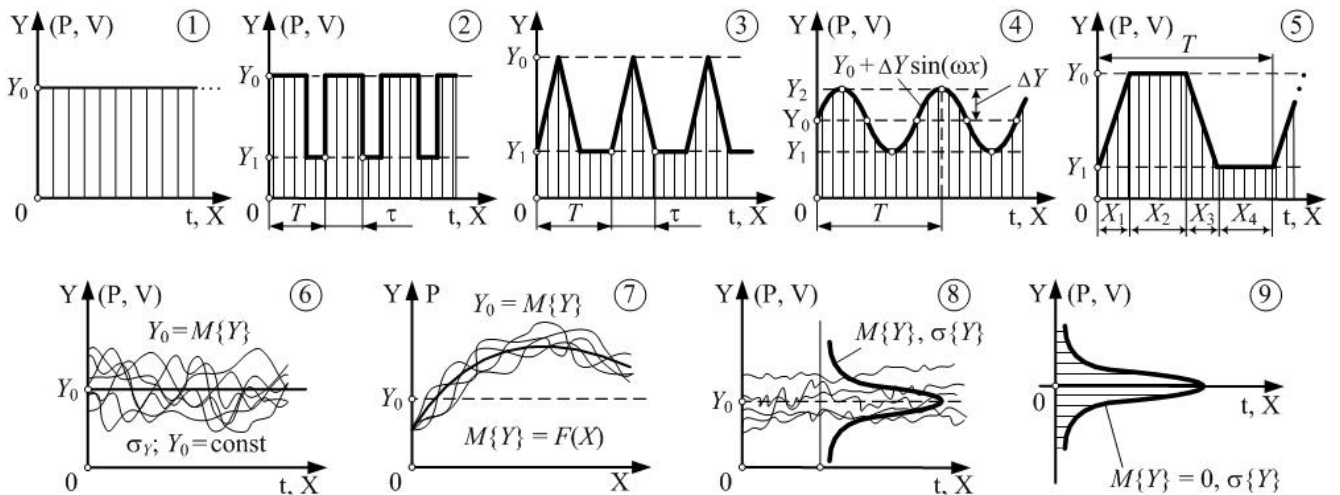


Рисунок 7.10 – Типовые функции изменения значений возмущающих воздействий на поверхности трибоэлементов в зависимости от времени t и координаты X

На рисунке 7.10 (график 1) длительность участков $X_1 = X_3 = X_4 = 0$, а функ-

ция $f_2(x) = \text{const}$, то есть значения нагрузок P или скоростей не V не изменяются ни во времени t , ни в пространстве X .

Если $X_1 = X_3 = 0$, $f_2(x) = Y_0 = \text{const}$, $f_4(x) = Y_1 = \text{const}$, то для возмущающих воздействий характерен импульсный характер (график 2, рисунок 7.10).

График 2 вырождается в график 3 (рисунок 7.10), если $X_2 = 0$, $X_1 = X_3 = \tau/2$, тогда характер изменений нагрузки или скорости принимает вид классического импульсного воздействия со скважностью импульса $c = T/\tau$.

На графике 4 (рисунок 7.10) участки $X_1 = X_3 = X_4 = 0$, а номинальное значение возмущающего воздействия Y на поверхности трибоэлементов определяется синусоидальной функцией $f_2(x) = Y_0 + \Delta Y \sin \omega x$.

На графике 5 (рисунок 7.10) представлен трапецеидальный закон изменения возмущающих воздействий, для которого участки X_1, X_2, X_3 периода T характеризуются линейными функциями $f_1(x), f_2(x), f_3(x) \in R(a_i + b_i x)$, а для участка X_4 функция $f_4(x) = \text{const}$.

Наиболее характерным случаем изменения значений нагрузок или скоростей относительного скольжения, встречающимся на практике, является представленный на графике 6 (рисунок 7.10), когда $X_1 = X_3 = X_4 = 0$, а функция $f_2(x)$ характеризует стационарный случайный процесс с математическим ожиданием $M\{Y\}$ и дисперсией $\sigma^2\{Y\}$, и обладающий эргодическим свойством.

График 7 (рисунок 7.10) показывает изменения значений возмущающих воздействий, характеризуемые как нестационарный случайный процесс, для которого математическое ожидание величины P или V является функцией времени. Такие процессы эксплуатации деталей соединений трения скольжения исследуются с применением теории случайных функций.

Для определения обобщенного параметра pV на участках X_2 и X_4 (рисунок 7.9) предлагается использовать графики 9 (рисунок 7.10) изменения значений случайных возмущений, характеризующий стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием $M\{Y\} = 0$ и дисперсией $D\{Y\}$. Такой подход позволит упростить описание механизма формирования возмущений случайного характера.

Например, график 8 (рисунок 7.10) можно рассматривать как сумму графиков 1 и 9. Объединение графиков 4 и 9 позволяет получить модель изменения значения случайного возмущающего воздействия с изменяемым по синусоидальному закону математическим ожиданием.

Представленные результаты моделирования силовых и скоростных воздействий на поверхности деталей в соединениях трения скольжения показывают, что их изменение может приводить к неравномерному износу поверхностей с параметрами качества, одинаково распределёнными по всей её площади. Снизить скорость изнашивания на участках поверхности с наиболее интенсивным эксплуатационным воздействием можно технологическим обеспечением ПКПС, которые будут распределены по поверхности по закону, соответствующему модели действующих силовых и скоростных факторов.

Формирование ПКПС по заданному закону в процессе обработки позволит обеспечить предлагаемый метод на основе применения ТС с высокой технологической гибкостью.

7.2. Принципы технологического управления процессом формирования закономерно изменяющихся параметров качества поверхностей деталей

Для обеспечения равномерного износа поверхностей деталей соединений трения скольжения при разработке технологии обработки поверхностей необходимо учитывать особенности воздействия на них эксплуатационных факторов.

На рисунке 7.11 представлена графовая модель формирования возможных состояний S функциональных поверхностей трибоэлементов, в которой вершины S_i характеризуют вид параметров состояния поверхностей, а рёбра переходов из состояния в состояние U_{ij} характеризуются видом воздействия на поверхность на этапах технологического процесса обработки или эксплуатации.

На графиках, характеризующих вершины S_i , показаны функции зависимости значений параметров качества K или эксплуатационных свойств ЭС поверхности от координаты X поверхности (например, продольной направляющей трения

скольжения), а на графиках, характеризующих рёбра переходов U_{ij} , показаны функции изменений значений технологических управляющих воздействий R в процессе обработки поверхности (режимы резания или ППД) и факторов условий эксплуатации P поверхности (нагрузка, скорость относительного скольжения, температура, динамические факторы и др.).

Вершины графа S_1 и S_3 соответствуют случаям, когда значения ПКПС или ПЭС являются одинаковыми в любой точке поверхности, а вершины S_2 и S_4 , когда их значения закономерно изменяются по поверхности.

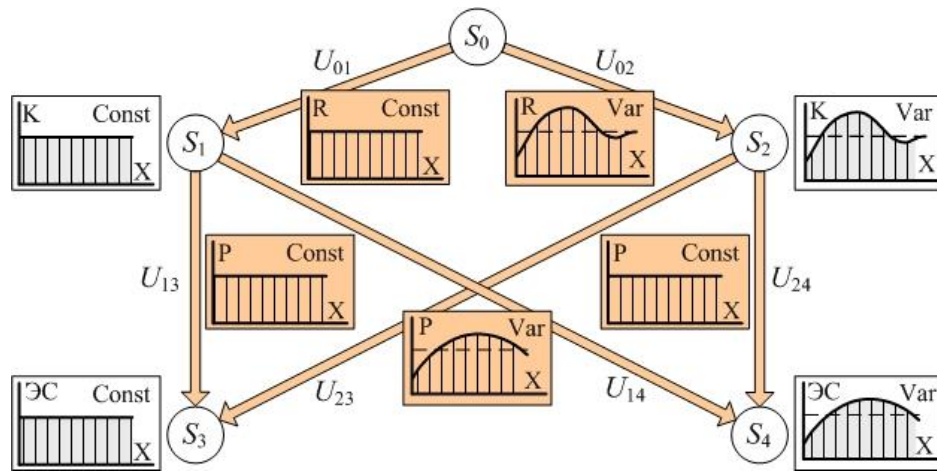


Рисунок 7.11 – Графовая модель формирования возможных состояний S_i функциональных поверхностей трибоэлементов, R – технологические факторы условий обработки; K – параметры качества поверхностного слоя; P – факторы условий эксплуатации; ЭС – параметры эксплуатационных свойств, X – координата точки поверхности трибоэлемента

Обычно параметры ЭС деталей машин обеспечиваются при условии, соответствующему вершине S_3 графа:

$$S_3 = (U_{01} \wedge U_{13}) \vee (U_{02} \wedge U_{23}). \quad (7.1)$$

Обычно формирование состояния S_3 достигается по пути:

$$S_0 \xrightarrow{U_{01}} S_1 \xrightarrow{U_{13}} S_3. \quad (7.2)$$

На практике условия эксплуатации P соединений деталей обычно отличаются от идеальных и характеризуются изменениями значений в пространстве и времени.

Поверхности трибоэлементов с равномерно распределёнными по ней ПКПС (S_1) в процессе воздействия эксплуатационных нагрузок, характеризующихся нестабильностью значений (U_{13}), переходят в состояние S_4 по пути (рисунок 7.11):

$$S_0 \xrightarrow{U_{01}} S_1 \xrightarrow{U_{14}} S_4. \quad (7.3)$$

Стабильность значений ЭС по поверхности трибоэлементов (S_3) можно обеспечить в случае, если значения ПКПС поверхности распределены по ней в соответствии с заданной закономерностью (S_2), соответствующей закономерности изменений эксплуатационных нагрузок (U_{23}):

$$S_0 \xrightarrow{U_{02}} S_2 \xrightarrow{U_{23}} S_3. \quad (7.4)$$

Обеспечение такой последовательности формирования свойств поверхности является актуальной технологической проблемой, решить которую позволит выполнение следующих задач.

1. Определить закономерности изменений значений факторов эксплуатации в зависимости от временных $P_i = f_i(t)$ и пространственных факторов $P_i = f_i(X)$.

2. Выявить закономерности изменения значений ПКПС по поверхности в зависимости от координаты X ($K_i = f_i(X)$), позволяющих обеспечить снижение интенсивности эксплуатационных воздействий и, как следствие, достичь равномерности распределения ПЭС по поверхности трибоэлемента.

3. Сформировать технологические системы, позволяющие обеспечить реализацию ребра U_{02} графовой модели, что позволит обеспечить закономерное распределение значений параметров качества по обрабатываемой поверхности $K_i = f_i(X)$.

Для решения этих задач необходимо выполнение двух принципиальных требований [119, 146 и др.].

1. Параметры качества функциональных поверхностей деталей, указываемые на чертежах деталей, должны иметь аргументированное обоснование закономерного изменения их значений по поверхности с учётом условий эксплуатации. Для этого необходимо:

– установить характеристики нестабильности внешних воздействий на функциональные поверхности в процессе эксплуатации в пространстве и во времени;

– установить закономерности формирования ПЭС поверхностей деталей в результате воздействия нестабильных эксплуатационных нагрузок (нагрузка, ско-

рость, температура, динамические характеристики и др.);

– определить параметры КПС и закономерности изменения их значений по поверхности, регламентация которых обеспечит требуемые ЭС.

2. При выборе технологических методов, обеспечивающих формирование ПКПС с заданным закономерным изменением их значений по поверхности обрабатываемой детали, необходимо:

– определить последовательность формирования ПКПС и степень влияния управляющих технологических факторов на их формирование в каждой из множества возможных альтернативных ТС;

– установить возможность управления условиями обработки в ТС по законам, заданным в виде кусочно-линейной или непрерывной функции;

– определить показатели надёжности технологического обеспечения ПКПС и ПЭС в регламентированных пределах.

Обеспечение изменения значений ПКПС по поверхности в процессе обработки детали можно в случае, если условия обработки меняются в пределах одного технологического перехода. Это возможно при применении ТС с высокой **технологической гибкостью** – способностью обеспечить требуемые значения ПКПС или ПЭС в регламентированных интервалах с заданной надёжностью за счёт изменения значений управляющих факторов и управления механизмом технологического наследования.

Различают два вида технологической гибкости (ТГ) систем обработки [88, 129, 130, 259 и др.]:

– **технологическая гибкость ТГ1** метода обработки характеризуется постоянством значений управляющих технологических факторов в пределах технологического перехода, что позволяет обеспечить формирование значений ПКПС или ПЭС в заданных пределах с требуемой надёжностью одинаковых по всей обработанной поверхности;

– **технологическая гибкость ТГ2** метода обработки характеризуется возможностью изменять значения одного или нескольких управляющих технологических факторов в пределах технологического перехода по заданному закону, что

позволяет обеспечить формирование закономерного изменения значений ПКПС или ПЭС по обрабатываемой поверхности с требуемой надёжностью.

Большинство ТС, в которых отсутствуют системы с ЧПУ или их элементы, обладают технологической гибкостью первого вида.

Технологическая гибкость ТГ2 характерна для ТС в которых один и более приводов движения исполнительных органов управляются от систем с ЧПУ, что позволяет изменять значения технологических факторов обработки в пределах технологического перехода. Для таких систем целесообразно устанавливать число степеней свободы соответствующих числу факторов обработки, которыми можно управлять в пределах перехода.

Например, при торцевом фрезеровании плоской поверхности заготовки 1 на станке с ЧПУ в пределах одного технологического перехода обеспечивается изменение только подачи $X_1 = S$ (рисунок 7.12 а), таким образом это технологическая система ТГ2 с одной степенью свободы [88, 130 и др.].

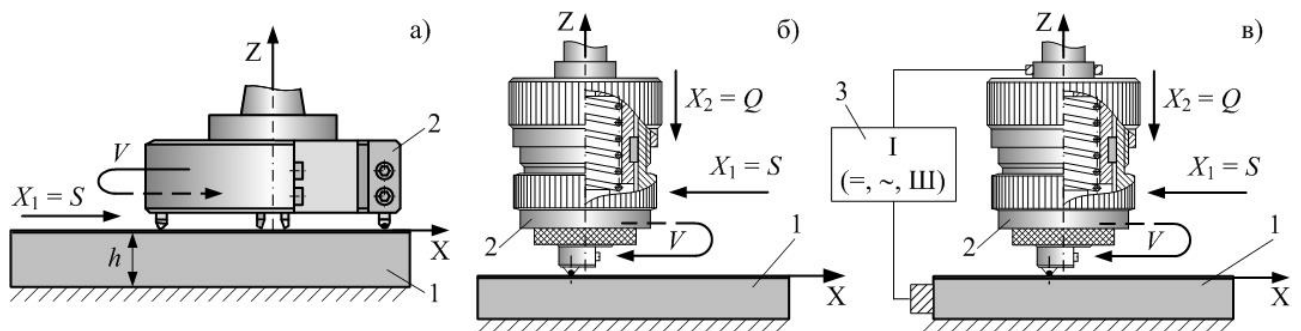


Рисунок 7.12 – ТС обработки плоских поверхностей заготовок с технологической гибкостью ТГ2: а – торцевое фрезерование; б – накатывание шариком или алмазное выглаживание инструментом упругого действия; в – электромеханическая обработка инструментом упругого действия; 1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – программируемый источник постоянного, переменного или импульсного напряжения)

На рисунке 7.12б представлен пример ТС алмазного выглаживания (или накатывания) на станке с ЧПУ типа CNC, обладающей технологической гибкостью ТГ2 с двумя степенями свободы, так как она позволяет управлять в пределах технологического перехода двумя факторами обработки – подачей инструмента $X_1 = S$ и силой АВ $X_2 = Q$.

Примером ТС с ТГ2 и тремя степенями свободы служит электромеханиче-

ская обработка с возможностью управления в пределах технологического перехода подачей инструмента $X_1 = S$, силой обработки $X_2 = Q$ и силой тока $X_3 = I$, проходящего в зоне контакта индентора с обрабатываемой поверхностью.

Целесообразно, чтобы при оценке технологической гибкости ТС также учитывались количество и достижимый диапазон изменения значений формируемых ПКПС. Например, для сравниваемых ТС токарной обработки с возможностью управления факторами обработки V, S, t и ТС ППД с управляющими факторами Q, S_{AB}, V_{AB} определена гибкость ТГ2 с тремя степенями свободы. Однако, технологическая гибкость ТС ППД выше, так как в ней может быть сформировано большее число ПКПС в более широких пределах, по сравнению с точением.

Таким образом, закономерное изменение значений ПКПС по обрабатываемой поверхности детали позволят обеспечить ТС с технологической гибкостью ТГ2. К таким ТС относятся методы ППД, осуществляемые на станках с ЧПУ.

При АВ формирование закономерно изменяющихся значений ПКПС должно обеспечиваться изменением силы выглаживания Q при обработке детали инструментом упругого действия. При этом точность размеров детали должна быть обеспечена на предыдущих технологических операциях.

Скорость обработки V также является важным управляющим фактором. Её значения определяют динамические процессы, протекающие при обработке ППД инструментами упругого действия и влияют на характер движения индентора по поверхности с отклонениями форм и волнистостью.

Постоянство значений ПКПС по поверхности обеспечивается технологической устойчивостью процессов ППД, в частности, постоянством контакта индентора с поверхностью.

7.3. Способы управления процессом закономерного формирования параметров качества поверхности детали

Обработка деталей с целью закономерного формирования значений ПКПС может осуществляться как на станках с ЧПУ так и на универсальных металлоре-

жущих станках.

Низкая технологическая гибкость универсальных металлорежущих станков связана с невозможностью изменения режимов обработки в рамках одного технологического перехода. Решать подобные задачи позволит применение дополнительных механических устройств (копиров), следящих гидравлических устройств, методов обработки с применением управляемых физических воздействий на поверхность обработки (электромеханическая обработка и др.) и др.

Примером может служить обработки поверхности вала методом ППД инструментом упругого действия на токарном станке с копиром, позволяющим изменять в процессе обработки поверхности силу Q (рисунок 7.13).

Задачей такой обработки является обеспечение минимального износа поверхности вала, на которую в процессе эксплуатации действуют изменяющиеся по длине поверхности нагрузки $P = f(X)$, эпюра которой представлена на рисунке 7.13а.

Для регламентации в конструкторской документации для каждого из участков поверхности вала (ab, bc, cd, de, ef) определяются значения ПКПС (например, поверхностная микротвёрдость H_μ ; высотные параметры шероховатости Ra, Rz, R_{max} и др.), изменяющиеся по координате X , в соответствии с функцией $P = f(X)$.

Назначаются условия обработки ППД, которые не изменяются в процессе формирования параметров качества – геометрические параметры индентора инструмента, скорость V и подача S обработки, вид СОТС и др., после чего рассчитываются значения фактора обработки, изменяемого по координате X вала в пределах технологического перехода, и строится эпюра его изменения по длине вала.

Для процесса АВ таким фактором является сила Q воздействия индентора на выглаживаемую поверхность (эпюра $Q_2 = f(X)$, рисунок 7.13а).

Изменение силы Q при АВ осуществляется за счёт профиля копира 10 (рисунок 7.13б). При движении инструмента, корпус 5 которого закреплён в резцедержателе станка, с подачей S_x вдоль обрабатываемой поверхности вала 1 смещение щупа 11 через механическую связь 9 и толкатель 8 вызывает смещение регулирующего упора 7 с пружиной 6, что, в свою очередь, изменяет значение силы Q на выглажи-

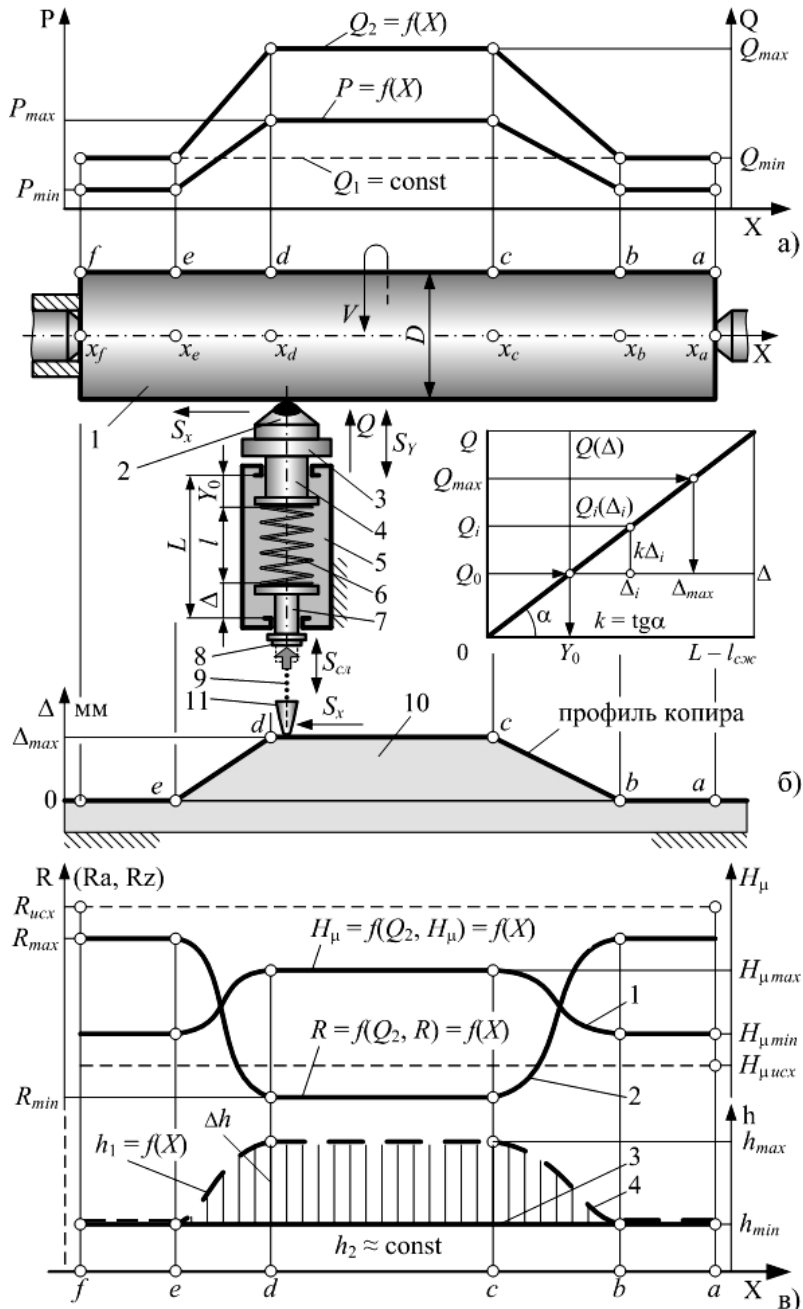


Рисунок 7.13 – Схема обработки детали АВ инструментом упругого действия на токарном станке с использованием копира, обеспечивающая формирование закономерно изменяющихся ПКПС: а – эпюра изменения нагрузки P при эксплуатации и силы Q выглаживания поверхности; б – схема обработки; в – эпюра изменения параметров качества H_μ и R по поверхности и ожидаемой величины износа h

$$Q_i = Q_0 + Q_i(\Delta_i) = ky_0 + k\Delta_i, \tag{7.5}$$

где k – тарировочный коэффициент пружины.

вающем инденторе 2. Коэффициент усиления $\varepsilon = 1$, так как применяется жёсткая единичная механическая связь 9.

Минимальное значение силы Q_0 устанавливается при наладке инструмента в предварительной деформацией пружины 6 на величину y_0 на участке ab поверхности вала (тарировочный график инструмента, рисунок 7.13б).

Изменение значения силы $Q_i(\Delta)$ осуществляется при перемещении упора 7 со следящей подачей $S_{сл}$ и последующим сжатием пружины 6.

Максимально значение сжатия пружины 7: $\Delta_{max} = L - l_{сжс} - y_0$, где L – длина пружины в свободном состоянии, $l_{сжс}$ – длина пружины в сжатом состоянии.

Значение силы Q изменяется по зависимости:

На рисунке 7.13в представлены зависимости изменения значений микротвёрдости поверхности $H_\mu = f(Q, H_\mu)$ (график 1) и значений высотных параметров шероховатости $R = f(Q, R)$ (график 1) вдоль оси X вала после обработки по схеме на рисунке 7.13б. Прямая 3 (рисунок 7.13в) характеризует постоянство значений ожидаемой величины износа ($h_2 \approx \text{const}$) вдоль поверхности вала.

Если поверхность вала обрабатывается при неизменных значениях силы Q , то ожидается неравномерный износ поверхности, характеризуемый зависимостью $h_1 = f(X)$ (график 4, рисунок 7.13в).

Аналогично методом прямого копирования могут обрабатываться плоские поверхности деталей на вертикально-фрезерных станках (рисунок 7.14). При обработке методом ППД инструментом упругого действия, сила Q воздействия инденторов 2 на поверхность заготовки 1 создаётся пружиной 3 с ползуном 4, установленным на шпинделе 5. Заготовка 1 устанавливается на «плавающем» столе 6, который перемещается по оси Z .

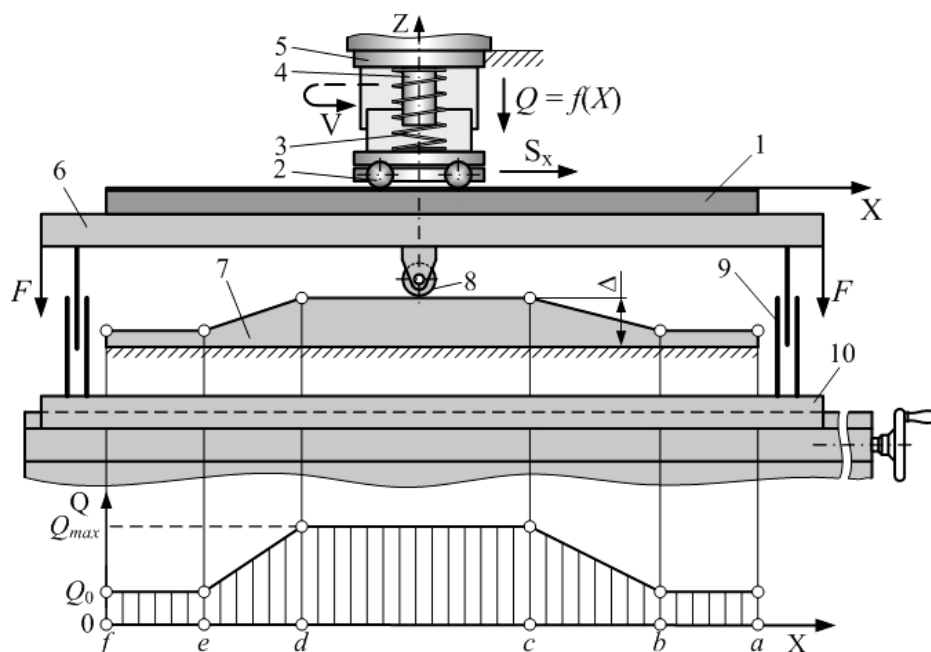


Рисунок 7.14 – Формирование закономерно изменяющихся параметров КПС ППД инструментом упругого действия на вертикально-фрезерном станке методом прямого копирования

Значение силы Q при обработке поверхности и геометрических параметров профиля копира 7 определяется аналогично случаю, представленному на рисунке 7.13. В процессе обработки ролик 8 (щуп),двигающийся вдоль профиля копира 7,

смещается на величину $\Delta = f(X)$ вместе с «плавающим» столом и обрабатываемой заготовкой, чем вызывает через инденторы 2 сжатие пружины 3, и, как следствие, изменение силы ППД по зависимости $Q = f(X)$, эпюра которой представлена на рисунке 7.14.

Рассмотренные способы формирования закономерно изменяющихся ПКПС деталей на универсальных станках отличаются простотой реализации и сравнительно низкой стоимостью, но в то же время низкой эффективностью в условиях мелкосерийных производств, что связано с ограничением типоразмеров обрабатываемых деталей для каждого копира.

Расширить технологические возможности универсальных станков, в частности, токарных, позволит применение программируемого блока обработки ППД инструментом упругого действия, блок-схема которого представлена на рисунке 7.15.



Рисунок 7.15 – Блок-схема программируемого блока обработки ППД инструментом упругого действия для закономерного формирования ПКПС деталей на токарных станках

При обработке поверхности детали 1 программируемый блок позволяет обеспечить закономерное изменение силы ППД $Q \pm \Delta Q$ и, как следствие, формирование параметров качества R в соответствии с зависимостью $R = f(X)$.

В инструменте упругого действия силовое воздействие на обрабатываемую поверхность передается через индентор 2, закреплённый в держателе плунжера 3, толкателем 5. Величина силы Q зависит от жёсткости пружины, установленной в корпусе 4. Зависимость $\Delta Q = f(X)$, характеризующая изменение силы обработки

ППД, определяется в соответствии с требованиями конструкторской документации на этапе технологической подготовки производства.

Возвратно-поступательное (или вращательное) движение толкателя обеспечивает исполнительный элемент 6 редуктора, который желательно выбирать червячным, что сокращает габариты привода. В качестве шагового двигателя с программируемым контроллером может применяться сервопривод (например, СПШ10). Инструмент, редуктор с исполнительным элементом, привод закрепляются в резцедержателе суппорта, который движется с подачей S_x .

Программа управления шаговым двигателем вводится в энергонезависимую память контроллера.

Через индуктивный датчик обратной связи 7 в управляющий блок передается информация о суммарном числе N оборотов шпинделя станка с момента пуска, которая переводится в текущую координату X обрабатываемой точки поверхности по зависимости $X = NS_x$, S_x – подача, мм/об.

При отсутствии датчика 7 осуществляется разомкнутое управление, при котором первоначальное положение индентора определяет начало цикла, а значение силы Q изменяется в процессе обработки в зависимости от величины подачи S_x и времени обработки t . Тогда текущая координата X индентора определяется по зависимости:

$$X = X_0 - S_x n t, \quad (7.6)$$

где X_0 – координата точки начала обработки; S_x – значение подачи, мм/об; n – частота вращения инструмента, мин⁻¹; t – время, прошедшее с начала обработки, с.

Рассматриваемый программируемый блок обработки ППД дает возможность обрабатывать конические и фасонные поверхности, при условии, если допустимое перемещение ползуна 3 инструмента не меньше разницы максимальных и минимальных размеров обрабатываемой детали.

Применение подобных программируемых блоков обработки ППД деталей позволит решать задачу формирования закономерно изменяющихся значений ПКПС в условиях в серийного, мелкосерийного и единичного производств.

7.4. Управление процессом закономерного формирования параметров качества поверхностей деталей на станках с программным управлением

Технологическое обеспечение параметров качества поверхностного слоя с закономерным изменением их значений по обработанной поверхности наиболее эффективно осуществляется в ТС с повышенной технологической гибкостью, к которым относятся станки с ЧПУ (CNC, PCNC). Управление процессом обработки в ТС с ЧПУ с компьютерным управлением позволяет обеспечить надёжное формирование требуемых показателей качества. Структурная модель программы управления ТС с ЧПУ представлена на рисунке 7.16 [88, 119, 130 и др.].

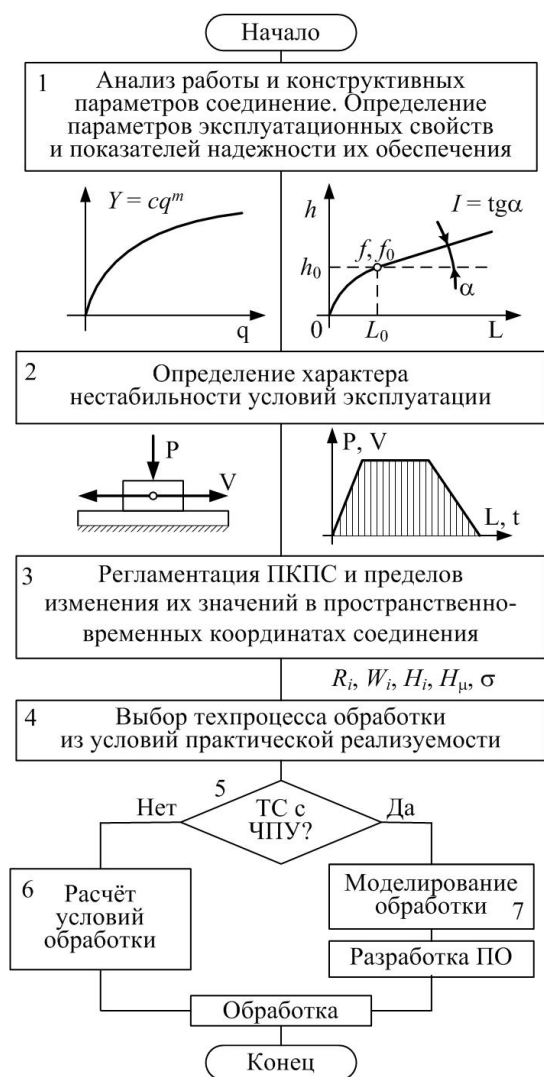


Рисунок 7.16 – Структурная модель программного управления процессом формированием закономерного изменения ПКПС деталей машин

В представленной блок-схеме блоки 2 и 3 являются ключевыми в решении задач технологического обеспечения параметров эксплуатационных свойств функциональных поверхностей деталей соединений, значения которых будут изменяться равномерно по поверхности при нестабильных условиях эксплуатации.

Выбор условий обработки (блоки 6 и 7) обычно осуществляется на основе поэтапного решения задач технологического обеспечения эксплуатационных свойств: «определение ПЭС» – «определение ПКПС» – «выбор метода и условий обработки». Большое количество исследований, проводившихся по такому пути решения технологических задач, отражены в научной и справочной литературе [195, 196, 204, 207 и др.],

Перспективным и экономически це-

лесообразным является двухэтапная последовательность выбора условий обработки: «определение ПЭС» – «выбор условий обработки». Исследования, проводившиеся по такому пути решения задач доказывают эффективность такого подхода [88, 114, 130, 207, 217, 235 и др.].

На современном этапе развития технологической науки необходимо решать вопрос о переходе к одноступенчатому решению задачи обеспечения требуемых ПЭС деталей, который возможен при объединении конструкторских (определение ПЭС, определяющих надёжность изделия, точности и ПКПС) и технологических (обеспечение требуемой точности и ПКПС с минимальными затратами) задач [82 и др.]. Теоретически одноступенчатый подход к обеспечению требуемых ПЭС предполагает подстановку взаимосвязей ПКПС с условиями обработки в уравнения зависимостей ПЭС деталей от ПКПС. Параметры качества и точности могут не учитываться в качестве исходных и выходных данных, как промежуточные параметры.

Задача компьютерного управления процессом формирования ПЭС деталей заключается в выборе оптимальных ПКПС и расчёте оптимальных режимов обработки, которые передаются в устройство ЧПУ.

При компьютерном управлении процессом обработки в качестве исходных данных служат значения ПЭС, определяющих надёжность детали и которые необходимо обеспечить на заключительных этапах обработки, а также сведения о материале обрабатываемой детали и его физико-механических характеристиках, о ПКПС, полученные на предыдущих технологических операциях.

Технологическое управление закономерным формированием значениями параметров качества обрабатываемых поверхностей деталей необходимо осуществлять с учётом механизма технологического наследования – переноса свойств объекта от предшествующих технологических операций к последующим. Явление технологического наследования можно описать на основе теории планирования эксперимента, анализ результатов которого позволит выявить на каждом этапе обработки деталей факторы, оказывающие значимое влияние на процесс формирования требуемых характеристик поверхностного слоя, что позволит учитывать

их при разработке ТС закономерного формирования ПКПС.

При определении основных условий функционирования таких ТС следует учитывать, что на формирование физико-механических свойств поверхностного слоя сильно влияет силовой фактор обработки, в частности, при обработке методами ППД: чем выше сила воздействия индентора на поверхность, тем ниже значения параметров шероховатости (до момента перенаклёпа), выше степень и глубина наклёпа и залегания сжимающих остаточных напряжений.

В качестве примера программного обеспечения закономерного формирования ПКПС деталей типа продольных направляющих скольжения рассмотрим двухэтапную ТС обработки торцевым фрезерованием композитом 10 с последующим АВ инструментом упругого действия (рисунок 3.4).

Обработка проводилась на фрезерном станке FQW-400 с системой ЧПУ типа CNC-H646, что обеспечивает высокую технологическую гибкость ТГ2 рассматриваемой ТС, благодаря возможности управления четырьмя факторами обработки на каждом этапе.

На этапе торцевого фрезерования в рамках технологического перехода возможно изменение значений глубины резания t , скорости обработки V и подач S_X и S_Y , которые обеспечивают формирование требуемых значений ПКПС K_1 поверхности после предварительной обработки (рисунок 3.4).

В процессе АВ осуществляется управление силой Q выглаживания индентором обрабатываемой поверхности, скоростью ППД V_{AB} , подачами S_{XAB} и S_{YAB} , что позволяет обеспечить закономерное изменение значений ПКПС K_2 по обработанной поверхности с учётом технологического наследования.

Результаты экспериментов по обработке плоских поверхностей деталей позволили выявить факторы обработки в рассматриваемой ТС, оказывающие наибольшее влияние на формирование ПКПС:

- параметр $Ra_{фр}$ шероховатости поверхности после торцевого фрезерования, мкм;
- сила Q алмазного выглаживания, Н;
- подача S_{AB} на индентор при АВ, мм/инд.

Результаты эксперимента, проведенного по матрице ПФЭ 2^3 , при варьировании управляющих факторов в интервалах $Ra_{\phi p} = 1,3 - 3$ мкм, $Q = 50 - 100$ Н, $S_{AB} = 0,07 - 0,7$ мм/инд (радиус индентора = 3,5 мм), позволили построить физико-статистическую модель формирования параметров шероховатости в рассматриваемой ТС (рисунок 3.4):

$$R_i = b_{0i} Ra_{\phi p}^{b_{1i}} Q^{b_{2i}} S_{AB}^{b_{3i}}, \quad (7.7)$$

где R_i – i -й параметр шероховатости; $b_{0i} \dots b_{3i}$ – соответствующие коэффициенты модели.

Коэффициенты модели представлены в приложении 18.

Такие модели получены не для исследовательских целей, а для оперативного управления процессом обработки.

Если ставится задача обеспечение требуемого параметра шероховатости, например, Ra_{mp} за счёт управления силовым фактором Q , то его значение определяется из зависимости (7.7):

$$Q = \left(\frac{1}{b_{01} Ra_{\phi p}^{b_{11}} S_{AB}^{b_{31}}} \right)^{1/b_{21}} Ra_{mp}^{1/b_{21}}. \quad (7.8)$$

Если необходимо обеспечить закономерное изменение значений параметра Ra по поверхности обрабатываемой детали, то на каждом элементарном участке поверхности, характеризуемом координатой x_i , устанавливается требуемое значение параметра $Ra_{mp}(x_i)$. Тогда значение силы Q на каждом элементарном участке будет определяться:

$$Q(x_i) = B_{2j} (Ra_{mp}(x_i))^{1/b_{21}}, \quad (7.9)$$

$$\text{где } B_{2j} = \left(\frac{1}{b_{01} Ra_{\phi p}^{b_{11}} S_{AB}^{b_{31}}} \right)^{1/b_{21}}.$$

Значения коэффициентов b_{01}, \dots, b_{ni} выбираются по приложению 18 или определяются в процессе оперативной диагностики ТС, для которой строится физико-статистическая модель (глава 8).

Изменения значений силы Q АВ при обработке зависит от смещения под-

вижной части инструмента вдоль его оси Z и, следовательно, сжатия пружины, поэтому целесообразно сразу определять величину перемещения по оси Z контрольной перемещаемой точки инструмента на каждом элементарном участке x_i выглаживаемой поверхности:

$$Z(x_i) = \frac{1}{c} B_{2j} (Ra_{mp}(x_i))^{1/b_{11}}, \quad (7.10)$$

где c – жёсткость пружины инструмента упругого действия.

Примером закономерного формирования параметра $Ra(x_i)$ с учётом механизма технологического наследования является обработка поверхности, параметры шероховатости которой, полученные на этапе торцевого фрезерования, имеют значения, отличающиеся по координате x_i поверхности.

Функция $Ra_{фр} = f(x)$ обеспечивается в процессе фрезерования изменением подачи $S_{фр}$ инструмента соответствующих элементарных участков x_i . Значение параметра $Ra_{фр}$ на i -м участке определяется по зависимости:

$$Ra_{фр}(x_i) = B_{1j} (Ra_{mp}(x_i))^{1/b_{11}}, \quad (7.11)$$

где $B_{1j} = \left(\frac{1}{b_{01} Q^{b_{21}} S_{AB}^{b_{31}}} \right)^{1/b_{11}}$.

Полученные зависимости позволяют определить требуемые закономерности изменений соответствующих факторов обработки, с целью реализации обработки на станке с ЧПУ.

Например, вдоль обрабатываемой поверхности требуется обеспечить изменение значения параметра шероховатости Ra в диапазоне от 0,1 до 2,4 мкм.

Соответствующая модель формирования параметра Ra при выглаживании поверхности заготовки из стали 45 имеет вид (приложение 18):

$$Ra_i = 4,85 Ra_{фр}^{0,89} S_{AB}^{0,66} Q^{-0,32}.$$

Если в качестве управляющего фактора выбирается сила выглаживания Q :

$$Q(x_i) = \left(\frac{1}{4,85 Ra_{фр}^{0,89} S_{AB}^{0,66}} \right)^{1/-0,32} (Ra_{mp}(x_i))^{1/-0,32}.$$

Если формирование параметра Ra осуществляется за счёт механизма техно-

логического наследования, то есть параметра $Ra_{фр}$, то

С учётом механизма технологического наследования шероховатость поверхности после предварительной обработки определяется по формуле:

$$Ra_{фр}(x_i) = \left(\frac{1}{4,85Q^{-0,32} S_{AB}^{0,66}} \right)^{1/0,89} (Ra_{мп}(x_i))^{1/0,89}.$$

На рисунке 7.17 представлены примеры зависимостей изменения параметра $Ra_{мп}$ от факторов обработки. На рисунке 7.17а представлена функция $Ra_{мп} = f(x)$, характеризующая зависимость параметра $Ra_{мп}$ от изменения силы выглаживания Q при постоянных значениях $Ra_{фр}$ и S_{AB} . На рисунке 7.17б изменение значения $Ra_{мп}$ зависит от фактора технологического наследования – параметра $Ra_{фр}$ при постоянных значениях Q и S_{AB} . На оси X_i показаны номера элементарных участков поверхности, для каждого из которых регламентируется требуемое значение параметра шероховатости $Ra_{мп}$.

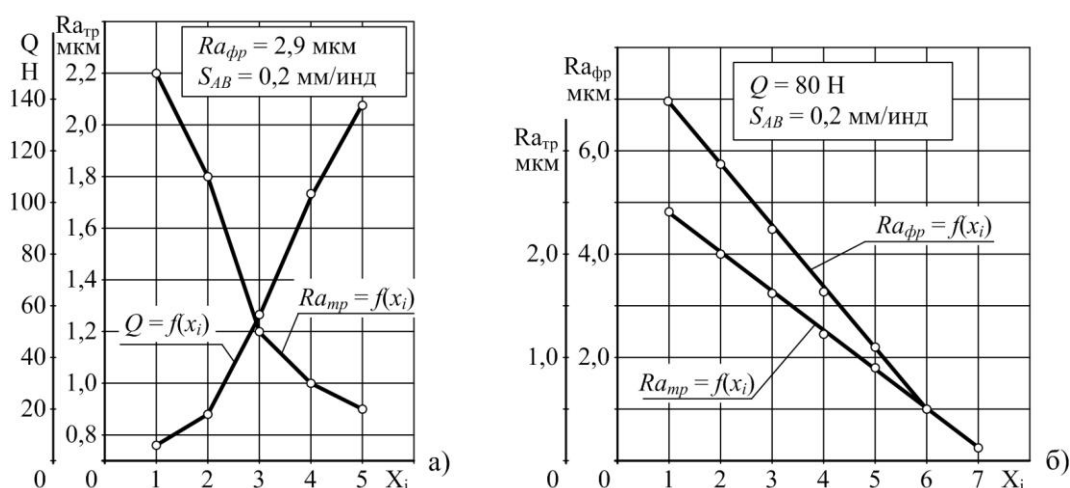


Рисунок 7.17 – Закономерности изменения параметра шероховатости $Ra_{мп} = f(x)$:
 а – при изменении значений силы Q выглаживания в процессе обработки;
 б – при изменении значений параметра $Ra_{фр}$, полученного на этапе торцевого фрезерования

Такой подход к формированию изменяющихся вдоль обрабатываемой поверхности значений параметров качества является эффективным при обеспечении ПКПС функциональных поверхностей деталей соединений трения скольжения, на которые в процессе эксплуатации действуют нагрузки, изменяющиеся по трапецидальному закону (график 5, рисунок 7.10). В таком случае целесообразной является применение методов ППД инструментами упругого действия плоских по-

верхностей типа направляющих скольжения с изменением управляющих факторов обработки по трапецеидальному закону.

На рисунке 7.18 представлена зависимость изменения силы Q ППД, в зависимости от координаты X_i поверхности обрабатываемой детали, на которой аналогично рисунку 7.9 можно выделить участки разбега (нагрузки) x_1 , воздействия эксплуатационных нагрузок с постоянными значениями x_2 и торможения (разгрузки) x_3 .

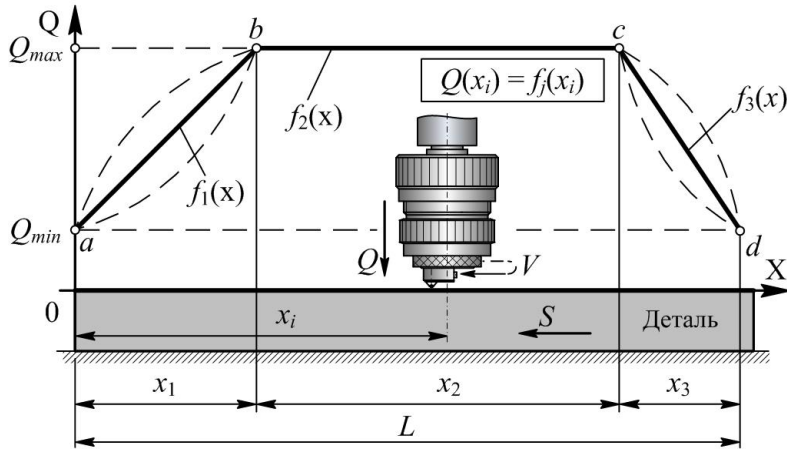


Рисунок 7.18 – Изменение силы Q ППД плоских поверхностей по трапецеидальному закону

На рисунке 7.19 представлено управление силой ППД по закону трапеции

листинг управляющей программы для устройства ЧПУ, позволяющей обеспечить изменение силы Q на участках ab и cd по зависимостям $f_1(x)$ и $f_3(x)$ в процессе обработки поверхности алмазным выглаживанием после торцевого фрезерования.

```

%7 (Управление силой ППД по
закону трапеции)
N10 G90 G57 G1 F(Sпр)M3
N20 P1, (Qmin) P2, (Qmax) P3, (C)
P4, (x0) P5, (x1) P6, (x2)
P7, (x3) P8, (z0)
P9, P1:P3 P10, [P2-P1]:P3
P11, P8+P9 P12, P11+P10
P13, P4+P5 P14, P13+P6
P15, P14+P7 P16, (Y0)
N30 X=P4 Y=P16
N40 Z=P11
N50 X=P13 Z=-P12
N60 X=P14
N70 X=P15 Z=P11
N80 Z0
N90 G0 X0 Y0
N100 M2
    
```

Рисунок 7.19 – Программа обработки поверхности детали с изменением силы выглаживания Q по трапецеидальному закону для УЧПУ CNC-N646

Входными данными при реализации программы являются значения длин участков x_1, x_2, x_3 , максимальные и минимальные значения силы Q , величины подачи S_{AB} и скорости обработки V_{AB} , а также жёсткости пружины инструмента упругого действия. Также задаются координаты нулевой точки станка X_0, Y_0, Z_0 , характеризующие положение заготовки в рабочей зоне перед началом обработки. В тексте программы в круглых скобках (кадры N10, N20) указаны параметры, вместо которых необходимо указывать их численные значения без скобок.

На рисунке 7.20 представлены профилограммы участков поверхности детали из чугуна СЧ20, обработанной на фрезерном станке FQW-400 по представленной на рисунке 7.19 управляющей программе, которые соответствуют участку ab трапецеидального закона изменения силы Q АВ (рисунок 7.18). В таблице представлены значения параметров шероховатости для каждой профилограммы. Участок поверхности $n = 0$ – это поверхность, полученная торцевым фрезерованием композитом 10.

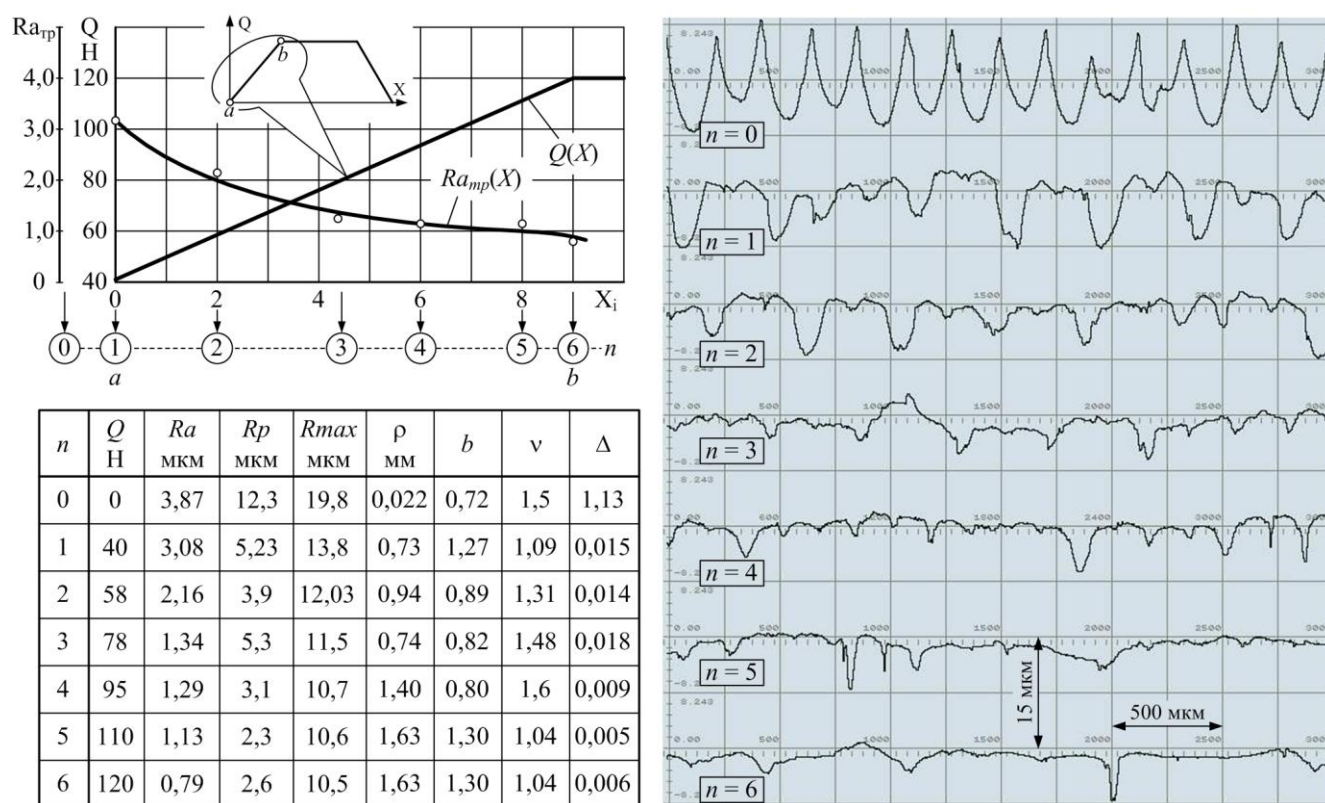


Рисунок 7.20 – Профилограммы участков поверхности, обработанной по трапецеидальному закону изменению силы Q выглаживания (участок ab), и значения параметров шероховатости каждого участка

Параметры шероховатости изменяются в сравнительно широких пределах, в частности, характеризующий износостойкость комплексный параметр Крагельского-Комбалова Δ изменяется более чем в 200 раз, что позволяет прогнозировать равномерное изнашивание поверхности в условиях нестабильных условий эксплуатационных нагрузок.

Обработка поверхности детали с изменением значений подачи инструмента ППД упругого действия вдоль трассы упрочнения также позволяет обеспечить за-

кономерное изменение ПКПС. Разработанная управляющая программа «Продольный меандр» позволяет проводить обработку плоских поверхностей деталей с различными законами изменения подачи (рисунок 7.21).

Так на рисунке 7.21а представлена зависимость характеризующая обработку с переменной ступенчатой дискретно изменяющейся рабочей подачей F (обозначение в соответствии с кодом программирования ISO-7bit), а на рисунке 7.21б – обработку с переменной подачей, изменяющийся по синусоидальному закону, определяемому зависимостью

$$F = F_{min} + (F_{max} - F_{min}) \left| \sin \left(\frac{2\pi}{t_F} X \right) \right|, \quad (7.11)$$

где X – текущая координата оси инструмента ППД в пределах изменения подачи t_F вдоль поверхности.

В скобках указывается соответствующий код в управляющей программе.

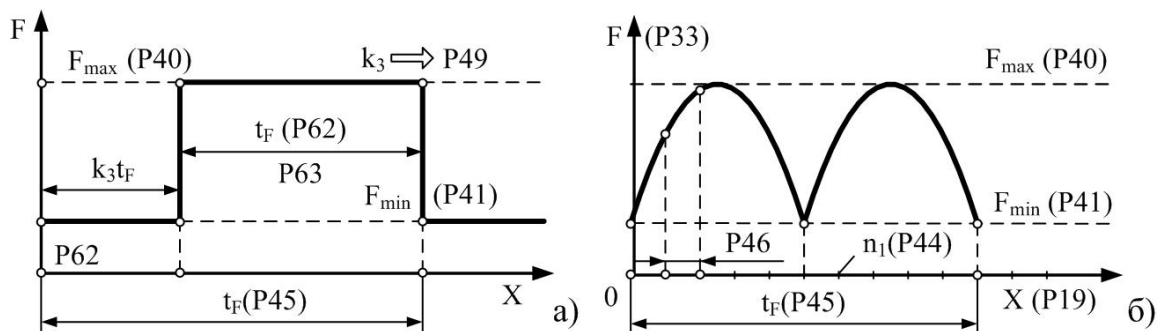


Рисунок 7.21 – Законы изменения подачи при обработке методом ППД плоских поверхностей деталей по управляющей программе «Продольный меандр»: а – ступенчатая дискретно изменяющаяся подача F ; б – подача F , изменяющаяся по синусоидальному закону

Примером технологического формирования различных по значениям ПКПС участков поверхности является ТС торцевого фрезерования с последующим АВ плоских поверхностей деталей с учётом механизма технологического наследования, результаты исследования технологических возможностей которой представлены на рисунке 7.22.

В качестве фактора, определяющего передачу ряда свойств поверхности от операции к операции, является продольная подача лезвийной обработки, изменение значений которой в пределах перехода позволяет обеспечить широкий диапа-

зон значений параметров шероховатости.

Так, изменение подачи $S_{фр}$ инструмента при торцевом фрезеровании композитом 10 плоской поверхности детали из стали 45 на участках I и II формирует профили шероховатости с различными значениями, что приводит к возникновению ступени ΔH_1 . Знаки (+), (-) указывают на большие или меньшие значения подачи (рисунок 7.22 а). Длины участков l_1 и l_{II} задаются из конструктивных или технологических соображений ($l_1 = l_2 = 4000$ мкм).

После алмазного выглаживания поверхности в зоне перехода II–I участков поверхности также наблюдаются ступень $\Delta H_2 > \Delta H_1$, что объясняется фактором передачи свойств поверхности, в частности геометрических свойств профиля шероховатости, и влиянием режимов АВ (Q и S_{AB}).

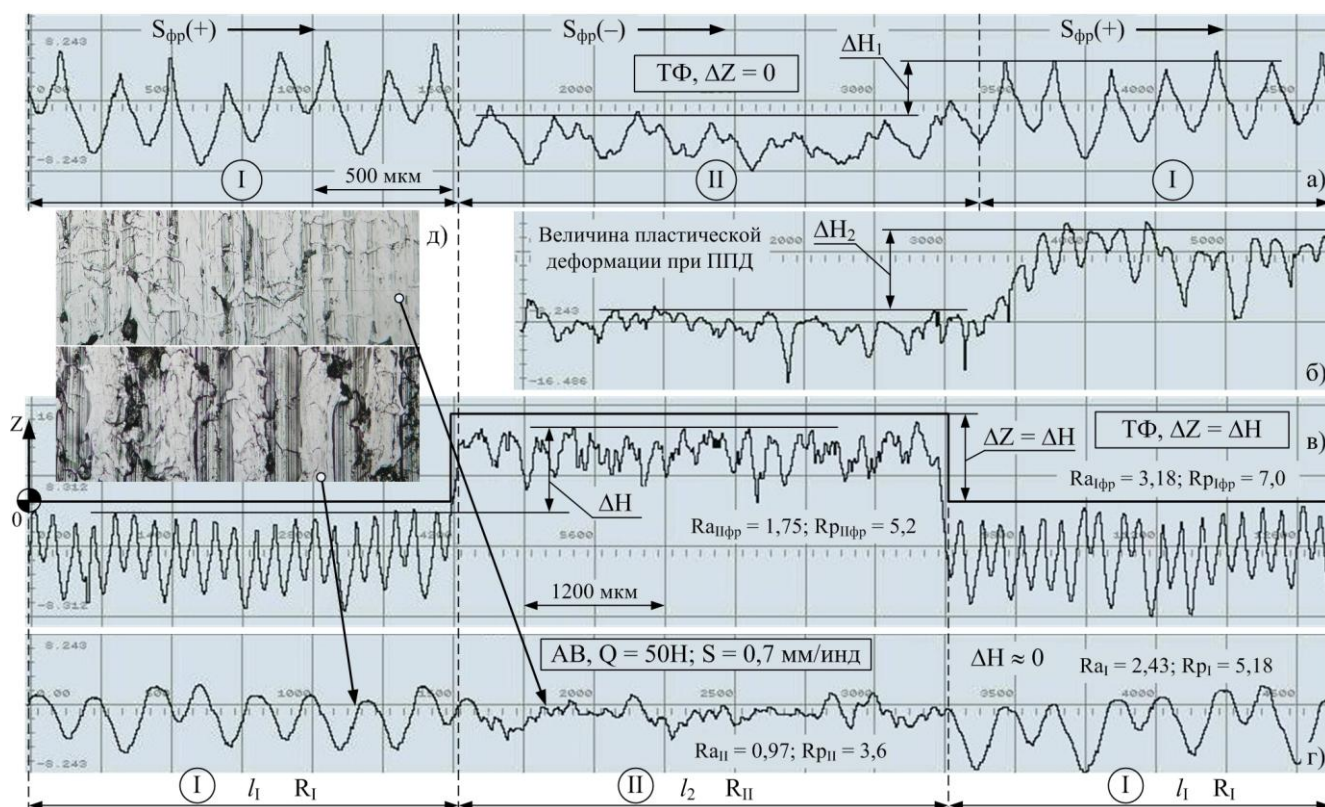


Рисунок 7.22 – Формирование параметров качества плоских поверхностей деталей с учётом механизма технологического наследования

Для того, чтобы обеспечить после АВ отсутствие ступеней ΔH на границах участков I – II при обработке торцевым фрезерованием предлагается корректировать положение вершины режущего зуба фрезы смещением по оси Z на величину

$\Delta Z = f(\Delta H_1, \Delta H_2)$. Теоретически определить значения ΔH_1 и ΔH_2 сложно, но оперативная диагностика ТС (ДТС) позволяет просто решить этот вопрос.

Для профилограммы на рисунке 7.23б $\Delta H_2 \approx 11$ мкм, поэтому на станке с ЧПУ нормальной точности с минимальной величиной перемещения 0,001 мм такое смещение $\Delta Z = \Delta H_2$ по оси инструмента можно обеспечить. На рисунке 7.22 в представлена профилограмма обработанной торцевым фрезерованием поверхности, где на переходах участков I – II и II – I сформирована ступень ΔH .

Обработка такой поверхности методом АВ позволяет сформировать поверхность без перепадов ΔH , но с различными геометрическими и физико-механическими свойствами участков l_1 и l_2 (рисунок 7.22 г).

Микрофотографии поверхностей соответствующих участков представлены на рисунке 7.22д.

7.5. Выводы к седьмой главе

1. В работе предложены модели контактных взаимодействий поверхностей деталей, работающих в соединениях трения скольжения технологического оборудования и оснастки, с целью определения причин неравномерного изнашивания поверхностей в процессе эксплуатации.

2. Предложена классификация типовых эксплуатационных воздействий (нагрузка P , скорость относительного скольжения V) на поверхности трибоэлементов по характеру изменений во времени и в пространстве, позволяющая обосновать требуемую закономерность изменения значений ПКПС по функциональной поверхности детали.

3. Разработаны принципы технологического управления процессом формирования параметров качества, значения которых закономерно изменяются по поверхности детали в соответствии с характером изменений эксплуатационных нагрузок, что позволит обеспечить равномерный износ.

4. Предложено оценивать технологические системы металлообработки по виду технологической гибкости, характеризующей возможность изменять значе-

ния управляющих факторов обработки в рамках одного технологического перехода.

5. Представлены способы закономерного формирования параметров качества поверхностей обрабатываемых деталей на универсальных станках с низкой технологической гибкостью на основе применения дополнительных механических устройств (копиров, следящих гидравлических устройств и др.) и программируемого блока обработки ППД инструментом упругого действия.

5. Разработана модель программного управления процессом формирования ПКПС с закономерно изменяющимися по обрабатываемой поверхности значениями в компьютеризированных ТС с ЧПУ.

6. Представлены принципы построения моделей изменения управляющих факторов в процессе обработки на основе физико-статистического моделирования процессов формирования параметров качества, в том числе с учётом механизма технологического наследования, позволяющие реализовать программное управление в ТС с ЧПУ обеспечением закономерно изменяющихся ПКПС.

7. Представлены примеры реализации программного управления формирования закономерно изменяющихся ПКПС деталей на примере управления силовым фактором Q процесса ППД в ТС с ЧПУ и на примере ТС торцевого фрезерования и последующего алмазного выглаживания, в которой формирование участков поверхности с различными ПКПС осуществляется с учётом механизма технологического наследования.

Результаты исследований, представленных в данной главе, опубликованы в работах [125, 129, 130, 138, 142 – 146, 242, 243, 244, 255, 259, 267, 268, 272, 278, 280, 284, 285, 290 – 293, 294, 295, 298 – 301, 333].

ГЛАВА 8. ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Технологическое обеспечение параметров качества и эксплуатационных свойств деталей машин с заданной надёжностью зависит от надёжности технологической системы, выбор которой нередко базируется на априорной информации о её возможностях, определяемой в ходе испытаний ТС. Эффективным является программный метод испытаний ТС, разработанный проф. А. С. Прониковым [170, 179], позволяющий определить их точность и параметрическую надёжность на основе тестовых воздействий, применения методов активного эксперимента и автоматизации процессов проведения испытаний и обработки их результатов.

В восьмой главе предлагается использовать такой подход для оценки технологических возможностей ТС чистовой и финишной обработки деталей инструментами с ССТМ и надёжности формирования требуемых ПКПС и ПЭС.

8.1. Модели процессов диагностики технологических систем обработки поверхностей деталей по параметрам качества и эксплуатационных свойств

Для определения параметрической надёжности ТС механической обработки поверхностей деталей по критериям их качества предлагается программный метод экспресс-диагностики (ЭД) как функционирующих ТС в соответствии с установленным регламентом (плановая ЭДТС), так и приобретаемых новых (приёмная ЭДТС), адаптированный к использованию в условиях производственных экспериментально-технологических лабораторий.

Предлагаемая ЭДТС основана на автоматизации процессов обработки поверхностей образцов в соответствии с планом эксперимента (блоки А, В, рисунок 8.1); процессов измерения ПКПС (С1 И С2) и ПЭС (С3) в информационно-измерительных системах (блок С, рисунок 8.1) и процессов обработки результа-

тов диагностики и их статистического анализа (блок D, рисунок 8.1).

По результатам ЭДТС определяется возможность ТС обеспечить заданные параметры качества R_{i3} обрабатываемых поверхностей в регламентируемых интервалах $[R_{i3} \pm \delta R_{i3}]$ с вероятностью выполнения задания, равной или больше допустимой:

$$P((R_{i3}) \in [R_{i3} \pm \delta R_{i3}]) \geq [P_{min}]. \quad (8.1)$$

Если условие (8.1) не выполняется, то ТС не обеспечит заданные требования по качеству обрабатываемых поверхностей.

Выбор ТС, удовлетворяющей условию (8.1), должен быть основан на информации о её технологических возможностях по обеспечению ПКПС и ПЭС, которые определяются в ходе ЭДТС.

Так как ПКПС и ПЭС поверхностей деталей, работающих в соединениях типа трения скольжения, формируются на заключительных этапах обработки, то целесообразно проводить диагностику ТС по финишным операциям, которые окончательно определяют значения ПКПС и ПЭС.

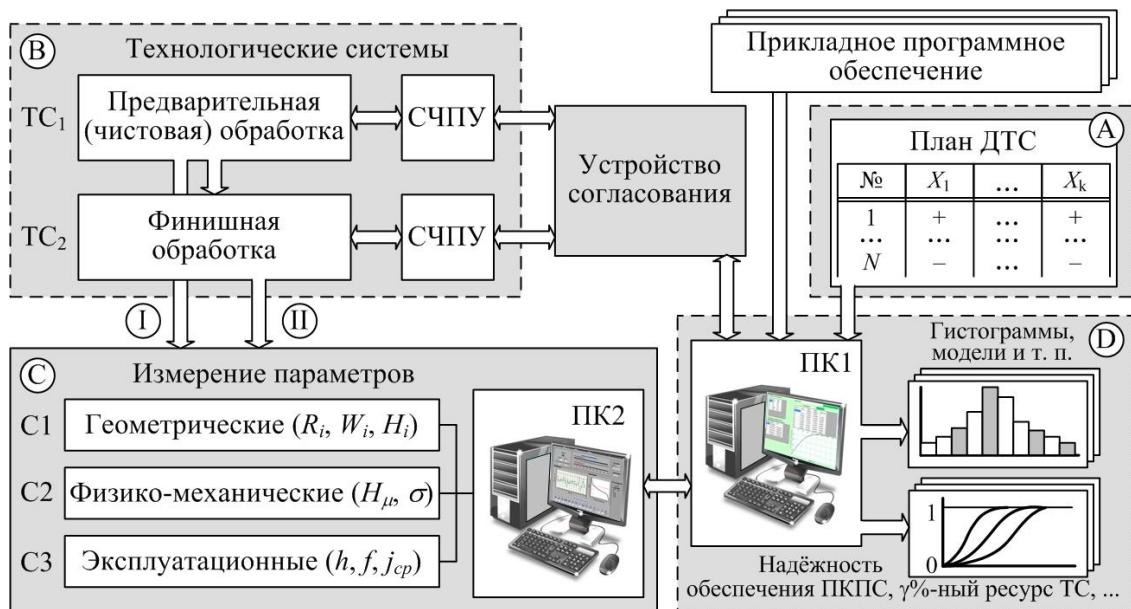


Рисунок 8.1 – Автоматизация ДТС программным методом: А – блок планирования; В – блок обработки поверхностей деталей; С – блок измерения ПКПС и ПЭС; Д – блок обработки результатов ДТС

Диагностика ТС с ЧПУ проводится на основе проведения активного экспе-

римента, что позволяет получить физико-статистические модели формирования ПКПС и ПЭС в зависимости от условий обработки. План проведения эксперимента формируется в блоке А (рисунок 8.1).

В процессе диагностики ТС на этапе обработки поверхностей деталей варьируются значения управляющих технологических факторов обработки. Так, для ТС обработки плоских поверхностей деталей методами ППД после торцевого фрезерования композитом 10 могут изменяться как количественные показатели факторов (например, значения параметров шероховатости поверхности после фрезерования Ra_{np} ; силы Q ППД инструментом упругого действия; подачи S и скорости V обработки методом ППД и др.), так и качественные (АВ или накатывание шариковым индентором и др.).

В блоке В (рисунок 8.1) в соответствии с планом ДТС в автоматизированном режиме выполняется обработка поверхности детали.

Для рассматриваемой ТС обработки на фрезерном станке с ЧПУ FQW-400 обработка детали торцевым фрезерованием композитом 10 должна обеспечить максимальные и минимальные значения параметров шероховатости на различных участках поверхности. Это обеспечивается программным способом за счёт дискретного изменения величины подачи $S_{фр}$ в пределах технологического перехода (рисунок 8.2).

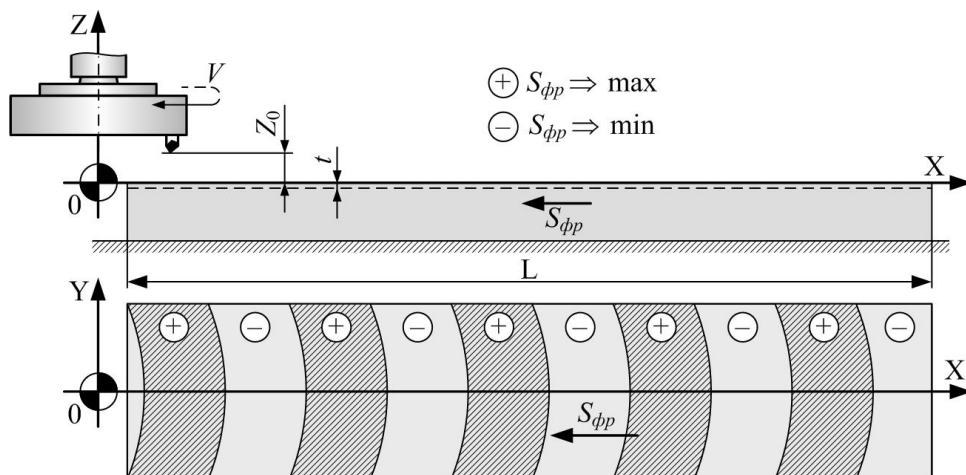


Рисунок 8.2 – Схем торцевого фрезерования композитом 10 плоской поверхности заготовки с дискретным изменением величины подачи $S_{фр}$ на станке с ЧПУ

Дальнейшая обработка методами ППД инструментом упругого действия

осуществляется с изменением значений силы Q ППД и подачи S .

На рисунке 8.3 представлена схема обработки поверхности образца путём программной реализации двух полуреplik плана ПФЭ для алмазного выглаживания (АСПК) и для накатывания шариком (сталь ШХ15).

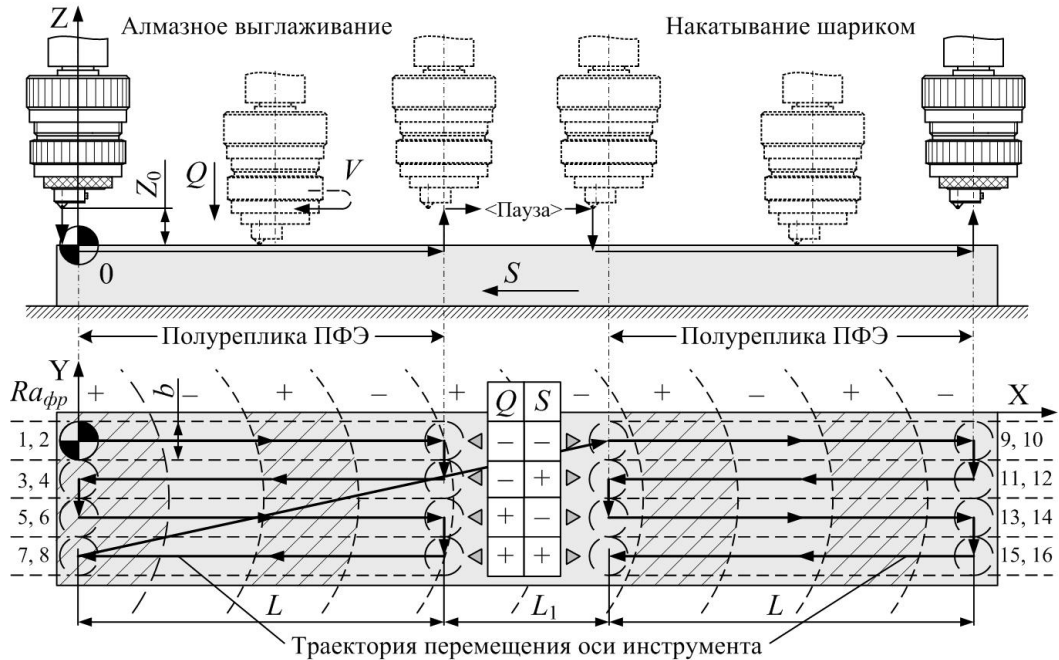


Рисунок 8.3 – Схема обработки плоской поверхности заготовки методами ППД при реализации полуреplik плана ПФЭ в процессе ДТС на станке с ЧПУ

На этапе измерения ПКПС и ПЭС поверхностей образцов (блок С, рисунок 8.1) применяются компьютеризированные информационно-измерительные системы, такие как стационарные ИИС-1 и мобильные ИИС-2, ИИС-3 (п. 3.2.1, глава 3) для оценки геометрических параметров качества, система микроструктурного анализа поверхностей (п. 3.2.2, глава 3), измерительная система «Осциллограф» (п. 3.1.2, глава 3) и др.

На рисунке 8.4 представлен процесс измерения параметров шероховатости поверхности образца в рабочей зоне ТС с помощью системы ИИС-3. Результаты могут быть представлены как на экране ПЭВМ, так и в форме протокола (рисунок 8.5).

Построение физико-статистических модели формирования ПКПС и ПЭС и расчёт параметрической надёжности исследуемой ТС осуществляется в процессе обработки результатов измерений (блок D, рисунок 8.1) с применением разработанного программного обеспечения.

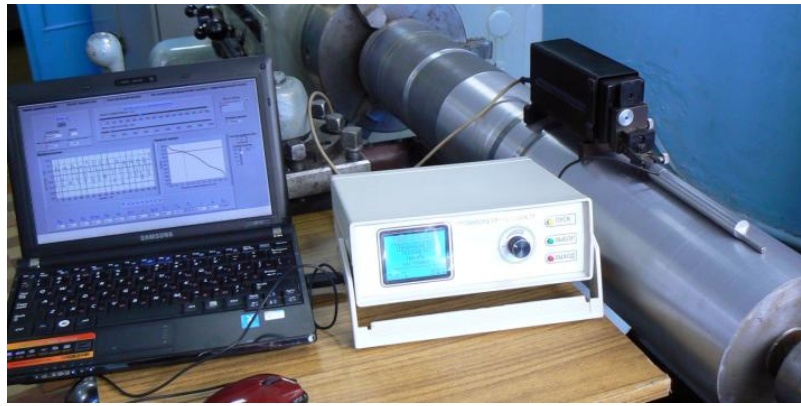


Рисунок 8.4 – Измерение шероховатости в рабочей зоне ТС с помощью мобильной ИИС-3

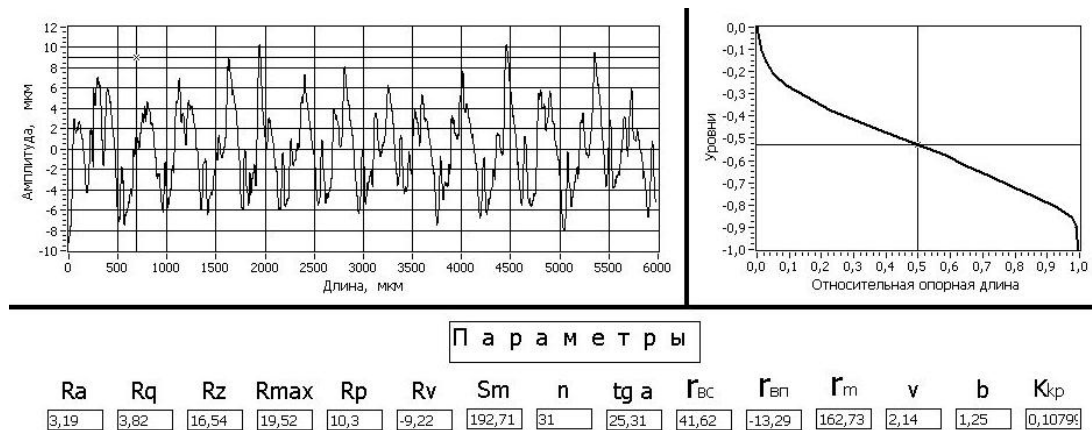


Рисунок 8.5 – Профилограмма, опорная кривая и числовые значения параметров шероховатости

Полученные по результатам ЭДТС модели (2.51 – 2.52) дают возможность уточнить известную информацию о технологических возможностях исследуемых ТС. Адекватность таких моделей выше адекватности моделей, полученных в лабораторных условиях, так как обработка поверхностей осуществляется в соответствии с планом эксперимента, проводимого в узкой области факторного пространства, определяемого условиями конкретного производства.

Результаты ДТС могут быть представлены в виде протоколов, содержащих параметры физико-статистических моделей формирования ПКПС и ПЭС и параметр, характеризующие параметрическую надёжность исследуемой ТС в табличном и графическом представлении.

Процесс измерения параметров эксплуатационных свойств поверхностей деталей (блок С, рисунок 8.1), отличается следующими особенностями.

1. Исследуемые параметры эксплуатационных свойств поверхности (износостойкости, контактная жёсткость и др.) определяются функциональным назна-

чением детали в конкретном узле.

2. Практически отсутствуют нормативно-технические документы для определения и регламентации показателей большинства параметров эксплуатационных свойств поверхностей деталей. Существуют указания рекомендательного характера, стандарты испытаний на надёжность, отдельные нормы (контактная жёсткость).

3. Практически отсутствуют стандартизованные или нормализованные методы диагностики поверхностей по параметрам эксплуатационных свойств (за исключением испытаний на выносливость).

Поэтому необходима реализация и унификация систем программных испытаний ЭС поверхностей деталей непосредственно в зоне ТС её обработки, результаты которых можно применять для сравнительной оценки и ранжирования различных ТС формирования ПКПС по критериям обеспечения требуемых ПЭС.

Можно получить априорную оценку некоторых эксплуатационных показателей обработанных поверхностей (например, износостойкости) для различных условий, рассчитав соответствующие комплексные показатели ПКПС (безразмерный комплекс Δ Крагельского-Комбалова).

Сложной задачей при проведении диагностики ТС по параметрам ЭС является измерение, регистрация и статистическая обработка входных и выходных параметров процессов, протекающих при стендовых испытаниях.

Эффективной является реализация метрологического обеспечения процессов испытаний на базе компьютеризации специализированных стендов и измерительных приборов с датчиками различных типов, предназначенных для регистрации и преобразования первичной информации. В таком случае применяются устройства сопряжения датчиков с платой сбора данных в ПК, адаптированные к условиям измерений различных ПКПС и ЭС и передающие при достаточном усилении сигналы от датчиков с минимальными помехами и искажениями.

На рисунке 8.6 представлена структурная схема автоматизированной системы исследования износостойкости поверхностей деталей соединений трения скольжения, в которой применяется подобные устройства.

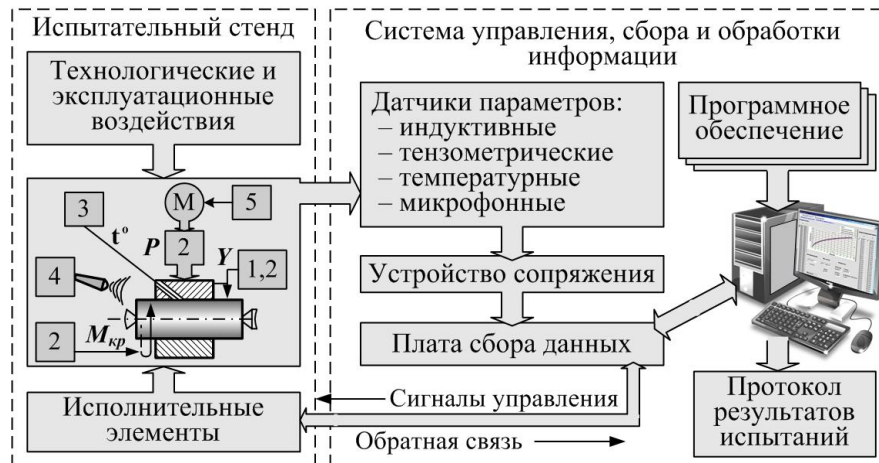


Рисунок 8.6 – Структура автоматизированной системы исследования ЭС поверхностей деталей соединений трения скольжения: 1, 2, 3, 4 – индуктивные, тензометрические, температурные и микрофонные датчики; 5 – исполнительные элементы приводов устройств моделирования эксплуатационных воздействий на поверхности трибоэлементов

Как показывает практика, во многих случаях диагностику ТС по параметрам эксплуатационных свойств поверхностей связана с необходимостью проведения стендовых испытаний соединений обработанных деталей, с имитацией условий и нагрузок, аналогичных реальным условиям эксплуатации соединений.

Основными модулями испытательных стендов при диагностике, например, износостойкости поверхностей деталей соединений трения скольжения, являются модуль привода относительного скольжения поверхностей трибоэлементов, модуль нагрузки на соединение и измерительный модуль.

В этом случае при диагностике, например, износостойкости основными модулями являются: модуль привода относительного скольжения поверхностей трибоэлементов, модуль нагрузки на соединение, измерительный модуль.

Для испытаний соединений деталей по другим ПЭС применяются аналогичные модули. Таким образом, необходимо создание унифицированных приводов управления модулями создания эксплуатационных воздействий на поверхности деталей в испытательных стендах.

Предлагается применять автоматизированный привод управления модулями (рисунок 8.7) на базе силового шагового привода (СШП), включающего шаговый двигатель и программируемый контроллер (сервопривод шаговый типа СШШ 10).



Рисунок 8.7 – Автоматизированный привод управления модулями испытательных стендов для определения параметров эксплуатационных свойств поверхностей деталей

Программа управления СШП генерируется ПК в соответствии с требованиями программы испытаний исследуемых деталей соединений и сохраняется в энергонезависимой памяти контроллера СШП (EMC2 или др.).

От СШП управляющее воздействие через редуктор передаётся на исполнительный элемент любого модуля испытательного стенда, что обеспечивает необходимый вид эксплуатационного воздействия на поверхность деталей соединения.

Такой привод позволяет моделировать различные типы эксплуатационных воздействий на соединения деталей: создавать как статические, так и динамические нагрузки на соединение, обеспечивать закономерное изменение скоростей относительного скольжения трибоэлементов при вращательном или возвратно-поступательном движении и др.

Регистрация значений ПЭС обеспечивает модуль измерения, регистрирующие датчики которого устанавливаются в модуле приводов и в модулях нагрузки.

В качестве примера на рисунке 8.8 представлена блок-схема канала сбора и обработки информации в испытательных стендах для исследования эксплуатационных свойств соединений, включающая измерительные датчики (индуктивные, тензометрические, температурные и др.), устройство сопряжения с ПК и плату сбора данных.

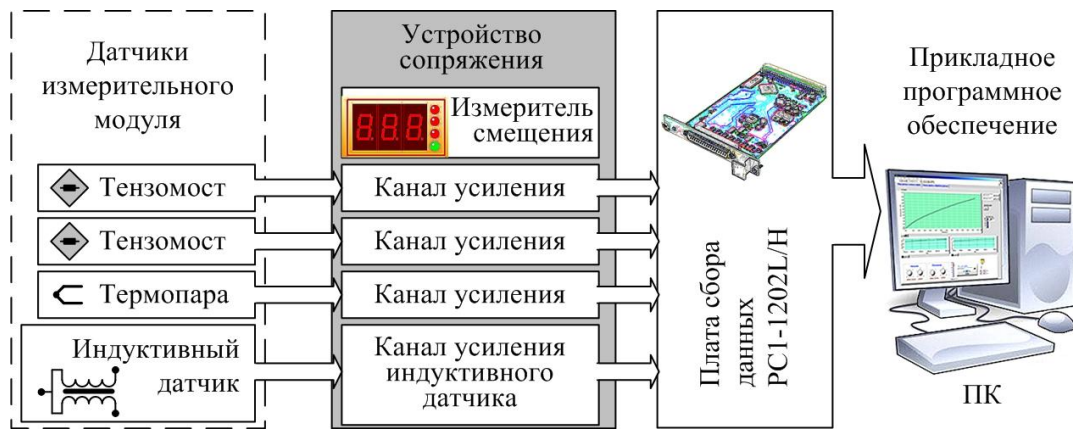


Рисунок 8.8 – Блок-схема канала сбора информации системы измерения контактной жёсткости плоских стыков

8.2. Аппаратно-программные средства, применяемые при диагностике технологических систем

Важнейшими элементами в блок-схемах диагностики ТС программным способом на базе ПК, обеспечивающими надёжность и точность результатов ДТС, являются блоки сопряжения и согласования, которые передают информацию с датчиков измерительных или испытательных стендов в компьютер для дальнейшей обработки (рисунки 8.1, 8.6, 8.8). Эти блоки представляют собой аппаратно-программные средства (АПС).

В ходе исследований было разработано несколько моделей таких устройств.

Блок-схема устройства АПС-1 (рисунок 8.9) содержит каналы усиления для тензометрических датчиков, применяемых при исследованиях эксплуатационных характеристик цилиндрических и плоских соединений пар трения, при исследовании контактной жёсткости соединений и др. Каналы усиления индуктивных датчиков применяются при исследованиях геометрических параметров качества поверхностей и измерении микроперемещений. Термопары применяют для определения температуры в зонах контакта поверхностей трибоэлементов. Таким образом, подобные устройства могут применяться в различных компьютеризированных системах сбора и обработки информации.

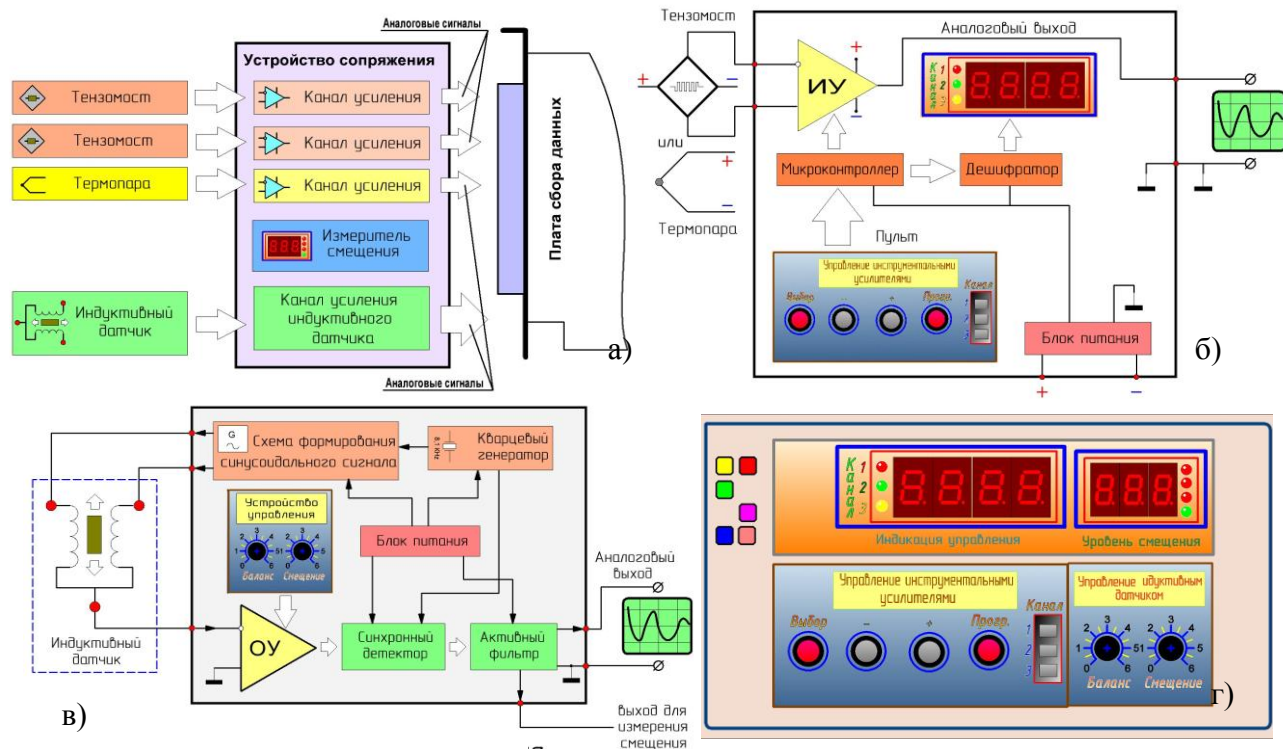


Рисунок 8.9 – Аппаратно-программное средство измерений микроперемещений АПС-1:
а – блок-схема; б, в – каналы усиления; г – лицевая панель АПС-1

Канал усиления для тензодатчиков и термопары (рисунок 8.9б) создан на базе инструментального усилителя AD8550. Величины коэффициента усиления и смещения задаются с пульта управления. Там же запускается программа микропроцессора для генерации кодов.

Запрограммированные величины коэффициента усиления и смещения индицируются в цифровом виде, а индикатор смещения показывает его фактическую величину для возможной коррекции, которая реализуется автоподстройкой. Это обеспечивает минимальный «дрейф нуля» канала. Реализована диагностика состояния датчиков во время работы. Длина коммуникационной линии может составлять до 100 м и более.

Канал усиления для индуктивного датчика (рисунок 8.9в) реализован по структурной схеме, аналогичной схеме профилометра 170622 («Калибр», г. Москва) с использованием современной элементной базы.

Для обработки получаемых сигналов с физических устройств, оснащённых датчиками различного типа, может быть использовано специальное программное обеспечение или любая стандартная среда программирования, например, LabView.

Их преимущество заключается в удобстве создания интерфейса пользователя от лицевой панели с управляющими элементами до связи с аппаратными средствами в виде элементов, подключаемых к ПК через стандартные интерфейсы.

На рисунке 8.10 представлен скриншот окна программы обработки полученных данных при исследовании параметров контактной жёсткости плоского стыка соединения.

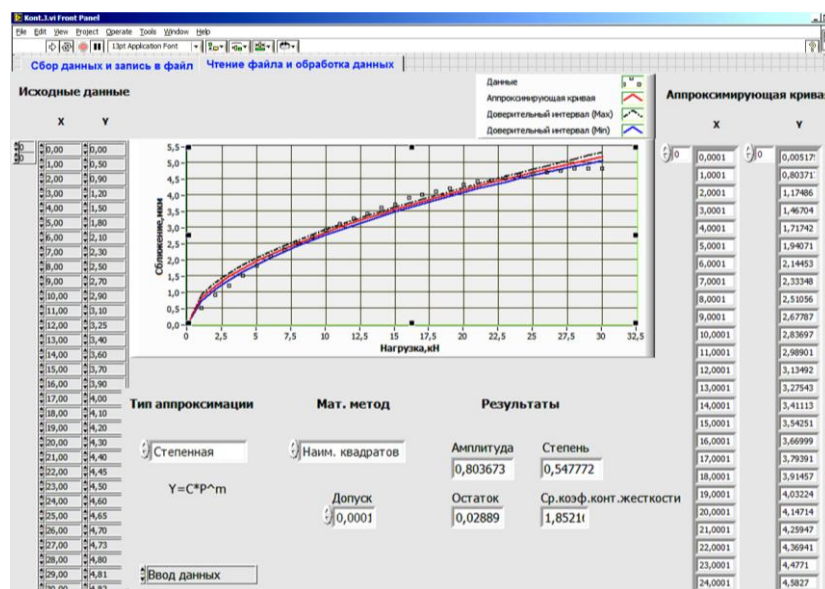


Рисунок 8.10– Фрагмент окна пользователя программы обработки полученных данных при исследовании параметрам контактной жёсткости плоского стыка соединения

Общий вид блока аппаратно-программного средства АПС-2 показан на рисунке 8.11.

Блок АПС-2 также является многоцелевым, так как в нём предусмотрена возможность подключения индуктивных, тензометрических измерительных систем и датчиков температуры. Это актуально при измерении геометрических параметров КПС, а также при стендовых исследованиях эксплуатационных свойств поверхностей деталей в процессе обработки (параметры износостойкости, контактной жёсткости и др.).

На передней панели блока АПС-2 (рисунок 8.11а) располагаются органы управления, которые включают мини-дисплей, кнопки «Выбор» (выбор режима измерения: профилометр, тензомер, температура), а также работы с памятью и режимами настройки, многофункциональный регулятор настройки режимов рабо-

ты выбранной рабочей среды, кнопка «Пуск» (запуск процесса измерения), кнопка «Выход» (завершение процесса измерения).

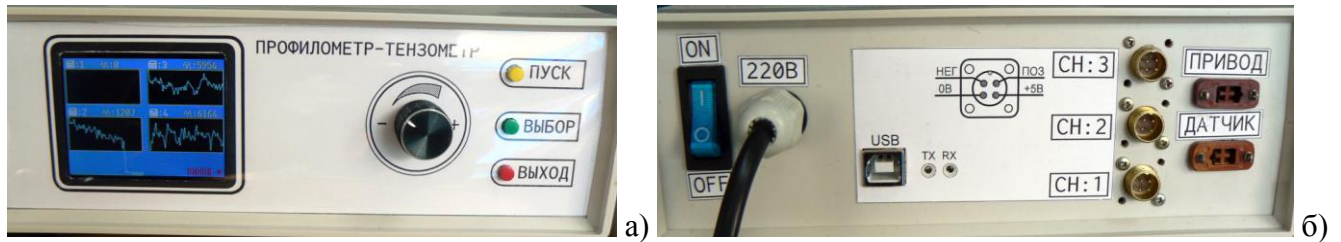


Рисунок 8.11 – Общий вид передней (а) и задней (б) панели блока аппаратно-программного средства измерений АПС-2

На задней панели блока АПС-2 (рисунок 8.11 б) размещаются: разъём электропитания; тумблер включения-выключения прибора; разъёмы для подключения индуктивного датчика, привода движения датчика, USB-порт для подключения к ПЭВМ при обработке результатов измерения; гнезда СН-1, СН-2, СН-3 для подключения тензометрических систем измерения.

Блок АПС-2 осуществляет функции управления измерениями в системах ДТС. Так, в измерительной системе «Профилометр» (п. 3.2.1.2, рисунок 3.14) он управляет балансировкой и работой привода датчика.

Информационные сигналы, снимаемые индуктивным датчиком с поверхности детали передаются для дальнейшей обработки через порт USB непосредственно в ПК.

Также АПС-2 позволяет осуществлять измерения в цеховых условиях, благодаря возможности регистрации полученных при измерении данных в его памяти (4 ячейки памяти), и вывода результатов на мини-дисплей в виде графической информации (профилограммы, графики нагрузки, контактных сближений и др.).

8.3. Выводы к восьмой главе

1. Для определения технологических возможностей ТС по обеспечению требуемых значений параметров качества и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей, разработан программный метод диагностики ТС, вклю-

чающий модули планирования экспериментов, обработки деталей, измерения параметров качества и эксплуатационных свойств, построения моделей их формирования и оценки параметрической надёжности.

2. Предложена модель диагностики технологических систем обработки поверхностей деталей по параметрам качества и эксплуатационных свойств.

3. Разработаны аппаратно-программные средства для систем диагностики по параметрам качества и эксплуатационным свойствам обрабатываемых поверхностей, обеспечивающие высокую «гибкость» и мобильность процесса.

4. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение поддержки средств передачи данных о состоянии диагностируемой системы для анализа непосредственно из рабочей зоны диагностируемой ТС в ПЭВМ.

Основные результаты исследований, представленные в данной главе, опубликованы в работах автора [3, 123, 129, 130, 205, 239, 241, 246, 250, 261, 262, 263, 270, 342].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены основные положения теоретико-методологического подхода к определению параметрической надёжности технологических систем металлообработки по параметрам качества и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей деталей.

Разработанные теоретические и методологические положения определения параметрической надёжности ТС и практические рекомендации по их реализации в совокупности с программным обеспечением готовы к практическому применению в условиях производства при периодической диагностике технологического оборудования.

Предложенный программный метод ДТС, позволяет строить модели формирования параметров качества и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей в пространстве управляемых факторов как для новых ТС, так и для ТС, находящихся в эксплуатации с целью установления их реальных технологических возможностей и текущей параметрической надёжности.

Представленные результаты исследований по комплексу вопросов, связанных с управлением процессом закономерного формирования параметров качества поверхностей деталей при их обработке с целью стабилизации ПЭС при изменяющихся условиях эксплуатации могут послужить отправной точкой к дальнейшему углубленному развитию теоретических идей технологического обеспечения требуемой эшюры распределения параметров качества по поверхности детали в процессе обработки, а также практических аспектов их реализации в условиях автоматизированного производства.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы позволяют сделать следующие выводы.

1. Впервые решена проблема повышения надёжности технологического обеспечения параметров шероховатости и эксплуатационных свойств (на примере износостойкости) поверхностей деталей машин при чистовой и финишной обработке ППД инструментами из ССТМ за счет выбора соответствующей ТС из

множества альтернативных по критерию максимума параметрической надёжности.

2. Разработаны теоретические основы назначения интервальных технологических значений параметров шероховатости поверхностей деталей машин в технологической документации, заключающимся в замене задаваемых конструктором их точечных средних значений на интервальные, что соответствует случайному характеру их формирования при обработке и обеспечивает выполнение конструктивных требований.

3. Разработаны научные основы оценки параметрической надёжности технологических систем механической обработки по обеспечению характеристик качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей в заданных интервалах, включающей построение физико-статистических моделей их формирования, реализацию и обработку результатов машинных экспериментов над моделями с применением методов имитационного моделирования и определения вероятности выполнения заданий по обеспечению требований к параметрам качества, являющейся показателем параметрической надёжности ТС.

4. Разработан комплексный подход к экспериментальным исследованиям ТС металлообработки, позволяющий унифицировать процедуры получения и анализа результатов в лабораторных и производственных условиях с применением созданных компьютеризированных измерительных систем оценки геометрических параметров качества поверхностей деталей и металлографического анализа на базе отечественной измерительной техники, микроскопов и цифровой фото- и видеотехники. Это решает задачу эффективной эксплуатации физически работоспособного, но морально устаревшего оборудования, и, в определенной мере, отвечает современным требованиям импортозамещения измерительного оборудования.

5. Разработаны модели влияния динамических свойств одноинденторных инструментов упругого действия при обработке ППД плоских и цилиндрических поверхностей деталей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости на постоянство контакта индентора с поверхностью, позволяющие

определить условия обработки (силу воздействия индентора на поверхность, скорость обработки при известных массе подвижных частей и жесткости упругого элемента инструмента ППД и параметрах волнистости обрабатываемой поверхности), обеспечивающие формирование параметров качества в допустимых интервалах варьирования с максимальной надёжностью.

6. Получены уравнения вынужденных колебаний индентора при обработке плоских и цилиндрических поверхностей деталей ППД в ТС постоянной жесткости инструментом упругого действия и его амплитудно- и фазочастотные характеристики, отличающиеся учётом его конструктивных параметров (масса m подвижных частей, жёсткость c упругого элемента, коэффициент F вязкого трения при демпфировании) и технологических факторов (максимальная высота W_{max} и шаг по средней линии S_{mw} основных гармоник разложения исходного профиля в ряд Фурье (в частном случае волнистости или отклонений от круглости), скорость V и сила Q выглаживания) и адаптированные к практическому использованию в условиях производства как аналитически, так и в виде диаграмм.

7. Установлено, что при обработке ППД инструментами упругого действия плоских и цилиндрических поверхностей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости возможно отсутствие контакта (отрыв) индентора с поверхностью, в связи с чем предложено понятие технологической устойчивости процессов обработки ППД инструментами упругого действия, условием которой является обеспечение регламентируемых значений параметров качества поверхностного слоя в допустимых интервалах варьирования с максимальной надёжностью непрерывно по всей обрабатываемой поверхности.

7. Установлено, что при обработке ППД инструментами упругого действия плоских и цилиндрических поверхностей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости возможно отсутствие контакта индентора с поверхностью, т. е. его отрыв, вызванный силами инерции, в связи с чем предложено понятие технологической устойчивости процессов обработки ППД инструментами упругого действия, условием которой является обеспечение регламентируемых значений параметров шероховатости поверхности в допустимых интервалах

варьирования, установленных на стадии проектирования, с максимальной надёжностью.

8. Теоретически определены критерии оценки технологической устойчивости процесса ППД из условий безотрывной обработки в виде зависимостей критических значений скорости V и силы Q выглаживания от параметров отклонений неровностей поверхности W_{max} и S_{mw} , конструктивных параметров инструмента m и c , и допустимых относительных пределов δ и β верхней и нижней границ вариации силы Q обработки. Полученные аналитические зависимости и диаграммы позволяют определить значения скоростей и сил обработки ППД, обеспечивающих формирование параметров качества поверхности в заданных интервалах варьирования, что нашло практическое применение при изготовлении деталей энергетических установок.

9. На основе полученных моделей формирования параметров шероховатости определены вероятности выполнения заданий по их регламентируемым значениям, как показатели параметрической надёжности ТС обработки плоских и цилиндрических поверхностей деталей из чугуна СЧ20 и стали 45 лезвийными методами обработки и ППД инструментами, оснащёнными ССТМ, и комбинированной антифрикционной обработкой («торцевое фрезерование или точение композитом 10», «торцевое фрезерование или точение композитом 10 + алмазное выглаживание (АВ)»; «точение композитом 10 + нанесение мягкой приработочной плёнки + АВ») и сформированы аналитические и табличные базы данных, принятые к практическому использованию качестве руководящего материала при выборе ТС из ряда альтернативных.

10. Установлены закономерности, получены физико-статистические модели, определены показатели параметрической надёжности формирования характеристик шероховатости и износостойкости в триботехнологической системе, включающей комбинированную антифрикционную обработку цилиндрических поверхностей деталей («точение композитом 10 + нанесение мягкой приработочной плёнки + АВ») и приработку соединений трения скольжения. Установлено, что комплекс Крагельского-Комбалова $\Delta = 0,79$, полученный после чистового точения, уменьшается до $\Delta = 0,01$ после процесса приработки, что обеспечивает по-

вышение износостойкости поверхности на 18 – 22 %.

11. Разработаны новые технологии формирования микрорельефов на поверхностях деталей обработкой ППД программным способом в компьютеризированных ТС с ЧПУ для повышения триботехнических характеристик поверхностей, позволившие увеличить износостойкость функциональных поверхностей деталей соединений трения-скольжения и качения на 15 – 20%.

12. Разработаны модели нестабильности эксплуатационных воздействий (нагрузка P , скорость относительного скольжения V) на поверхности деталей соединений трения-скольжения по характеру изменений во времени и в пространстве, позволяющие обосновать требуемую закономерность изменения значений параметров качества по поверхности детали при обработке, что позволит обеспечить её равномерный износ.

13. Разработаны модели и принципы, а также реализована технология программного управления процессом формирования параметров качества, значения которых закономерно изменяются по поверхности детали в соответствии с характером изменений эксплуатационных нагрузок, обеспечивающая равномерный износ поверхности и принятая к внедрению в службах технической подготовки производства промышленных предприятий.

14. Разработан инженерный метод определения параметрической надёжности ТС механической обработки поверхностей деталей, в основу которого положен программный метод экспресс-диагностики ТС (ЭДТС) как функционирующих, в соответствии с установленным регламентом (плановая ЭДТС), так и приобретаемых новых (приёмная ЭДТС), адаптированный к использованию в условиях производства.

15. Результаты исследований внедрены в ООО НПО «Группа компаний машиностроения и приборостроения», ЗАО «Клондайк электроникс». Применение предложенных решений позволило увеличить износостойкость функциональных поверхностей пар скольжения и качения (шарниры, втулки, оси, диски фрикционные, направляющие усилителей и др.), повысить ресурс эксплуатации деталей энергетических установок, снизить затраты на реализацию технологических про-

цессов изготовления деталей, что позволило получить совокупный годовой экономический эффект до 2 800 000 руб.

В будущем представляется необходимым решение ряда задач, из числа которых можно выделить следующие:

- разработка и стандартизация методов диагностики поверхностей деталей по показателям важнейших эксплуатационных свойств с соответствующим метрологическим обеспечением;

- разработка стандартов или руководящих методических материалов по регламентации в технологической документации закономерного изменения значений параметров качества по функциональным поверхностям ответственных деталей и включения этих вопросов в ЕСКД;

- развитие программных и технических средств технологического обеспечения закономерного изменения значений параметров качества по поверхности детали в процессе обработки для условий реального производства.

Для дальнейшего развития идей и методов решения задач исследования параметрической надёжности ТС по качеству обрабатываемых поверхностей деталей и его повышению необходимо развивать:

- теоретические основы оценки параметрической надёжности ТС;

- современные средства автоматизации процессов диагностики ТС по параметрам качества и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей на основе компьютеризации промышленных и перспективных систем испытаний, измерений и обработки данных.

Решение этих задач будет способствовать дальнейшему повышению конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения на мировом рынке.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АВ – алмазное выглаживание;
- АСПК – алмаз синтетический поликристаллический;
- АПС – аппаратно-программные средства;
- АПИ – аппаратно-программного интерфейс;
- АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;
- АФХ – амплитудно-фазовая характеристика
- БТЭ – базовый трибоэлемент;
- ДТС – диагностика технологических систем;
- ИД – индуктивный датчик;
- ИИС – измерительно-информационная система;
- ИС – испытательный стенд;
- КИБ – катодно-ионная бомбардировка в вакууме;
- КПС – качество поверхностного слоя;
- МТЭ – мобильный трибоэлемент;
- МПП – мягкая прирабочная плёнка;
- МЭ – машинный эксперимент;
- НТД – нормативно-техническая документация;
- ОФП – область факторного пространства;
- ОУО ППД – отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием;
- ПКПС – параметры качества поверхностного слоя;
- ПК – персональный компьютер;
- ПО – программное обеспечение;
- ППДПС – поверхностное пластическое деформирование программным способом;
- ПФЭ – полный факторный эксперимент;
- ПАВ – поверхностно активные вещества;
- ПЭС – параметры эксплуатационных свойств;

СОТС – смазочно-охлаждающие технологические средства;

ССТМ – синтетические сверхтвёрдые материалы;

ТГС – технологическая гибкость систем;

ТС – технологические системы;

ФАБО – финишная антифрикционная безабразивная обработка;

ФЧХ – фазо-частотная характеристика;

ЧПУ – числовое программное управление;

ЭМО – электромеханическая обработка;

ЭС – эксплуатационные свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивная и алмазная обработка материалов : справ. / А. Н. Резников, Е. Н. Алексенцев, Я. И. Барац, В. Л. Белостоцкий. – М. : Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. **Аверченков, В. И.** Автоматизация метрологического обеспечения качества деталей машин / В. И. Аверченков, В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин // Технологическое управление качеством поверхности деталей машин: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 11 – 13 ноября 2003 г., г. Киев : АТМ Украины. – Киев, 2003. – С. 5-8.
3. **Аверченков, В. И.** Новые подходы к автоматизации технологических исследований на основе виртуальных измерительных комплексов / В. И. Аверченков, В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2005. – № 1. – С. 64-75.
4. **Аверченков, В. И.** Основы математического моделирования технических систем : учеб. пособие / В. И. Аверченков, В. П. Фёдоров, М. Л. Хейфец – М. : Флинта, 2011. – 271 с.
5. **Аверченков, В. И.** Технологическое обеспечение качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин на базе комплексной компьютеризации процессов обработки и измерения / В. И. Аверченков, В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, В. В. Нагоркина // Машиностроение: республиканский межведомственный сб. науч. тр. Вып 20. В 2-х томах. Т. 1 / под ред. И. П. Филонова. – Минск : Технопринт, 2004. – С. 3-9.
6. **Алексеев, П. Г.** Машинам быть долговечными / П. Г. Алексеев. – Тула : Приок. кн. изд-во, 1973. – 136 с.
7. **Аскинази, Б. М.** Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой / Б. М. Аскинази. – Л. : Машиностроение, 1977. – 184 с.
8. **Балтер, М. А.** Упрочнение деталей машин / М. А. Балтер – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1978. – 184 с.
9. **Бауман В. А.** Влияние технологической наследственности на качество

поверхности после обработки поверхностным пластическим деформированием : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Бауман Владимир Анатольевич. – Брянск, 1972. – 160 с.

10. **Безьязычный, В. Ф.** Взаимосвязь технологических условий обработки с параметрами качества поверхностного слоя, модулем упругости и пределом выносливости детали / В. Ф. Безьязычный // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 9. – 18 с.

11. **Безьязычный, В. Ф.** Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин / В. Ф. Безьязычный // Справочник. Инженерный журнал. – 2000. – № 4. – С. 9-16.

12. **Безьязычный, В. Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения / В. Ф. Безьязычный. – М. : Машиностроение, 2012. – 320 с.

13. **Безьязычный, В. Ф.** Определение технологических условий механической обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства деталей авиационных двигателей / В. Ф. Безьязычный // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 7. – С. 14-24.

14. **Безьязычный, В. Ф.** Расчет режимов обработки, обеспечивающих комплекс параметров поверхностного слоя и точность обработки / В. Ф. Безьязычный // Справочник. Инженерный журнал. – 1998. – № 9 (18). – С. 13-19.

15. **Безьязычный, В. Ф.** Технологическое обеспечение износостойкости деталей машин на основе изучения накопленной энергии в поверхностном слое детали при деформационном упрочнении при обработке / В. Ф. Безьязычный, А. Н. Сулягин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 7. – С. 3-6.

16. **Белый, В. А.** К вопросу конструирования узлов трения с использованием эффекта избирательного переноса / В. А. Белый, А. С. Михневич, Л. С. Пинчук // Избирательный перенос при трении и его экономическая эффективность. – М. : 1972. – С. 87-90.

17. **Белый, А. А.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств трущихся деталей нанесением прирабочных плёнок : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Белый Александр Алексеевич – Брянск, 1980. – 210 с.

18. **Беляков, В. М.** Таблицы эллиптических интегралов : в 2 т. / В. М. Беляков, Р. И. Кравцова, М. Г. Раппопорт. – М. : Высшая школа, 1962. – Т. 1 – 656 с.; Т. 2 – 786 с.
19. **Билик, Ш. М.** Макрогеометрия деталей машин / Ш. М. Билик. – М. : Машиностроение, 1973. – 344 с.
20. **Бойцов, А. Г.** Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А. Г. Бойцов, В. Н. Машков, В. А. Смоленцев, Л. А. Хворостухин. – М. : Машиностроение, 1991. – 144 с.
21. **Боуден, Ф. П.** Трение и износ твёрдых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор ; пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1969. – 544 с.
22. **Болдырев, А. И.** Комбинированные методы обработки : учеб. пособие / А. И. Болдырев, А. В. Кузовкин, Г. П. Смоленцев, А. И. Часовских / под ред. В. П. Смоленцева. – 1996. – 169 с.
23. **Боровский, Г. В.** Режущий инструмент из сверхтвёрдых материалов : обзор / Г. В. Боровский. – М. : НИИмаш, 1984. – 56 с.
24. **Боровский, Г. В.** Современные технологические процессы обработки деталей режущим инструментом из сверхтвёрдых материалов: обзор / Г. В. Боровский, С. У. Молодык. – М. : НИИмаш, 1984. – 87 с.
25. **Бутенко, В. И.** Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин / В. И. Бутенко ; Донской гос. техн. ун-т (ДГТУ). – Ростов-на-Дону : Издат. центр ДГТУ, 2017. – 481 с.
26. **Бутенко, В. И.** Финишная обработка поверхностей деталей: способы, устройства, инструменты / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2016. – 219 с.
27. **Буше, Н. А.** Совместимость трущихся поверхностей / Н. А. Буше, В. В. Копытько. – М. : Машиностроение, 1981. – 126 с.
28. **Васильев, А. С.** Направленное формирование качества деталей машин / Конструкторско-технологическая информатика – 2000: труды IV Международного конгресса : в 2-х т. Т. 1 // А. С. Васильев. – М. : Станкин, 2000. – С. 93-95.
29. **Васильев, А. С.** Актуальная научная проблематика технологии машино-

строения / А. С. Васильев // Справочник. Инженерный журнал. – 2016. – № 1. – С. 54-64.

30. **Вентцель, Е. С.** Теория вероятностей и её инженерные приложения: учеб. пособие для вузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров – 2-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2000. – 480 с.

31. **Винарский, М. С.** Планирование экспериментов в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – Киев : Техника, 1975. – 168 с.

32. **Виттенберг, Ю. Р.** Применение эльбора для выглаживания / Ю. Р. Виттенберг, Л. Г. Маркова. – Л. : ЛДНТП, 1975. – 20 с.

33. **Виттенберг, Ю. Р.** Шероховатость поверхности и методы её оценки / Ю. Р. Виттенберг. – Л. : Судостроение, 1971. – 98 с.

34. **Вороненко, В. П.** Проектирование машиностроительного производства / В. П. Вороненко, М. С. Чепчуров, А. Г. Схиртладзе. – Санкт-Петербург : Лань, 2017. – 416 с.

35. **Галин, Л. А.** Контактные задачи теории упругости / Л. А. Галин. – М. : Гостехиздат, 1953. – 264 с.

36. **Гаркунов Д. Н.** Триботехника (износ и безызносность): учебник / Д. Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : МСХА, 2001. – 616 с.

37. **Гаркунов, Д. Н.** Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения. / Д. Н. Гаркунов, С. И. Дякин, О. Н. Курлов [и др.] ; под общ. ред. Д. Н. Гаркунова. – М. : Машиностроение, 1982. – 207 с.

38. **Головань, А. Я.** Алмазное точение и выглаживание / А. Я. Головань, Э. Г. Грановский, В. И. Машков. – М. : Машиностроение, 1976. – 32 с.

39. **Голубев, Ю. М.** Шероховатость поверхности и её оценка / Ю. М. Голубев, Л. Н. Кошек, В. Я. Небольсин // Технология машиностроения. Вып. 1. – Новосибирск, 1970. – С. 32-36.

40. **Горленко, А. О.** Технологическое повышение износостойкости деталей с криволинейными поверхностями трения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / Горленко Александр Олегович. – Брянск, 2003. – 32 с.

41. **Горленко О. А.** Технологическое обеспечение параметров неровностей,

определяющих износостойкость упрочнённых направляющих скольжения из чугуна, с учётом технологической наследственности: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Горленко Олег Александрович. – Брянск, 1972. – 185 с.

42. **Горский, В. Г.** Планирование промышленных экспериментов (модели динамики) / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер, А. М. Талалай. – М. : Metallurgia, 1978. – 112 с.

43. **ГОСТ 18296-72.** Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – 10 с.

44. **ГОСТ 25142-82 (СТ СЭВ 1156-78).** Шероховатость поверхности. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 20 с.

45. **ГОСТ 27.002-2015.** Надёжность в технике. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2016. – 24 с.

46. **ГОСТ 27.003-2016.** Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности. – М. : Стандартинформ, 2017. – 19 с.

47. **ГОСТ 27.004-85.** Надёжность в технике. Системы технологические. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 10 с.

48. **ГОСТ 27.202-83.** Надёжность в технике. Технологические системы. Методы оценки надёжности по параметрам качества изготавливаемой продукции. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 52 с.

49. **ГОСТ 27.203-83.** Надёжность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надёжности. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 5 с.

50. **ГОСТ 27.301-95.** Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1996. – 16 с.

51. **ГОСТ Р ИСО 4287-2014.** Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – М. : Стандартинформ, 2015. – 18 с.

52. **Грановский, Э. Г.** Чистовая обработка методом алмазного выглаживания / Э. Г. Грановский // Вестник машиностроения. – 1966. – с. 72-77.

53. **Грановский, Э. Г.** О динамике алмазного выглаживания / Э. Г. Грановский, М. С Камсюк // Известия вузов. Машиностроение. – М. : МВТУ им. Н. Э

Баумана, 1964. – № 4. – с. 132-136.

54. **Григорьян, Г. Д.** Надёжность технологических процессов механической обработки / Г. Д. Григорьян. – Одесса : Одесский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт, 1982. – 88 с.

55. **Дальский, А. М.** Направленное формирование показателей качества / А. М. Дальский, А. С. Васильев, А. И. Кондаков // Образование через науку: сб. докл. междунар. симпозиума / Федеральное агентство по образованию РФ, МГТУ им Н. Э. Баумана. – М., 2006. – С. 204-114.

56. **Дальский, А. М.** Поверхностный слой деталей машин в условиях самоорганизации технологических систем / А. М. Дальский // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 9. – С. 13-15.

57. **Дальский, А. М.** Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев, А. М. Дмитриев ; под ред. А. М. Дальского. – М. : Изд-во МАИ, 2000. – 360 с.

58. **Дальский А. М.** Технологическое обеспечение надёжности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М. : Машиностроение, 1975. – 222 с.

59. **Демкин, Н. Б.** Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Дёмкин, Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1981. – 244 с.

60. **Демкин, Н. Б.** Контактное шероховатых поверхностей. / Н. Б. Дёмкин. – М. : Наука, 1970. – 227 с.

61. **Ден-Гартог, Дж. П.** Механические колебания / Дж. П. Ден-Гартог ; пер. с 4-го американского издания А. Н. Обморшева. – М. : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1960. – 580 с.

62. **Джонсон, Н.** Статистика и планирование эксперимента в технике и науке : в 2-х т. / Н. Джонсон, Ф. Лион ; пер. с англ. – М. : Мир, 1981. – Т. 1 – 612 с.; Т. 2 – 520 с.

63. **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ : в 2-х кн. / Н. Дрейпер, Г. Смит. ; пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Финансы и статистика, 1986. – Кн. 1. – 366 с.; Кн. 2 – 351 с.

64. **Дубровский, П. В.** Обеспечение надёжности технологических процессов

/ П. В. Дубровский – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – 124 с.

65. **Дунин-Барковский, И. В.** Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – М. : Машиностроение, 1978. – 232 с.
66. **Дунин-Барковский, И. В.** Современные методы анализа связей неровностей поверхностей с жёсткостью в машиностроении / И. В. Дунин-Барковский // Жёсткость в машиностроении: тез. докл. всесоюз. научн.-техн. конф., 21-23 сент. 1971 г.; отв. ред. Л. Н. Решетов – Брянск : Приок. кн. изд-во, 1971. – С. 18-26.
67. **Дьяченко, П. Е.** Влияние шероховатости поверхности на её износ / П. Е. Дьяченко // Качество поверхностей деталей машин. – М. ; Л. : МАШГИЗ, 1949. – С. 30-31.
68. **Дьяченко, П. Е.** Исследования зависимости микрогеометрии поверхности от условий механической обработки / П. Е. Дьяченко. – М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1949. – 216 с.
69. **Евдокимов, Ю. А.** Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – М. : Наука, 1980. – 228 с.
70. **Егоров, К. В.** Основы теории автоматического регулирования: учеб. пособ. для вузов / К. В. Егоров – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1967. – 648 с.
71. **Елизаветин, М. А.** Повышение надёжности машин / М. А. Елизаветин. – М. : Машиностроение, 1973. – 430 с.
72. **Ермаков, Ю. М.** Перспективы применения алмазного выглаживания: обзор / Ю. М. Ермаков, Л. А. Ершов. – М. : НИИмаш, 1984. – 64 с.
73. **Жасимов, Н. М.** Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании / Н. М. Жасимов. – Алма-Ата : Наука, 1986. – 208 с.
74. **Заковоротный, В. Л.** Динамическая диагностика процесса обработки методами поверхностного пластического деформирования / В. Л. Заковоротный, В. С. Минаков, М. М. Ханукаев // Вестник Донского государственного технического университета. – 2012. – № 1(62). – С. 38-45.

75. **Заковоротный, В. Л.** Устойчивость процесса алмазного выглаживания / В. Л. Заковоротный, М. М. Ханукаев // Вестник Донского государственного технического университета. – 2014. – № 1(75). – С. 21-26.
76. **Зубарев, Ю. М.** Современные инструментальные материалы: учебник. / Ю. М. Зубарев – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2014. – 304 с.
77. **Зубов, В. А.** Динамика механизмов с упругими звеньями: учеб. пособие / В. А. Зубов, В. Д. Лисицын. – Л. : Ленингр. механический институт, 1971. – 166 с.
78. **Ивахненко, А. Г.** Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А. Г. Ивахненко. Ю. П. Юрачковский. – М. : Радио и связь, 1986. – 119 с.
79. **Инженерия поверхности деталей** / А. Г. Суслов, В. Ф. Безъязычный, Ю. В. Панфилов, С. Г. Бишутин и др.; под ред. А. Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
80. **Инструменты из сверхтвердых материалов** / под. ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2014. – 608 с.
81. **Ишуткин, В. И.** Технологическая надёжность системы СПИД / В. И. Ишуткин. – М. : Машиностроение, 1973. – 128 с.
82. **Качество машин: справочник: в 2-х т. Т. 1** / А. Г. Суслов, Э. Д. Браун, Н. А. Виткевич, А. А. Гусев; под общ. ред. А. Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с.
83. **Качество машин: справочник: в 2-х т. Т. 2** / А. Г. Суслов, Ю. В. Гуляев, А. М. Дальский, Э. Я. Абашин; под общ. ред. А. Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 1995. – 430 с.
84. **Кельнер, А. А.** Надёжность технологического обеспечения параметров шероховатости и волнистости наружных цилиндрических поверхностей вращения деталей машин при механической обработке : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Кельнер Александр Абрамович. – Москва, 1989. – 214 с.
85. **Кириллов, О. Н.** Автоматизация производственных процессов в машиностроении : учеб. пособие / О. Н. Кириллов, В. П. Смоленцев, В. Г. Грицюк, А. В. Мондрыкин. – Воронеж : Воронежский государственный технический уни-

верситет, 2013. – 234 с.

86. **Киричек, А. В.** Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьёв, А. Г. Лазуткин. – М. : Машиностроение, 2004. – 288 с.

87. **Клюев, А. С.** Автоматическое регулирование / А. С. Клюев – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1973. – 392 с.

88. **Ковалева, Е. В.** Технологическое обеспечение заданной закономерности изменения шероховатости плоских поверхностей деталей машин при отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием на станках с ЧПУ : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ковалева Елена Владимировна. – Брянск, 2007. – 235 с.

89. **Колесников, А. А.** Синергетическая теория управления / А. А. Колесников. – Москва–Таганрог : Энергоатомиздат, 1994 – 246 с.

90. **Комбалов, В. С.** Влияние шероховатости твёрдых тел на трение и износ / В. С. Комбалов. – М. : Наука, 1974. – 112 с.

91. **Коновалов, Е. Г.** Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей / Е. Г. Коновалов, В. А. Сидоренко. – Минск : Вышэйшая школа, 1968. – 363 с.

92. **Костецкий, Б. И.** Качество поверхности и трение в машинах / В. И. Костецкий, Н. Ф. Колесниченко. – Киев : Техника, 1969. – 216 с.

93. **Костецкий, В. И.** Надёжность и долговечность машин / В. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. Н. Бершадский, А. К. Караулов. – Киев : Техника, 1975. – 408 с.

94. **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.

95. **Крагельский, И. В.** Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.

96. **Крагельский, И. В.** Узлы трения машин: справочник / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.

97. **Кудряшов, Е. А.** Лезвийные сверхтвёрдые материалы (обработка преры-

вистых поверхностей деталей из черных металлов): монография. / Е. А. Кудряшов. – Иркутск : Изд-во ИЛУ, 1987. – 72 с.

98. **Кудряшов, Е. А.** Технологическое оснащение процессов изготовления конструктивно сложных деталей: монография / Е. А. Кудряшов [и др.]. – Старый Оскол : ТНТ. 2013. – 268 с.

99. **Кузнецов, В. П.** Имитационное моделирование влияния параметров технологической системы на виброустойчивость выглаживания поверхностей деталей / В. П. Кузнецов // Металлообработка. – 2010. – № 1 (55). – С. 7-15.

100. **Кузнецов, В. П.** Моделирование нелинейной динамики технологических процессов механической обработки: учебное пособие / В. П. Кузнецов, В. Г. Горгоц. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2013. – 64 с.

101. **Кузнецов, В. П.** Теоретическое обоснование и реализация наноструктурирующего выглаживания при обработке прецизионных деталей из конструкционных сталей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.07 / Кузнецов Виктор Павлович. – Томск, 2013. – 35 с.

102. **Лариков, Е. А.** Расчёт и проектирование кулачковых механизмов приборов / Е. А. Лариков. – М. : Машиностроение, 1968. – 104 с.

103. **Левина, З. М.** Контактная жёсткость машин / З. М. Левина, Д. Н. Решетов. – М. : Машиностроение, 1971. – 264 с.

104. **Левитский, Н. И.** Кулачковые механизмы / Н. И. Левитский. – М. : Машиностроение, 1964. – 288 с.

105. **Лещинер, Я. А.** Лезвийные инструменты из сверхтвёрдых материалов / Я. А. Лещинер, Р. М. Свирицкий, В. В. Ильин. – Киев : Техніка, 1981. – 120 с.

106. **Лозовский, В. Н.** Фрикционное латунирование как метод повышения антифрикционных свойств стальных деталей авиационной техники : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Лозовский Владимир Николаевич – Москва, 1961. – 179 с.

107. **Лойцянский, Л. Г.** Курс теоретической механики: в 2-х т. Т. 2. Динамика / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 640 с.

108. **Лурье, А. И.** Пространственные задачи теории упругости / А. И. Лурье. –

М. : Гостехиздат, 1955. – 491 с.

109. **Львовский, Е. Н.** Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. пособие / Е. Н. Львовский. – М. : Высшая школа, 1982. – 224 с.

110. **Максак, В. И.** Предварительное смещение и жёсткость механического контакта / В. И. Максак. – М. : Машиностроение, 1975. – 59 с.

111. **Маталин, А. А.** Новые направления развития технологии чистовой обработки / А. А. Маталин. – Киев : Техніка, 1972. – 136 с.

112. **Маталин, А. А.** Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин. – Киев : Техніка, 1971. – 144 с.

113. **Михин, Н. М.** Внешнее трение твёрдых тел / Н. М. Михин. – М. : Наука, 1977. – 224 с.

114. **Моргаленко, А. П.** Технологическое обеспечение износостойкости поверхностей трения скольжения комбинированной обработкой на основе применения твёрдых нитридсодержащих покрытий : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Моргаленко Александр Петрович – М., 1989. – 241 с.

115. **Моргаленко, Т. А.** Прогнозирование и обеспечение работоспособности трибомеханических систем типа подшипников скольжения / Т. А. Моргаленко, В. П. Фёдоров // Сборка в машиностроении, приборостроении – 2004. – № 12. – С. 31 - 37.

116. **Моргаленко, Т. А.** Технологическое управление триботехническими характеристиками соединений типа подшипников скольжения, работающих в условиях динамических нагрузок, на основе использования износостойких покрытий : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Моргаленко Татьяна Александровна. – Брянск, 2003. – 201 с.

117. **Мрочек, Ж. А.** Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин: учеб. пособие / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск : Технопринт, 2000. – 268 с.

118. **Мусхелишвили, Н. И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мусхелишвили. – М. : Наука, 1966. – 320 с.

119. **Нагоркина, В. В.** Технологическое обеспечение триботехнических ха-

ра характеристик цилиндрических соединений типа подшипников скольжения на основе нанесения прирабочных медесодержащих пленок и ППД : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Нагоркина Виктория Владимировна. – Брянск, 2005. – 212 с.

120. **Нагоркина, В. В.** Технологическое управление триботехническими характеристиками соединений типа подшипников скольжения комбинированной обработкой / В. В. Нагоркина // Обеспечение и повышение качества машин на этапах их жизненного цикла : материалы 5-й междунар. науч.-техн. конф., 19-21 окт. 2005 г., г. Брянск; под общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск : БГТУ, 2005. – С. 142-143.

121. **Нагоркин, М. Н.** Влияние динамических характеристик устройств поверхностного пластического деформирования упругого действия на параметры качества поверхностей деталей машин / М. Н. Нагоркин, А. В. Тотай, В. П. Фёдоров. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – № 4. – С. 70-79.

122. **Нагоркин, М. Н.** Влияние технологической наследственности на формирование шероховатости плоских поверхностей при финишной обработке алмазным выглаживанием / М. Н. Нагоркин, В. П. Фёдоров // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XIX междунар. науч.-техн. конф., 17-22 сент. 2012 г., г. Севастополь. В 3-х томах. – Донецк : ДонНТУ, 2012. – Т. 2. – С. 216-219.

123. **Нагоркин, М. Н.** Диагностика технологических систем по качеству и эксплуатационным свойствам обрабатываемых поверхностей деталей машин с применением современных компьютерных технологий / М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков, В. В. Третьяков, В. П. Федоров // Научоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения (ТМ-2016) : материалы VIII междунар. научно-техн. конф., 19-21 мая 2016 г., г. Москва, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет. – М. : Техполиграф-центр, 2016. – С. 130-133.

124. **Нагоркин, М. Н.** Динамика процесса обработки ППД инструментами упругого действия поверхностей деталей с волнистостью или отклонениями от

круглости / М. Н. Нагоркин // Виброволновые процессы в технологии обработки высокотехнологичных деталей: сборник трудов. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2017. – С. 101-104.

125. **Нагоркин, М. Н.** Закономерное изменение параметров качества поверхностей деталей машин на универсальных металлорежущих станках с использованием традиционной программируемой оснастки. / М. Н. Нагоркин, В. П. Фёдоров, Е. В. Ковалёва / Тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф. «Логистика – Управление – Безопасность», Брянск, БГТУ, 27 мая 2016 г.; под ред. Л. А. Карбан. – Брянск : БГТУ, 2016. – С. 144-147.

126. **Нагоркин, М. Н.** Моделирование процессов формирования параметров качества поверхностей деталей алмазным выглаживанием с учётом технологической наследственности / М. Н. Нагоркин // Научно-технические аспекты виброволновых технологий обработки деталей высокотехнологичных изделий: материалы междунар. науч. симпозиума технологов-машиностроителей; отв. ред. М. А. Тамаркин; 26-28 сент. 2018 г., Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2018. – С. 181-186.

127. **Нагоркин, М. Н.** Оценка влияния технологической наследственности на процесс формирования параметров качества поверхностей деталей алмазным выглаживанием / М. Н. Нагоркин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – № 5. – С. 125-130.

128. **Нагоркин, М. Н.** Оценка параметрической надёжности технологических систем имитационным моделированием / М. Н. Нагоркин // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем: сб. науч. тр. 7-й Междунар. науч.-техн. конф., 30-31 мая 2019 г., Юго-Зап. гос. ун-т; отв. ред. Е. В. Павлов; в 2-х т. Т. 2. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2019. – С. 95-100.

129. **Нагоркин, М. Н.** Параметрическая надёжность технологических систем лезвийной и упрочняющей обработки инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов по геометрическим параметрам качества и триботехническим характеристикам поверхностей деталей / М. Н. Нагоркин, В. П. Федоров,

В. В. Нагоркина, Е. В. Ковалева // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. Том VII. Коллективная монография / под ред. А. В. Киричека. – М. : Издательский дом «Спектр», 2016. – с. 506-688.

130. **Нагоркин, М. Н.** Параметрическая надёжность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов: монография / М. Н. Нагоркин; под ред. А. В. Киричека. – М. : Издательский дом «Спектр», 2017. – 304 с.

131. **Нагоркин, М. Н.** Параметрическая надёжность триботехнологических систем по параметрам износостойкости цилиндрических соединений трения скольжения / М. Н. Нагоркин, В. П. Фёдоров // Виброволновые процессы в технологии обработки высокотехнологичных деталей: сборник трудов. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2017. – С. 161-163.

132. **Нагоркин, М. Н.** Параметры эксплуатационного микропрофиля цилиндрических поверхностей трибоэлементов соединений трения скольжения, подвергнутых комбинированной антифрикционной обработке / М. Н. Нагоркин, В. П. Фёдоров, Е. В. Ковалева, И. Л. Пыриков // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XXIV междунар. науч.-техн. конф. 11-17 сент. 2017 г., г. Севастополь. – Донецк : ДонНТУ, 2017. – С. 170-174.

133. **Нагоркин, М. Н.** Принципы обеспечения стабильности эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин / М. Н. Нагоркин, В. П. Фёдоров // Сб. материалов VII Междунар. науч.-практ. конф.-конкурса «Логистика – ресурсы – экология», 28 апр. 2017 года; под ред. Л. А. Карабан; Брян. гос. техн. ун-т – Брянск : Изд-во БГТУ, 2017. – С. 149-150.

134. **Нагоркин, М. Н.** Прогнозирование и диагностика технологических и триботехнологических систем на основе теории информации / М. Н. Нагоркин, В. П. Фёдоров, Т. А. Моргаленко, Е. В. Ковалева // Вестник Брянского государственного технического университета – 2013. – № 3 (39) – С. 134-140.

135. **Нагоркин, М. Н.** Расчёт технологических ограничений параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин с целью обеспече-

ния требований технической документации / М. Н. Нагоркин, В. П. Федоров, Е. В. Ковалева // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр. XXV междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 10-16 сент. 2018 г. – Донецк : ДонНТУ, 2018., Т. 2. – С. 7-11.

136. **Нагоркин, М. Н.** Регламентация параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в технологической документации / М. Н. Нагоркин, В. П. Федоров, И. Л. Пыриков, М. П. Топорков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 3 (76). – С. 4-12.

137. **Нагоркин, М. Н.** Технологическая устойчивость процессов обработки поверхностей деталей методами ППД одноинденторными инструментами упругого действия и критерии её обеспечения / М. Н. Нагоркин // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. трудов науч. симпозиума технологов-машиностроителей (Ростов-на-Дону, 2-5 октября 2019 г.); Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2019. – С. 381-390.

138. **Нагоркин, М. Н.** Технологическое обеспечение параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин для эксплуатации в неоднородных условиях / М. Н. Нагоркин, В. П. Фёдоров, Е. В. Ковалёва, М. П. Топорков // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – № 1 (52). – С. 136-145.

139. **Нагоркин, М. Н.** Технологическое обеспечение триботехнических характеристик цилиндрических поверхностей деталей машин типа подшипников скольжения / М. Н. Нагоркин, В. П. Фёдоров // Проблемы и перспективы развития машиностроения. Сб.науч. трудов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию Липецкого государственного технического университета. 17-18 ноября 2016 г. – Ч. 1. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2016. – С. 173-177.

140. **Нагоркин, М. Н.** Технологическое обеспечение шероховатости плоских поверхностей алмазным выглаживанием / М. Н. Нагоркин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструмент). – 2002. – № 3 (16). – С. 17-24.

141. **Нагоркин, М. Н.** Технологическое управление параметрами шероховатости

сти и волнистости плоских поверхностей деталей из чугуна высокоскоростным торцевым фрезерованием и алмазным выглаживанием с применением поликристаллических сверхтвёрдых материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Нагоркин Максим Николаевич. – Брянск, 2002. – 237 с.

142. **Нагоркин, М. Н.** Управление качеством и эксплуатационными свойствами соединений деталей машин с учётом технологической наследственности / М. Н. Нагоркин. // Наука и производство – 2009; материалы междунар. науч.-практ. конф., 19-20 марта 2009 г., г. Брянск. В 2-х ч. / под. ред. С. П. Сазонова, П. В. Новикова. – Брянск : БГТУ, 2009. – Ч. 2 – С. 53-54.

143. **Нагоркин, М. Н.** Управление процессом закономерного формирования параметров качества поверхностей деталей методами ППД / М. Н. Нагоркин, В. П. Федоров // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий [Электронный ресурс]: сб. тр. научного семинара, посвященного памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, почётного профессора ДГТУ А. П. Бабичева / отв. ред. В. А. Лебедев; Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. – С. 110-115.

144. **Нагоркин, М. Н.** Управление формированием параметров качества поверхности детали в процессе обработки поверхностным пластическим деформированием / М. Н. Нагоркин, В. П. Федоров, А. В. Тотай, Е. В. Ковалева // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 8. – с. 4-13.

145. **Нагоркин, М. Н.** Условия эксплуатации функциональных поверхностей трибоэлементов в типовых соединениях трения скольжения / М. Н. Нагоркин, В. П. Фёдоров, А. В. Тотай // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 6 (57). – С. 15-26.

146. **Нагоркин, М. Н.** Формирование закономерно изменяющихся параметров качества поверхностного слоя деталей в технологических системах повышенной гибкости / М. Н. Нагоркин, В. П. Федоров // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию

- академика П. И. Яшерлицына, 28-29 окт. 2015 г., г. Новополоцк.; под общ. ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега; Полоц. гос. ун-т – Новополоцк : 2015. – С. 138-141.
147. **Нагоркин, М. Н.** Формирование поверхностного слоя деталей из чугуна СЧ20 и Стали 45 финишной обработкой пластическим деформированием / Нагоркин М. Н // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр. XXV междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 10-16 сент. 2018 г. – Донецк : ДонНТУ, 2018. Т. 2 – С. 3-7.
148. **Надёжность и долговечность машин / В. И. Костецкий И. Г. Носовский, Л. Н. Бершадский, А. К. Караулов; под общ. ред. В. И. Костецкого. – Киев : Техника, 1975. – 408 с.**
149. **Надёжность и эффективность в технике: справочник в 10-и т. Т. 2. Математические методы в теории надёжности и эффективности / Белов В. В., Беляев Ю. К., Давтян А. Г. [и др.] / Ред. совет В. С. Авдудевский и др.; под ред. Б. В. Гнеденко. – М. : Машиностроение, 1987. – 280 с.**
150. **Надежность машиностроительной продукции: практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению. – М. : Издательство стандартов, 1990. – 328 с.**
151. **Налимов, В. В.** Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 340 с.
152. **Новик, Ф. С.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.
153. **Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А. С. Васильев, А. М. Дальский, Ю. М. Золотаревский, А. И. Кондаков; ред. А. И. Кондаков. – М. : Машиностроение, 2005. – 351 с.**
154. **Одинцов, Л. Г.** Упрочнение и отделка деталей пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
155. **Одинцов, Л. Г.** Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1981. – 160 с.

156. **Отений, Я. Н.** Технологическое обеспечение качества деталей машин поверхностным пластическим деформированием: монография / Я. Н. Отений; ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград: РПК «Политехник», 2005. – 224 с.
157. **Отений, Я. Н.** Влияние физико-механических процессов в зоне контакта на показатели обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием [Электронный ресурс]: монография / Я. Н. Отений, А. Э. Вирт; ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград: ВолгГТУ, 2018. – 136 с.
158. **Пановко, Я. Г.** Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко – 3-е изд., доп. и переработ. – Л. : Машиностроение, 1976. – 320 с.
159. **Папшев, Д. Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. – М. : Машиностроение, 1978. – 152 с.
160. **Повышение износостойкости на основе избирательного переноса /** Под ред. Д. Н. Гаркунова. – М. : Машиностроение, 1977. – 215 с.
161. **Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием /** В. К. Яценко, Г. З. Зайцев, В. Ф. Притченко, Л. И. Ищенко. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.
162. **Погонышев, В. А.** Повышение износо- и фреттингостойкости восстановленных деталей машин модифицированием поверхностей : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.02.04 / Погонышев Владимир Анатольевич. – Брянск, 2000. – 257 с.
163. **Польцер, Г.** Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф. Мейсснер / Пер. с нем. О. Н. Озёрского, В. Н. Пальянова; под ред. М. Н. Добычина. – М. : Машиностроение, 1984. – 289 с.
164. **Попов, М. Е.** Проектирование операций упрочняющей обработки деталей машин методами ШПД / М. Е. Попов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 7. – С. 11-19.
165. **Попов, Н. Н.** Расчёт и проектирование кулачковых механизмов / Н. Н. Попов – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1980. – 214 с.
166. **Порошин, В. В.** Основы комплексного контроля топографии поверхно-

- сти: монография / В. В. Порошин. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 196 с.
167. **Прилуцкий, В. А.** Технологические методы уменьшения периодических погрешностей обработки / В. А. Прилуцкий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, №4 (3). – С. 1200-1202.
168. **Проников, А. С.** Надёжность машин / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 592 с.
169. **Проников, А. С.** Параметрическая надёжность машин / А. С. Проников. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
170. **Проников, А. С.** Программный метод испытания металлорежущих станков / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1985. – 288 с.
171. **Проников, А. С.** Программный метод испытания технологического оборудования по параметрам качества и надёжности / А. С. Проников // Вестник машиностроения, 1984. – № 3. – С. 51-56.
172. **Проскуряков, Ю. Г.** Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов / Ю. Г. Проскуряков. – М. : Машиностроение, 1971. – 208 с.
173. **Пыриков, И. Л.** Компьютеризированная система измерений параметров шероховатости и волнистости поверхностей деталей машин с использованием виртуальных приборов / И. Л. Пыриков, В. В. Третьяков, В. П. Федоров // Научные технологии на современном этапе развития машиностроения (ТМ-2016): материалы VIII междунар. научно-техн. конф., 19-21 мая 2016 г., г. Москва, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет. – М. : Техполиграфцентр, 2016. – С. 187-189.
174. **Разработка аппаратных и программно-технических средств для комплексного определения, анализа и хранения информации о геометрических характеристиках поверхностей деталей машин: отчет о НИР (заключ): Т00-6.3-360 / Брянский государственный технический университет; рук. Федоров В. П.; исполн.: Нагоркин М. Н. [и др.]. – Брянск, 2003. – 69 с. – № ГР 01.2.00103349.**
175. **РД 50-690-89.** Методические указания. Надёжность в технике. Методы оценки показателей надёжности по экспериментальным данным. – М. : Изд-во

стандартов, 1990. – 132 с.

176. Режущие инструменты, оснащённые сверхтвёрдыми и керамическими материалами, и их применение: справочник / В. П. Жедь, Г. В. Боровский, Я. А. Музыкант, Г. М. Ипполитов. – М. : Машиностроение, 1987. – 320 с.

177. **Решетов, Д. Н.** Надёжность машин: учеб. пособие для вузов / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. – М. : Высшая школа, 1988. – 238 с.

178. **Ротбарт, Г. А.** Кулачковые механизмы (проектирование, динамика и вопросы точности изготовления) / Г. А. Ротбарт; под ред. Н. И. Колчина; пер. с англ. Э. Л. Аксельрада. – Л. : Судпромгиз, 1960. – 336 с.

179. **Рудзит, Я. А.** Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей / Я. А. Рудзит. – Рига : Зинатне, 1975. – 216 с.

180. **Рыжов, Э. В.** Влияние технологических методов на качество поверхности и контактную жёсткость. / Э. В. Рыжов // Технология машиностроения: сб. статей. – Тула : ТулПИ, 1977. – С. 3-11.

181. **Рыжов, Э. В.** Контактная жёсткость деталей машин / Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1966. – 193 с.

182. **Рыжов Э. В.** Контактная жёсткость и износостойкость упрочнённых поверхностей деталей из чугуна / Э. В. Рыжов, О. А. Горленко, А. Г. Суслов // Поверхностное упрочнение деталей машин и инструментов: сб. науч. трудов. – Куйбышев: КПТИ, 1974. – С. 30-37.

183. **Рыжов, Э. В.** Комплексный параметр для оценки свойств поверхностей трения деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, А. П. Улашкин // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 3. – С. 436-439.

184. **Рыжов, Э. В.** Математические методы в технологических исследованиях: монография / Э. В. Рыжов, О. А. Горленко; отв. ред. А. Г. Гавриш.; АН УССР, ин-т сверхтвёрд. материалов. – Киев : Наук. думка, 1990. – 184 с.

185. **Рыжов, Э. В.** Научные основы технологического управления качеством поверхности деталей при механической обработке / Э. В. Рыжов // Трение и износ. – 1997. – Том 18, № 3. – С. 293-300.

186. **Рыжов, Э. В.** Технологические методы повышения износостойкости де-

талей машин / Э. В. Рыжов. – Киев : Наук. думка, 1984. – 272 с.

187. **Рыжов, Э. В.** Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э. В. Рыжов, С. А. Клименко, О. Г. Гуцаленко. – Киев : Наук. думка, 1994. – 184 с.

188. **Рыжов, Э. В.** Технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами поверхностей. / Э. В. Рыжов, О. А. Горленко. – Тула : ТулПИ, 1980. – 100 с.

189. **Рыжов, Э. В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Фёдоров. – М. : Машиностроение, 1979. – 174 с.

190. **Смелянский, В. М.** Концепция инженерии поверхностного слоя в категориях пластичности и технологического наследования / В. М. Смелянский, В. Ю. Блюменштейн // Справочник. Инженерный журнал. – 2000. – № 4. – С. 17-24.

191. **Смелянский, В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение, 2002. – 300 с.

192. Создание систем технологического обеспечения качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей на базе компьютеризации процессов управления обработкой, измерением и испытанием: отчёт о НИР (заключ): ТО2-06.3-579 / Брянский государственный технический университет; рук. Федоров В. П.; исполн.: Нагоркин М. Н. [и др.]. – Брянск, 2005. – 72 с. – № ГР 01.2.00304928.

193. **Соколовский А. П.** Научные основы технологии машиностроения / А. П. Соколовский. – М., Л. : Машгиз, 1955. – 515 с.

194. **Спиридонов, А. А.** Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

195. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. Т. 1 / А. М. Дальский, А. Г. Суслов, А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков; под ред. А. М. Дальского [и др.] – 5-е изд. испр. – М. : Машиностроение-1, 2003. – 912 с.

196. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. Т. 2 / А. М. Дальский, А. Г. Суслов, А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков; под ред. А. М. Дальского [и др.] – 5-е изд. испр. – М. : Машиностроение-1, 2003. – 943 с.
197. **Старков В. К.** Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 1989. – 296 с.
198. **Сугак, Е. В.** Надёжность технических систем: учеб. пособие для вузов / Е. В. Сугак, Н. В. Василенко [и др.]; под общ. ред. Е. В. Сугака, Н. В. Василенко. – Красноярск : НИИ СУВПТ, 2001. – 608 с.
199. **Сулима, А. М.** Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев. – М. : Машиностроение, 1974. – 255 с.
200. **Сулима, А. М.** Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
201. **Суслов, А. Г.** Автоматизация контроля параметров шероховатости, волнистости и макроотклонений поверхностей деталей машин / А. Г. Суслов, В. П. Фёдоров, А. А. Кельнер // Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин: сб. науч. статей. – Брянск : 1988. – С. 140-143.
202. **Суслов, А. Г.** Влияние технологического наследования на качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов, А. С. Васильев, С. О. Сухарев // Известия вузов. Машиностроение. – 1999. – № 1. – С. 69-76.
203. **Суслов, А. Г.** Инженерия поверхности деталей – резерв в повышении конкурентоспособности машин. / А. Г. Суслов // Справочник. Инженерный журнал. – 2001. – № 4. – С. 3-9.
204. **Суслов, А. Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.
205. **Суслов, А. Г.** Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин / А. Г. Суслов, В. П.

- Федоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков // Научные основы технологии в машиностроении. – 2018. – № 10. – С. 3-13.
206. **Суслов, А. Г.** Назначение, обозначение и контроль параметров шероховатости поверхностей деталей машин: учеб. пособие для вузов / А. Г. Суслов, И. М. Корсакова; Моск. гос. индустр. ун-т. – Москва : МГИУ, 2010. – 111 с.
207. **Суслов, А. Г.** Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – М. : Машиностроение, 2002. – 684 с.
208. **Суслов, А. Г.** Проектирование операций отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием / А. Г. Суслов, Р. В. Гуров. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 3. – С. 14-16.
209. **Суслов, А. Г.** Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин обработкой пластическим деформированием / А. Г. Суслов // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 8. – С. 8-13.
210. **Суслов, А. Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.
211. **Суслов, А. Г.** Экспериментально-статистический метод обеспечения качества поверхности деталей машин: монография / А. Г. Суслов, О. А. Горленко. – М. : Машиностроение-1, 2003. – 303 с.
212. **Тамаркин, М. А.** Обеспечение надёжности технологических процессов вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей в среде стальных шаров / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, А. В. Гордиенко, Р. В. Гребенкин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – № 3. – С. 38-45.
213. **Технологическая надёжность станков** / Под общ. ред. А. С. Проникова. – М. : Машиностроение, 1971 – 342 с.
214. **Технологические основы обеспечения качества машин** / К. С. Колесников, Г. Ф. Баландин, А. М. Дальский и др.: под общ. ред. К. С. Колесникова. – М. : Машиностроение, 1990 – 256 с.
215. **Технологические основы управления качеством машин** / А. С. Васильев, А. М. Дальский, С. А. Клименко [и др.]. – М. : Машиностроение, 2003. – 255 с.

216. Технологические особенности механической обработки инструментом из поликристаллических сверхтвёрдых материалов / П. В. Захаренко, В. М. Волкогон, А. В. Бочко, С. С. Джамаров; отв. ред. Г. Г. Карюк. – Киев : Наук. думка, 1991. – 288 с.
217. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко и др.; под общ. ред. А. Г. Суслова. – М. : Машиностроение. 2006. – 447 с.
218. Технологическое обеспечение надёжности в машиностроении / ред. А. М. Дальский, Р. К. Мещерякова. – М. : МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1988. – 130 с.
219. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник: в 2 т. Т. 1 / А. Г. Суслов, В. Ю. Блюменштейн, Р. В. Гуков [и др.]; под общ. ред. А. Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 2014. – 480 с.
220. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник: в 2 т. Т. 2 / А. Г. Суслов, А. П. Бабичев, А. В. Киричек [и др.]; под общ. ред. А. Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 2014. – 444 с.
221. **Тимошенко, С. П.** Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер; пер. с англ. Л. Г. Корнейчука; под ред. Э. И. Григолюка. – М. : Машиностроение, 1985. – 472 с.
222. **Тихомиров В. Б.** Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в лёгкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров – М. : Лёгкая индустрия, 1974. – 262 с.
223. **Торбило, В. М.** Алмазное выглаживание / В. М. Торбило. – М. : Машиностроение, 1972. – 104 с.
224. **Тотай, А. В.** Детали машин. Современные средства и прогрессивные методы обработки: учеб. для академического бакалавриата / А. В. Тотай, М. Н. Нагоркин, В. П. Фёдоров; под общ. ред. А. В. Тотая. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2016. – 288 с.
225. **Тотай, А. В.** Подготовка поверхностей деталей машин под финишную

- антифрикционную безабразивную обработку / А. В. Тотай, В. В. Нагоркина // Тез. докл. 56-й науч. конф. профессорско-преподавательского состава; под ред. О. А. Горленко, И. В. Говорова. – Брянск : БГТУ, 2002. – Ч. 1. – С. 60-62.
226. **Тотай, А. В.** Технологические аспекты подготовки поверхностей деталей машин под нанесение мягких приработочных плёнок фрикционным способом. / А. В. Тотай, В. В. Нагоркина // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк : ДонГТУ, 2002. – Вып. 22. – С. 117-122.
227. **Тотай, А. В.** Технологическое обеспечение качества поверхности тонким точением резцами из эльбора-Р : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Тотай Анатолий Васильевич. – Брянск, 1975. – 183 с.
228. **Тотай, А. В.** Технологическое обеспечение физико-химических свойств поверхностного слоя деталей машин / А. В. Тотай // Научно-технические проблемы машиностроения. – 2012. – № 9. – С. 8-11.
229. **Тотай, А. В.** Технологическое обеспечение физических и эксплуатационных свойств поверхностных слоёв деталей машин. / А. В. Тотай // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 3. – С. 385-397.
230. **Тотай А. В.** Технологическое обеспечение физических свойств поверхностного слоя, износостойкости и усталостной прочности деталей машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.02.08 / Тотай Анатолий Васильевич. – Брянск, 1996. – 347 с.
231. **Тотай, А. В.** Формирование геометрических параметров качества поверхности деталей машин обработкой сверхтвёрдыми синтетическими материалами. / А. В. Тотай, В. П. Фёдоров, В. В. Нагоркина // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2004. – № 3 (3). – С. 13-21.
232. **Тотай, А. В.** Формирование параметров качества поверхностей деталей машин методами комбинированной антифрикционной обработки. / А. В. Тотай, В. В. Нагоркина // Тез. докл. 57-й науч. конф. профессорско-преподавательского состава: в 2 ч.; под ред. С. П. Сазонова, И. В. Говорова. / Брянский государственный технический университет. – Брянск : БГТУ, 2005. – Ч. 1. – с. 68-69.

233. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2-х кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М. : Машиностроение, Кн. 1, 1978. – 400 с.; Кн. 2., 1979. – 358 с.
234. Триботехнология формирования поверхности / И. Х. Чеповецкий, С. А. Ющенко, А. В. Бараболя [и др.]; ин-т сверхтвёрдых материалов. – Киев : Наук. думка, 1989. – 232 с.
235. Улашкин, А. П. Выбор отделочно-упрочняющих методов обработки (для повышения износостойкости деталей машин) / А. П. Улашкин. – Хабаровск : Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 1998. – 103 с.
236. Улашкин, А. П. Научное обоснование выбора и разработки методов упрочняюще-отделочной обработки для обеспечения износостойкости деталей машин : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / Улашкин Анатолий Петрович. – Хабаровск, 1998. – 356 с.
237. Усов А. М. Стандартизация средств и методов обработки поверхностным пластическим деформированием / А. М. Усов // Прогрессивные процессы упрочнения поверхностным пластическим деформированием: материалы семинара. – Москва, 1974. – С. 117-120.
238. Фёдоров, В. П. Автоматизация диагностики технологических систем по параметрам качества поверхностей обрабатываемых деталей / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета – 2012. – № 1. – С. 85-94.
239. Фёдоров, В. П. Автоматизация метрологического обеспечения задач инженерии поверхностей на основе виртуальных приборов / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин // Обеспечение и повышение качества машин на этапе их жизненного цикла : материалы 5-й междунар. науч.-техн. конф., 19-21 окт. 2005 г., г. Брянск ; под общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск : БГТУ, 2005. – С. 235-237.
240. Федоров, В. П. Автоматизация технологических измерений качества поверхностей на основе виртуальных комплексов / В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалева // Логистика в инновационной экономике : тез. докл. IV междунар. науч.-практ. конф., 25 апреля 2014 г., Брянский государственный тех-

нический университет ; под ред. Л. А. Карабан. – Брянск : БГТУ, 2014. – С. 134-136.

241. **Фёдоров, В. П.** Автоматизация технологических измерений качества поверхностей на основе виртуальных комплексов / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва, В. В. Нагоркина // Автоматизация технологических процессов и производственный контроль : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., 23-25 мая 2006 г., Тольяттинский государственный университет. – Тольятти : ТГУ, 2006 г. – С. 86-90.

242. **Фёдоров, В. П.** Адаптация поверхностей к нестационарным условиям эксплуатации обработкой ППД программным способом / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва, Д. В. Чмыхов. // Известия ОрёлГТУ. – 2007. – № 3/267. – С. 66 - 77.

243. **Фёдоров, В. П.** Адаптация поверхностей трибоэлементов к нестационарным условиям эксплуатации обработкой ППД программным способом / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва, Д. В. Чмыхов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 10. – С. 9-15.

244. **Фёдоров, В. П.** Анализ условий эксплуатации функциональных поверхностей трибоэлементов в типовых соединениях трения скольжения / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалева // Процеси механічної обробки в машинобудуванні – 2012. – № 13. – С. 186-203.

245. **Федоров, В. П.** Антифрикционная технология на основе обработки поверхностей деталей инструментами из поликристаллических сверхтвёрдых материалов с последующим нанесением прирабочных плёнок / В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин, В. В. Нагоркина, А. В. Тотай // Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения (ТМ-2015) : материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф., 21-23 сент. 2015 г., г. Брянск. – Брянск : БГТУ, 2015. – С. 201-202.

246. **Фёдоров, В. П.** Аппаратно-программные интерфейсы автоматизированных систем диагностики технологических процессов механической обработки поверхностей деталей машин / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков,

В. В. Третьяков // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сент. 2016 г. Т. 2. – Донецк: МСМ, 2016. – С. 145-148.

247. **Фёдоров, В. П.** Влияние динамических характеристик инструмента упругого действия на стабильность процесса алмазного выглаживания плоских поверхностей деталей машин / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. – Донецк : ДонГТУ, 2002. – Вып. 22. – С. 117-122.

248. **Фёдоров, В. П.** Влияние технологической наследственности на формирование параметров качества поверхностей деталей машин при обработке поликристаллическими сверхтвёрдыми материалами / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин // Тез. докл. 57-й науч. конф. профессорско-преподавательского состава : в 2-х ч. Брянский государственный технический университет ; под ред. С. П. Сазонова, И. В. Говорова. – Брянск : БГТУ, 2005. – Ч. 1. – С. 66-67.

249. **Федоров, В. П.** Инженерные методы технологического обеспечения регламентированных параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в процессе механической обработки / В. П. Федоров, А. Г. Суслов, М. Н. Нагоркин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2019. – № 4 (94). – С. 40-48.

250. **Фёдоров, В. П.** Инструментальное обеспечение автоматизированных систем исследований качества поверхностей деталей машин / В. П. Фёдоров, И. Л. Пыриков, М. П. Топорков, М. Н. Нагоркин, В. В. Третьяков // Наука и производство – 2009; материалы междунар. науч.-практ. конф., 19-20 марта 2009 г., г. Брянск : в 2-х ч. ; под. ред. С. П. Сазонова, П. В. Новикова. – Брянск : БГТУ, 2009. – Ч. 2 – С. 76-78.

251. **Федоров, В. П.** Исследование оптических свойств поверхностей деталей, полученных обработкой методами ППД / В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалева // Научно-технические и виброволновые технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий: материалы междунар. науч. симпозиума технологов-машиностроителей / отв. ред. М. А. Тамаркин; 26-28 сент. 2018 г., Донской

гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2018. – С. 63-68.

252. **Фёдоров, В. П.** Исследование отражательной способности поверхностей деталей машин при обработке ППД / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва, В. В. Нагоркина // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XVI междунар. науч.-техн. конф., 14-19 сент. 2009 г., г. Севастополь : в 4-х томах. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – Т. 3. – С. 193-197.

253. **Фёдоров, В. П.** Исследование отражательной способности поверхностей при обработке ППД / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, В. Ф. Чистов, Е. В. Ковалёва // Материалы 58-й науч. конф. профессорско-преподавательского состава; Брянский государственный технический университет; под ред. С. П. Сазонова, И. В. Говорова. – Брянск : БГТУ, 2008. – С. 52-54.

254. **Федоров, В. П.** К вопросу выбора законов распределения оценок технологических значений параметров шероховатости / В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр. XXV междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 10-16 сент. 2018 г. – Донецк : ДонНТУ, 2018. Т. 2 – С. 176-180.

255. **Фёдоров, В. П.** Комбинированные системы повышенной технологической гибкости для обработки поверхностей трибоэлементов / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, В. В. Нагоркина, Е. В. Ковалёва // Гидродинамическая теория смазки – 120 лет: тр. междунар. науч. симпозиума : в 2-х томах. Т. 2. – М. : Машиностроение-1, Орел : ОрёлГТУ, 2006. – С. 186-196.

256. **Фёдоров, В. П.** Компьютерное управление обеспечением параметров эксплуатационных свойств деталей машин / В. П. Фёдоров, Е. В. Ковалёва, А. В. Крылов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2004. – № 3. – С. 129-135.

257. **Фёдоров, В. П.** Критерии повышения качества обработки деталей машин в комбинированных технологических системах / В. П., Фёдоров М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва // Логистика – инновации – менеджмент : сб. тез. III междунар. науч.-практ. конф., 26 апреля 2013 г., Брянский государственный технический университет ; под ред. О. Н. Федонина, Л. А. Карабан. – Брянск : БГТУ,

2013. – С. 20-24.

258. **Фёдоров, В. П.** Критерии повышения качества обработки поверхностей деталей машин в комбинированных технологических системах / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва // Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., посвящённой 50-летию Липецкого государственного технического университета, 11-12 мая 2006 г. Ч 1. – Липецк : ЛГТУ, 2006 – С. 265-268.

259. **Фёдоров, В. П.** Критерии технологической устойчивости и её обеспечение при обработке деталей машин методами ППД / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, В. В. Нагоркина, Е. В. Ковалёва // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XVI междунар. науч.-техн. конф., 14-19 сент. 2009 г., г. Севастополь : в 4-х т. Т. 3. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – С. 188-192.

260. **Фёдоров, В. П.** Лезвийная чистовая обработка сверхтвёрдыми материалами – основа создания эффективных антифрикционных технологий / Фёдоров В. П., Нагоркина В. В // Известия Тульского государственного университета – 2005. – Вып. 1. Ч. 1. – С. 157-163.

261. **Фёдоров, В. П.** Мехатронная система научных исследований в инженерии поверхностей деталей машин / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков // Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ-2011) : сб. тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф., 19-20 мая 2011 г., г. Брянск; под общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск : Десяточка, 2011. – С. 246-247.

262. **Фёдоров, В. П.** Мобильная виртуальная система структурного микроанализа поверхностей / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, В. В. Нагоркина, Е. В. Ковалёва // Состояние, проблемы и перспективы автоматизации технической подготовки производства на промышленных предприятиях : материалы междунар. науч.-практ. конф., 16-18 ноября 2009 г., г. Брянск; под ред. В. И. Аверченкова. – Брянск : БГТУ, 2009. – С. 16.

263. **Фёдоров, В. П.** Моделирование и управление качеством поверхностного слоя деталей с применением современных средств инструментального обеспе-

чения и компьютерных технологий / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков, М. П. Топорков // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – № 2 (53). – С. 138-147.

264. **Фёдоров, В. П.** Модернизация технологического оборудования с ЧПУ на основе инновационного подхода / В. П. Фёдоров, А. А. Малкин, И. Л. Пыриков, М. Н. Нагоркин // Состояние, проблемы и перспективы автоматизации технической подготовки производства на промышленных предприятиях : материалы междунар. науч.-практ. конф., 16-18 ноября 2009 г., г. Брянск; под ред. В. И. Аверченкова. – Брянск : БГТУ, 2009. – С. 15.

265. **Федоров, В. П.** Надёжность и диагностика технологических систем металлообработки : учеб. пособие / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин. – Брянск : БГТУ, 2013. – 116 с.

266. **Фёдоров, В. П.** Надёжность технологического управления качеством поверхностей деталей машин / В. П. Фёдоров // Технологическое управление качеством поверхности деталей: сб. науч. тр. – Киев : АТМ Украины, 1998. – С. 114-123.

267. **Фёдоров, В. П.** Обеспечение закономерного изменения качества поверхностного слоя деталей при ОУО ППД на универсальных станках с использованием традиционной и программируемой оснастки / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, В. В. Нагоркина, Е. В. Ковалёва // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XVIII междунар. науч.-техн. конф., 12-17 сент. 2011 г., г. Севастополь : в 4-х т. Т. 3. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – С. 151-154.

268. **Фёдоров, В. П.** Обеспечение закономерного изменения качества поверхностного слоя деталей при ОУО ППД на универсальных станках на основе применения мехатронных модулей / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков // Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ – 2011) : сб. тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф., 19-20 мая 2011 г., г. Брянск; под общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск : Десяточка, 2011. – С. 160-161.

269. **Федоров, В. П.** Обеспечение качества плоских поверхностей деталей ма-

шин из чугуна лезвийной и отделочно-упрочняющей обработкой инструментом из поликристаллических сверхтвёрдых материалов / В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин // Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения (ТМ-2015) : материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф., 21-23 сентября 2015 г., г. Брянск. – Брянск : БГТУ, 2015. – С. 197-198.

270. **Федоров, В. П.** Оперативная диагностика технологических систем по параметрам шероховатости поверхностей обрабатываемых деталей машин / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков, М. П. Топорков // Проблемы и перспективы развития машиностроения : сб. науч. трудов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию Липецкого государственного технического университета. 17-18 ноября 2016 г. – Ч. 1. – Липецк : ЛГТУ, 2016. – С. 259-263.

271. **Фёдоров, В. П.** Определение рациональности системы показателей качества изделий по критерию её информационной энтропии / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва // Логистика – инновации – менеджмент : сб. тез. II междунар. науч.-практ. конф., 27 апреля 2012 г., Брянский государственный технический университет; под ред. А. В. Лагерева, Л. А. Карабан. – Брянск : БГТУ, 2012. – С. 70-74.

272. **Фёдоров, В. П.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием деталей машин с закономерным изменением качества поверхностных слоёв / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 1. – С. 22-33.

273. **Фёдоров, В. П.** Отражательная способность поверхностей при обработке ППД / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва, В. В. Нагоркина, В. Ф. Чистов // Наука и производство – 2009 : материалы междунар. науч.-практ. конф., 19-20 марта 2009 г., г. Брянск ; под. ред. С. П. Сазонова, П. В. Новикова : в 2-х ч. Ч. 2. – Брянск: БГТУ, 2009. – С. 74-76.

274. **Фёдоров, В. П.** Параметры контактного взаимодействия упрочняемой поверхности и сферического индентора при финишной обработке пластическим

деформированием / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва, В. В. Нагоркина // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XII междунар. науч.-техн. конф., 12-17 сент. 2005 г., г. Севастополь : в 5-ти т. Т. 4. – Донецк : ДонГТУ, 2005. – С. 26-30.

275. **Фёдоров, В. П.** Повышение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств соединений деталей машин комбинированными методами обработки / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин // Проблемы качества машин и их конкурентоспособности : материалы 6-й междунар. науч.-техн. конф., 22-23 мая 2008 г., г. Брянск; под. общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск : БГТУ, 2008 – С. 251-252.

276. **Фёдоров, В. П.** Прикладная теория надёжности технических объектов : учеб. пособие / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин. – Брянск : БГТУ, 2006. – 330 с.

277. **Федоров, В. П.** Применение программных технических средств на станках с компьютерными системами ЧПУ для формирования закономерно изменяющихся параметров качества поверхностей деталей машин / В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалева // Логистика в инновационной экономике: тез. докл. V междунар. науч.-практ. конф., 25 апреля 2015 г., Брянский государственный технический университет ; под ред. Л. А. Карабан. – Брянск : БГТУ, 2015. – С. 134-136.

278. **Федоров, В. П.** Принципы и средства технологического обеспечения заданных законов распределения параметров качества по обрабатываемой поверхности детали / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин // Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки. Коллективная монография; под ред. А. В. Киричека. – М. : Издательский дом «Спектр», 2014. – С. 172-220.

279. **Фёдоров, В. П.** Проблемы исследования и повышения надёжности технологического обеспечения качества деталей машин / В. П. Фёдоров // Трение и износ – 1997. – Том 18, № 3. – С. 349-360.

280. **Фёдоров, В. П.** Программные технические средства обеспечения закономерно изменения качества поверхностей ОУО ППД на станках с компьютер-

ными системами ЧПУ / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков, А. А. Малкин // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XVIII междунар. науч.-техн. конф., 12-17 сент. 2011 г., г. Севастополь : в 4-х т. Т. 3. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – С. 155-158.

281. **Фёдоров, В. П.** Программный метод исследования надёжности технологического обеспечения эксплуатационных свойств машин / В. П. Фёдоров, А. А. Кельнер // Технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами деталей машин и механизмов : сборник научных трудов; под ред. А. О. Горленко. – Брянск : БИТМ, 1986. – С. 93-100.

282. **Фёдоров, В. П.** Синтез мехатронных технологических систем механической обработки деталей на основе модернизации морально устаревшего оборудования / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков, А. А. Малкин // Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ-2011) : сб. тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф., 19-20 мая 2011 г., г. Брянск; под общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск : Десяточка, 2011. – С. 333-334.

283. **Фёдоров, В. П.** Сравнительная характеристика методов повышения износостойкости поверхностей деталей нанесением мягких и твёрдых покрытий / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, В. В. Нагоркина // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XX междунар. науч.-техн. конф., 16-21 сентября 2013 г., г. Севастополь : в 3-х т. Т. 3. – Донецк : ДонНТУ, 2013. – С. 93-96.

284. **Фёдоров, В. П.** Стабилизация величины износа поверхностей деталей машин, работающих в нестационарных условиях, технологическими методами / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва, В. В. Нагоркина, Н. С. Карасёва // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин : зб. наук. праць. / НАН України, ИСМ им. В. Н. Бакуля. – Киев, 2009. – С. 107-120.

285. **Фёдоров, В. П.** Стабилизация эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин, работающих в нестационарных условиях, технологическими методами / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва, В. В. Нагоркина //

Контактная жёсткость и износостойкость деталей машин : материалы междунар. науч.-техн. семинара, посвящённого 80-летию со дня рождения Э. В. Рыжова и 100-летию со дня рождения И. В. Крагельского, 22 декабря 2008 г., г. Брянск; под ред. А. Г. Сулова, О. А. Горленко. – Брянск : БГТУ, 2008 – С. 135-142.

286. **Фёдоров, В. П.** Стабильность технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин чистовыми и финишными методами обработки : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / Фёдоров Владимир Павлович. – Брянск, 1991. – 618 с.

287. **Фёдоров, В. П.** Статистическое моделирование формирования параметров качества поверхности деталей алмазным выглаживанием с учётом технологической наследственности / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин // Научно-технические технологии в авиационном двигателестроении : материалы IV междунар. науч.-техн. конф., посвященной 75-летию В. Ф. Безъязычного, 3-5 сент. 2012 г., г. Рыбинск : в 2-х ч. Ч. 2.; под ред. В. А. Полетаева. – Рыбинск : РГАТУ, 2012. – С. 30-35.

288. **Федоров, В. П.** Техническое обеспечение и повышение контактной жесткости и износостойкости деталей / В. П. Федоров [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2003. – № 9. – С. 2-7.

289. **Федоров, В. П.** Технологическая устойчивость и параметры контактного взаимодействия индентора с поверхностью при финишной обработке ППД устройствами упругого действия / В. П. Фёдоров // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – № 4. – С. 4-8.

290. **Фёдоров, В. П.** Технологические и метрологические аспекты адаптации поверхностей деталей машин к нестационарным условиям эксплуатации в процессе изготовления / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков // Справочник. Инженерный журнал. – № 10. – 2009. – С. 8-15.

291. **Фёдоров, В. П.** Технологическое обеспечение качества поверхности деталей машин, работающих при нестационарных условиях эксплуатации / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, В. В. Нагоркина, Е. В. Ковалёва // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XIII междунар. науч.-техн. конф., 11-16 сен-

тября 2006 г., г. Севастополь : в 5-ти т. Т. 4. – Донецк : ДонНГТУ, 2006. – С. 10-15.

292. **Федоров, В. П.** Технологическое обеспечение заданной закономерности изменения параметров качества поверхностей деталей, учитывающей переменные условия их эксплуатации / В. П. Федоров М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалева // Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения (ТМ-2015) : материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф., 21-23 сентября 2015 г., г. Брянск. – Брянск, 2015. – С. 199-200.

293. **Фёдоров, В. П.** Технологическое обеспечение закономерного изменения качества поверхностей при обработке на станках с ЧПУ / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва // Материалы 58-й науч. конф. профессорско-преподавательского состава ; под ред. С. П. Сазонова, И. В. Говорова / Брянский государственный технический университет. – Брянск : БГТУ, 2008. – С. 56-58.

294. **Фёдоров, В. П.** Технологическое обеспечение закономерного изменения качества поверхностного слоя деталей при обработке на станках с ЧПУ / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2011. – № 2 (02). – С. 40-46.

295. **Фёдоров, В. П.** Технологическое обеспечение закономерного изменения параметров качества поверхности детали в процессе обработки: монография / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва. – Брянск: БГТУ, 2012. – 192 с.

296. **Фёдоров, В. П.** Технологическое обеспечение параметров качества плоских поверхностей деталей из чугуна инструментами с поликристаллическими сверхтвёрдыми материалами / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин // Контактная жёсткость. Износостойкость. Технологическое обеспечение: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., 22-24 окт. 2003 г., г. Брянск ; под общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск, 2003. – С. 136-139.

297. **Фёдоров, В. П.** Триботехническая эффективность и область применения комбинированной антифрикционной обработки на базе нанесения медесодержащих пленок и ППД / В. П. Федоров, А. В. Тотай, П. П. Акулич, В. В. Нагор-

кина // Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 6-й междунар. науч.-техн. конф., 30 мая-1 июня 2006 г., г. Ялта / АТМ Украины. – Киев, 2006. – С. 180-183.

298. **Фёдоров, В. П.** Управление качеством поверхностей деталей машин в технологических системах повышенной гибкости / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва, В. В. Нагоркина // Наука и производство – 2009 : материалы междунар. науч.-практ. конф., 19-20 марта 2009 г., г. Брянск : в 2-х ч. Ч. 2.; под. ред. С. П. Сазонова, П. В. Новикова. – Брянск: БГТУ, 2009. – С. 72-74.

299. **Фёдоров, В. П.** Управление качеством поверхностей трения деталей машин по заданному закону в системах обработки с ЧПУ / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва, В. В. Нагоркина // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XV междунар. науч.-техн. конф., 15-20 сент. 2008 г., г. Севастополь : в 4-х т. Т. 3. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – С. 253-257.

300. **Фёдоров, В. П.** Управление обеспечением переменных свойств поверхности детали в пределах перехода обработкой ППД в компьютерных системах ЧПУ / В. П. Фёдоров, Е. В. Ковалёва, А. В. Крылов // Обеспечение и повышение качества машин на этапах их жизненного цикла : материалы 5-й междунар. науч.-техн. конф., 19-21 окт. 2005 г., г. Брянск ; под общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск, 2005. – С. 92-95.

301. **Федоров, В. П.** Управление процессом закономерного формирования параметров качества поверхностей деталей методами поверхностного пластического деформирования / В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей технологии и виброволновых технологий : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., посв. 90-летию А. П. Бабичева, 27-28 февр. 2018 г.; Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2018. – С. 106-109.

302. **Фёдоров, В. П.** Управление формированием качества поверхностей и триботехнических характеристик соединений комбинированными методами обработки / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, В. В. Нагоркина, Е. В. Ковалёва // Вестник Курганского университета. – 2006. – Вып. 2. Ч. 1 – С. 121-123.

303. **Фёдоров, В. П.** Управление формированием триботехнических характеристик соединений методами комбинированной триботехнологии / В. П. Фёдоров, А. В. Тотай, П. П. Акулич, В. В. Нагоркина // Современные проблемы подготовки производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении : материалы 6-го междунар. науч.-техн. семинара, 21-23 февр. 2006 г., г. Свалява, Карпаты / АТМ Украины. – Киев, 2006. – С. 178-180.
304. **Фёдоров, В. П.** Формирование качества плоских поверхностей деталей из чугуна алмазным выглаживанием / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XIX междунар. науч.-техн. конф., 17-22 сент. 2012 г., г. Севастополь : в 3-х т. Т. 3. – Донецк : ДонНТУ, 2012. – С. 33-36.
305. **Хазов Б. Ф.** Справочник по расчёту надёжности машин на стадии проектирования / Б. Ф. Хазов, Б. А. Дидусев. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
306. **Харт, Х.** Введение в измерительную технику / Х. Харт : пер. с нем. – М. : Мир, 1999. – 391 с.
307. **Харченко, В. С.** Технологическое обеспечение износостойкости деталей машин нанесением многослойных покрытий // Трение и износ – Т. 18, № 3 – 1997. – С. 361-368.
308. **Хворостухин, Л. А.** [и др.] Выглаживание поверхностей деталей // Вестник машиностроения. – 1973. – № 9. – С. 52-54.
309. **Хворостухин, Л. А.** Обработка металлопокрытий выглаживанием / Л. А. Хворостухин, В. Н. Машков, В. А. Торпачёв, Н. Н. Ильин. – М. : Машиностроение, 1981. – 63 с.
310. **Хворостухин, Л. А.** Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л. А. Хворостухин, С. В. Шишкин, А. П. Ковалёв, Р. А. Ишмаков. – М. : Машиностроение, 1988. – 144 с.
311. **Хейфец, М. Л.** Технологическое управление наследованием эксплуатационных параметров качества деталей машин / М. Л. Хейфец, А. С. Васильев, А. И. Кондаков, Л. И. Ганович // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук – 2015. – № 3. – С. 10-22.
312. **Химмельблау, Д.** Анализ процессов статистическими методами / Д.

- Химмельблау ; пер. с англ. В. Д. Скаржинский; под ред. В. Г. Горского. – М. : Мир, 1973. – 957 с.
313. **Хусу, А. П.** Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Витенберг, В. А. Пальмов. – М. : Наука, 1975. – 344 с.
314. **Цап М. В.** Повышение долговечности направляющих станин металлорежущих станков / М. В. Цап // Технология и организация производства. – 1975. – № 6. – С. 22-24.
315. **Чепа, П. А.** Технологические основы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / П. А. Чепа. – Минск. : Наука и техника, 1981. – 128 с.
316. **Чихос, Х.** Системный анализ в трибонике. / Х. Чихос ; пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – 352 с.
317. **Шеннон, Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон ; пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского. – М. : Мир, 1978. – 420 с.
318. **Школьник, Л. М.** Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием / Л. М. Школьник, В. И. Шахов. – М. : Машиностроение, 1964. – 183 с.
319. **Шнейдер, Ю. Г.** Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1972. – 240 с.
320. **Шнейдер, Ю. Г.** Технология финишной обработки давлением: справочник / Ю. Г. Шнейдер. – СПб : Политехника, 1998. – 416 с.
321. **Шнейдер, Ю. Г.** Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1982. – 248 с.
322. **Штаерман, И. Я.** Контактная задача теории упругости / И. Я. Штаерман – М., Л. : Гостехиздат, 1949. – 270 с.
323. **Яблонский, А. А.** Курс теоретической механики : учеб. для втузов. Ч. 2. Динамика / А. А. Яблонский. – М. : Высш. шк., 1984. – 422 с.
324. **Яблонский, А. А.** Курс теории колебаний / А. А. Яблонский, С. С. Нореико – 4-е изд. стер. – СПб. : Лань., 2003. – 247 с.

325. **Ящерицын П. И.** Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении / П. И. Ящерицын. – Минск : Вышэйшая школа, 1974. – 607 с.
326. **Ящерицын П. И.** Прогрессивная технология финишной обработки деталей / П. И. Ящерицын, М. С. Наерман, С. А. Попов. – Минск : Беларусь, 1978. – 176 с.
327. **Ящерицын, П. И.** Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск : Вышэйш. шк., 1985. – 286 с.
328. **Ящерицын, П. И.** Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.
329. A study on the surface characteristics of burnished components / Rajesham S., Cheong Tak Jem // J. Mech. Work. Technol. – pp. 53-61.
330. **Brummerhoff R.** Werkstückwelligkeit beim Gewindeschleifen. Zwf67(1972) Heft 3, pp. 115-117.
331. Detaillierte rauheits untersuch ungen in der oberflächen meBtechnik // Masch.-Anlag. Verfahr. – 1989. No 3. – 62 p.
332. Entwicklungen beim Glattwalzen und Feswalzen. NC-kompatible Werkzeuge // Ind.- Anz. – 110. No 71. – pp. 40-42.
333. **Fyodorov V. P.** Controlling the parameters of the component quality using program means while performing mechanical machining. / V. P. Fyodorov, V. I. Averchenkov, M. N. Nagorkin // Procedia engineering 150 (2016): 2nd International conference on industrial engineering (ICIE-2016). Pp. 899-905. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.047.
334. **Fyodorov V. P.** Determination of parametric reliability of machining technological systems by simulation technique / V. P. Fyodorov, M. N. Nagorkin , A. V. Totai // IOP conf. series: Materials science and engineering; 124 (2016) 012053. doi: 10.1088/1757-899X/124/1/012053.
335. **Gladwell G. M.** Contact problems in the classical theory of elasticity. – Alphen aan den Rijn: Sijthoff and Noordhoff, 1980.
336. **Griffiths B. J.** Manufacturing surface technology – a part of manufacturing

- strategy technical information. // Recent. Dev. Prod. Res.: Collect.Rf. Pap. 9 Int. Conf., Cincinnati, Ohio, 17 – 20 Aug., 1987. – Amsterdam etc., 1988. – pp. 37-44.
337. **Groenwood I. A.** The are of contact between rough surfaces and flats ASME, Ser. E. – № 1. – 1967.
338. **Kazuhiko Y.** Einflub der ABricht und Schleif bedingungen auf die Rauheit und Rungheit geschliffener Oberflashes. Werkstatt und Betrieb. 107 (1974). 9. – pp. 513-525.
339. **Kiethe H.** Oberflashengestalt und Eigenspannung – sausbildung beim Wal-senfrasen von Flachproben aus Ckus. Dissertation. Von der Fakultat fur Maschinenbau der Universitat Kalsruhe (T.N.). – 1973. – 135 p.
340. **Loh N. H., Tam S. C., Miyazawa S.** Statistical analyses of the effects of ball burnishing parameters on surface hardness / Wear. 129, No 2, 1989 – pp. 235-243.
341. **Manufacturing surface technology – a part of manufacturing strategy technical information.** / Griffiths B. J. // Recent. dev. prod. res.: Collect, Ref. pap. 9th Int. Conf., Cincinnati, Ohio, 17 – 20 Aug., 1988. – Amsterdam etc., 1988. – pp. 37-44.
342. **Nagorkin M. N.** Automation of technological system diagnostics by parameters of quality of surfaces of machined parts / M. N. Nagorkin, V. P. Fyodorov, E. V. Kovalyova // Lecture notes in mechanical engineering. Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering (ICIE 2018). Pp. 1535-1545. doi: org/10.1007/978-3-319-95630-5_164.
343. **Nagorkin M. N.** Features of waviness's formation and deviations from roundness of machine details surfaces at final machining with surface plastic deformation by elastic action tools / M. N. Nagorkin, V. P. Fyodorov, A.V. Totai // Procedia engineering 206 (2017): 3rd International conference on industrial engineering (ICIE-2017). Pp. 169-175. doi: org/10.1016/j.proeng.2017.10.455.
344. **Nagorkin M. N.** Modeling of process of forming quality parameters for surfaces of parts by diamond burnishing taking into account technological heredity / M. N. Nagorkin, V. P. Fyodorov, E. V. Kovalyova // IOP conf. series: Materials science and engineering; 327 (2018) 042071. doi: 10.1088/1757-899X/327/4/042071.
345. **Nagorkin M. N.** Simulation modelling of tribotechnologies system and its par-

ametric reliability assessment on tribotechnical parameters of the joints of sliding friction / M. N. Nagorkin, V. P. Fyodorov, V. V. Nagorkina // IOP conf. series: Materials science and engineering; 177 (2017) 012079. doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012079.

346. **Peklenik I.** Neurre Statistische verfahren zur topographischen erfassung von oberflächen. Wt-z. ind. Fertig. 53. – Nr. 11. – 1963. – pp. 580-589.

347. **Pahlitzsch.** Schleifen von Holz und Holzwerkstoffen. ZwF 67 (1972) Helt 3, pp. 118-123.

348. **Salje E.** Erkenntnisse über den Ablauf des Schleifprozesses. Technische Mitteilungen 69. Jahrgang, Heft 718. – 1976, pp. 331-338.

349. **Simulation bei der Ne-Programmierung / Schade Berud.** Schade Klaus-Gunter // Werkstatt und Betr. – 123. No3. – 1990. – pp. CA28–CA31.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

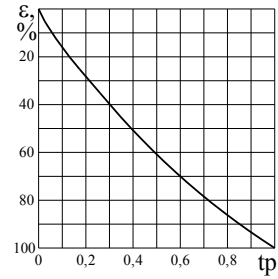
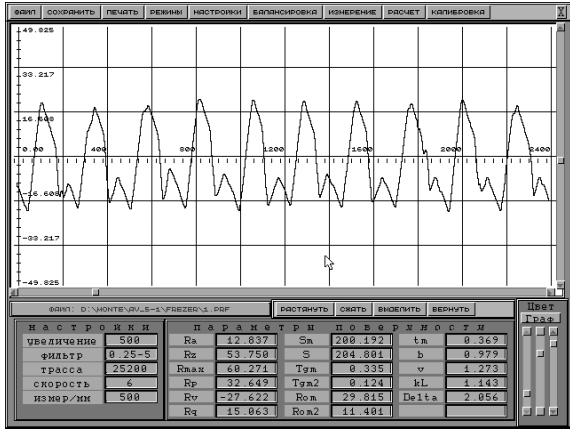
Область факторного пространства и матрица планирования эксперимента типа 2^2
 по исследованию процесса торцевого фрезерования композитом 10
 плоских поверхностей деталей из чугуна

Параметр	$S_{z\text{фрез}}$, мм/зуб	$V_{\text{фрез}}$, м/мин	$S_{z\text{фрез}}V_{\text{фрез}}$
Код фактора X_i	X_1	X_2	$X_3 = X_1 X_2$
Нижний уровень (-1)	0,05	311	15,55
Верхний уровень (+1)	0,25	622	155,5

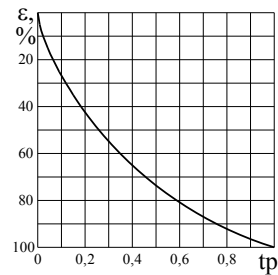
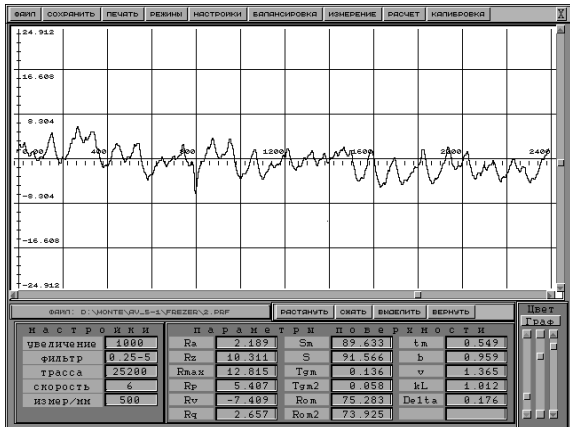
№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_1X_2
1	+	+	+	+
2	+	-	+	-
3	+	+	-	-
4	+	-	-	+

Приложение 2

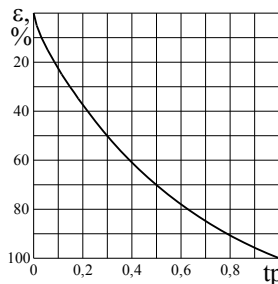
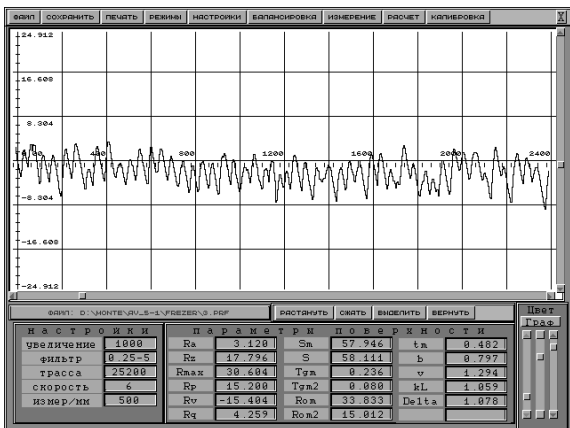
Фрагменты профиля шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна, обработанных торцевым фрезерованием композитом 10, и относительные опорные кривые



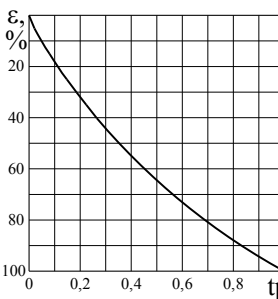
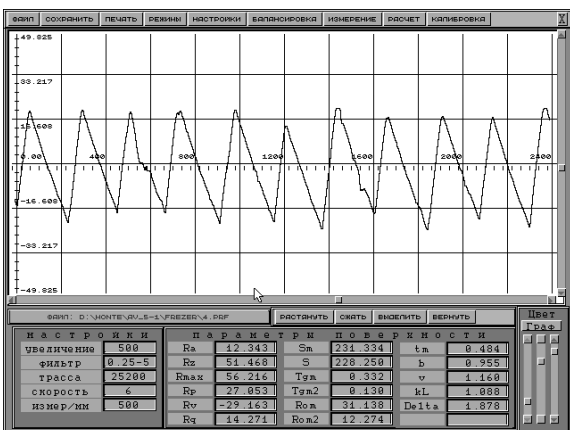
Торцевое фрезерование композитом 10
 $S_z \text{ фрез} = 0,25 \text{ мм/зуб}$; $V_{\text{фрез}} = 622 \text{ м/мин}$



Торцевое фрезерование композитом 10
 $S_z \text{ фрез} = 0,05 \text{ мм/зуб}$; $V_{\text{фрез}} = 622 \text{ м/мин}$



Торцевое фрезерование композитом 10
 $S_z \text{ фрез} = 0,25 \text{ мм/зуб}$; $V_{\text{фрез}} = 311 \text{ м/мин}$



Торцевое фрезерование композитом 10
 $S_z \text{ фрез} = 0,05 \text{ мм/зуб}$; $V_{\text{фрез}} = 311 \text{ м/мин}$

Приложение 3

Таблица П.3.1 – Характеристики физико-статистических моделей формирования параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна торцевым фрезерованием композитом 10

Фактор	Коэф- фициент	Ra МКМ	Rz МКМ	$Rmax$ МКМ	Rp МКМ	Sm МКМ	ρ МКМ	b	v	Δ
	β_0	1,4564	17,8757	14,1728	6,6432	1,7432	2,7224	0,6903	1,2629	12,3687
	b'_0	1,6127	3,1295	3,2801	2,5864	4,7757	3,4511	-0,2044	0,2829	-0,1958
S_z фрез мм/зуб	β_1	0,0857	0,1390	0,0849	0,1252	-0,1931	-0,1664	0,0696	-0,0328	0,3216
	b'_1	0,0690	0,1118	0,0683	0,1007	-0,1554	-0,1339	0,0560	-0,0264	0,2588
	t_1	5,2402	16,0171	6,0888	5,4323	5,2368	3,8742	2,1368	1,8132	2,8807
V фрез м/мин	β_2	-0,2299	-0,3545	-0,2814	-0,2623	0,3398	0,3367	0,0197	0,0456	-0,7248
	b'_2	-0,0797	-0,1229	-0,0975	-0,0909	0,1177	0,1167	0,0068	0,0158	-0,2512
	t_2	6,0504	17,6007	8,6931	4,9034	3,9684	3,3760	0,2603	1,0862	2,7960
S_z фрез × V фрез	β_3	-0,7249	0,6953	0,6489	0,6581	0,4439	0,0092	0,0511	-0,0771	0,6174
	b'_3	-0,8346	0,8005	0,7470	0,7576	0,5110	0,0106	0,0588	-0,0887	0,7108
	t_3	63,3806	114,6619	66,5848	40,8657	17,2229	0,3062	2,2415	6,0927	7,9123

Окончание приложения 3

Таблица П.3.2 – Коэффициенты регрессии и их среднеквадратические отклонения в физико-статистических моделях формирования параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна торцевым фрезерованием композитом 10

Фактор	Коэффициент модели	Параметры распределения коэффициентов	Ra МКМ	Rz МКМ	$Rmax$ МКМ	Rp МКМ	Sm МКМ	ρ МКМ	b	ν	Δ
	β_0		1,4564	17,8757	14,1728	6,6432	1,7432	2,7224	0,6903	1,2629	12,3687
S_z фрез мм/зуб	β_1	$M\{\beta_1\}$ $S\{\beta_1\}$	0,0857	0,1390	0,0849	0,1252	-0,1931	-0,1664	0,0696	-0,0328	0,3216
			0,0164	0,0087	0,0139	0,0230	0,0369	0,0430	0,0326	0,0181	0,1116
V фрез м/мин	β_2	$M\{\beta_2\}$ $S\{\beta_2\}$	-0,2299	-0,3545	-0,2814	-0,2623	0,3398	0,3367	0,0197	0,0456	-0,7248
			0,0380	0,0201	0,0324	0,0535	0,0856	0,0997	0,0757	0,0420	0,2592
S_z фрез × V фрез	β_3	$M\{\beta_3\}$ $S\{\beta_3\}$	-0,7249	0,6953	0,6489	0,6581	0,4439	0,0092	0,0511	-0,0771	0,6174
			0,0114	0,0061	0,0097	0,0161	0,0258	0,0300	0,0228	0,0126	0,0780

Приложение 4

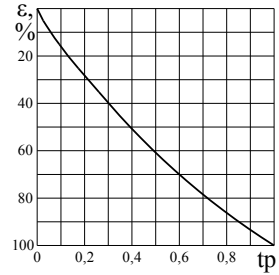
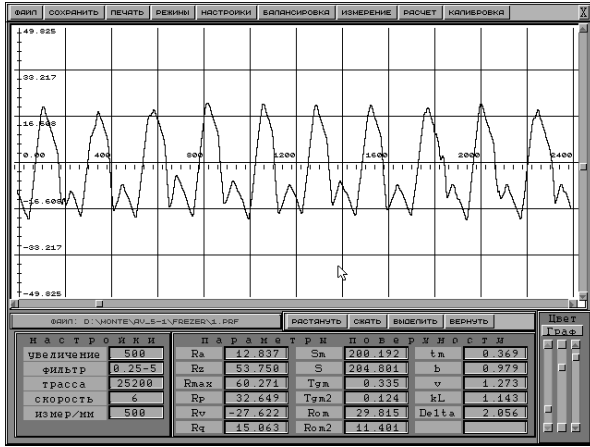
Область факторного пространства и матрица планирования эксперимента типа 2^{5-1} по обработке торцевым фрезерованием композитом 10 и алмазным выглаживанием плоских поверхностей деталей из чугуна

Параметр	$S_{z \text{ фрез}}$ мм/зуб	$V_{\text{фрез}}$ м/мин	Q Н	S_{AB} мм/об	V_{AB} м/мин	$S_{z \text{ фрез}} \times$ $\times V_{\text{фрез}}$	QV_{AB}
Код фактора X_i	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$X_1 X_2$	$X_3 X_2$
Нижний уровень (-1)	0,05	311	50	0,025	35,2	15,55	1760
Верхний уровень (+1)	0,25	622	150	0,16	87,9	155,5	13185

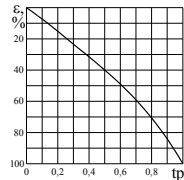
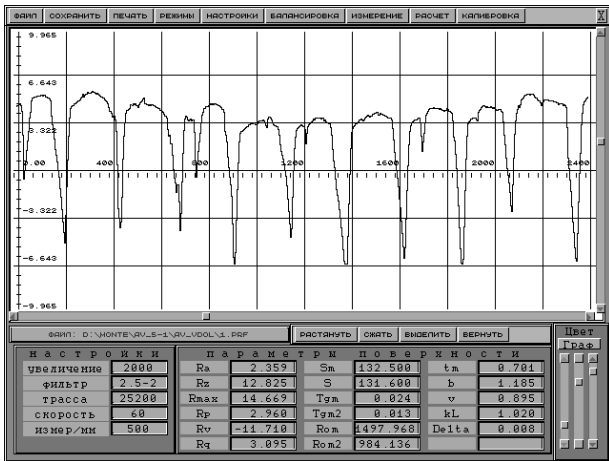
№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$X_1 X_2$	$X_3 X_5$
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	+	+	-	-	-
3	+	+	-	+	+	-	-	-
4	+	-	-	+	+	+	+	+
5	+	+	+	-	+	-	+	+
6	+	-	+	-	+	+	-	-
7	+	+	-	-	+	+	-	-
8	+	-	-	-	+	-	+	+
9	+	+	+	+	-	-	+	-
10	+	-	+	+	-	+	-	+
11	+	+	-	+	-	+	-	+
12	+	-	-	+	-	-	+	-
13	+	+	+	-	-	+	+	-
14	+	-	+	-	-	-	-	+
15	+	+	-	-	-	-	-	+
16	+	-	-	-	-	+	+	-

Приложение 5

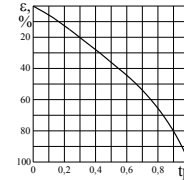
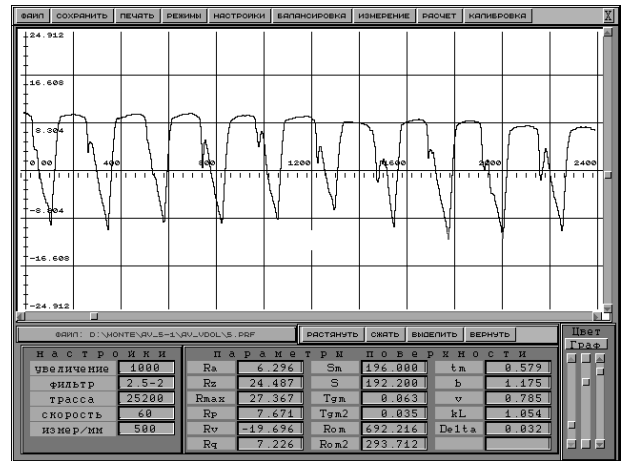
Микропрофиль поверхностей деталей, обработанных торцевым фрезерованием композитом 10 и алмазным выглаживанием



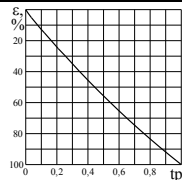
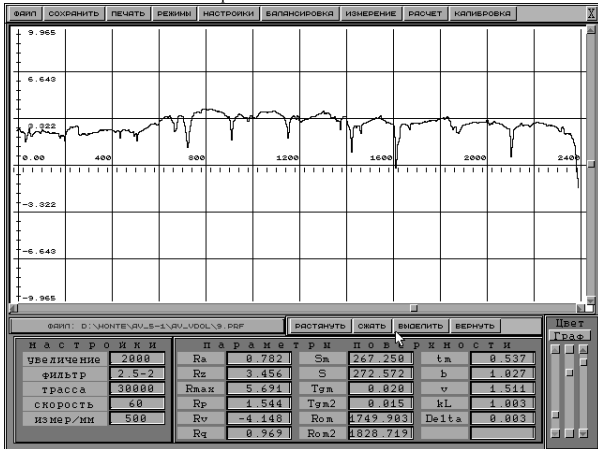
Торцевое фрезерование композитом 10
 $S_{z\text{ фрез}} = 0,25 \text{ мм/зуб}$; $V_{\text{фрез}} = 622 \text{ м/мин}$



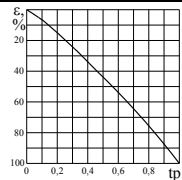
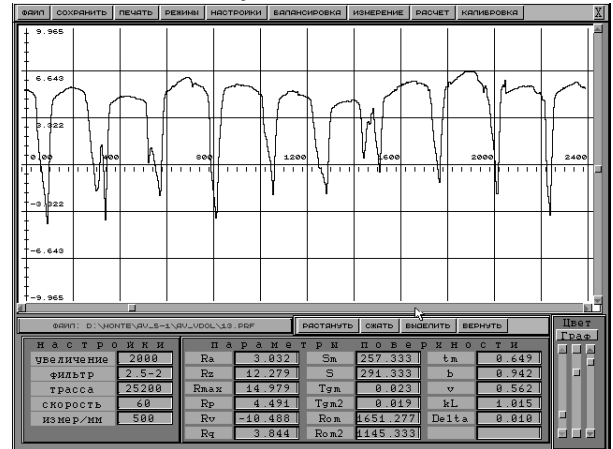
Выглаживание
 $Q = 150 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,16 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}$



Выглаживание
 $Q = 50 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,16 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 35,2 \text{ м/мин}$

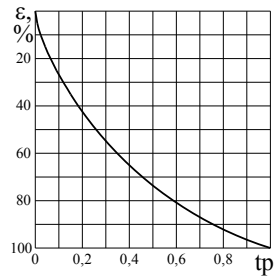
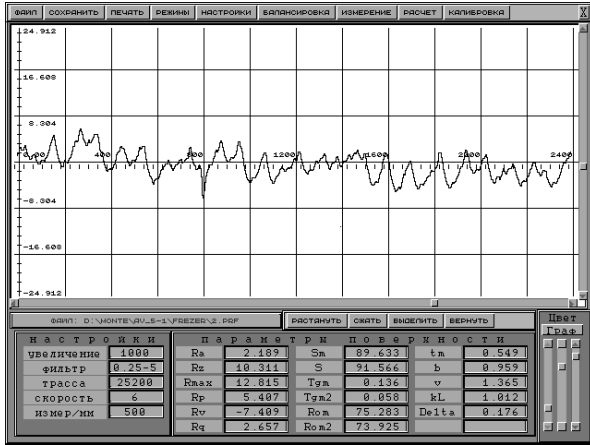


Выглаживание
 $Q = 150 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 35,2 \text{ м/мин}$

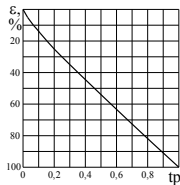
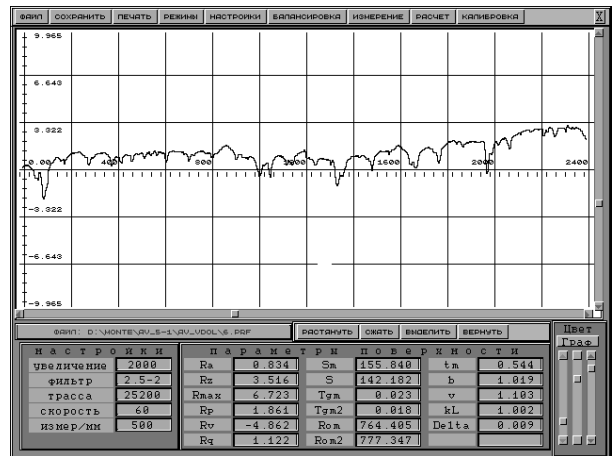
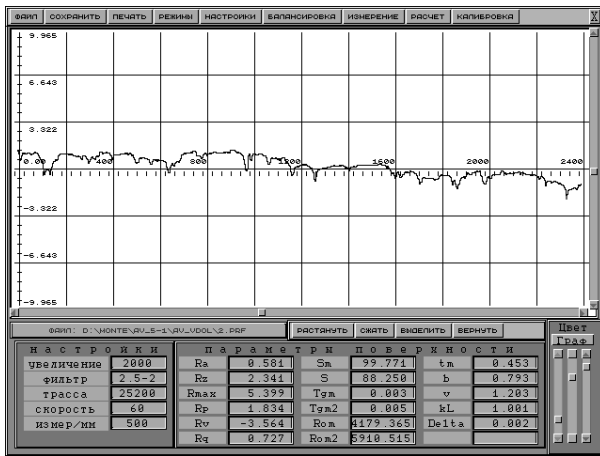


Выглаживание
 $Q = 50 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}$

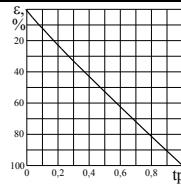
Продолжение приложения 5



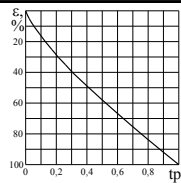
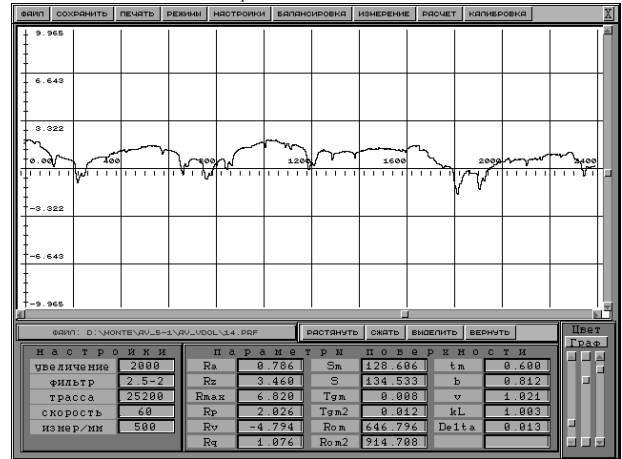
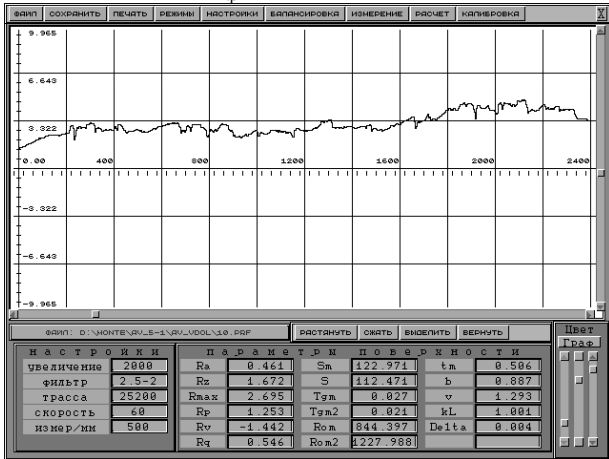
Торцевое фрезерование композитом 10
 $S_{z\text{ фрез}} = 0,05$ мм/зуб; $V_{\text{фрез}} = 622$ м/мин



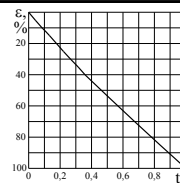
Выглаживание
 $Q = 150$ Н
 $S_{AB} = 0,16$ мм/об
 $V_{AB} = 35,2$ м/мин



Выглаживание
 $Q = 50$ Н
 $S_{AB} = 0,16$ мм/об
 $V_{AB} = 87,9$ м/мин

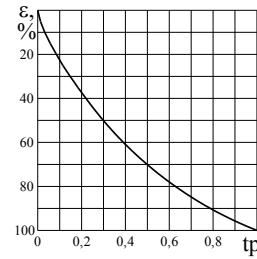
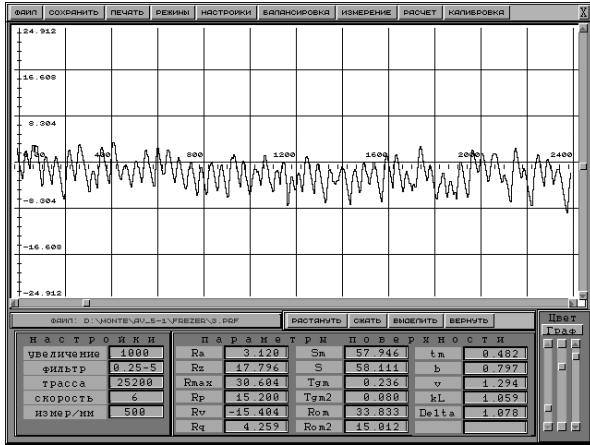


Выглаживание
 $Q = 150$ Н
 $S_{AB} = 0,025$ мм/об
 $V_{AB} = 87,9$ м/мин

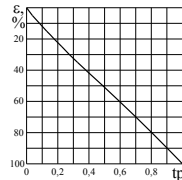
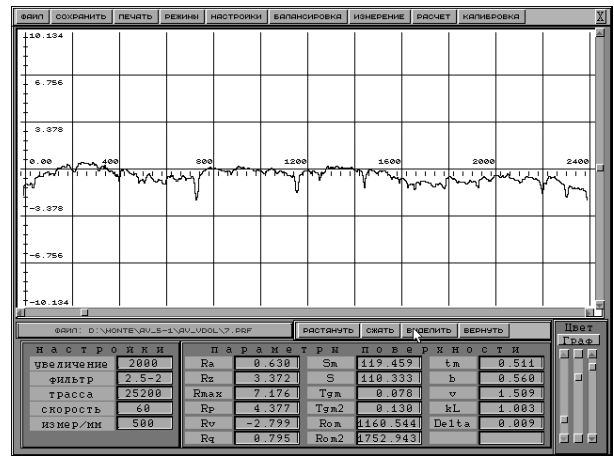
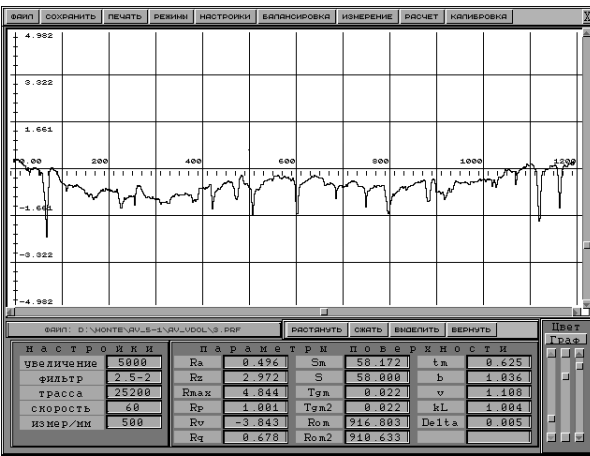


Выглаживание
 $Q = 50$ Н
 $S_{AB} = 0,025$ мм/об
 $V_{AB} = 35,2$ м/мин

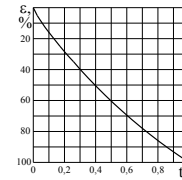
Продолжение приложения 5



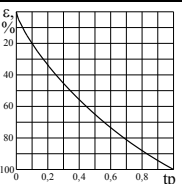
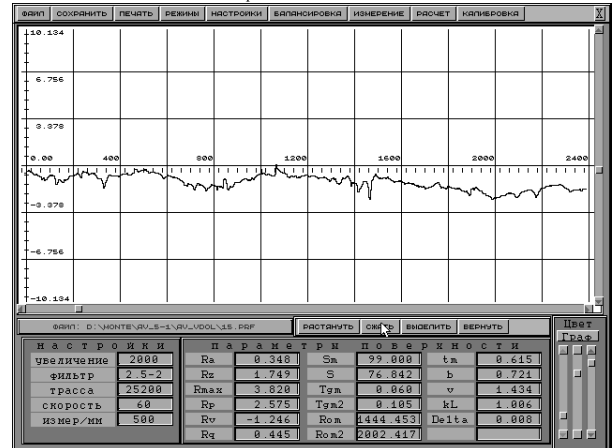
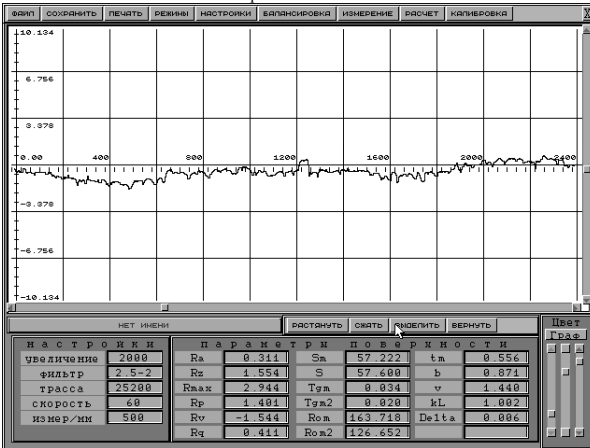
Торцевое фрезерование композитом 10
 $S_z \text{ фрез} = 0,25 \text{ мм/зуб}; V_{\text{фрез}} = 311 \text{ м/мин}$



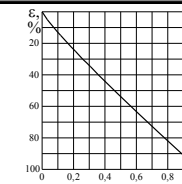
Выглаживание
 $Q = 150 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,16 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 35,2 \text{ м/мин}$



Выглаживание
 $Q = 50 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,16 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}$

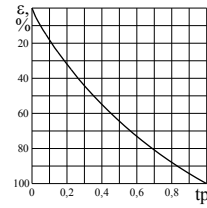
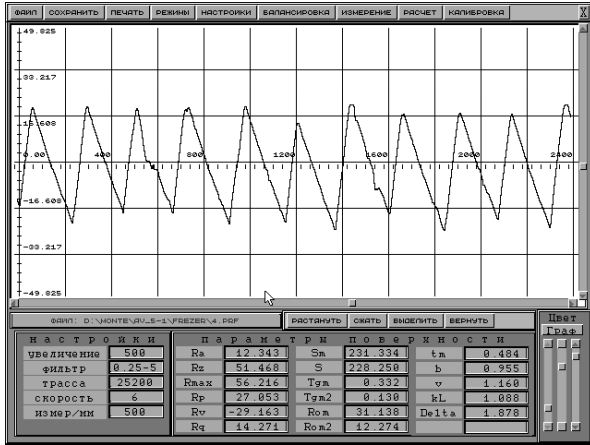


Выглаживание
 $Q = 150 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}$

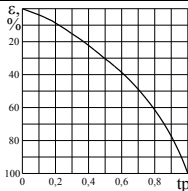
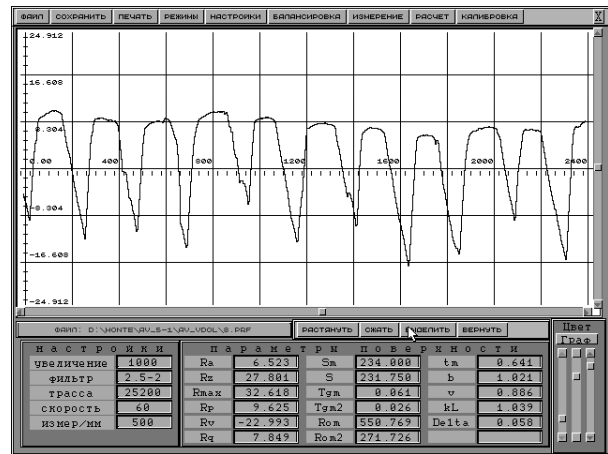
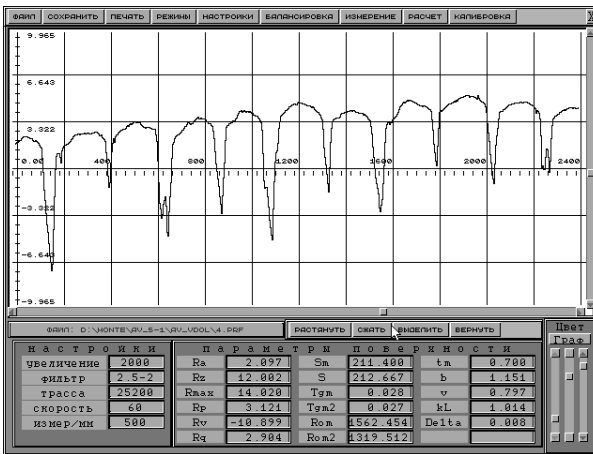


Выглаживание
 $Q = 50 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}$
 $V = 35,2 \text{ м/мин}$

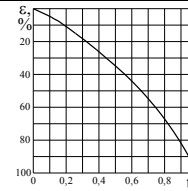
Окончание приложения 5



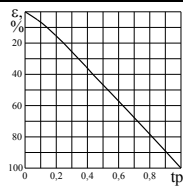
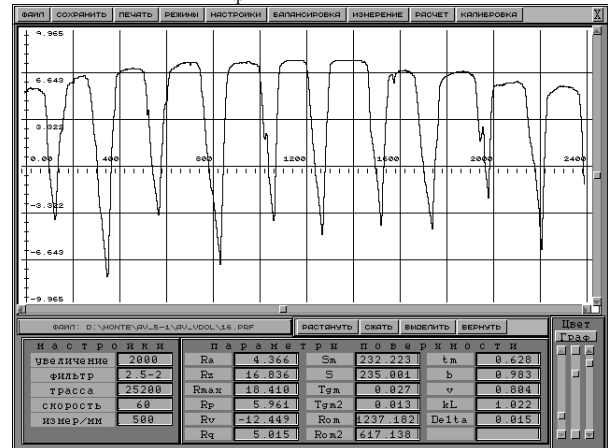
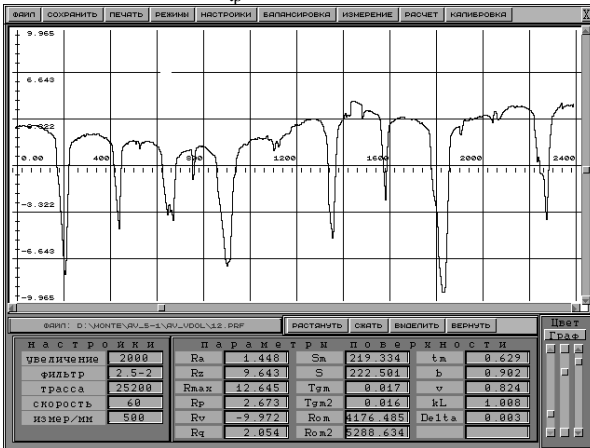
Торцевое фрезерование композитом 10
 $S_z \text{ фрез} = 0,05 \text{ мм/зуб}$; $V_{\text{фрез}} = 311 \text{ м/мин}$



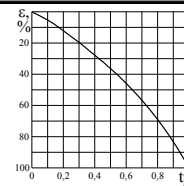
Выглаживание
 $Q = 150 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,16 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}$



Выглаживание
 $Q = 50 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,16 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 35,2 \text{ м/мин}$



Выглаживание
 $Q = 150 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 35,2 \text{ м/мин}$



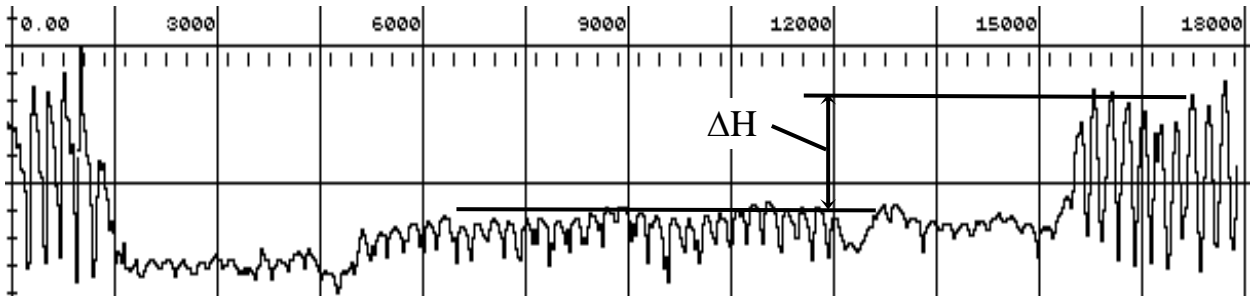
Выглаживание
 $Q = 50 \text{ Н}$
 $S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}$
 $V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}$

Приложение 6

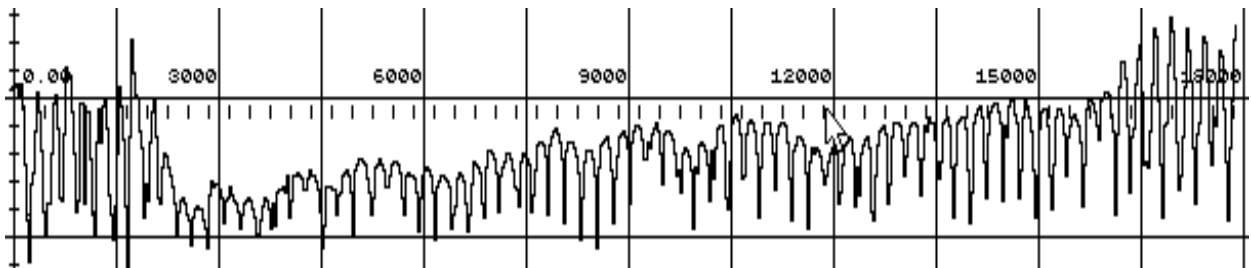
Профилограммы зон остаточной деформации микропрофиля поверхностей, обработанных торцевым фрезерованием композитом и последующим АВ

Предварительное торцевое фрезерование композитом 10

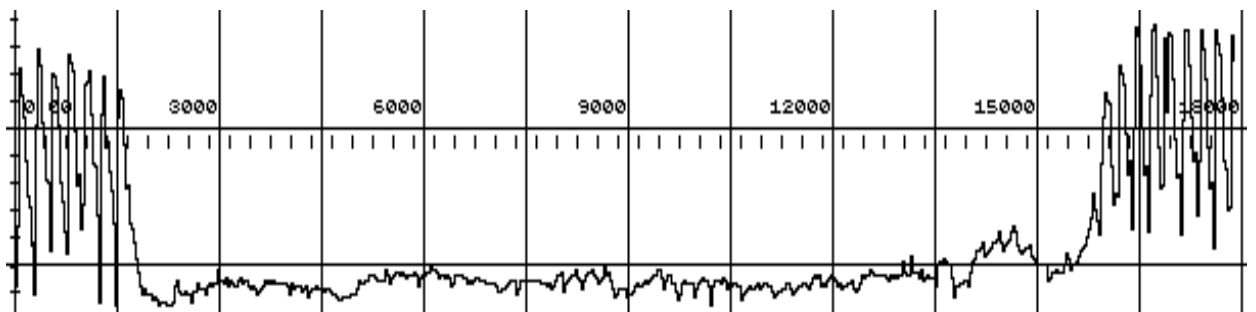
$S_{z\text{ фрез}} = 0,25$ мм / зуб; $V_{\text{фрез}} = 622$ м / мин; $Ra_{\text{фр}} = 11,5$ мкм



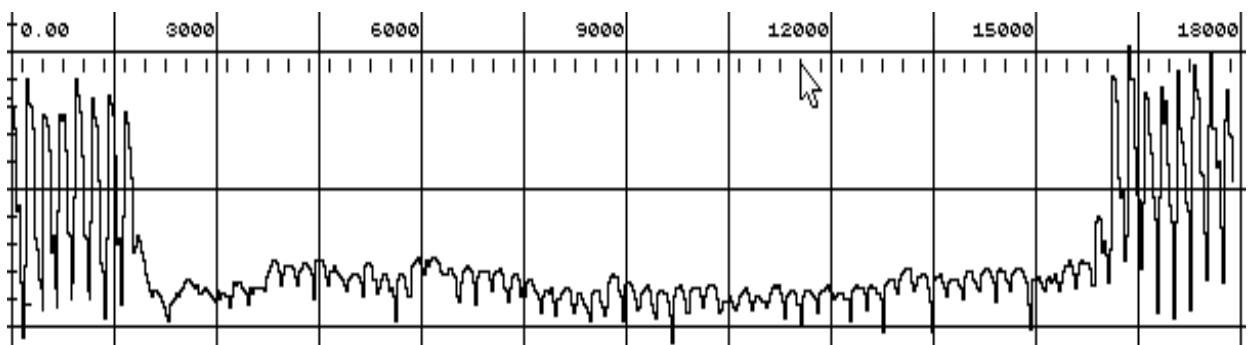
Алмазное выглаживание: $Q = 150$ Н; $S_{AB} = 0,16$ мм/об; $V_{AB} = 87,9$ м/мин
 $Ra = 2,3$ мкм; $\Delta H = 32,7$ мкм



Алмазное выглаживание: $Q = 50$ Н; $S_{AB} = 0,16$ мм/об; $V_{AB} = 35,2$ м/мин
 $Ra = 7$ мкм; $\Delta H = 21,8$ мкм



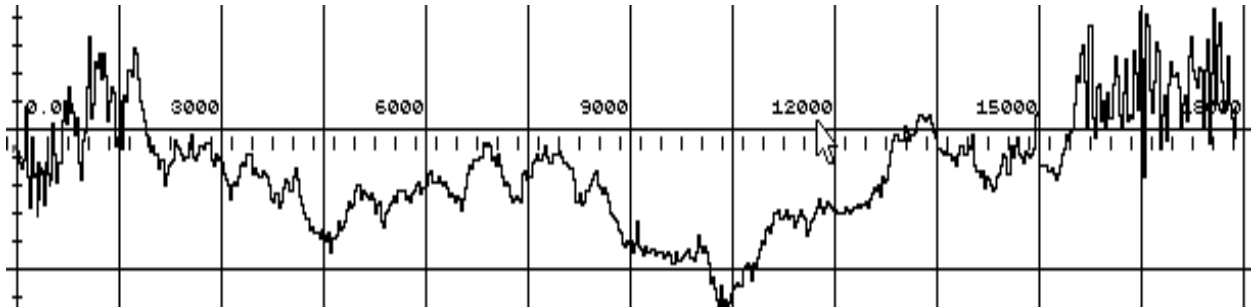
Алмазное выглаживание: $Q = 150$ Н; $S_{AB} = 0,025$ мм/об; $V_{AB} = 35,2$ м/мин
 $Ra = 1$ мкм; $\Delta H = 65,4$ мкм



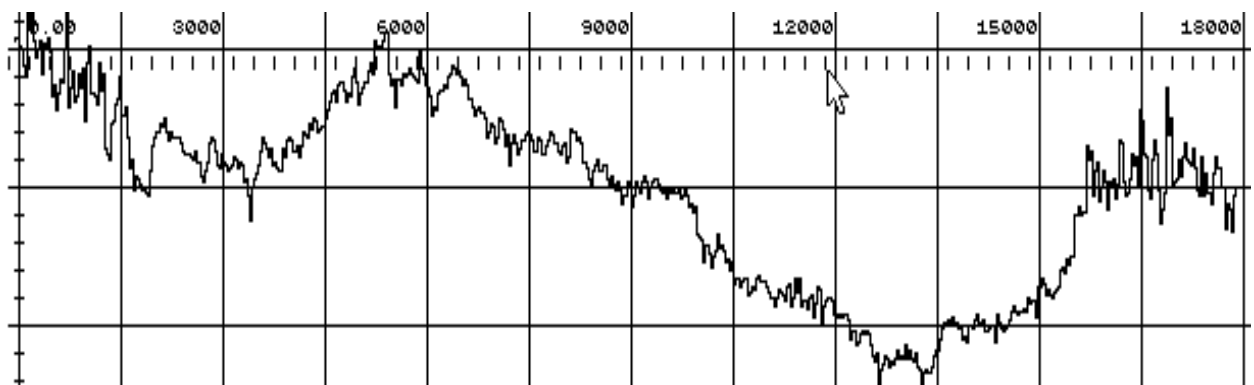
Алмазное выглаживание: $Q = 50$ Н; $S_{AB} = 0,025$ мм/об; $V_{AB} = 87,9$ м/мин
 $Ra = 4,5$ мкм; $\Delta H = 45,5$ мкм

Продолжение приложения 6

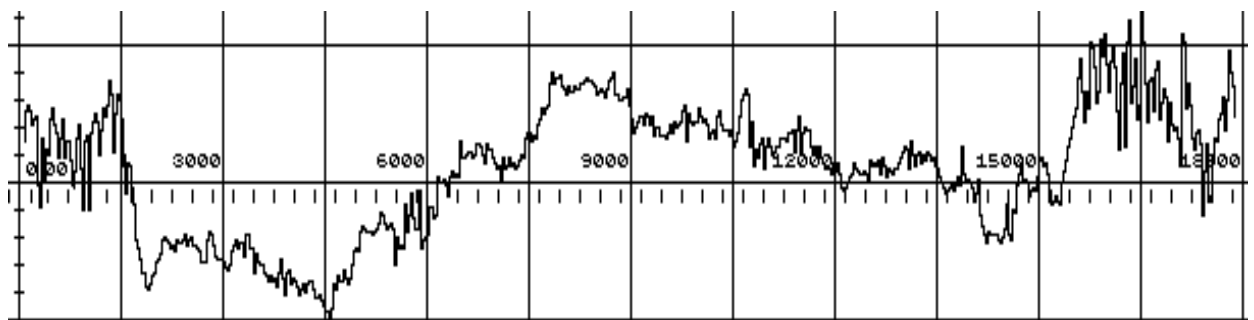
Предварительное торцевое фрезерование композитом 10

 $S_{z\text{ фрез}} = 0,05$ мм/зуб; $V_{\text{фрез}} = 622$ м/мин; $Ra_{\text{фр}} = 1,9$ мкм

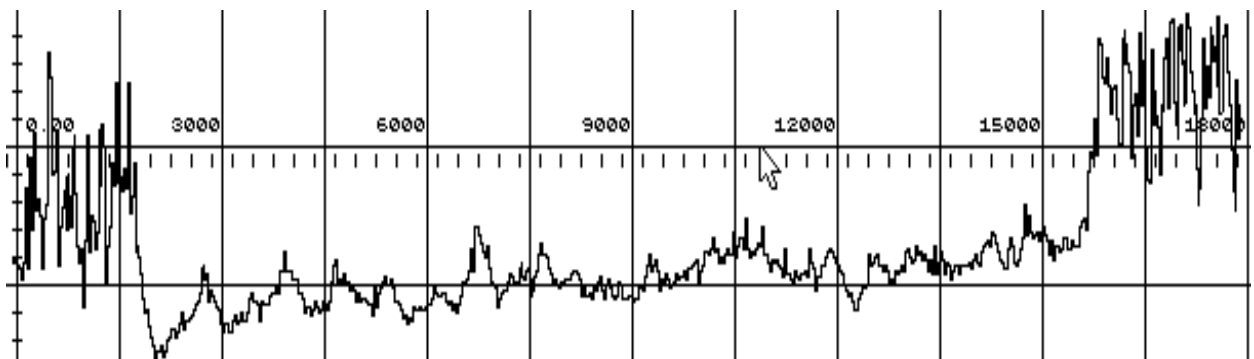
Алмазное выглаживание: $Q = 150$ Н; $S_{AB} = 0,16$ мм/об; $V_{AB} = 35,2$ м/мин
 $Ra = 0,5$ мкм; $\Delta H = 8$ мкм



Алмазное выглаживание: $Q = 50$ Н; $S_{AB} = 0,16$ мм/об; $V_{AB} = 87,9$ м/мин
 $Ra = 0,55$ мкм; $\Delta H = 4,3$ мкм



Алмазное выглаживание: $Q = 150$ Н; $S_{AB} = 0,025$ мм/об; $V_{AB} = 87,9$ м/мин
 $Ra = 0,4$ мкм; $\Delta H = 6,5$ мкм

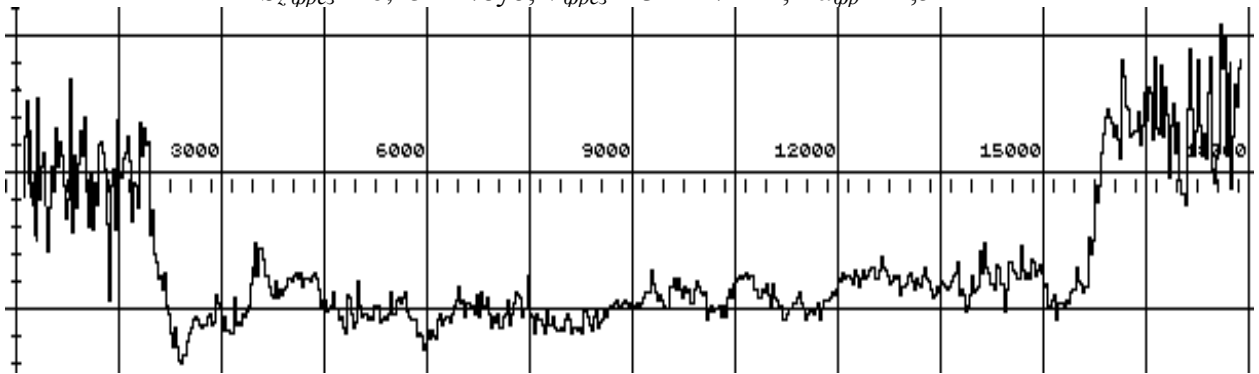


Алмазное выглаживание: $Q = 50$ Н; $S_{AB} = 0,025$ мм/об; $V_{AB} = 35,2$ м/мин
 $Ra = 0,5$ мкм; $\Delta H = 12,3$ мкм

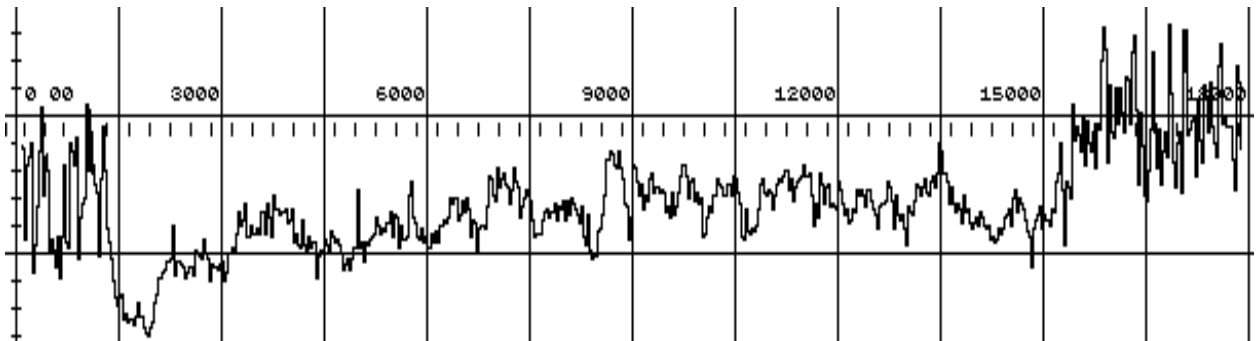
Продолжение приложения 6

Предварительное торцевое фрезерование композитом 10

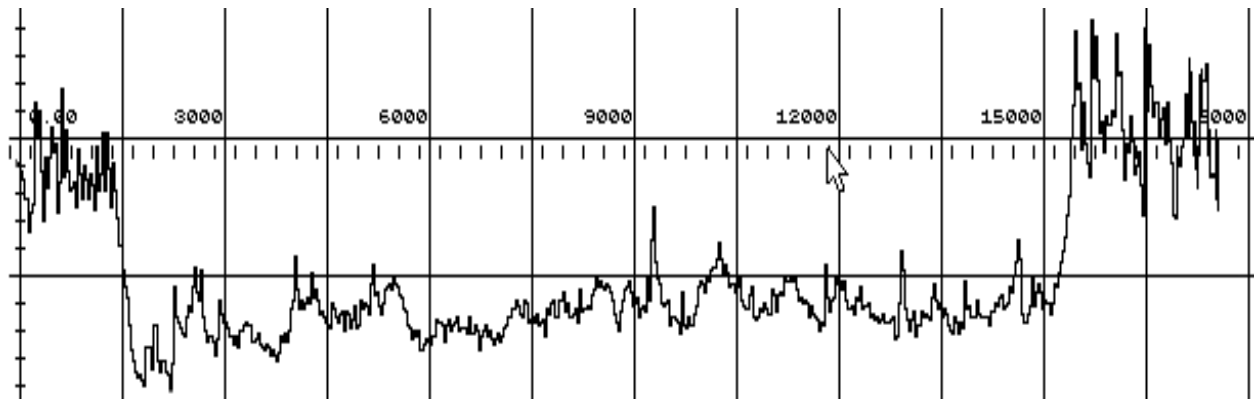
$$S_{z\text{ фрез}} = 0,25 \text{ мм/зуб}; V_{\text{фрез}} = 311 \text{ м/мин}; Ra_{\text{фр}} = 2,5 \text{ мкм}$$



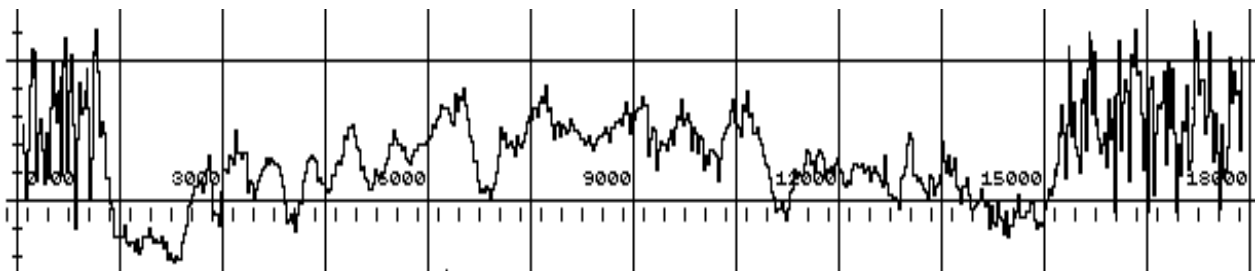
Алмазное выглаживание: $Q = 150 \text{ Н}; S_{AB} = 0,16 \text{ мм/об}; V_{AB} = 35,2 \text{ м/мин}$
 $Ra = 0,45 \text{ мкм}; \Delta H = 17,7 \text{ мкм}$



Алмазное выглаживание: $Q = 50 \text{ Н}; S_{AB} = 0,16 \text{ мм/об}; V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}$
 $Ra = 1 \text{ мкм}; \Delta H = 10,6 \text{ мкм}$



Алмазное выглаживание: $Q = 150 \text{ Н}; S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}; V_{AB} = 87,9 \text{ м/мин}$
 $Ra = 0,4 \text{ мкм}; \Delta H = 23,4 \text{ мкм}$

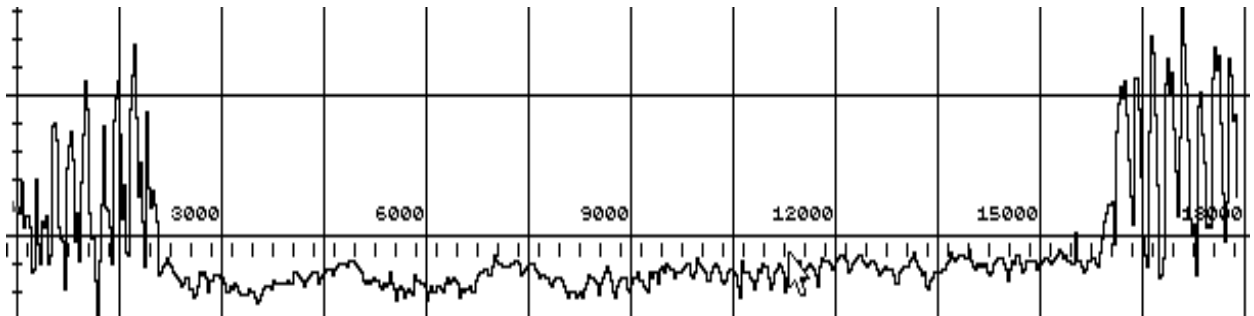


Алмазное выглаживание: $Q = 50 \text{ Н}; S_{AB} = 0,025 \text{ мм/об}; V_{AB} = 35,2 \text{ м/мин}$
 $Ra = 1,5 \text{ мкм}; \Delta H = 7,8 \text{ мкм}$

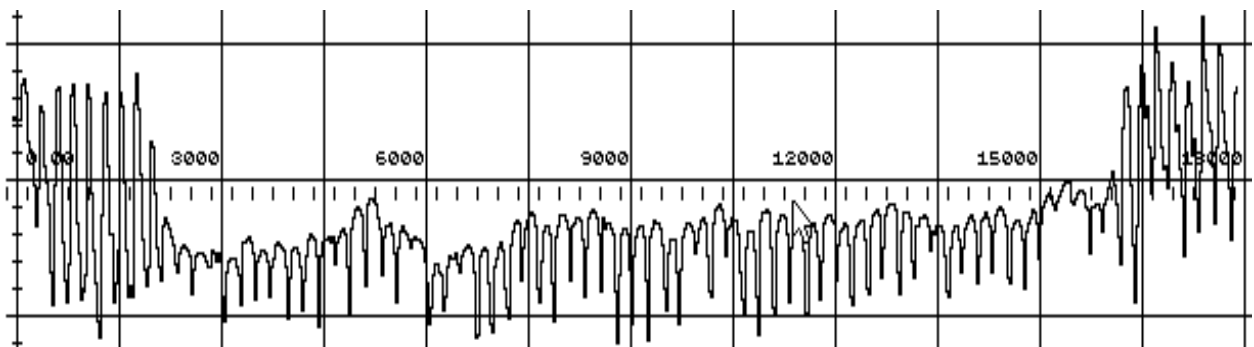
Окончание приложения 6

Предварительное торцевое фрезерование композитом 10

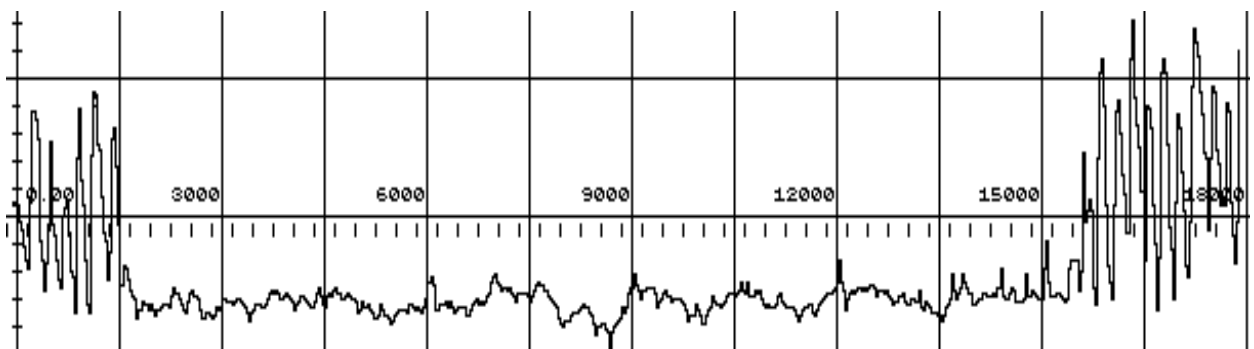
$S_{z\text{ фрез}} = 0,05$ мм/зуб; $V_{\text{фрез}} = 311$ м/мин; $Ra_{\text{фр}} = 11,5$ мкм



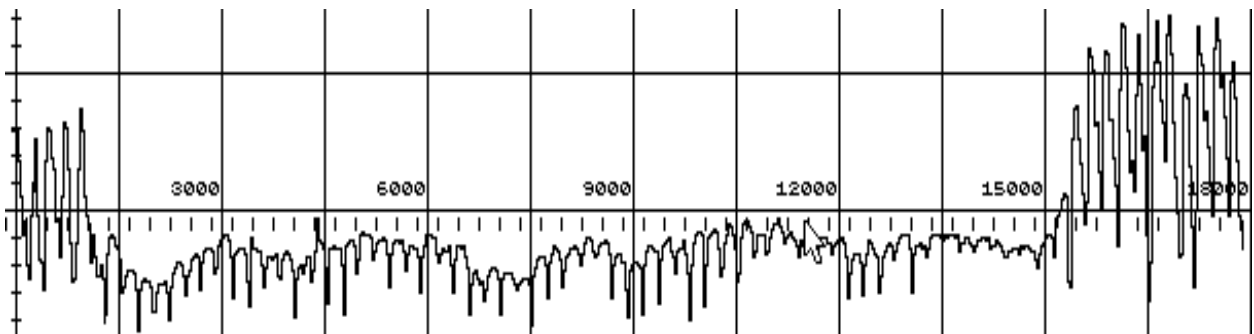
Алмазное выглаживание: $Q = 150$ Н; $S_{AB} = 0,16$ мм/об; $V_{AB} = 87,9$ м/мин
 $Ra = 3$ мкм; $\Delta H = 53,9$ мкм



Алмазное выглаживание: $Q = 50$ Н; $S_{AB} = 0,16$ мм/об; $V_{AB} = 35,2$ м/мин
 $Ra = 7,3$ мкм; $\Delta H = 39,1$ мкм



Алмазное выглаживание: $Q = 150$ Н; $S_{AB} = 0,025$ мм/об; $V_{AB} = 35,2$ м/мин
 $Ra = 1$ мкм; $\Delta H = 52,1$ мкм



Алмазное выглаживание: $Q = 50$ Н; $S_{AB} = 0,025$ мм/об; $V_{AB} = 87,9$ м/мин
 $Ra = 5$ мкм; $\Delta H = 44,6$ мкм

Приложение 7

Таблица П. 7.1 – Характеристики моделей формирования параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна алмазным выглаживанием после торцевого фрезерования композитом 10

Фактор	Коэф- фициент	Ra мкм	Rz мкм	Rmax мкм	Rp мкм	Sm мкм	ρ мм	b	v	Δ	ΔH
	β_0	2,8851	93,5988	26,8433	6,6773	8,6597	0,0014	0,6613	1,5634	30,6767	49,8609
	β'_0	0,2264	1,7976	2,1679	0,8626	4,4654	-0,4147	-0,0018	0,0936	-4,7887	3,0378
S_z фрез мм/зуб	β_1	0,0070	0,1799	0,0379	-0,0026	-0,0280	-0,2083	-0,0316	0,0329	0,4846	0,1557
	β'_1	0,0056	0,1448	0,0305	-0,0021	-0,0225	-0,1676	-0,0254	0,0265	0,3900	0,1253
	t_1	0,3686	8,0212	1,6617	0,0900	0,7714	3,3347	1,6301	2,0814	9,2676	8,3583
V фрез м/мин	β_2	-0,1938	-0,4406	-0,2670	-0,1521	0,0698	0,7821	-0,0265	-0,0026	-1,2758	-0,6636
	β'_2	-0,0672	-0,1527	-0,0925	-0,0527	0,0242	0,2711	-0,0092	-0,0009	-0,4422	-0,2300
	t_2	4,3855	8,4596	5,0408	2,2875	0,8283	5,3933	0,5907	0,0706	10,5077	15,3403
Q H	β_3	-0,7736	-0,6079	-0,4571	-0,4862	-0,2827	-0,0272	-0,0257	0,1732	-0,5432	0,2866
	β'_3	-0,4249	-0,3339	-0,2511	-0,2671	-0,1553	-0,0149	-0,0141	0,0951	-0,2984	0,1574
	t_3	27,7508	18,5000	13,6766	11,5889	5,3175	0,2969	0,9075	7,4710	7,0910	10,4998
S_{AB} мм/об	β_4	0,2676	0,2594	0,2081	0,2152	0,1204	-0,0936	0,0801	-0,0424	0,1933	-0,1796
	β'_4	0,2484	0,2407	0,1932	0,1998	0,1118	-0,0868	0,0744	-0,0393	0,1794	-0,1667
	t_4	16,2218	13,3370	10,5218	8,6673	3,8274	1,7280	4,7729	3,0895	4,2627	11,1216

Продолжение приложения 7

Окончание таблицы П.7.1

Фактор	Коэф- фициент	Ra МКМ	Rz МКМ	Rmax МКМ	Rp МКМ	Sm МКМ	ρ мм	b	v	Δ	ΔH
V м/мин	β_5	0,1688	0,0946	0,0687	0,0368	0,1374	-0,0301	0,0203	-0,0842	0,0766	-0,1119
	b'_5	0,0749	0,0420	0,0305	0,0163	0,0609	-0,0133	0,0090	-0,0374	0,0340	-0,0496
	t_5	4,8912	2,3254	1,6593	0,7093	2,0870	0,2654	0,5781	2,9358	0,8075	3,3117
$S_{z \text{ фрез}} \times$ $V_{\text{фрез}}$	β_6	0,7746	0,7847	0,6722	0,5071	0,5677	0,3303	0,0545	-0,1123	0,3323	0,6125
	b'_6	0,8918	0,9034	0,7739	0,5839	0,6535	0,3803	0,0628	-0,1293	0,3826	0,7052
	t_6	58,2396	50,0521	42,1563	25,3338	22,3813	7,5672	4,0297	10,1550	9,0913	47,0374
Q V	β_7	0,1013	0,0386	0,0362	0,0619	0,0771	-0,0440	0,0645	-0,0449	0,2324	-0,0241
	b'_7	0,1020	0,0389	0,0364	0,0623	0,0776	-0,0444	0,0649	-0,0452	0,2340	-0,0243
	t_7	6,6618	2,1530	1,9839	2,7026	2,6574	0,8825	4,1659	3,5485	5,5610	1,6182

Окончание приложения 7

Таблица 7.2 – Коэффициенты регрессии и их среднеквадратические отклонения в моделях формирования параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна алмазным выглаживанием после фрезерования композитом 10

Фактор	Коэффициент модели	Параметры распределения коэффициентов	Ra МКМ	Rz МКМ	Rmax МКМ	Rp МКМ	Sm МКМ	ρ мм	b	v	Δ	ΔH
	β_0		2,8851	93,5988	26,8433	6,6773	8,6597	0,0014	0,6613	1,5634	30,6767	49,8609
S_z фрез мм/зуб	β_1	M $\{\beta_1\}$ S $\{\beta_1\}$	0,0070 0,0190	0,1799 0,0224	0,0379 0,0228	-0,0026 0,0286	-0,0280 0,0363	-0,2079 0,0624	-0,0316 0,0194	0,0329 0,0158	0,4846 0,0523	0,1557 0,0186
V фрез м/мин	β_2	M $\{\beta_2\}$ S $\{\beta_2\}$	-0,1938 0,0442	-0,4406 0,0521	-0,2670 0,0530	-0,1521 0,0665	0,0698 0,0843	0,7816 0,1449	-0,0265 0,0449	-0,0026 0,0367	-1,2758 0,1214	-0,6636 0,0433
Q H	β_3	M $\{\beta_3\}$ S $\{\beta_3\}$	-0,7736 0,0279	-0,6079 0,0329	-0,4571 0,0334	-0,4862 0,0420	-0,2827 0,0532	-0,0270 0,0914	-0,0257 0,0284	0,1732 0,0232	-0,5432 0,0766	0,2866 0,0273
S_z мм/об	β_4	M $\{\beta_4\}$ S $\{\beta_4\}$	0,2676 0,0165	0,2594 0,0194	0,2081 0,0198	0,2152 0,0248	0,1204 0,0315	-0,0936 0,0541	0,0801 0,0168	-0,0424 0,0137	0,1933 0,0453	-0,1796 0,0162
V м/мин	β_5	M $\{\beta_5\}$ S $\{\beta_5\}$	0,1688 0,0345	0,0946 0,0407	0,0687 0,0414	0,0368 0,0519	0,1374 0,0658	-0,0299 0,1132	0,0203 0,0351	-0,0842 0,0287	0,0766 0,0948	-0,1119 0,0338
S_z фрез \times $\times V$ фрез	β_6	M $\{\beta_6\}$ S $\{\beta_6\}$	0,7746 0,0133	0,7847 0,0157	0,6722 0,0159	0,5071 0,0200	0,5677 0,0254	0,3301 0,0436	0,0545 0,0135	-0,1123 0,0111	0,3323 0,0365	0,6125 0,0130
Q \cdot V	β_7	M $\{\beta_7\}$ S $\{\beta_7\}$	0,1013 0,0152	0,0386 0,0179	0,0362 0,0182	0,0619 0,0229	0,0771 0,0290	-0,0440 0,0499	0,0645 0,0155	-0,0449 0,0126	0,2324 0,0418	-0,0241 0,0149

Приложение 8

Область факторного пространства и результаты моделирования
 формирования параметров шероховатости поверхностей
 деталей из стали 45 чистовым точением композитом 10

Технологические факторы		Ra_{np} мкм	t мм	S мм/об	V м/мин	φ°	φ_1°	$90+\gamma^\circ$	r мм	$\rho_{кр}$ мм	
max (+)		3,6	0,4	0,08	80	50	30	100	0,8	0,08	
min (-)		1,3	0,1	0,02	40	30	10	80	0,1	0,02	
Аргумент модели		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	
Параметры шероховатости Y_i	Ra , мкм $b_0 = 0,12$	b_i	-0,085	-0,09	0,58	-0,06	0,058	-0,16	0,73	-0,22	-0,025
		S_i	0,01	0,007	0,007	0,015	0,02	0,01	0,046	0,005	0,007
	Rp , мкм $b_0 = 0,72$	b_i	0,13	-0,003	0,82	-0,2	-0,13	-0,04	0,77	-0,29	-0,15
		S_i	0,01	0,007	0,007	0,014	0,02	0,009	0,04	0,005	0,007
	$Rmax$, мкм $b_0 = 6,15$	b_i	0,11	0,005	0,65	-0,21	-0,03	-0,03	0,44	-0,3	0,03
		S_i	0,013	0,01	0,01	0,02	0,025	0,012	0,06	0,006	0,01
	$r_{под}$, мкм $b_0 = 5763$	b_i	-0,01	-0,12	-0,14	0,06	0,07	0,001	-0,77	0,39	0,19
		S_i	0,01	0,007	0,007	0,015	0,02	0,01	0,05	0,005	0,007
	b $b_0 = 0,005$	b_i	-0,005	-0,016	-0,82	0,35	0,005	-0,002	0,02	0,26	-0,015
		S_i	0,02	0,01	0,01	0,024	0,03	0,015	0,08	0,01	0,01
	ν $b_0 = 2,28$	b_i	0,14	-0,04	0,17	-0,2	-0,11	0,05	0,22	-0,025	-0,003
		S_i	0,007	0,005	0,005	0,01	0,013	0,006	0,03	0,003	0,005

Приложение 9

Область факторного пространства и матрица планирования

эксперимента типа 2^{8-4} от ПФЭ типа 2^8 по исследованию

процесса алмазного выглаживания поверхности

после точения композитом 10 и нанесения мягких прирабочных пленок

Код фактора	ФАКТОРЫ							
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
	V_T	S_T	t	j	M_{II}	Q_{AB}	S_{AB}	V_{AB}
–	65	0,05	0,1	2,5	1,5	100	0,075	65
+	200	0,15	0,25	1,62	3	300	0,15	100
УРОВНИ ФАКТОРОВ								
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	–	+	+	+	–	+	–	–
3	+	–	+	+	–	–	+	–
4	–	–	+	+	+	–	–	+
5	+	+	–	+	–	–	–	+
6	–	+	–	+	+	–	+	–
7	+	–	–	+	+	+	–	–
8	–	–	–	+	–	+	+	+
9	+	+	+	–	–	–	–	+
10	–	+	+	–	+	–	+	–
11	+	–	+	–	+	+	–	–
12	–	–	+	–	–	+	+	+
13	+	+	–	–	+	+	+	+
14	–	+	–	–	–	+	–	–
15	+	–	–	–	–	–	+	–
16	–	–	–	–	+	–	–	+

Приложение 10

Средние экспериментальные значения параметров шероховатости поверхности,
полученные алмазным выглаживанием после точения композитом 10
и нанесения мягких прирабочных плёнок

№ опыта	<i>Ra</i> мкм	<i>Rz</i> мкм	<i>Rmax</i> мкм	<i>Rp</i> мкм	<i>Rq</i> мкм	<i>Sm</i> мкм	ρ мкм	<i>tm</i>	<i>b</i>	<i>v</i>
1	1,49	7,00	8,00	3,10	2,00	112,5	1,07	0,65	1,12	1,17
2	1,40	7,80	8,00	3,00	2,00	62,5	0,69	0,58	1,14	1,45
3	0,49	3,60	5,00	1,60	0,64	53,5	0,38	0,56	1,03	1,83
4	1,20	5,50	6,90	3,20	1,20	66,5	0,63	0,58	1,17	1,39
5	0,80	9,60	7,00	1,40	1,40	84,0	0,85	0,65	1,01	1,28
6	3,50	13,5	16,0	4,70	3,84	150,0	0,51	0,63	1,26	1,30
7	0,90	4,32	5,00	2,22	1,10	120,0	2,12	0,53	1,27	1,62
8	0,80	3,40	5,00	2,10	1,00	40,0	0,31	0,57	0,96	1,48
9	1,80	9,00	8,98	3,50	2,50	151,0	0,56	0,63	0,93	1,26
10	3,90	19,0	19,5	7,30	5,00	150,0	0,49	0,66	0,99	1,11
11	4,00	18,0	20,0	5,00	4,50	380,0	2,23	0,65	0,70	1,35
12	0,79	6,50	9,30	4,20	1,60	67,0	0,56	0,57	0,83	1,52
13	2,00	12,0	15,1	3,62	2,94	146,0	1,47	0,71	1,15	1,13
14	0,81	6,40	8,56	2,50	1,90	50,8	0,57	0,57	0,74	1,33
15	1,18	4,50	8,10	2,70	1,50	95,0	0,94	0,57	1,19	1,41
16	1,20	6,20	10,0	4,10	1,80	71,0	0,42	0,68	1,00	1,52

Приложение 11

Параметры моделей формирования характеристик шероховатости алмазным выглаживанием после точения композитом 10 и нанесения мягких проработочных пленок

Параметры моделей	Характеристики шероховатости											ν
	Ra МКМ	Rz МКМ	$Rmax$ МКМ	Rp МКМ	Rq МКМ	Sm МКМ	ρ МКМ	tm	b			
b_0	140	177,6	319,8	91,6	103,6	181,7	0,01	0,42	1,15			1,5
b'_1	-0,03	-0,005	-0,05	-0,15	-0,06	0,25	0,35	0,01	0,02			-0,005
$M(b_1)$	-0,05	-0,01	-0,09	-0,27	-0,11	0,44	0,62	0,02	0,03			-0,01
$S(b_1)$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02			0,01
t_1^p	2,63	0,48	5,74	12,7	6,2	13,7	19,3	1,46	1,4			0,6
b'_2	0,22	0,29	0,16	0,06	0,28	0,1	0,001	0,04	0,02			-0,09
$M(b_2)$	0,41	0,52	0,29	0,11	0,52	0,2	0,002	0,07	0,03			-0,17
$S(b_2)$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02			0,01
t_2^p	19,75	29,8	18,0	5,0	29,2	5,7	0,05	5,35	1,35			11,5
b'_3	0,11	0,11	0,06	0,13	0,07	0,1	-0,02	-0,002	-0,04			-0,002
$M(b_3)$	0,25	0,23	0,12	0,29	0,16	0,22	-0,05	-0,005	-0,1			-0,005
$S(b_3)$	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04	0,04	0,02	0,03			0,02
t_3^p	9,9	10,9	6,44	11,0	7,37	5,7	1,27	0,3	3,4			0,25
b'_4	-0,19	-0,19	-0,25	-0,23	-0,27	-0,19	-0,06	-0,03	0,09			0,04
$M(b_4)$	-0,21	-0,21	-0,27	-0,25	-0,3	-0,21	-0,06	-0,03	0,1			0,04
$S(b_4)$	0,012	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,008	0,01			0,01
t_4^p	16,79	19,8	28,6	18,6	27,9	10,6	3,1	3,88	8,1			4,76

Окончание приложения 11

Параметры моделей	Характеристики шероховатости											
	Ra МКМ	Rz МКМ	$Rmax$ МКМ	Rp МКМ	Rq МКМ	Sm МКМ	ρ МКМ	tm	b	ν		
M_n покрытие	b'_5	0,37	0,23	0,22	0,23	0,25	0,31	0,23	0,04	0,05	-0,04	
	$M(b_5)$	1,05	0,65	0,63	0,66	0,73	0,89	0,66	0,11	0,14	-0,13	
	$S(b_5)$	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05	0,05	0,02	0,03	0,02	
	t^p_5	32,3	23,4	24,8	18,9	26,2	17,2	12,7	5,4	4,29	5,4	
Q_{AB} H	b'_6	-0,05	-0,03	-0,02	-0,01	0,01	-0,01	0,23	-1,01	-0,05	-0,001	
	$M(b_6)$	-0,09	-0,06	-0,04	-0,02	0,03	-0,01	0,42	-0,03	-0,08	-0,002	
	$S(b_6)$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	
	t^p_6	4,26	3,5	2,5	0,84	1,45	0,42	13,0	1,96	4,0	0,17	
S_{AB} мм/об	b'_7	0,036	-0,02	0,05	0,06	0,01	-0,03	-0,14	0,006	0,04	-0,02	
	$M(b_7)$	0,1	-0,07	0,16	0,18	0,04	-0,1	-0,39	0,02	0,11	-0,05	
	$S(b_7)$	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05	0,05	0,02	0,03	0,02	
	t^p_7	3,2	2,4	6,2	5,2	1,36	1,53	7,5	0,81	3,2	1,97	
V_{AB} м/мин	b'_8	-0,13	-0,07	-0,08	-0,04	-0,1	-0,11	-0,09	0,03	0,001	-0,03	
	$M(b_8)$	-0,6	-0,31	-0,37	-0,18	-0,46	-0,51	-0,44	0,13	0,005	-0,12	
	$S(b_8)$	0,05	0,04	0,04	0,06	0,05	0,08	0,08	0,03	0,05	0,04	
	t^p_8	11,5	6,96	0,03	3,26	10,1	6,2	5,2	3,97	0,08	3,3	
Грасс	4,4	5,7	3,6	4,8	3,0	6,1	4,3	0,8	2,6	1,4		

Приложение 12

Средние экспериментальные значения параметров отклонений от круглости поверхностей деталей, обработанных на разных этапах комбинированной антифрикционной обработки

№ опыта	Параметры отклонений от круглости							
	Точение + нанесение МПП				Последующее АВ			
	EFK , мкм	EFK_a , мкм	EFK_q , мкм ²	TFE	K_{EFK_a}	K_{EFK_q}	K_{TFE}	K_{TFE}
1	19,0	4,50	5,24	1,43	0,56	0,56	0,55	0,92
2	20,6	1,46	1,86	1,14	0,43	0,63	0,66	0,89
3	12,64	1,95	2,27	1,18	0,68	0,79	0,84	0,97
4	16,5	2,86	3,65	1,05	0,79	0,17	0,58	1,03
5	9,30	1,76	2,06	1,01	1,25	0,91	0,92	1,13
6	16,3	3,03	3,69	1,36	0,65	0,75	0,73	0,99
7	22,7	6,48	7,24	1,72	0,98	0,94	0,95	0,98
8	8,72	1,12	1,39	1,04	0,64	0,89	0,86	1,04
9	22,8	3,95	4,91	1,17	0,97	0,98	0,96	0,69
10	27,4	4,09	4,91	1,72	0,86	1,03	1,02	1,07
11	32,54	6,23	7,42	1,27	0,69	0,54	0,57	0,95
12	34,0	4,73	6,85	1,54	0,61	0,47	0,66	0,65
13	35,0	9,75	11,36	3,90	0,61	0,53	0,55	0,31
14	17,2	4,40	4,99	2,10	0,97	1,07	1,05	1,11
15	18,4	2,93	3,76	1,71	0,61	0,72	0,68	0,71
16	18,0	2,24	2,67	1,47	0,85	1,04	1,01	0,90

Приложение 13

Область факторного пространства и матрица планирования эксперимента
 типа 2^{12-8} по исследованию триботехнологической системы
 формирования триботехнических характеристик поверхностей деталей

Код фактора	ФАКТОРЫ											
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
	V_T	S_T	t	j	M_n	Q_{AB}	S_{AB}	V_{AB}	$M_{вкл}$	$V_{пр}$	$P_{пр}$	$\Delta P/P$
–	65	0,05	0,1	2,5	1,5	100	0,075	65	2	10	30	0,15
+	200	0,15	0,25	1,62	3	300	0,15	100	5	50	50	0,25
УРОВНИ ФАКТОРОВ												
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	–	+	+	+	–	+	–	–	–	–	–	+
3	+	–	+	+	–	–	+	–	–	–	+	–
4	–	–	+	+	+	–	–	+	+	+	–	–
5	+	+	–	+	–	–	–	+	+	–	+	+
6	–	+	–	+	+	–	+	–	–	+	–	+
7	+	–	–	+	+	+	–	–	–	+	+	–
8	–	–	–	+	–	+	+	+	+	–	–	–
9	+	+	+	–	–	–	–	+	–	+	–	–
10	–	+	+	–	+	–	+	–	+	–	+	–
11	+	–	+	–	+	+	–	–	+	–	–	+
12	–	–	+	–	–	+	+	+	–	+	+	+
13	+	+	–	–	+	+	+	+	–	–	–	–
14	–	+	–	–	–	+	–	–	+	+	+	–
15	+	–	–	–	–	–	+	–	+	+	–	+
16	–	–	–	–	+	–	–	+	–	–	+	+

Приложение 14

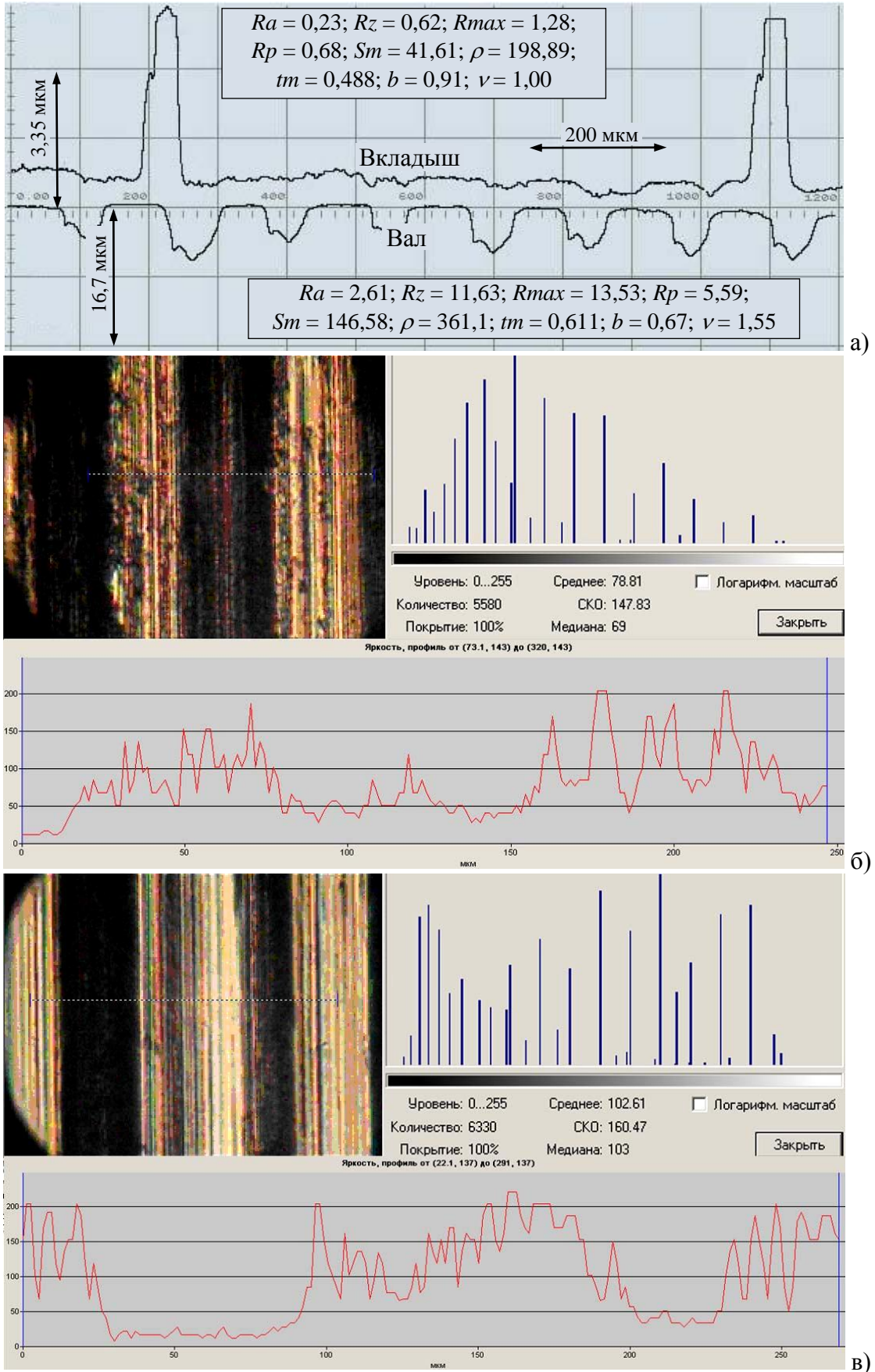


Рисунок П.14.1 – Поверхности трибоэлементов (пара 705): а – шероховатость после приработки; микрофотографии поверхности вала, гистограммы и профили яркости: б – до и; в – после приработки ($V_{np} = 10$ м/мин; $P_{np} = 50$ Н/мм; $\Delta P = \pm 25\%$)

Продолжение приложения 14

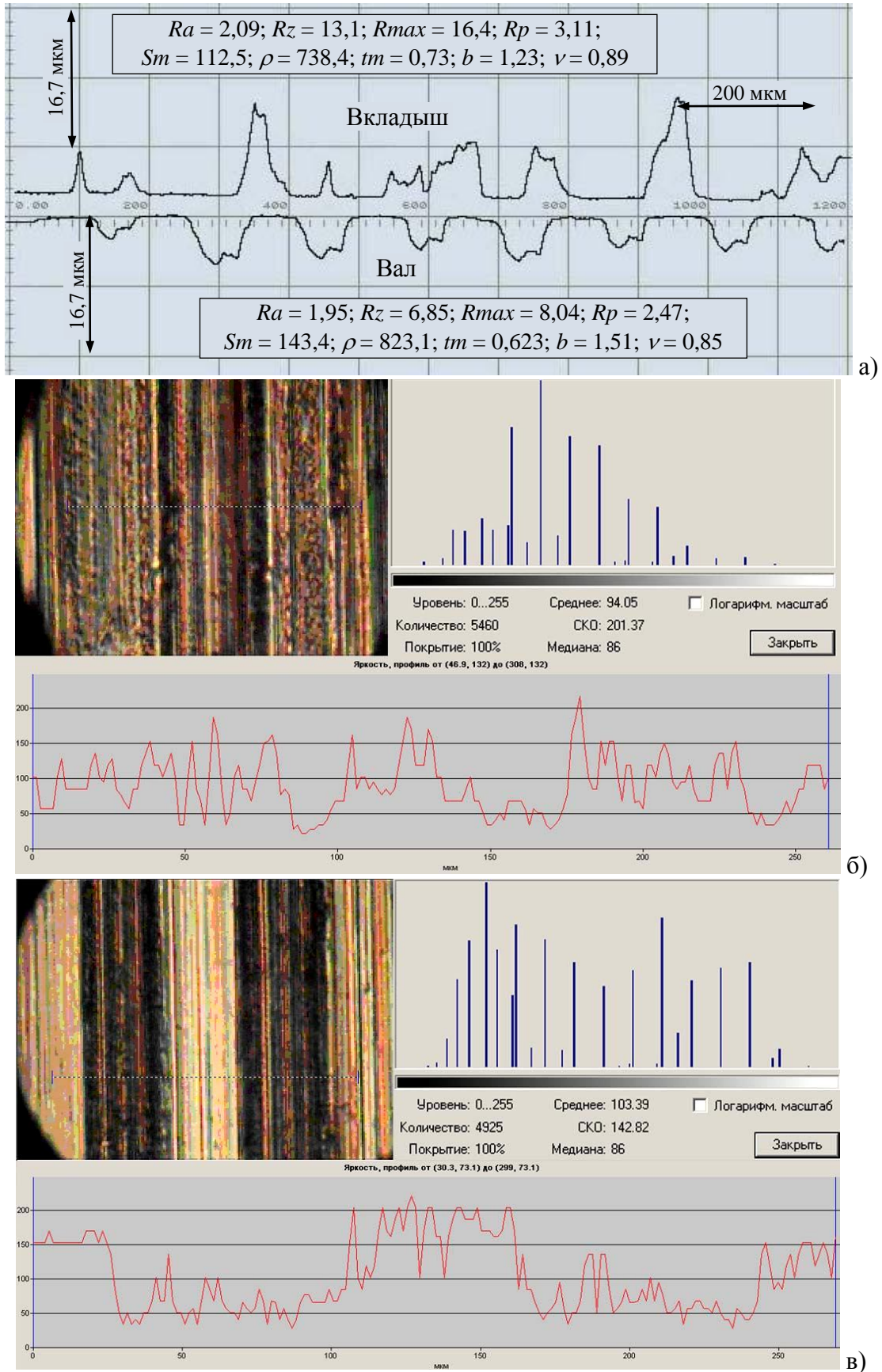
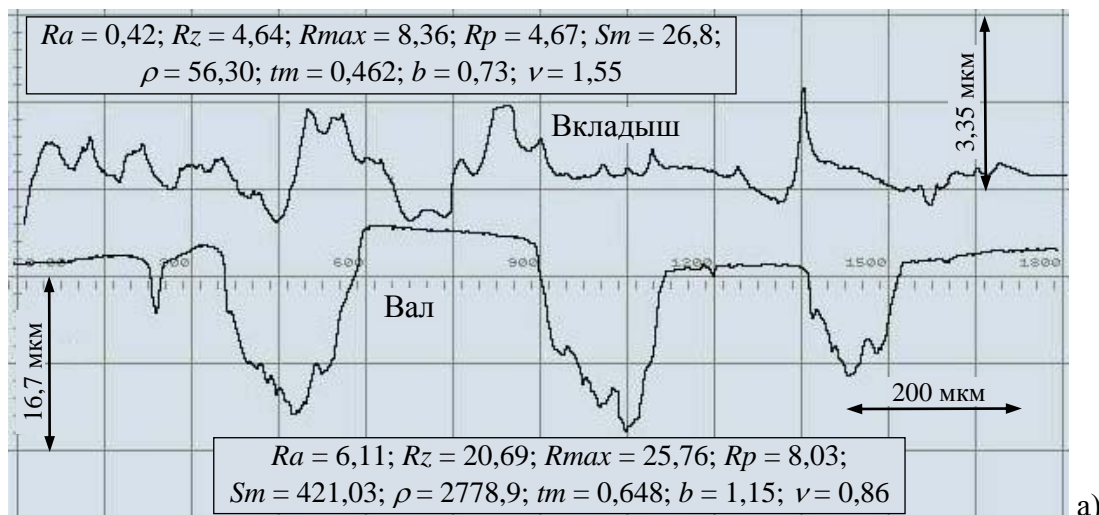
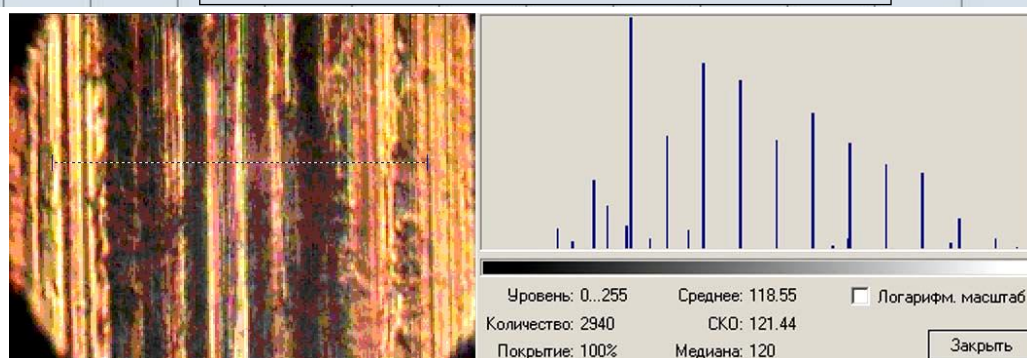


Рисунок П.14.2 – Поверхности трибоземента (пара 706): а – шероховатость после приработки; микрофотографии поверхности вала, гистограммы и профили яркости: б – до и; в – после приработки ($V_{np} = 50$ м/мин; $P_{np} = 30$ Н/мм; $\Delta P = \pm 25\%$)

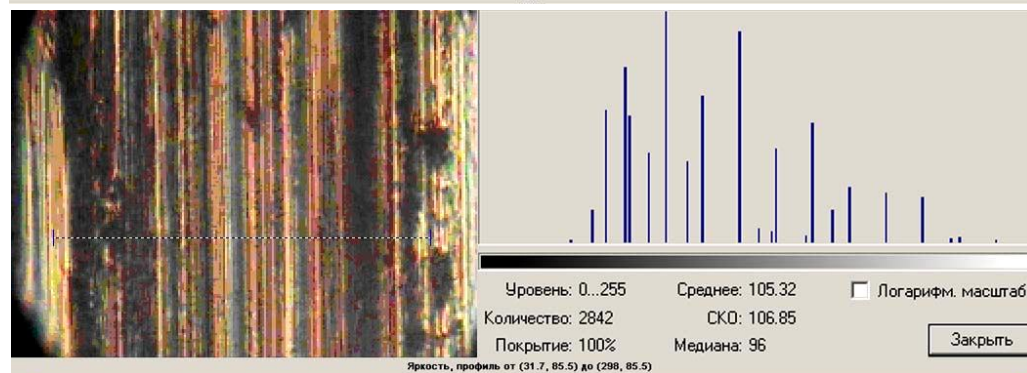
Продолжение приложения 14



а)



б)



в)

Рисунок П.14.3 – Поверхности трибоэлементов (пара 711): а) шероховатость после приработки; микрофотографии поверхности вала, гистограммы и профили яркости: б – до и; в – после приработки ($V_{np} = 10$ м/мин; $P_{np} = 30$ Н/мм; $\Delta P = \pm 25\%$)

Окончание приложения 14

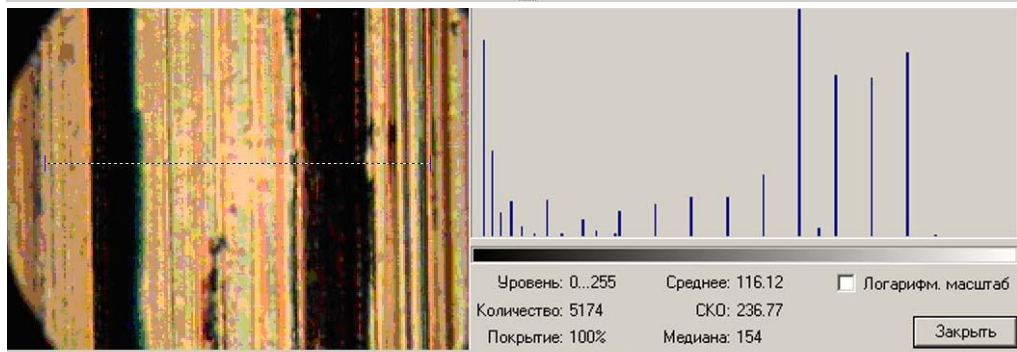
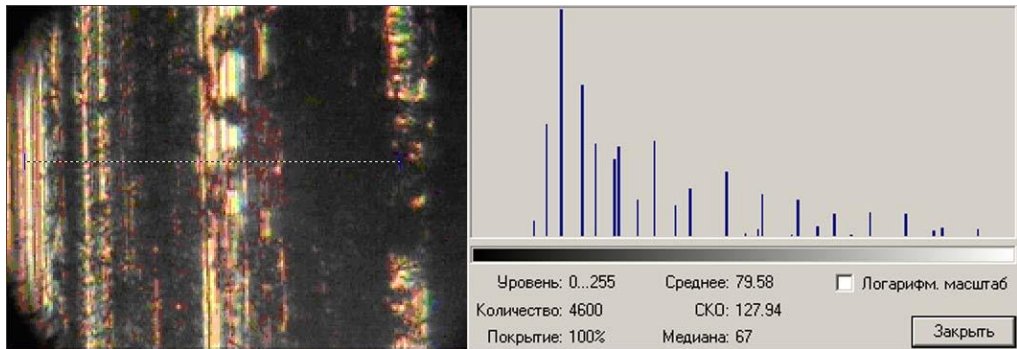
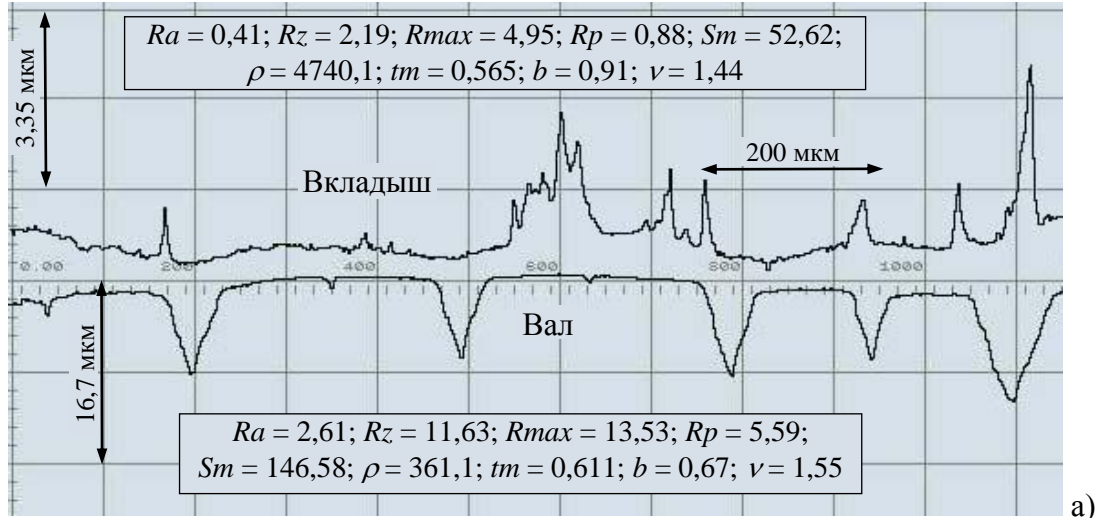


Рисунок П.14.4 – Поверхности трибоэлементов (пара 713): а – шероховатость после приработки (а); микрофотографии поверхности вала, гистограммы и профили яркости: б – до и; в – после приработки ($V_{np} = 10$ м/мин; $P_{np} = 30$ Н/мм; $\Delta P = \pm 15\%$)

Приложение 15

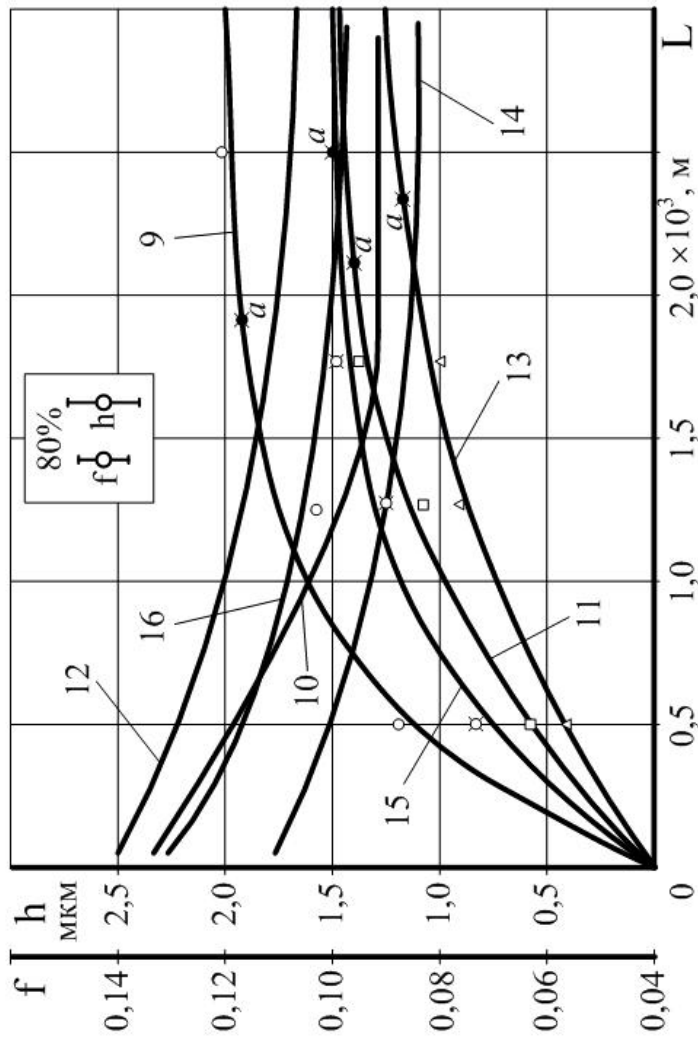
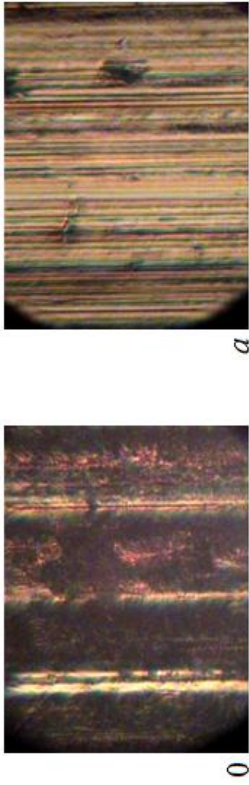
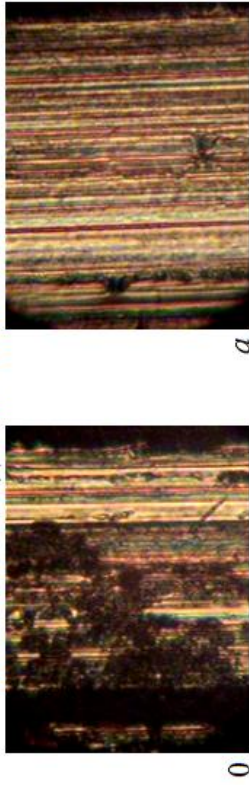


Рисунок П.15.1. Графики зависимости линейного износа h_{01} валов (9, 11, 13, 15) и коэффициента трения f (10, 12, 14, 16) от длины пути трения L_{01} для опытов эксперимента (приложение 13) и микрофотографии поверхностей трения валов в начале и конце приработки: кривые 9, 10 – опыт № 3; кривые 11, 12 – опыт № 2; кривые 13, 14 – опыт № 11; кривые 15, 16 – опыт № 16; a – завершение процесса приработки

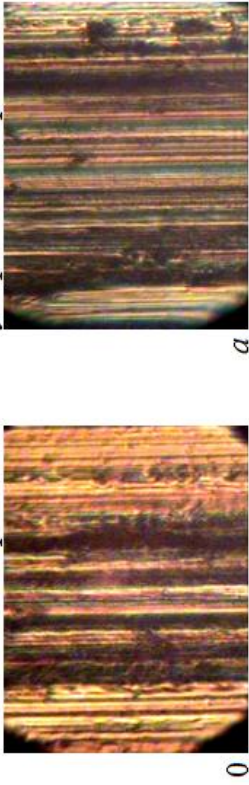
Опыт № 03: Меднение химическое – АЧС-1



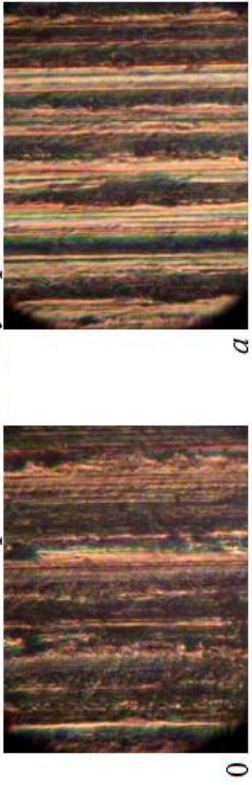
Опыт № 02: Меднение химическое – АЧС-1



Опыт № 11: Фрикционное лагунирование – Бронза



Опыт № 16: Фрикционное лагунирование – АЧС-1



Продолжение приложения 15

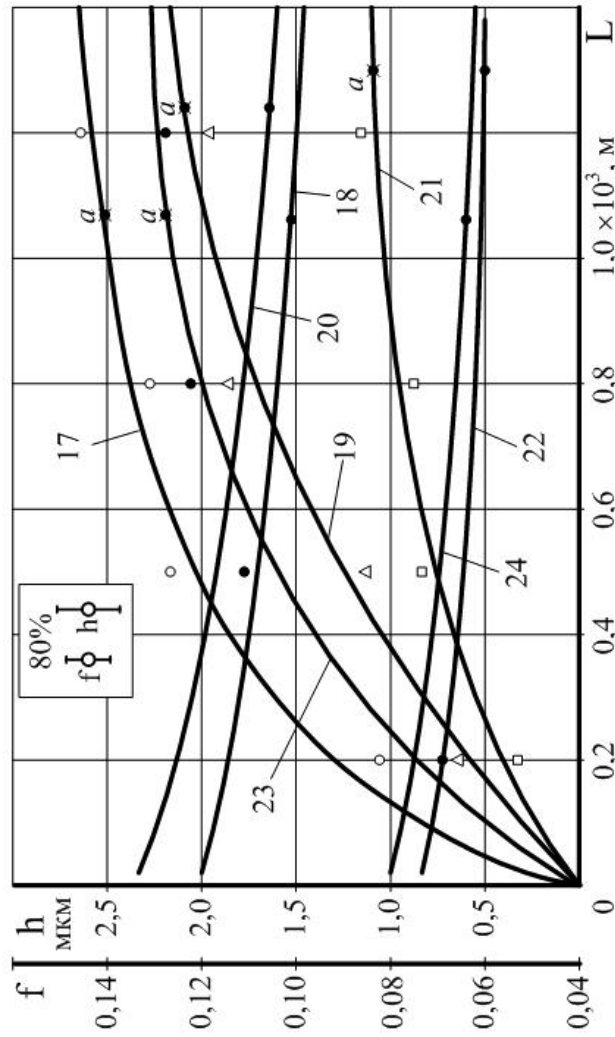
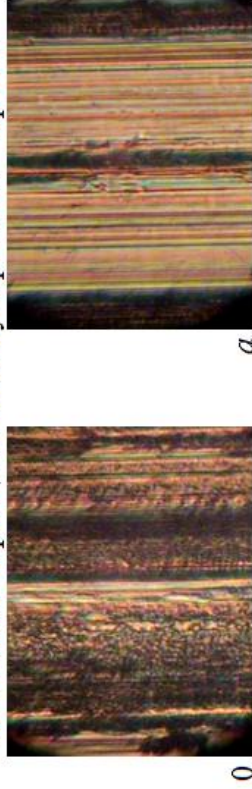
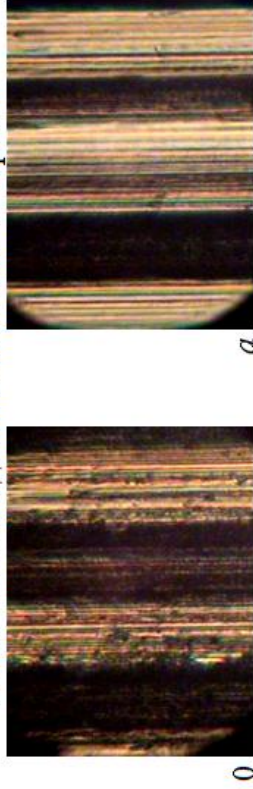


Рисунок П.15.2. Графики зависимости линейного износа h_{01} валов (17, 19, 21, 23) и коэффициента трения f (18, 20, 22, 24) от длины пути трения L_{01} для опытов эксперимента (приложение 13) и микрофотографии поверхностей трения валов в начале и конце приработки: кривые 17, 18 – опыт № 1; кривые 19, 20 – опыт № 5; кривые 21, 22 – опыт № 07; кривые 23, 24 – опыт № 09; a – завершение процесса приработки

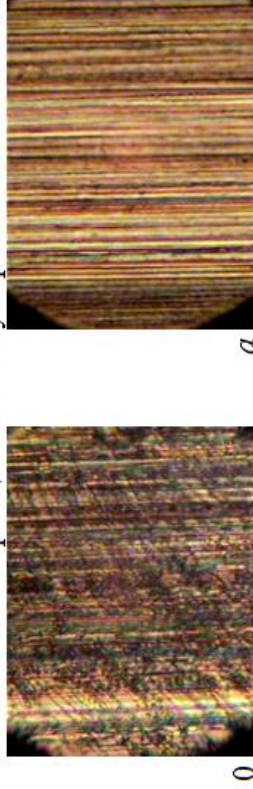
Опыт № 01: Фрикционное лагунирование – Бронза



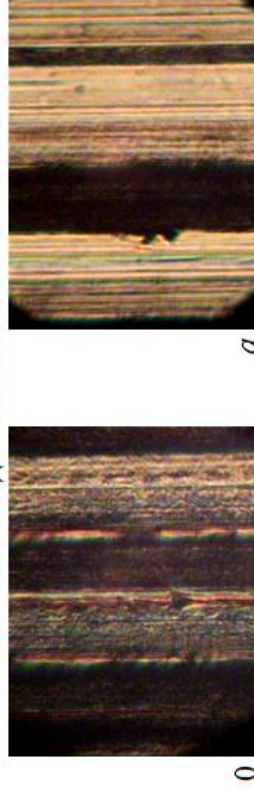
Опыт № 05: Меднение химическое – Бронза



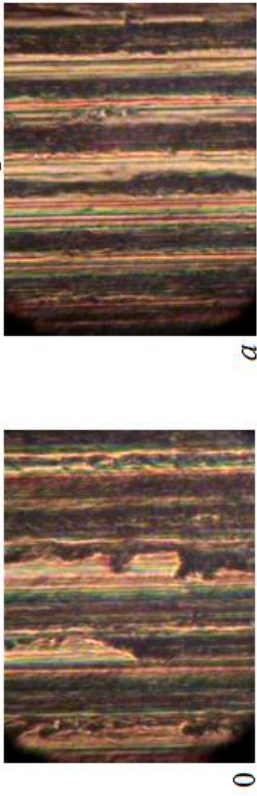
Опыт № 07: Фрикционное лагунирование – АЧС-1



Опыт № 09: Меднение химическое – АЧС-1



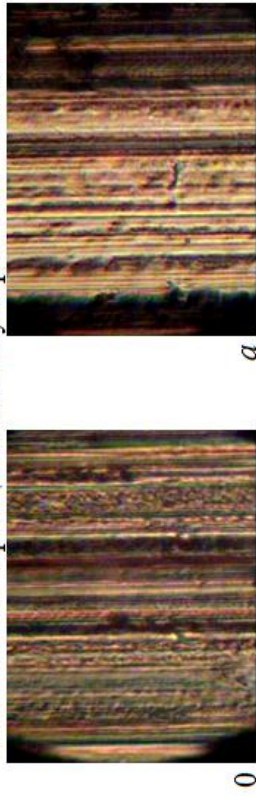
Опыт № 15: Меднение химическое – Бронза



Опыт № 13: Фрикционное лагунирование – АЧС-1



Опыт № 06: Фрикционное лагунирование – АЧС-1



Опыт № 14: Меднение химическое – Бронза

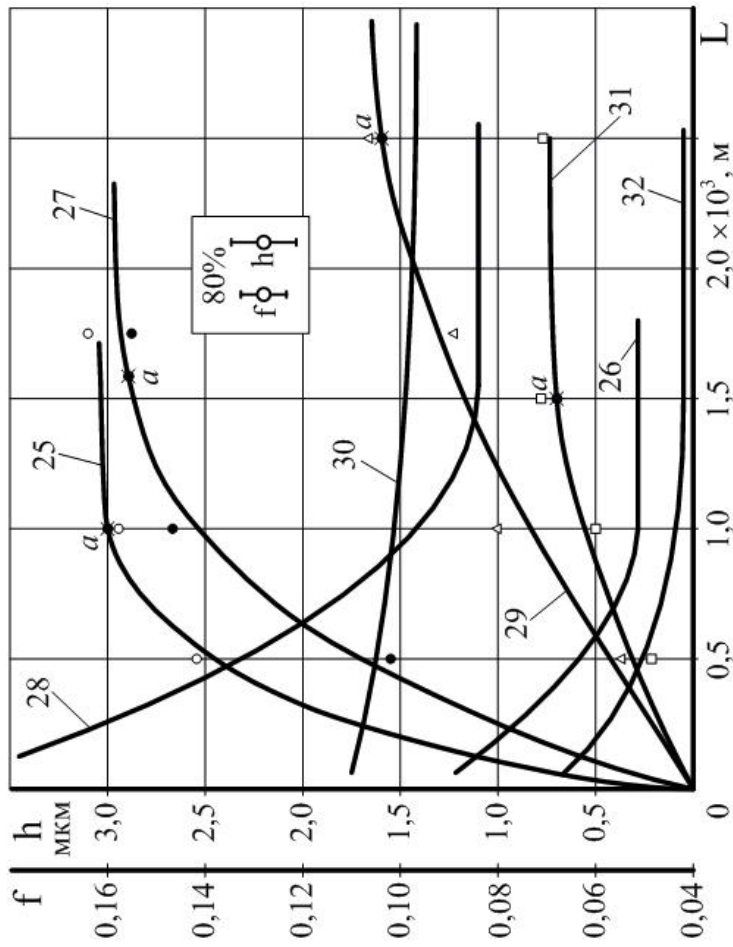
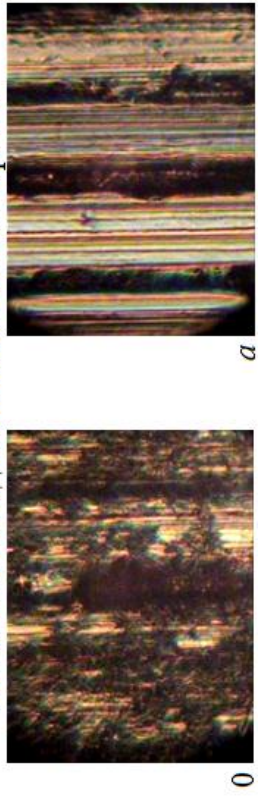


Рисунок П.15.3. Графики зависимости линейного износа h_{01} валов (25, 27, 29, 31) и коэффициента трения f (26, 28, 30, 32) от длины пути трения L_{01} для опытов эксперимента (приложение 13) и микрофотографии поверхностей трения валов в начале и конце приработки: кривые 25, 26 – опыт № 15; кривые 27, 28 – опыт № 13; кривые 29, 30 – опыт № 06; кривые 31, 32 – опыт № 14; a – завершение процесса приработки

Приложение 16

Средние экспериментальные значения триботехнических характеристик,
формируемых в триботехнологической системе

№ опыта	Триботехнические характеристики								
	f_1	f_0	h_{01} , МКМ	h_{02} , МКМ	$L_{01} \cdot 10^{-3}$, м	$L_{02} \cdot 10^{-4}$, м	$I_1 \cdot 10^{-12}$	$I_2 \cdot 10^{-11}$	f_1 / f_0
1	0,10	0,11	2,33	10,5	1,07	0,85	3,20	7,00	0,93
2	0,14	0,11	1,40	7,50	2,10	1,68	3,40	6,90	1,24
3	0,14	0,09	1,70	9,50	1,88	1,50	2,80	5,80	1,50
4	0,10	0,05	2,50	12,0	0,77	0,60	1,25	2,90	2,00
5	0,13	0,10	2,10	14,0	1,25	0,90	3,00	6,90	1,18
6	0,11	0,10	1,60	11,0	3,50	2,50	3,15	6,40	1,10
7	0,06	0,05	1,10	9,5	1,33	1,05	1,20	3,00	1,20
8	0,11	0,07	1,80	8,00	0,70	0,55	2,00	4,30	1,43
9	0,06	0,05	2,80	16,0	1,06	0,82	1,30	2,80	1,80
10	0,16	0,13	2,00	18,0	0,90	0,70	4,00	7,80	1,23
11	0,11	0,10	1,20	10,0	2,90	2,30	3,00	6,50	1,16
12	0,09	0,05	0,80	9,00	1,00	0,75	1,25	2,40	1,80
13	0,20	0,09	3,00	12,0	1,60	1,00	2,75	5,70	2,33
14	0,07	0,03	0,70	13,0	1,50	1,18	0,60	1,70	2,17
15	0,12	0,05	3,00	9,00	0,98	0,78	1,45	2,80	2,40
16	0,13	0,10	1,50	7,50	2,30	1,85	2,90	6,60	1,30

Приложение 17

Листинг программы «Синусоида»

```

%2000 ("Синусоида" – обработка плоских поверхностей)
N10 G90 G55 G1 F500 M3
N20 P30,1(2) P42,1(2) P1,L P2,B P3,l P4,r P5,k P6,n
    P7,N P8,3,1415:m P26,k1 P40,Sm P41,So
N30 P10,P1-[2*P3]-[2*P4] P11,P10:P6
    P12,P2-[2*P3]-[2*P4] P13,2*P5*[P7-1]+2
    P14,P12:P13 P9,P11:k2
N40 P15,P3+P4+P14 P16,P3+P4 P17,2*P5*P14
    P18,2*3,1415:P11 P25,2*3,1415:P11:P26
N50 G92 X=P16 Y=-P15
N60 GO X0 Y0
N70 G1 Z-10
N75 P31,P30-1 P31+N170
N80 P22,P18*P19 P23,P14*,S[P22+P21]-P20
N85 P45,P42-1 P45+N94
N90 X=-P19 Y=P23 N100
N94 P32,*, S[P22+P21] P33,P40*RP32+P41
N97 X=P19 Y=P23 F=P33
N100 P19, P19+P9 P24, P10+P9-P19 P24+N80
N110 Z0
N120 P20,P20+P17 P19,0 P21,P21+P8 P23,P14*,SP21-P20
N130 Y=P23
N140 P7,P7-1 P7+N70
N150 G92 X0 Y0
N160 X0 Y0 N
N170 P22,P25*P19 P27,P18*P19 P28,*,S[P27+P21]
    P23,P14*,SP22*RP28-P20
N180 X=P19 Y=P23 N190
N184 P32,*,S[P22+P21] P33,P40*RP32+P41
N187 X=P19 Y=P23 F=P33
N190 P19,P19+P9 P24,P10+P9-P19 P24+N170
N200 N110
N210 M2

```

Содержание кадров:

- 1) P30, 1(2) \Rightarrow P30 = 1 – без амплитудной модуляции;
P30 = 2 – с амплитудной модуляцией
- 2) P42, 1(2) \Rightarrow P42 = 1 – с постоянной подачей;
P42 = 2 – с переменной подачей
- 3) P1, L \Rightarrow длина обрабатываемой поверхности (L);
- 4) P2, B \Rightarrow ширина обрабатываемой поверхности (B);
- 5) P3, l \Rightarrow расстояние от края поверхности до зоны обработки l;
- 6) P4, r \Rightarrow радиус вращения индентора r;
- 7) P5, k \Rightarrow коэффициент перекрытия «дорожек» обработки (последующей трассы обработки относительно предыдущей) в долях удвоенной амплитуды. Если $k = 0,5$, то $\Delta = 0,5 \cdot 2A = A$;
- 8) P6, n \Rightarrow количество полных периодов синусоиды (n – целое) на длине обработки (L – 2 l);
- 9) P7, N \Rightarrow количество «дорожек» (проходов) обработки на ширине (B – 2 l), N – целое;
- 10) P8, 3.1415: m \Rightarrow здесь P8 – угол сдвига фазы последующей дорожки относительно предыдущей в долях π : если $m = 2$, то $\frac{\pi}{2}$ и т. д.

Приложение 18

Характеристики физико-статистических моделей формирования параметров шероховатости плоских поверхностей деталей горцевым фрезерованием и алмазным выплаживанием

Параметр	Чугун СЧ20						Сталь45					
	Параметры модели	b_0	Факторы			$F_{кр}^P$	Параметры модели	b_0	Факторы			$F_{кр}^P$
			$Ra_{фр}$ МКМ	Q Н	S_{AB} мм/инд				$Ra_{фр}$ МКМ	Q Н	S_{AB} мм/инд	
Ra МКМ	B_k	0,1925	0,2278	-0,2589	0,2259	5,1	B_k	0,0557	0,3820	-0,1111	0,3407	5,9
	$T_{кр}$		11,7440	13,3446	11,6451		$T_{кр}$		19,1555	5,5722	17,0828	
	B	23,0968	0,6698	-0,7470	0,1962		B	4,8514	0,8908	-0,3207	0,6618	
	$СКО B$		0,0570	0,0560	0,0169		$СКО B$		0,0465	0,0575	0,0387	
R_p МКМ	B_k	1,1570	0,1441	-0,1999	0,2167	6,02	B_k	0,9485	0,3567	0,0178	0,3163	6,03
	$T_{кр}$		7,9218	10,9855	11,9095		$T_{кр}$		18,4098	0,9203	16,3360	
	B	35,2268	0,4238	-0,5768	0,1882		B	2,3952	0,8318	0,0515	0,6148	
	$СКО B$		0,0535	0,0525	0,0158		$СКО B$		0,0452	0,0559	0,0376	
R мм	B_k	-0,06661	0,1005	0,2299	-0,5279	5,9	B_k	0,1756	-0,2004	0,0871	-0,2803	6,0
	$T_{кр}$		4,9862	11,4066	26,1910		$T_{кр}$		10,4724	4,5524	14,6442	
	B	0,0220	0,2955	0,6634	-0,4586		B	0,3031	-0,4673	0,2514	-0,5444	
	$СКО B$		0,0593	0,0582	0,0175		$СКО B$		0,0446	0,0552	0,0372	

B_k – коэффициент регрессии для кодированных переменных, характеризующий знак и степени влияния фактора обработки на обеспечиваемый параметр;
 $T_{кр}$ – значения критерия Стьюдента, характеризующие значимость фактора обработки на величину обеспечиваемого параметра (при уровне значимости $\alpha = 0,05$ $t_{табл} = 2,57$);

B – значения коэффициентов модели для натуральных величин факторов;

$СКО B$ – среднее квадратическое отклонения коэффициентов регрессии;

$F_{кр}^P$ – критерий Фишера, характеризующий адекватность модели. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ $F_{кр}^P = 6,39$

Приложение 19

**ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«КЛОНДАЙК ЭЛЕКТРОНИКС»**

Юридический адрес: 119049, Москва, Ленинский проспект, дом 6, стр. 1А
E-mail: klondike@yandex.ru

Исх. № 14/06-18
от 29.12.2018 г.



УТВЕРЖДАЮ

генеральный директор

М. П. Исаев

« 29 » декабря 2018 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Нагоркина Максима Николаевича

Комиссия в составе:

- председатель: Соболев Н. В. – главный инженер;
- члены комиссии: Серов П. П. – главный технолог;

Иконникова В. С. – главный экономист,

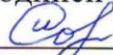
составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Надёжность технологического обеспечения шероховатости и износостойкости поверхностей деталей инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы в конструкторско-технологической деятельности ЗАО «Клондайк «Электроникс» при разработке технологических процессов обработки функциональных поверхностей деталей энергетических установок на станках с ЧПУ в виде:

- 1) структурной модели программного управления формированием закономерно изменяющихся параметров качества поверхностей деталей;
- 2) рекомендаций по вопросам технологического обеспечения закономерно изменяющихся параметров качества поверхностей деталей, с целью равномерного износа при нестабильных условиях эксплуатации.

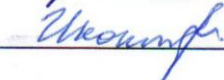
Использование указанных результатов позволяет повысить ресурс эксплуатации деталей энергетических установок и снизить затраты на реализацию технологических процессов изготовления деталей за счет сокращения станкочасов и, соответственно, экономии материальных и энергетических ресурсов.

Годовой экономический эффект от внедрения результатов исследования составил 780 000 (семьсот восемьдесят тысяч) рублей.

Подписи членов комиссии:

 Соболев Н. В.

 Серов П. П.

 Иконникова В. С.

Приложение 20



121357, г. Москва
ул. Верейская, д.29
стр.154, оф.10/2
Т/ф: +7 4832 58 19 66
e-mail: gkmp@gkmp32.com
www.gkmp32.com



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО НПО "ГКМП"
Инютин Н.В.
"26" 01 2019г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Нагоркина Максима Николаевича
на тему «Надёжность технологического обеспечения шероховатости
и износостойкости поверхностей деталей инструментами
из синтетических сверхтвёрдых материалов»

Настоящий акт составлен в том, что на предприятии ООО НПО «Группа Компаний Машиностроения и Приборостроения» были использованы отдельные результаты диссертационного исследования Нагоркина Максима Николаевича. В частности, применялась предложенная технология формирования микрорельефов поверхностей деталей обработкой ППД программным способом в технологических системах с ЧПУ.

Получаемые при обработке деталей «Шарниры», входящих в сборку «Отвал передний поворотный» (черт. № 313.07.00.000СБ); «Скалка», «Втулка», входящих в сборку «Направляющие усилителя» (черт. № 723.02.00.00.000А СБ); «Диск фрикционный», входящих в сборку «Корпус тормоза»" (черт. № 523.10.01.09.403), микрорельефы позволяют улучшить эксплуатационные характеристики асфальтоукладчиков АСФ-К-4-02-2, в частности, износостойкость поверхностей пар скольжения и качения.

Основой для реализации предложенной технологии являются следующие результаты диссертационного исследования:

- 1) алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее моделировать и реализовать микрорельефы поверхностей деталей в процессе ППД в технологических системах с ЧПУ;
- 2) алгоритмические модели траектории движения инструмента для ППД при реализации микрорельефов.

Использование технологии формирования микрорельефов позволяет повысить ресурс использования дорожной техники, выпускаемой предприятием, и снизить затраты на её ремонтно-восстановительные

ИНН 3250517421
КПП 773101001
Р/С 40702810708000006655

Отделение №8605
Сбербанка России г. Брянск
К/С 3010181040000000601
БИК 041501601



ООО «НПО «Группа компаний машиностроения и приборостроения»
Сертификат соответствия менеджмента качества РОСС RU. ФК15.К00164

Окончание приложения 20



121357, г. Москва
ул. Верейская, д.29
стр.154, оф.10/2
Т/ф: +7 4832 58 19 66
e-mail: gkmp@gkmp32.com
www.gkmp32.com

работы.

Годовой экономический эффект от внедрения результатов исследования составил 330 000 руб. на единицу выпускаемого оборудования.

Настоящий акт составлен комиссией в следующем составе:

Председатель комиссии

Технический директор:

Сидоренко Д.М.

Члены комиссии:

Зам дир. по развитию:

Добровольский Г.И.

Главный конструктор:

Солопеко А.В.

Главный технолог:

Демидов Ю.А.

Зам. дир. по экономике:

Цымбал Т.Л.