

M85-814

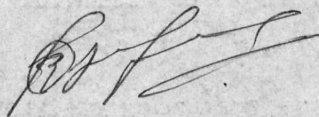
Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской революции
и ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана

На правах рукописи

ФЕДОРОВ ВЛАДИМИР ПАВЛОВИЧ

УДК 621. 9.

**Стабильность технологического обеспечения
параметров состояния поверхностного слоя
и эксплуатационных свойств деталей машин
чистовыми и финишными методами обработки**



Специальность 05. 02. 08—Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва—1992

Работа выполнена в Брянском ордена „Знак Почета“ институте транспортного машиностроения

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники
РФ, доктор технических наук, профессор
В. К. СТАРКОВ;

доктор технических наук, профессор
А. В. МУХИН;

доктор технических наук, профессор
Л. А. ХВОРОСТУХИН.

Ведущее предприятие—производственное объединение
„Брянский автомобильный завод“

Защита диссертации состоится „17“ июня 1992 г.
в 14-30 на заседании специализированного совета
Д053. 15. 04 при Московском государственном техническом уни-
верситете им. Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я
Бауманская. 5.

г. _____ в библиотеке МГТУ

экземпляре, заверенный
по адресу.

июня 1992 г.

M85814

Зуб

Усов Б. А.

1085814

Федоров В.П. Стабильность

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

актуальность проблемы. Повышение качества и надежности машин и оборудования является одной из важнейших проблем современного машиностроения как в нашей стране, так и за рубежом. Известно, что эксплуатационные свойства машин, определяющие их надёжность (износостойкость, контактная жёсткость, плотность соединений и др.), зависят от ряда функциональных параметров контактирующих поверхностей, к которым в первую очередь относятся точность размера, погрешность формы, геометрические характеристики поверхности и физико-химические параметры поверхностного слоя.

1085814
В отечественном машиностроении сложилась определенная схема обеспечения надёжности деталей на стадиях проектирования и изготовления, включающая решение двух задач: конструктора и технолога. При этом конструктор должен задать, наряду с другими требованиями, допустимые пределы изменения параметров состояния поверхностного слоя, исходя из требуемой вероятности обеспечения заданных показателей эксплуатационных свойств в регламентируемом интервале их изменения, а технолог должен определить условия обработки, которые обеспечат в процессе изготовления поставленные конструктором требования с максимально возможной вероятностью.

К настоящему времени достигнуты значительные успехи в области технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин, к которым относятся разработанная система параметров состояния поверхностного слоя с соответствующим метрологическим обеспечением, широкий арсенал средств технологического воздействия на обрабатываемые детали, позволяющий формировать заданные показатели их качества, современные методы оптимизации технологических процессов обработки, сложившуюся методологию технологических исследований.

В силу наличия значительного количества случайных факторов обработки, оказывающих влияние на формирование поверхностного слоя, стабильность обеспечения параметров его качества различна для различных технологических систем (ТС). Таким образом с целью повышения эксплуатационной надёжности продукции машиностроения необходим рациональный выбор ТС обработки деталей по критерию максимальной стабильности обеспечения параметров их качества.

М Г Т У

ИЗДАНИЕ Н.Э. Буцаева

БИБЛИОТЕКА

I

Следует отметить наличие фундаментальных исследований в области оптимизации, в том числе с учетом критериев стабильности обеспечения параметров процесса резания, а вместе с ними и параметров качества обработанных деталей, касающихся адаптивных систем обработки, станков и станочных комплексов с ЧПУ. Однако их результаты нельзя автоматически перенести для использования в ТС с пониженной гибкостью управления. Кроме того, в настоящее время имеются весьма ограниченные сведения о стабильности технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин не только перспективными, но и традиционными методами обработки, в том числе чистовыми и финишными, которые вносят значительный вклад в формирование показателей качества обрабатываемых поверхностей. Это затрудняет выбор рационального с точки зрения указанного критерия стабильности метода обработки или комбинации ряда методов, что не может не сказаться на снижении эксплуатационной надежности обрабатываемых деталей или их соединений.

В связи с изложенным особую актуальность приобретает крупная научно-техническая проблема исследования и повышения стабильности чистовых, финишных широкораспространенных и перспективных технологических методов обработки по обеспечению параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин, решение которой имеет важное народнохозяйственное значение.

Ц е л ь р а б о т ы .

Исследование и повышение стабильности чистовых, финишных широкораспространенных и перспективных методов обработки по обеспечению параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин на основе имитационного моделирования.

М е т о д ы и с с л е д о в а н и й . Теоретические исследования проводились на базе научных основ технологии машиностроения, теории надежности машин, теории автоматического регулирования, молекулярно-механической теории трения и износа, теории контактного взаимодействия, физико-статистической теории формирования геометрических параметров поверхности, теоретических основ технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин, теории веростностей и случайных фулкций, а также современной теории и практики имитационного моделирования.

Экспериментальные исследования проводились на основе разра-

ботанного автором программного метода технологических исследований, базирующегося на широком использовании теории активного эксперимента, методов имитационного моделирования и статистических испытаний, реализуемых над имитационными моделями на ЭВМ.

Достоверность теоретических и экспериментальных исследований подтверждается результатами опытно-промышленной проверки и внедрения в производство.

А в т о р з а щ и щ а е т научные основы исследования и повышения стабильности чистовых, финишных широкораспространенных и перспективных технологических методов обработки по обеспечению параметров состояния и эксплуатационных свойств деталей машин, включающие:

1. Системную методологию определения показателей надёжности технологических процессов по параметрам качества обрабатываемых деталей, разработанную на основе теоретических положений оценки надёжности сложных систем, теории имитационного моделирования и метода Монте-Карло.

2. Программный метод исследования параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин и аппаратурные средства его реализации, позволяющие проводить экспресс-исследования в экспериментально-технологических лабораториях, а в ряде случаев непосредственно на рабочих местах.

3. Инженерные методы оценки надёжности технологических систем по параметрам качества обработанных деталей.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния условий чистовых и финишных методов обработки на формирование параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин.

5. Результаты комплекса теоретических и экспериментальных исследований стабильности технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя и ряда эксплуатационных свойств деталей машин чистовыми и финишными методами обработки.

6. Теоретические основы комбинированной обработки, включающей нанесение твердых износостойких покрытий методом напыления в вакууме и их последующее алмазное выравнивание.

7. Разработанную на основе спектральной теории стационарных случайных функций методику оптимизации процессов обработки поверхностным пластическим деформированием по частотным критериям, позволяющую сократить время приработки и величину начального из-

носа поверхностей трения скольжения.

8. Разработанный метод моделирования и реализации регулярных, квазирегулярных и стохастических систем канавок и микрорельефов при финишной обработке поверхностей деталей машин на станках с системами ЧПУ поверхностным пластическим деформированием.

Научная новизна. Системный подход к решению проблемы дал новые научные результаты, полученные лично автором:

1. На основе теоретических положений оценки надёжности сложных систем, теории имитационного моделирования и метода статистических испытаний разработана методология определения показателей стабильности чистовых и финишных технологических методов обработки по параметрам качества обрабатываемых деталей.

2. На основе кибернетического моделирования и спектральной теории стационарных случайных функций разработана теория и процедура оптимизации процессов обработки поверхностным пластическим деформированием по частотным критериям.

3. Теоретическая модель формирования шероховатости и волнистости при тонком точении, позволяющая сгенерировать профиль обработанной поверхности и теоретически определить надёжность технологического обеспечения высотных параметров шероховатости и волнистости.

4. Экспериментально-аналитический метод определения параметров механических колебаний технологических систем, основанный на спектральном анализе профилограммы пробной обработанной поверхности.

5. Теоретическая модель контактирования реальных шероховатых поверхностей, построенная на основе молекулярно-механической теории трения, включающая вероятностные характеристики микропрофилей контактирующих поверхностей.

6. Теоретические основы моделирования и реализации регулярных, квазирегулярных и стохастических систем канавок и микрорельефов при финишной обработке поверхностей деталей машин методом ПД на станках с ЧПУ.

Практическая ценность. Проведенные исследования позволили разработать основы инженерных расчетов оценки стабильности технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя (ПСЛ) и эксплуатационных свойств (ПЭС) деталей машин чистовыми и финишными методами обработки. При этом наибольшую практическую ценность представляют следующие результаты:

1. Программный метод исследований параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин, включающий аппаратные средства реализации эксперимента, построенные на базе мини- и микроЭВМ, математические и программные средства регистрации и обработки экспериментальных данных.

2. Инженерные методы оценки стабильности технологических систем по параметрам качества обработанных деталей.

3. Реализованные отдельные модули автоматизированной системы технологических исследований в виде автоматизированных систем определения параметров шероховатости и волнистости, остаточной напряженности поверхностного слоя и контактной жесткости соединений.

4. Графические и табличные базы данных стабильности технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя, триботехнических характеристик и контактной жесткости наружных цилиндрических и плоских поверхностей чистовыми и финишными широкораспространенными и перспективными методами обработки.

5. Технология комбинированной обработки поверхностей, в основе которой лежат нанесение твердых износостойких нитридсодержащих покрытий в вакууме и их последующее алмазное выглаживание.

6. Программный метод нанесения регулярных, квазирегулярных и стохастических систем канавок и микрорельефов при обработке ПД на станках с компьютерными и обычными системами ЧПУ инструментом с единичным центрально или периферийно расположенным индентором.

7. Прикладное программное обеспечение для всех стадий исследования стабильности технологических систем чистовых и финишных методов обработки по параметрам качества обрабатываемых деталей.

Реализация результатов. Результаты работы внедрены в отрасли насосного машиностроения (ВНИИТнасосмаш, г.Казань, Минхимнефтемаш), на одном из предприятий Минэлектронпрома (г.Брянск) и рекомендованы к внедрению в отраслях машиностроения межотраслевым экспертным советом ВМИ.

Отдельные результаты используются в учебном процессе при чтении лекций, проведении лабораторных работ, а также в ходе курсового и дипломного проектирования по специальности 12.01. Экономический эффект частичного внедрения результатов работы составляет более 600 тыс. рублей.

Апробация работы. Основные положения и ре -

результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах, в том числе на республиканских (Хабаровск, 1976; Севастополь, 1988), всесоюзных (Андропов, 1989, 1988; Брянск, 1971, 1986, 1991; Киев, 1977, 1985; Куйбышев, 1973, 1990; Москва, 1976, 1985; Смоленск, 1976; Ташкент, 1990; Тольятти, 1989; Тула, 1988) и международной (Ташкент, 1985) конференциях; на межотраслевом экспертном совете по метрологии (г. Москва, 1989) и на ежегодных научно-технических конференциях ВИТма (Брянск, 1971 ... 1991 гг.).

В полном объеме диссертация доложена и одобрена на кафедрах "Технология машиностроения" и "Металлорежущие станки и инструменты ВИТма (г.Брянск) и на кафедре "Технология автоматизированного механосборочного производства" МГТУ им. И.Э.Баумана.

П у б л и к а ц и и . По материалам диссертации опубликована 61 работа, в том числе монографии и авторское свидетельство.

С т р у к т у р а и о б ъ е м р а б о т ы . Работа состоит из введения, семи глав и заключения, изложенных на 314 страницах машинописного текста, дополнительно содержит 146 рисунков, 31 таблицу, 352 наименования литературных источников и приложения на 96 стр.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, изложена её структура, показана научная и практическая ценность, а также излагаются основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин и формированию задач, решение которых необходимо для достижения поставленной цели исследований.

На основе анализа работ ряда ведущих отечественных и зарубежных учёных, а также представителей созданных ими школ в областях технологии изготовления и надёжности машин, состояния поверхностного слоя и его влияния на эксплуатационные свойства деталей машин, перспективных технологических методов обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин, современного состояния обеспечения надёжности машин на стадии разработки конструкторско-технологической документации и методов технологических исследований в обеспечении надёжности изделий машиностроения сделаны следующие выводы:

1. Надёжность продукции машиностроения складывается на ста-

дии конструкторско-технологической подготовки производства и во многом определяется технологией изготовления деталей машин, технологической надёжностью применяемого оборудования.

2. Существует научно обоснованная система параметров состояния поверхностного слоя деталей машин, определяющая их эксплуатационные свойства. К числу параметров, получивших весьма широкое распространение в практике машиностроительного производства, относятся параметры шероховатости, волнистости, макроотклонений, наклепа и остаточной напряженности.

3. Технология машиностроения располагает достаточным арсеналом средств технологического воздействия на обрабатываемые поверхности деталей машин с целью формирования при обработке их наперед заданных свойств, однако к настоящему времени недостаточно исследованы и не получили должного распространения перспективные методы формирования поверхностного слоя, в частности, комбинированные с использованием твёрдых износостойких покрытий, финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО), обработка ПД на станках с ЧПУ и ряд других.

4. Ряд функциональных параметров состояния поверхностного слоя, непосредственно влияющих на эксплуатационные свойства деталей и их соединений, имеет недостаточный уровень метрологического обеспечения, что затрудняет их контроль в процессе изготовления и регламентацию в технических условиях.

5. В формировании параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин, а также в стабильности их технологического обеспечения, весьма важную роль играют чистовые и финишные операции технологического процесса их изготовления, включая как выбор метода, так и выбор оптимальных с точки зрения выбранного критерия условий обработки с обязательным учетом влияния механизма технологического наследования.

6. К настоящему времени проведены фундаментальные исследования стабильности процессов обработки резанием, охватывающие как параметры самого процесса, так и параметры физико-механического состояния поверхностного слоя детали. Эти исследования, в основном, относятся к адаптивным системам обработки, а также к системам обработки на станках и станочных комплексах с ЧПУ. В основу повышения стабильности в этих случаях положены: адаптивное управление, требующее непрерывное получение информации о ходе и результатах процесса обработки; стохастическое моделирование процесса с его последующей оптимизацией на ЭВМ, а также адап-

тивное управление, основанное на результатах стохастического моделирования.

Эти результаты применимы и дают хороший эффект в условиях уже выбранного конкретного метода обработки на оборудовании с известными характеристиками. Использование же полученных методов затруднено в условиях ТС, построенных на основе оборудования, обладающего пониженной гибкостью управления, а также при выборе методов обработки и ТС из числа альтернативных по критериям стабильности технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей. В связи с этим методологию вышеотмеченных исследований необходимо обобщить и адаптировать к применению в условиях ТС с пониженной гибкостью управления, а также многоступенчатых ТС нетрадиционных перспективных методов обработки.

Таким образом, в настоящее время имеются значительные скрытые резервы повышения надёжности машин на стадиях технологического проектирования и изготовления. Вскрытие и реализация этих резервов – проблема современной технологии машиностроения, решению которой во многом будет способствовать исследование стабильности широкораспространённых и перспективных чистовых и финишных методов обработки по обеспечению параметров качества деталей машин, создание соответствующих методов исследований, количественных моделей, баз данных и практических рекомендаций.

Это и предопределило цель данной работы, для достижения которой необходимо решить следующие задачи:

1. На основе использования теоретических результатов по оценке надёжности технологических систем по параметрам качества продукции разработать системную методологию технологических исследований стабильности чистовых и финишных методов обработки по параметрам качества обрабатываемых деталей, базирующихся на методах имитационного моделирования и статистических испытаний.

2. Разработать программный метод исследований параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин на основе использования ЭВМ.

3. Теоретически определить пути повышения стабильности технологического обеспечения износостойкости деталей машин методами перспективной технологии и разработать соответствующие технологические системы.

4. Установить стабильность технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств

деталей машин для широко распространенных и перспективных чистовых и финишных методов обработки.

5. Разработать инженерные методы оценки стабильности чистовых и финишных операций технологического процесса по обеспечению параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин.

6. Наметить пути реализации результатов исследований в сфере конструкторско-технологической подготовки производства. Дать оценку экономической эффективности результатов внедрения.

Вторая глава посвящена разработке теоретических и методологических основ оценки стабильности технологических процессов по параметрам качества обработанных деталей методом имитационного моделирования, которому отдается предпочтение из-за наличия значительного количества случайных факторов обработки.

В соответствии с ГОСТ 27.004-85 рассматривался переход технологических систем (ТС) из работоспособного в неработоспособное состояние в связи с возникновением отказов по параметрам и показателям качества, которые являются постепенными в функции времени. В качестве моделей формирования постепенных отказов ТС в зависимости от времени рассматривались процессы с линейным и экспоненциальным изменением регламентируемого параметра качества во времени, которые являются весьма распространенными и типичными. В первом случае регламентируемый параметр Y в начальный момент эксплуатации ТС имеет математическое ожидание Y_0 и среднее квадратическое отклонение (СКО) σ_0 . В случае нормального распределения случайных аргументов Y_0 и скорости γ в любой момент времени $t = T$ показатель качества Y будет иметь также нормальное распределение с параметрами:

$$M\{Y\} = Y_0 + \gamma_{cp} T, \quad (1) \quad \sigma\{Y\} = \sqrt{\sigma_0^2 + T^2 \sigma_\gamma^2}. \quad (2)$$

Здесь σ_γ - СКО скорости γ . Вероятность безотказного функционирования ТС ($Y \leq Y_{max}$) в течение времени $t = T$ определяется соотношением (3):

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left[\frac{Y_{max} - Y_0 - \gamma_{cp} T}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_\gamma^2 T^2}} \right] \quad (3)$$

Здесь Φ - функция Лапласа.

При анализе модели рис. 1а, когда

$$Y(x, t) = Y_0(x) \exp[a(x) \cdot t^{\theta(x)}], \quad (4)$$

с целью упрощения модели введено равномерное распределение параметра Y вместо нормального и принято допущение, что величина $\sigma\{Y\}$ во времени не изменяется и для любого момента времени равна значению σ_0 . С целью совпадения среднего значения начального распределения Y_0 с началом экспоненты при $t = 0$ введены нормированные верхний и нижний пределы равномерного распределения. Параметры $a(x)$ и $b(x)$ являются случайными величинами, зависящими от факторов обработки X . Критическое время функционирования ТС $t_{кр}$ (рис. 1б) составляет:

$$t_{кр} = \left[\left(\frac{1}{a(x)} \right) \ln \left(Y_0(x) / (Y_{max} - \Delta Y) \right) \right]^{1/b(x)} \quad (5)$$

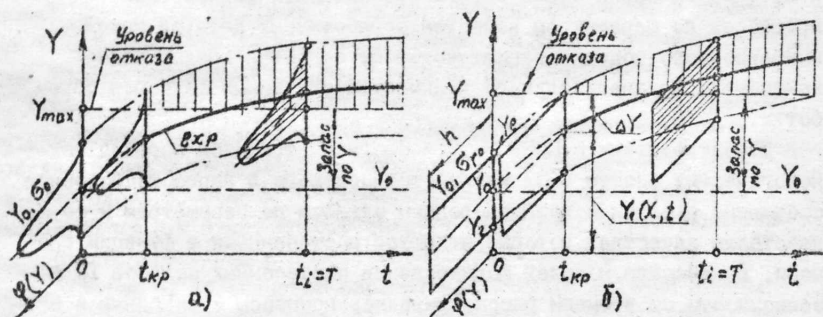


Рис. 1. Модели формирования постепенного отказа ТС при экспоненциальном изменении параметров качества детали

При $t > t_{кр}$ вероятность безотказной работы ТС при $t = T$ определяется в соответствии с (6):

$$P(T) = 0,5 + \frac{Y_0(x)}{2\Delta Y} \left[\exp(a(x)t^{b(x)}) - \frac{Y_{max}}{Y_0(x)} \right] \quad (6)$$

Параметры $a(x)$, $b(x)$ определяются экспериментально с учетом временного фактора. Рассмотрен вопрос формирования оптимального запаса Z_{opt} ТС по параметру Y в случае допущения его выхода за нижнюю (Y_{min}) и верхнюю (Y_{max}) границы допуска Δ с вероятностями соответственно α_1 и α_2 :

$$Z_{opt} = Y_{max} - Y_{min} - \sigma_0 (Z_{\alpha_1} + Z_{\alpha_2}) \quad (7)$$

Здесь Z_{α_1} , Z_{α_2} - квантили нормального распределения.

В случае наложения двухстороннего ограничения на регламентированный параметр качества Y , изменяющийся линейно, имеем

$$P(T) = \Phi \left[\frac{Y_{\max} - Y_0 - \gamma_{\text{ср}} T}{\sqrt{G_0^2 + G_T^2 T^2}} \right] + \Phi \left[\frac{Y_0 + \gamma_{\text{ср}} T - Y_{\min}}{\sqrt{G_0^2 + G_T^2 T^2}} \right]. \quad (8)$$

Таким образом, рассмотренные модели позволяют оценить показатели надёжности ТС по параметрам качества обрабатываемых деталей, причем в расчетные зависимости входит целый ряд статистических параметров закона распределения Y , которые зависят от конкретной ТС и условий обработки. В связи с этим для их определения разработана специальная методология, в основу которой положены методы имитационного моделирования и статистических испытаний (Монте-Карло). В основу построения имитационных моделей (ИМ) положен физико-статистический подход, новая концепция которого заключается в том, что структура модели ТС формируется на основе физико-технологического анализа причинно-следственных связей факторов обработки и внешней среды, а выходные параметры определяются статистическими методами.

Основу разработанной методологии составляют следующие последовательно выполняемые процедуры: 1. Выбор исследуемой ТС и факторов обработки; 2. Выбор плана эксперимента и его реализация; 3. Определение параметров сечения поверхностного слоя (ПСПС) и эксплуатационных свойств (ПЭС); 4. Построение и анализ ИМ; 5. Реализация машинного эксперимента (МЭ) над ИМ по схеме Монте-Карло; 6. Статистический анализ результатов МЭ; 7. Расчет показателей надёжности ТС по обеспечению ПСПС и ПЭС в заданных пределах.

Для всех процедур, составляющих основу предложенной методологии, разработано соответствующее математическое и программное обеспечение. ИМ строились в виде аддитивных (9) или моделей Кобба-Дугласа (10):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \dots + \beta_k X_k, \quad (9)$$

$$Y_i = \beta_0 \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \dots X_i^{\beta_i} \dots X_k^{\beta_k} \quad (10)$$

Здесь Y_i - i -тый параметр из ПСПС или ПЭС; X_i - i -тый фактор ТС; β_0, β_i - истинные значения коэффициентов, которые являются случайными нормально распределенными величинами с мате-

математическим ожиданием β_0 , β_i и СКО $S\{\beta_i\}$. Если в моделях (9), (10) величины X_i не являются случайными, то для модели (10) имеем:

$$M\{Y_i\} = \exp(\ln M\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k \ln X_i \cdot M\{\beta_i\}) , \quad (11)$$

$$S^2\{Y_i\} = \exp(\ln(S^2\{\beta_0\}) + \sum_{i=1}^k (\ln X_i)^2 \cdot S^2\{\beta_i\}) . \quad (12)$$

Если в моделях (9), (10) случайными являются один или несколько факторов X_i , то аналитических выражений для расчета $M\{Y_i\}$ и $S\{Y_i\}$ найти не удастся. Они определяются путем обработки результатов МЭ над ИМ, который реализуется путем N прогонов соответствующей ИМ на ЭВМ по схеме Монте-Карло. При этом для параметра Y_i в случае ИМ вида (10) имеет место следующая формулировка задачи:

Вычислить N значений функции

$$Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_k; \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_i, \dots, \beta_k; S\{\beta_0\}, S\{\beta_1\}, \dots, S\{\beta_i\}, \dots, S\{\beta_k\}) \quad (13)$$

такой, что

$$Y_i = \beta_0 \times \prod_{j=1}^k X_j^{RNDN_i(\beta_i, S\{\beta_i\})} , \quad \text{где} \quad (14)$$

$X_1, \dots, X_k$ — значения входных параметров ТС; $\beta_0, \dots, \beta_k$ — математические ожидания коэффициентов ИМ; $S\{\beta_1\}, \dots, S\{\beta_k\}$ — их СКО; $RNDN_i(\beta_i, S\{\beta_i\})$ — нормально распределенное случайное число с параметрами распределения β_i и $S\{\beta_i\}$.

Данный алгоритм положен в основу математического и программного обеспечения исследований, разработанного применительно к микро-, мини- и ПЭВМ. Разработанная методология положена в основу инженерных методов оценки ТС по параметрам качества обрабатываемых деталей.

Третья глава посвящена разработке программного метода исследований параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин. Сущность метода заключается в реализации планируемого активного эксперимента с использованием программируемых испытательных стендов и измерительных систем. Управление объектами исследований осуществляется от мини-ЭВМ с использованием цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) и за-

дающих устройств: двигателей постоянного тока, электромагнитов, электромагнитных муфт, нагревательных элементов, шаговых двигателей. Этих элементов достаточно для реализации входных воздействий стендов по исследованию износостойкости при нормальных и повышенных температурах, контактной жёсткости плоских и цилиндрических соединений и др.

Выходные параметры ТС (ПСПС) и программируемых испытательных стендов (ПЭС) определяются программным путём, для чего разработана автоматизированная система технологических измерений (АСТИ) на базе мини- и микроЭВМ, которая обеспечивает измерение и определение следующих характеристик:

1. Параметров шероховатости, волнистости и отклонений от круглости поверхностей. Для определения параметров шероховатости и волнистости разработана автономная система "СКИФ" на базе профилографов мод. 201, 252, 260 и др. 3-да "Калибр" и ЭВМ СМ-1 или ДБК-2, которая обеспечивает определение 18-ти параметров (в том числе всех, оговоренных ГОСТ 2789-79) с печатью протокола, возможность создания банков данных и расчета целого ряда других характеристик при использовании дополнительного программного обеспечения. При определении отклонений от круглости в системе используется серийный кругломер мод. 290 3-да "Калибр".

2. Параметров остаточной напряженности поверхностного слоя, которые рассчитываются по известным алгоритмам по величине деформации образца в зависимости от его толщины, изменяющейся в процессе электролитического полирования.

3. Величины молекулярной составляющей коэффициента трения и прочности адгезионной связи на тангезиометре в соответствии с ГОСТ 23.203-78 для расчета триботехнических свойств пар трения.

4. Параметров контактной жёсткости неподвижных плоских стыков при нормальном приложении нагрузки, а также параметров контактной жёсткости и триботехнических характеристик подвижных цилиндрических и плоских соединений применительно к подшипникам скольжения и направляющим технологического оборудования.

Разработанная АСТИ построена по модульному принципу и включает следующие группы модулей: 1. Измерительные - с индуктивным, емкостным или тензометрическим преобразователями; встроенные в серийно выпускаемые блоки; с термопарой. 2. Привода - с электромагнитом, двигателем постоянного тока, шаговым двигателем, встроенные в серийно выпускаемые блоки. 3. Программные - по рас-

чету условий эксперимента и параметров, получаемых в ходе эксперимента. 4. Дополнительные – нагрева до заданной температуры и др. Для регистрации длительно протекающих процессов предусмотрено использование запоминающих устройств. Прикладное программное обеспечение разработано на языках высокого уровня.

В четвёртой главе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований стабильности технологического обеспечения ПСПС деталей машин широкораспространёнными чистовыми и финишными методами обработки. Исследовались следующие методы обработки наружных цилиндрических поверхностей: 1) шлифование периферией абразивного круга на станках мод. 3А161, 3Б161, 3Б261 и др.; 2) тонкое точение композитом 10 на станке 16К20; 3) последующее алмазное выглаживание индентором из синтетического алмаза с радиусом сферы 3,5 мм; 4), 5) – электромеханическая обработка подвижным роликом с осью вращения, параллельной оси вращения детали после точения и круглого шлифования соответственно. Исследуемые материалы: в случае 1 – сталь 40Х в состоянии нормализации; в случаях 2 и 3 – сталь 45 (HRC₃ 48...50); в случаях 4 и 5 – сталь 45 в состоянии поставки. В качестве СОТС применялись: 5%-ный раствор эмульсола в воде (случаи 1,4,5); масло "Индустриальное 20" (случай 3).

Стабильность обеспечения ПСПС при обработке плоских поверхностей исследовалась для следующих методов: 1) плоское шлифование периферией абразивного круга на станке мод. 3Г71; 2) накатывание шариковой головкой упругого действия на станке 6Р13; 3) вибронакатывание инструментом упругого действия строчечным способом на станке мод. 6Р13. В случаях 2,3 в качестве предварительной обработки применялось торцовое фрезерование.

Выбор материалов: для случая 1 – образцы из сталей 12ХНЗА и 20Х, имеющих твердость до HRC₃ 60; для случаев 2,3 – из чугуна СЧ20 (НВ195...210) и из стали 40Х (HRC₃ 40). В работе приведено подробное обоснование материалов, которые приняты за базовые, а также факторов, включая жёсткость ТС резания, и уровней их варьирования.

Исследовалось обеспечение параметров шероховатости ($R_a, R_p, R_{max}, S_m, t_m, \beta, \gamma, \rho_{nop}$), волнистости (W_a, W_p, S_{mw}, t_{mw}), отклонений от круглости (H_m, H_p), остаточных напряжений I рода ($\sigma_0, \sigma_{max}, \sigma_0 \cdot h_0, h_0$) и наклёпа (H_{ncl}, h_n). Выбор этих параметров сделан на основе анализа ряда работ отечественных и зарубежных ученых по влиянию ПСПС на эксплуатационные свойства деталей машин.

В соответствии с разработанной методологией для каждого метода обработки получены адекватные имитационные модели вида (10) с их соответствующими статистическими характеристиками. Установлено, что рассматриваемые параметры имеют распределение, которое не противоречит гипотезе логарифмически нормального (в большинстве случаев) или нормального.

Стабильность технологического обеспечения ПСПС исследовалась по результатам машинных экспериментов над имитационными моделями, которые проводились по предложенной схеме Монте-Карло. Количество прогонов ИМ на ЭВМ составляло от 1000 до 4000. В

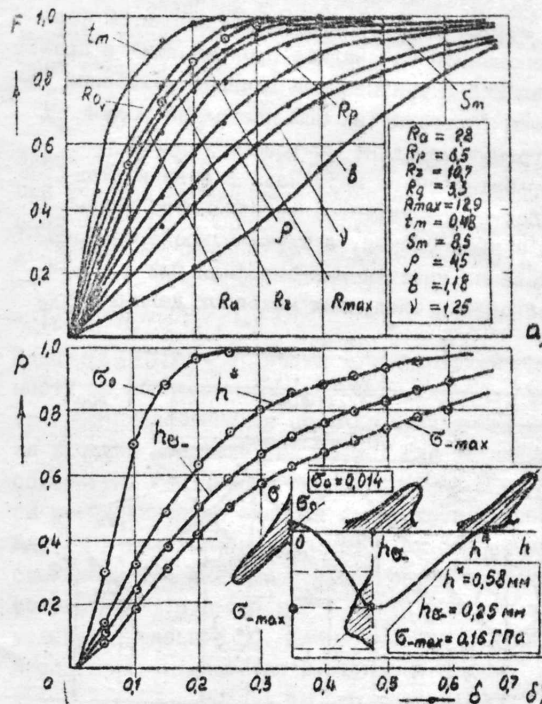


Рис. 2. Стабильность технологического обеспечения ПСПС: а - параметров шероховатости тонким точением компози-том 10; б - параметров остаточных напряжений ЭМО после круглого шлифования.

обеспечения имеет величина σ_0 , а наименьшую - "глубинный" параметр σ_{-max} (рис. 2б). В работе приведены результаты исследования для остальных рассматриваемых параметров и методов обработки

качестве показателя стабильности обеспечения параметра Y рассматривалась вероятность выполнения задания по его обеспечению в симметричном δ %-ном относительном интервале, т.е. величина

$$P\{Y \in [\bar{Y} - \delta \bar{Y}, \bar{Y} + \delta \bar{Y}]\}$$

Некоторые результаты исследований стабильности обеспечения ПСПС в центрах факторных областей рассматриваемых ТС, представлены на рис. 2. Установлено, что исследуемые ПСПС обеспечиваются с различной стабильностью, которая зависит как от метода обработки, так и от материала детали. Из параметров остаточной напряженности наибольшую стабильность

с подробным их анализом. В частности, показано, что параметр t_p , входящий в ГОСТ 2789-73, имеет самую низкую стабильность технологического обеспечения как при обработке тонким точением, так и при ПД. Причём, с ростом ρ растёт стабильность обеспечения t_p .

Для диагностики реальных ТС тонкого и чистового точения разработан экспериментально-аналитический метод определения стабильности обеспечения параметров шероховатости при точении с учетом колебаний. Он базируется на кинематических соотношениях процесса точения, геометрии режущего инструмента и на результатах спектрального анализа реальной ТС резания. Сущность метода заключается в построении ИМ формирования шероховатости, основанной на анализе происходящих в процессе резания физических явлений и учитывающей влияние колебаний ТС резания, в её дальнейшем "прогоне" на ЭВМ и анализе полученных результатов. Предлагаемый метод не учитывает упругих и пластических деформаций обрабатываемого материала в зоне контакта с инструментом при обработке, результатов адгезионного взаимодействия материалов детали и инструмента, а также микронеровности его рабочей части. Моделирование участка микропрофиля при точении (рис. 3) производится на основании следующих исходных данных:

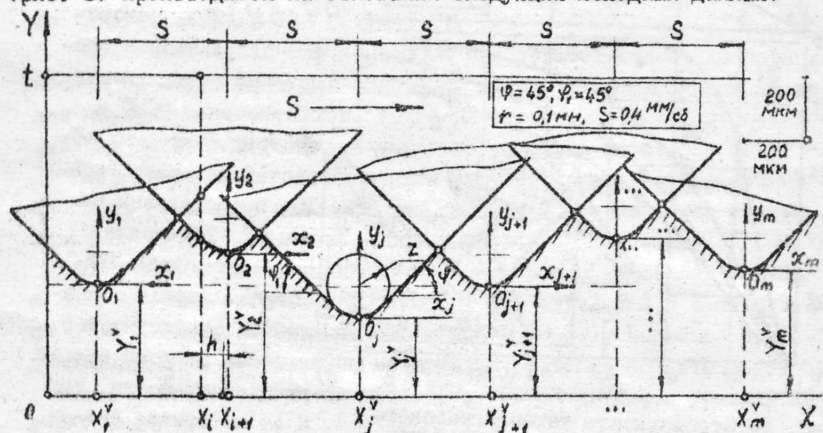


Рис. 3. Модель формирования шероховатости при точении

ℓ, h - длина участка и шаг дискретизации микропрофиля соответственно; n, S, t - частота вращения шпинделя, подача и глубина резания; r, φ, φ_1 - геометрия резца; параметры колебаний ТС резания: q_x, q_y - гармонические колебания резца по осям OX и OY с амплитудами A_{xi}, A_{yi} , частотами f_{xi}, f_{yi}

и начальными фазами Ψ_{xi}, Ψ_{yi} .

для моделируемого участка приняты следующие обозначения: m - количество микронеровностей и расчетных точек соответственно; i, j - текущий номер моделируемых точки и впадины микропрофиля; $(X_i^0, Y_i^0), (X_j^0, Y_j^0)$ - координаты i -той точки и наинизшей точки j -той впадины, численно равные координатам вершины резца в момент формирования j -той впадины без учета колебаний; X_j^v, Y_j^v - то же с учетом колебаний; K_j - номер точки, ближайшей к наинизшей точке j -той впадины; T_i - момент времени формирования j -той впадины.

В соответствии с принятой моделью рассчитываются координаты вершины резца на j -том обороте детали с учетом колебаний в момент времени T_i :

$$\bar{X}_j = S_j; X_j^v = \bar{X}_j + KOLEB_x; Y_j^v = KOLEB_y. \quad (15)$$

Здесь $KOLEB_x, KOLEB_y$ - приращения координат вершины резца при участии последней в нескольких гармонических колебаниях вдоль осей OX и OY . Ординаты точек формирующегося микропрофиля определяются как наименьшее из двух значений:

$$Y_i = \min(Y_i^0; C_i), \quad C_i = REZEC(X_i). \quad (16)$$

Здесь $REZEC(X_i)$ - ордината точки режущей кромки резца в зависимости от абсциссы X_i и m, φ, φ_1 . Полученное дискретное представление профиля в виде массива ординат выводится на внешний носитель (МЛ, ПЛ, МД) для последующей интерпретации и обработки. Реализация процедур $KOLEB$ и $REZEC$ осложняется необходимостью задания параметров колебаний в ТС резания. Для этой цели разработан метод их оценки вдоль оси OY путём спектрального анализа профилограммы поверхности, полученной в результате пробного прохода в конкретных условиях реальной ТС. Длина участка должна составлять $l \approx 20$ и содержать количество выступов и впадин $N = 2m + 1$, где $m = 1, 2, 3, \dots$. Высота любого выступа Y_i^0 и любой впадины Y_i^v представляется в виде:

$$Y_i^0 = Y_0^0 + Y_i^0; \quad Y_i^v = Y_0^v + Y_i^v, \quad (17)$$

где Y_0^0, Y_0^v - высота i -того выступа и глубина i -той впадины при отсутствии колебаний, а Y_i^0, Y_i^v - отклонения высоты i -того выступа и глубины i -той впадины, вызванные колебаниями в ТС резания. С другой стороны величины Y_i^0 и Y_i^v

можно представить как сумму составляющих от шероховатости R и волнистости W :

$$Y_i^P = R_i^P + W_i^P; \quad Y_i^V = R_i^V + W_i^V. \quad (18)$$

С использованием теории рядов Фурье для величин, входящих в (18), получены выражения типа:

$$R_i^V = A_0^V + \sum_{k=m'+1}^m A_k^V \cos(2\pi k i / N - \psi_k^V), \quad (19)$$

$$W_i^V = \sum_{k=1}^{m'} A_k^V \cos(2\pi k i / N - \psi_k^V). \quad (20)$$

Здесь $m' = \ell' / \ell$, где $\ell' = 2\ell\delta$. Величины A_k^V , A_k^P , ψ_k^V , ψ_k^P определяются по результатам спектрального анализа пробной профилограммы с учетом случайности фазовых сдвигов между гармониками ψ_k^V и ψ_k^P , а величины R_i^P , R_i^V , определяемые выражениями типа (19), представляют собой нормально распределенные величины с параметрами:

$$M\{R_i^P\} = A_0^P = A_0^P; \quad (G_0^P)^2 = D\{R_i^P\} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (A_k^P)^2; \quad (21)$$

$$M\{R_i^V\} = A_0^V = A_0^V; \quad (G^V)^2 = D\{R_i^V\} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (A_k^V)^2. \quad (22)$$

Исходя из практической значимости параметров шероховатости R_v , R_p , $R_{\max}$, определяем их следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} R_v &= \min\{R_i^V\}, \quad j = \overline{1, N}; \quad R_p = \max\{R_i^P\}, \quad i = \overline{1, N}; \\ R_{\max} &= R_p + |R_v| = \max\{R_i^P + |R_j^V|\}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Случайная величина $R_{\max}$ имеет нормальное распределение с параметрами:

$$M\{R_{\max}\} = A_0^P + |A_0^V|; \quad D\{R_{\max}\} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m ((A_k^P)^2 + (A_k^V)^2). \quad (24)$$

Установлено, что величины R_v , R_p , $R_{\max}$ распределены по закону, функция и плотность которого имеют вид:

$$G(z) = [\Phi(t)]^N, \quad g(z) = N\varphi(t)[\Phi(t)]^{N-1}, \quad (25)$$

где $\Phi(t)$ и $\varphi(t)$ - функция и плотность нормального распределения; $t = (z - a)/\sigma$. При оценке законов распределения параметров R_p , R_v , $R_{\max}$ в (25) следует подставлять величины,

определяемые соответственно (21), (22) или (24). Сопоставление предложенной теоретической модели с экспериментом показало удовлетворительную сходимость результатов (коэффициент корреляции от 0,76 до 0,96).

Пятая глава посвящена вопросам технологического обеспечения триботехнических характеристик поверхностей деталей машин перспективными методами обработки и его стабильности. В качестве перспективных методов чистовой и финишной обработки рассматривались комбинированная обработка (КО) на основе применения твердых нитридсодержащих покрытий (ТНСП) и алмазного выглаживания, финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО), рассмотренная выше ЭМО и обработка ППД на станках с ЧПУ. Указанные методы (кроме ФАБО) разработаны автором. ТНСП (TiN - нитрид титана, MoN - нитрид молибдена) наносились методом КИВ на установках типа "Пуск-77" по спецтехнологиям ПО АвтоГАЗ и Харьковского физико-технического института.

В работе, наряду с ПСПС, исследовались следующие триботехнические характеристики: L_0 , h_0 - путь приработки и величина начального износа; I - интенсивность изнашивания; f_1 , f_2 - коэффициент трения в начале и конце процесса приработки; T_0 , κ - температура в зоне контакта; f , T_n - молекулярная составляющая коэффициента трения и сдвиговая прочность молекулярной связи; P_n - грузоподъемность соединения при ступенчатом нагружении. Экспериментальные исследования проводились на модернизированной машине трения МИ-1М и на специальном стенде программным методом в полуавтоматическом режиме с последующим построением и анализом ИМ.

На основе анализа износостойкости соединений, один из трибоэлементов которых имеет ТНСП, установлено, что они не работоспособны ввиду высокой интенсивности износа сопряженного с ними второго трибоэлемента ввиду наличия процесса микрорезания в зоне контакта, вызываемого микронеровностями поверхности ТНСП, имеющей твердость до 2000-3000 HV. Это вызывает необходимость дополнительной обработки поверхности ТНСП. С этой целью в работе на основе молекулярно-механической теории трения теоретически решена задача выбора технологических параметров КО. При величине пластического внедрения при контакте, равной R_p микропрофиля ТНСП, вид фрикционной связи, в частности, условие микрорезания для каждого отдельного выступа определяется соотношением

$$\lambda = h_i / \rho_i \approx \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2\tau_0}{\sigma_0} \right), \quad (26)$$

где h_i и ρ_i - высота и радиус при вершине i -того выступа, T_0 - сдвиговая прочность адгезионной связи; σ_T - предел текучести материала истираемой поверхности. Для реального микропрофиля величина ξ является случайной с параметрами $M\xi$ и $D\xi$. В случае её нормального распределения имеет место соотношение:

$$P(\xi > \xi_{кр}) = 1 - \Phi\left(\frac{\xi_{кр} - M\xi}{S\xi}\right), \quad (27)$$

где $P(\xi > \xi_{кр})$ - вероятность, характеризующая относительную долю микровыступов профиля, которые вызывают микрорезание. Это дает возможность рассчитать среднее число n таких микровыступов на площади контакта ($a \times b$) (мм^2) при отсутствии волнистости и макроотклонений:

$$n = 10^6 \frac{ab}{S_{ma} S_{mb}} P(\xi > \xi_{кр}). \quad (28)$$

Здесь S_{ma} , S_{mb} - средние шаги микронеровностей по средней линии микропрофиля ТНСП в направлениях (а) и (в) соответственно. Так как $\xi_{кр}$ зависит от физико-механических свойств материала истираемой поверхности, то для одной и той же истирающей поверхности имеют место различные величины $P(\xi > \xi_{кр})$ в зависимости от материала контртела. На рис. 4а показана гистограмма распределения величины ξ для поверхности ТНСП (TiN ; $R_a = 0,41$ мкм, $R_p = 2,32$ мкм, $\beta = 0,1$; $V = 1,15$, $\bar{\rho} = 7,0$ мкм), которое не противоречит гипотезе логарифмически нормального. Там же указаны значения $\xi_{кр}$ для различных материалов контртела. Анализ ве-

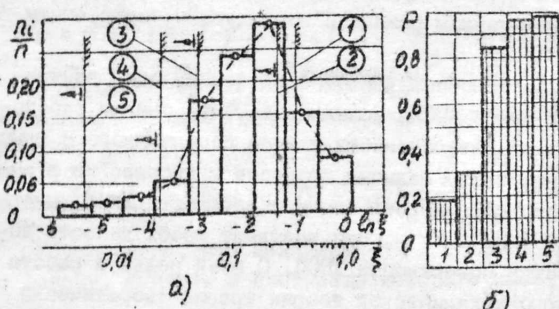


Рис. 4. К оценке истирающей способности поверхности ТНСП при трении с материалами: 1 - сталь 45(НRC 45...50), 2 - сталь 45 (отжиг), 3 - АСЧ-1, 4 - ОЦС-5 -5, 5 - Б-83.

роятностей $P(\xi > \xi_{кр})$, рассчитанных по зависимости, аналогичной (27), показывает (рис. 4б), что их отношение примерно соответствует отношению интенсивностей изнашивания контртела. Погрешность составляет около 15%, что можно считать удовлетворительным. Для верхнего предела нормальной нагрузки N на сопряжение, при

которой с вероятностью P (27) гарантировано отсутствие микрорезания, получено выражение:

$$N \leq A_c \left(\frac{f \cdot \rho}{R_p (2\sqrt{1+f^2} - 1)} \right)^{1/3} V C G \tau. \quad (29)$$

Здесь A_c - контурная площадь контакта; f - коэффициент трения; C ($\approx 2,8$) - коэффициент стеснения. Остальные величины определены выше. Учитывая, что повышению N способствует увеличение ρ и снижение R_p , а также незначительную толщину (2...5 мкм) ТНСП и его высокую твердость, предложена финишная обработка поверхности ТНСП алмазным выглаживанием. Таким образом, логическая формула КЮ имеет вид: $(T \wedge \Pi) \vee A_I \vee \Pi \vee A_2$. Здесь T, Π - предварительная обработка точением или шлифованием с достижением необходимой точности; A_I - алмазное выглаживание с силой $Q_1 = 100...400$ Н до $R_a = 0,16...0,3$ под нанесение покрытия; Π - нанесение покрытия; A_2 - алмазное выглаживание поверхности ТНСП с силой $Q_2 = 50...150$ Н, что, по результатам приведенных электронно-микроскопических исследований гарантирует отсутствие растрескивания покрытия. Приводятся результаты исследований стабильности обеспечения КЮ параметров шероховатости и триботехнических характеристик, включая показатели адгезии поверхности после КЮ с различными материалами и гальваническими покрытиями. Даны соответствующие практические рекомендации.

При практической реализации ТС ФАВО возникает необходимость подготовки поверхности детали под нанесение мягкой приработочной плёнки фрикционным методом с шероховатостью, обеспечивающей качественное покрытие плёнкой всего микропрофиля. Для этого необходимо, чтобы при обработке имел место процесс микрорезания шероховатостью поверхности детали материала наносимой плёнки, что обеспечивается точением при $R_a \gg 0,04$ мкм. Верхний предел шероховатости ограничен необходимостью заполнения микровпадин профиля детали материалом наносимой плёнки и зависит от его физико-механических свойств. В работе разработана специальная методика определения $\max[R_{max}]$ микропрофиля детали, обеспечивающего данное условие. Эта методика базируется на решении задачи контакта единичной микронеровности детали, принятой за абсолютно жёсткое тело, с упруго-пластическим полупространством материала наносимой плёнки методом конечных элементов (МКЭ). Разработан соответствующий алгоритм расчета $\max[R_{max}]$, исходными данными которого являются параметры микропрофиля обрабаты-

ваемой ФАБО поверхности и физико-механические характеристики (G_r, μ) материала наносимой плёнки. Экспериментальная проверка выявила погрешность расчета $\max[R_{\max}]$ в сторону занижения $\approx 11\%$, что является приемлемым. В работе приведены результаты исследований стабильности обеспечения ФАБО триботехнических характеристик, аналогичные изложенным выше для КО.

Рассмотрение финишной обработки ППД (ЭМО) показало, что существует необходимость её оптимизации по времени приработки поверхностей. Выявлены общие закономерности в формировании микропрофиля в этих двух разных по физической природе процессах. На основе этого предложена кибернетическая модель А формирования микропрофиля в процессе приработки в виде "черного ящика", на входе которой - технологический микропрофиль, на выходе - эксплуатационный. Аналогичная модель Б принята для обработки ППД. За критерий оптимума обработки ППД принято соответствие частотных характеристик модели Б, которые зависят от условий обработки, аналогичным для модели А, зависящим от условий эксплуатации. Применяя спектральную теорию стационарных случайных функций к решению данной задачи и принимая гипотезу линейности модели, имеем:

$$K(\omega) = \sqrt{S_Y(\omega)/S_X(\omega)} \quad (30)$$

Здесь $K(\omega)$ - амплитудно-частотная характеристика модели; $S_X(\omega), S_Y(\omega)$ - спектральные плотности микропрофиля на входе и выходе модели соответственно. Для определения $S_X(\omega)$ и $S_Y(\omega)$ разработано соответствующее алгоритмическое и программное обеспечение. Проведенные экспериментальные исследования показывают достаточно высокую эффективность данного метода оптимизации обработки ППД по времени приработки.

Исследование стабильности обеспечения триботехнических характеристик обработкой ППД показало, что целесообразно осуществлять ЭМО после предварительного шлифования. При этом существенно снижается как средняя величина линейного износа, так и интервал его обеспечения при одной и той же вероятности выполнения задания. Выше в этом случае и стабильность обеспечения износа в регламентируемом интервале δ .

Анализ одного из наиболее известных и эффективных методов ППД - вибронакатывания - позволил выявить его некоторые существенные недостатки, с целью устранения которых и повышения эффективности

обработки автором впервые разработаны теоретические основы и реализован программный метод образования микрорельефов при обработке на станках с системами ЧПУ типа *CNC*. Его сущность заключается в программировании траектории движения центра инструмента с единственным индентором, который может быть центральным или периферийным (рис. 5а), устройством ЧПУ с последующей её обработкой. В частности, при создании синусоидального регулярного микрорельефа (рис. 5б) уравнение траектории имеет вид:

$$Y_1 = A_1 \sin \left(\frac{2\pi}{T_1} X_1 + (i-1)\Delta\varphi \right) + \Delta Y. \quad (31)$$

Программный метод позволяет реализовать новые типы микрорельефов, практически любые, имеющие аналитическое описание. Так, для

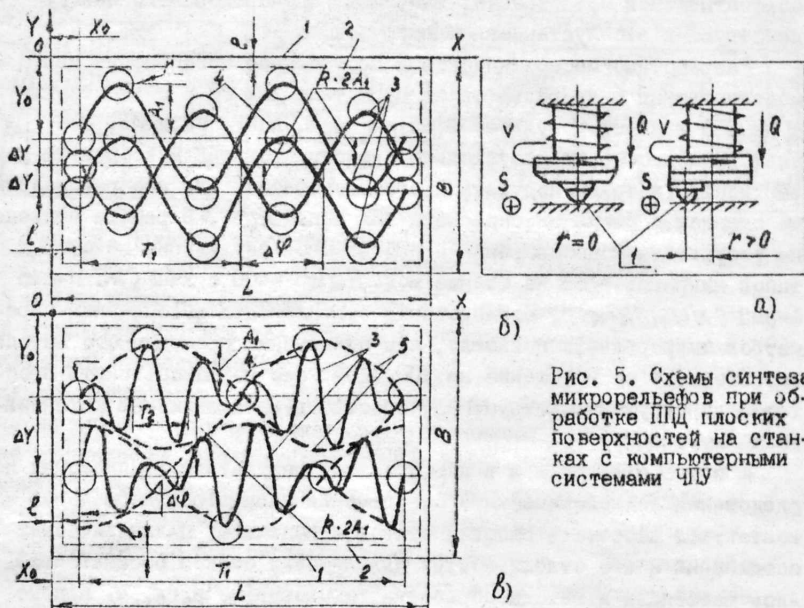


Рис. 5. Схемы синтеза микрорельефов при обработке ПВД плоских поверхностей на станках с компьютерными системами ЧПУ

квазирегулярного синусоидального микрорельефа (рис. 5в) имеем траекторию:

$$Y_2 = A_1 \sin \left(\frac{k_1 2\pi}{T_1} X_1 \right) \cdot \left| \sin \left(\frac{2\pi}{T_1} X_1 + (i-1)\Delta\varphi \right) \right| + \Delta Y \quad (32)$$

Аналогичные уравнения получены и для нанесения микрорельефов или систем канавок на торцевых кольцевых поверхностях с целью по-

вышения плотности соединений. Параметры $A, T, \Delta Y$, входящие в (31) и (32), рассчитываются системой ЧПУ в процессе обработки по исходным данным $L, B, P, N, k, k_1, i, z, \Delta Y$, (рис. 5), которые вводятся при обработке с пульта устройства ЧПУ. Данный метод позволяет реализовать принципиально новый класс микрорельефов – стохастических. В частности: А – стохастический (со случайной амплитудой), Т – стохастический (со случайным периодом), АТ – стохастический (со случайными амплитудой и периодом одновременно). Для их реализации в программе используются датчики псевдослучайных чисел. Кроме того, имеется возможность управления параметрами физико-механических свойств в функции координат обрабатываемой поверхности, например, пропорционально закону действующих эксплуатационных нагрузок.

Разработано математическое и программное обеспечение для моделирования микрорельефов на ПЭВМ типа IBM PC и совместимых с ними с выдачей результатов на дисплей, АЦПУ, ГП и ПЛ. Это дает возможность предварительно "конструировать" микрорельеф поверхности, а также получать программноноситель для его реализации на станках с обычными системами ЧПУ типа NC. В работе приведены результаты моделирования и программной реализации некоторых типов микрорельефов на станке мод. FQW -400 с УЧПУ CNC H-646 фирмы "NUMERIK". Исследование стабильности обеспечения параметров микрорельефа показало, что применение программного метода способствует её повышению на 10...15%. Это можно объяснить простотой конструкции инструмента, способствующей снижению интенсивности вибраций.

Шестая глава обобщает результаты комплексных исследований технологического обеспечения параметров нормальной контактной жёсткости плоских стыков и подвижных цилиндрических соединений и его стабильности. Для плоских стыков рассматривались материалы и методы обработки, оговоренные в гл. 4. Кривые контактного сближения аппроксимировались зависимостью (33), а коэффициент средней контактной жёсткости – (34):

$$Y = c q^m, \quad (33) \quad J_{cp} = \frac{1}{c} q^{(1-m)} \quad (34)$$

Здесь c, m – коэффициенты параболической аппроксимации кривой контактного сближения; q – величина нормальной нагрузки на стык, которая составляла $0 \leq q \leq 10$ МПа и $10 \leq q \leq 30$ МПа. Эксперименты проводились на программируемом

стенде и анализировались первое ($i = 1; 3$) и повторное ($i = 2; 4$) нагружения, в качестве которых принимались пятые. Кроме того отдельно рассмотрены результаты для взаимно-параллельного ($i = 1; 2$) и взаимно-перпендикулярного ($i = 3; 4$) расположения следов обработки. Путем машинного эксперимента над ИМ методом Монте-Карло получены показатели стабильности обеспечения параметров. Некоторые из результатов при вибронакатывании чугуна СЧ20 показаны на рис. 6: а) вероятности выполнения заданий по параметру J_i ($i = 1; 2; 3; 4$); б), в) - интегральные функции распределения величин максимального ($Y_{\max}$) и минимального ($Y_{\min}$) контактных сближений при нагрузках $Q - 6$ МПа (1) и 10 МПа (2).

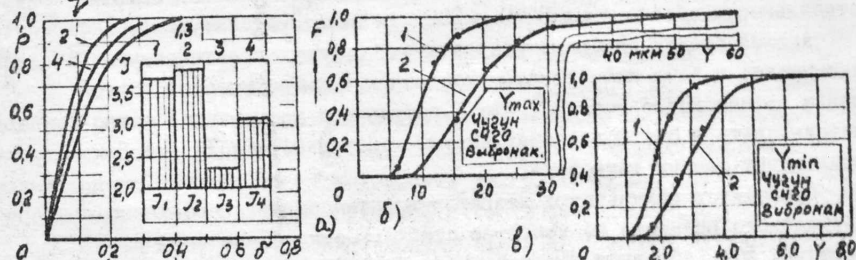


Рис. 6. Показатели стабильности обеспечения параметров контактной жёсткости вибронакатыванием чугуна СЧ20

В работе даны конкретные рекомендации по выбору метода и условий обработки плоских поверхностей, обеспечивающих повышение стабильности исследуемых параметров.

Для цилиндрических соединений с зазором исследования проводились на двух уровнях - качественном и количественном. В первом случае эксперимент выполнялся по плану греко-латинского квадрата, а в качестве факторов рассматривались: метод финишной обработки вала, материал вкладыша, смазка в сопряжении и скорость относительного скольжения при вариации каждого фактора на четырех уровнях. Эксперименты проводились на специальном моделирующем стенде. Наряду с параметрами нормальной контактной жёсткости, исследовались триботехнические характеристики соединения (f , h_E , и др.).

С учетом выявленных доминирующих факторов получены соответствующие имитационные модели формирования указанных параметров. Стабильность их обеспечения исследовалась на основе анализа машинных экспериментов. Кроме перечисленных параметров получены показатели стабильности для величин максимальных контактных сближений в динамике и коэффициента динамичности соединения в зависимости как от пути приработки, так и от области факторного пространства.

Седьмая глава посвящена направлениям и эффективности реализации результатов исследований в практике конструкторско-технологической подготовки производства.

В частности, на основе обобщения результатов исследований дана сводка инженерных методов оценки стабильности ТС по параметрам качества обработанных деталей, которая носит рецептурный характер и предусматривает 7 ситуаций, которые отличаются степенью априорной информированности инженера-производственника об интересующей его ТС. Приведены табличные базы данных по стабильности обеспечения ПСПС исследованными в работе чистовыми и финишными методами обработки. Даны примеры практической оценки стабильности обеспечения ПСПС и ПЭС для некоторых ситуаций.

Анализ сводки основных результатов, имеющих практическую значимость и блок-схем конструкторской и технологической подготовки производства показал, что 7 полученных результатов можно использовать в 3-х подзадачах задачи конструктора и II - в 3-х подзадачах задачи технолога.

Приводятся результаты: разработки оптимизированного технологического процесса по критерию стабильности обеспечения параметра R_a образцов шероховатости по ГОСТ 9378-75 и его внедрения; внедрения автоматизированной системы определения параметров шероховатости и волнистости; внедрения технологического процесса комбинированной обработки лимитирующих деталей погружных электронасосов. Как показал анализ результатов внедрения технологических процессов и систем, а также опыт их эксплуатации, они обладают достаточно хорошими технико-экономическими показателями.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В диссертационной работе осуществлено теоретическое обобщение и решение крупной научно-технической проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение, а именно: разработаны научные положения исследования и повышения стабильности чистовых, финишных широко распространенных и перспективных технологических методов обработки по обеспечению параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин на основе имитационного моделирования.

2. На основе теоретических положений оценки надёжности сложных систем, теории имитационного моделирования и метода статисти-

ческих испытаний разработана методология определения показателя стабильности технологических процессов, а именно: вероятности выполнения задания по обеспечению параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей, позволяющая осуществлять диагностику технологических систем по указанному показателю в производственных условиях с минимальными интеллектуальными и материальными затратами.

3. Предложена и разработана концепция программного метода исследований параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин, включающая использование аппаратных средств реализации исследований, построенных на базе отечественных мини- и микроЭВМ, математических и программных средств регистрации и обработки экспериментальных данных.

4. На базе разработанной концепции программного метода исследований реализован ряд автоматизированных модулей системы технологических исследований: по определению параметров шероховатости и волнистости; отклонений от круглости; технологических остаточных напряжений; параметров контактной жёсткости соединений.

5. На основе теоретических исследований определены пути повышения стабильности технологического обеспечения износостойкости деталей машин методами прогрессивной технологии, которые включают: процедуру оптимизации процессов обработки ППД по пути приработки, основанную на применении спектральной теории стационарных случайных функций; методику определения допустимых границ шероховатости поверхностей деталей под нанесение мягких приработочных плёнок фрикционными способами, основанную на применении МКД; применение технологии комбинированной обработки поверхностей, базирующейся на использовании твёрдых износостойких покрытий, разработанной на основе анализа теоретической модели контактирования реальных шероховатых поверхностей и позволяющей повысить износостойкость более, чем в 4 раза; реализацию программного метода формирования регулярных, квазирегулярных и стохастических систем канавок и микрорельефов обработкой ППД на станках с компьютерными системами ЧПУ.

6. На основе экспериментальных исследований установлены показатели стабильности технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя (геометрические характеристики поверхности, физико-механические свойства) и эксплуатационных свойств поверхностей (контактная жёсткость, триботехнические характеристики) деталей из среднеуглеродистых, легированных сталей, а

также из чугуна при следующих чистовых и финишных методах обработки: тонкое точение, круглое и плоское шлифование периферией абразивного круга, алмазное выглаживание, накатывание, вибронакатывание, электромеханическая обработка, комбинированная обработка и ФАБО. Полученные результаты представлены в виде таблиц и графиков, пригодных к практическому использованию при выборе ТС.

7. Разработанные теоретическая модель формирования шероховатости и волнистости при тонком точении и экспериментально-аналитический метод определения параметров механических колебаний технологических систем, основанный на спектральном анализе профилограммы поверхности после пробного прохода, позволяет теоретически определить стабильность обеспечения высотных параметров шероховатости и волнистости при заданных условиях обработки и сгенерировать соответствующие профили на ЭВМ.

8. Применительно к различным ситуациям, возникающим в производственных условиях, разработаны инженерные методы оценки стабильности чистовых и финишных операций технологического процесса по обеспечению параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин. Разработано соответствующее программное обеспечение на языках высокого уровня.

9. Практическая реализация результатов исследований осуществлялась путем внедрения на различных предприятиях: автоматизированной системы определения параметров шероховатости и волнистости поверхностей (в соответствии с рекомендацией межотраслевого экспертного Совета ВИМИ); разработанных технологических процессов изготовления образцов шероховатости в соответствии с ГОСТ 9.378-75 для методов точения и шлифования, обеспечивающих максимальную стабильность получения регламентируемого параметра; технологических процессов комбинированной обработки на основе твердых износостойких покрытий при изготовлении лимитирующих деталей погружных электронасосов. Общий экономический эффект, полученный от частичного внедрения результатов работы составил свыше 600 тыс. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Федоров В.П. К вопросу ранжирования факторов при обработке результатов планируемого эксперимента // Технология машиностроения: Сб. науч. статей. - М.: МАМИ, 1975. - С. 46-50.

2. Федоров В.П., Кельнер А.А. Программный метод исследования надёжности технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин // Технологическое управление качеством и эксплуа-

тационными свойствами деталей машин и механизмов: Сб. науч. статей. - Брянск, 1986. - С. 93-100.

3. Федоров В.П., Кельнер А.А. Исследование надёжности технологического обеспечения качества поверхностей деталей машин методом имитационного моделирования / ВИНТИ, Деп. науч. работы, 1987, № 12 (194). - С. 124.

4. Федоров В.П., Кельнер А.А. Автоматизированная система определения параметров шероховатости поверхностей деталей машин // Измерительная техника, 1987. - № 12. - С.23-24.

5. Суслов А.Г., Федоров В.П., Кельнер А.А. Обеспечение качества деталей, обрабатываемых на ГПС: Тез. докл. науч.-техн. конф. - Севастополь, 1988. - С.41-42.

6. Суслов А.Г., Федоров В.П., Кельнер А.А. Автоматизация контроля параметров шероховатости, волнистости и макроотклонений поверхностей деталей машин // Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин: Сб. науч. статей. - Брянск, 1988. - С. 140-143.

7. Федоров В.П., Кельнер А.А. Программный метод исследования состояния и риботехнических свойств поверхностей трения // Трибо-технические испытания в проблеме контроля качества материалов и конструкций: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. - Андропов, 1989. - С. 24-25.

8. Аверченков В.И., Дуденков В.Г., Федоров В.П. Характер упрочнения конструкционных сталей при электромеханической обработке // Физика прочности и пластичность металлов и сплавов: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Куйбышев, 1973. - С. 87-89.

9. Рыжов Э.В., Федоров В.П. Финишная электромеханическая обработка цилиндрических поверхностей // Тез. докл. республ. науч.-техн. конф. - Хабаровск, 1976. - С. 14-16.

10. Рыжов Э.В., Федоров В.П., Ольшевская Н.А., Красильщиков Г.Ю. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин - резерв повышения надёжности изделий // Методы повышения надёжности механических систем и их стандартизация: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Смоленск, 1976. - С.64-66.

11. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. - М.: Машиностроение, 1979. - 176 с.

12. Горленко О.А., Тотай А.В., Федоров В.П. Системное технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей при

обработке инструментами из сверхтвёрдых материалов // Новые сверхтвёрдые материалы и прогрессивные технологии их применения: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Киев, 1985. - С. 260-261.

13. Рыжов Э.В., Федоров В.П., Ольшевская Н.А. Технологическое обеспечение геометрических параметров шероховатости поверхности при ЭМО // Наука - производству. - Новосибирск, 1985. - С. 43-45.

14. Федоров В.П., Кельнер А.А., Игнатов В.В. Технологическая надёжность методов обработки ППД // Новые технологические процессы и оборудование для поверхностной пластической обработки материалов: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Брянск, 1986. - С. 68.

15. Федоров В.П., Кельнер А.А. Надёжность технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин // Конструктивно-технологические методы повышения надёжности и их стандартизация: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Тула, 1988. - С. 63.

16. Суслов А.Г., Федоров В.П., Кельнер А.А. Математическое моделирование и исследование надёжности процесса формирования шероховатости поверхности при механической обработке // Математическое обеспечение и автоматическое управление высокопроизводительными процессами механической и физико-механической обработки изделий машиностроения: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Андропов, 1988. - С. 9-10.

17. Федоров В.П., Щеглова А.В., Кельнер А.А. Исследование технологической надёжности обработки ППД методом имитационного моделирования // Интенсификация производства и повышение качества изделий поверхностным пластическим деформированием: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Тольятти, 1989. - С. 87-88.

18. Федоров В.П., Пугач Л.И., Кельнер А.А. К вопросу расчета параметров шероховатости и волнистости при тонком точении // Технологическое повышение надёжности и долговечности машин и инструментов: Сб. науч. статей. - Брянск, 1989. - С. 24-33.

19. Рыжов Э.В., Федоров В.П., Ольшевская Н.А. Некоторые статистические оценки формирования микропрофиля поверхности в процессах эксплуатации и при отделочно-упрочняющей обработке // Технология машиностроения: Сб. науч. статей. - М.: МАМИ, 1975. - С. 13-18.

20. Рыжов Э.В., Федоров В.П., Ольшевская Н.А. К вопросу оптимизации процессов отделочно-упрочняющей обработки по времени приработки // Метрология и свойства обработанных поверхностей: Сб. науч. статей. - М.: Изд-во Стандартов, 1977. - С. 110-123.

21. Федоров В.П., Ольшевская Н.А. Стохастическое моделирование процессов формирования микропрофиля поверхности при контактных взаимодействиях // Технологическое обеспечение повышения качества и долговечности деталей машин: Сб. науч.статей. - Тула: ТПИ, 1976. - С. 18-21.

22. Федоров В.П., Абдрахманов Ф.Х., Кирсанов В.К. и др. Оптимизация обработки контактирующих поверхностей пары трения скольжения // Химическое и нефтяное машиностроение, 1984. - № II. - С.19-20.

23. Федоров В.П., Абдрахманов Ф.Х., Моргаленко А.П. и др. Повышение износостойкости пар трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой поверхностей трибоэлементов // Износ в машинах и методы защиты от него: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - М.: ИМАШ, 1985. - С. 127.

24. Федоров В.П., Харченков В.С., Белый А.А. Эволюция поверхностных свойств трибоэлементов в условиях сухого и граничного трения // Трение, износ и смазочные материалы : Тез. докл. междуна. науч.-техн. конф. - Ташкент, 1985. - С. 139-140.

25. Федоров В.П., Подлеснов Ю.П., Щеглова А.В. и др. Оптимизация подготовки поверхностей под финишную антифрикционную безабразивную обработку / ВИНТИ, Деп. науч. работы, 1988. - № 5 (199) - С. 124.

26. Федоров В.П., Щеглова А.В., Моргаленко А.П., Кельнер А.А. Оценка истирающей способности микропрофиля твердых покрытий деталей машин вероятностными методами // Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин: Сб. науч. статей. - Брянск, 1988. - С. 14-23.

27. Федоров В.П., Щеглова А.В., Моргаленко А.П. Комбинированная обработка поверхностей на основе применения твердых нитридсодержащих покрытий // Ученые и специалисты - в решении социально-экономических проблем страны: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Ташкент, 1990. - С. 220-221.

28. Федоров В.П. К вопросу анализа истирающей способности поверхности в процессе трения скольжения // Износостойкость машин: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф., Ч. I - Брянск, 1991. - С. 66-67.

29. Федоров В.П., Кельнер А.А., Щеглова А.В., Моргаленко А.П. Исследование надёжности технологического обеспечения триботехнических характеристик пар трения скольжения методом имитационного моделирования // Износостойкость машин: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Ч. 2 - Брянск, 1991. - С. 110-111.

30. Федоров В.П. Программный метод реализации микрорельефов поверхностей деталей машин на станках с ЧПУ // Проблемы повышения качества, надёжности и долговечности машин и инструментов. - Брянск, 1991. - С. 95-98.

31. Рыжов Э.В., Федоров В.П., Климентьев В.И. Контактная жёсткость и ударная выносливость деталей из сталей 30ХГСА и 30Х2НВА после электромеханической обработки // Жёсткость в машиностроении: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Брянск, 1971. - С. 343-354.

32. Федоров В.П., Ольшевская Н.А. К вопросу технологического обеспечения контактной жёсткости цилиндрических соединений с зазором // Технология машиностроения. - М.: Изд-во МАМИ, 1975. - С. 97-104.

33. Ольшевская Н.А., Федоров В.П. К оценке коэффициента динамичности подвижных цилиндрических соединений // Технология машиностроения: Сб. науч. статей. - Тула, ТПИ, 1976. - С. 46-53.

34. Федоров В.П., Ольшевская Н.А. Контактная жёсткость подвижных цилиндрических соединений типа подшипников скольжения // Жёсткость машиностроительных конструкций: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - М., 1976. - С. 150-153.

35. Рыжов Э.В., Федоров В.П., Ольшевская Н.А. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов и условий эксплуатации подвижных цилиндрических соединений на параметры их контактной жёсткости // Контактная жёсткость в машиностроении: Сб. науч. статей. - Куйбышев, 1977. - С. 169-170.

36. Рыжов Э.В., Федоров В.П., Ольшевская Н.А. Исследование контактной жёсткости подвижных цилиндрических соединений // Механика и физика контактного взаимодействия: Сб. науч. статей. - Калинин, КГУ, 1977. - С. 43-47.

37. Рыжов Э.В., Федоров В.П., Ольшевская Н.А. Формирование параметров эксплуатационного микропрофиля в процессе контактирования гладкой и шероховатой поверхности // Механика и физика контактного взаимодействия: Сб. науч. статей. - Калинин, КГУ, 1978. - С. 30-38.

Подписано в печать 26.03.92. Зак. 214 Формат 60х60 1/16
Бумага типографская № 2. Офсетная печать.
Объем 2 п.л. Тираж 100 экз. Бесплатно.

Брянский ордена "Знак Почета" институт транспортного машиностроения. Брянск, бульвар им. 50-летия Октября, 7.

Подразделение оперативной полиграфии БИТМ, ул. Институтская, 16.