

М 407155

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

БУГАКОВ АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

УДК 621.9.08

ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ
МАТЕРИАЛОВ НАПРАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТОЧНОСТНОЙ
НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЗУЩИХ СТАНКОВ

Специальность 05.03.01

Процессы и машины обработки материалов резанием;
автоматические линии

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1983

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель — заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор А.С.Проников

Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор Д.Н.Гаркунов

— кандидат технических наук, доцент И.М.Рыбкин

Ведущая организация — Московское производственное объединение "Станкостроительный завод имени Серго Орджоникидзе"

Защита диссертации состоится "30" мая 1983 г. на заседании специализированного Совета К 053.15.15 в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана, по адресу: 107005,

ни Н.Э.

В
печать

у
специа
н

л. 00
Госапп

МВТУ име-

аверенный

Мещеряков

Тир. 1000.
ул., д.5.

M 407155



1407155

Бугаков А.В. Физико-статист

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Качество многих деталей машин формируется при обработке их на металлорежущих станках. В связи с этим создание высоконадежных станков является одной из важнейших задач, стоящих перед советскими станкостроителями.

Главная характеристика качества металлорежущего станка — его точность. К сожалению, она не остается постоянной, а, как правило, снижается при эксплуатации станка вследствие протекания различных процессов, в первую очередь, из-за изнашивания направляющих базовых узлов. Поэтому необходимо знать закономерности протекания процесса изнашивания направляющих, уметь оценивать износостойкость их материалов и прогнозировать точностную надежность всего станка в целом на всех этапах его создания и эксплуатации. Это позволит при проектировании подбирать наиболее износостойкие материалы для подвижных сопряжений и создавать оптимальные конструкции узлов станка, а на этапе эксплуатации — разрабатывать оптимальные методы ремонта, технического обслуживания и использования станка.

Таким образом, проблема определения закономерностей протекания процесса изнашивания направляющих и разработки методики оценки износостойкости их материалов для прогнозирования точностной надежности станков является весьма актуальной и непосредственно связана с задачами создания высоконадежного оборудования, поставленными XXVI съездом КПСС.

Цель работы. Исследование протекания процесса изнашивания направляющих и разработка методов оценки характеристик износостойкости их материалов на основе физико-статистического моделирования процесса изнашивания для прогнозирования точностной надежности металлорежущих станков.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены на основе положений теории надежности машин, теории вероятностей и математической статистики, системного анализа трибологических явлений и расчетов на трение и изнашивание, а также теории информации, исследования операций и планирования экспериментов. Экспериментальные исследования проводились на специальном стенде, позволяющем автоматически задавать и изменять моделируемые режимы и условия работы направляющих станков. Для измерения задаваемых и исследуемых параметров использована современная измерительно-регистрирующая аппаратура, а величины износа — основного исследуе-

мого параметра — определялись с применением метода поверхностной активации. Обработка экспериментальных данных и математическое моделирование производились на ЭВМ серии ЕС с использованием алгоритмического языка "Фортран IV".

Научная новизна. В результате теоретических и экспериментальных исследований и применения нового метода физико-статистического моделирования разработана методика оценки износостойкости материалов направляющих с учетом вероятностного характера влияющих факторов. Выявлено влияние процессов вторичной приработки и разработана методика их оценки, которая позволяет более достоверно (по сравнению с известными методами погрешность уменьшается на 10-30%) определять характеристики, необходимые для прогнозирования точностной надежности станков.

Практическая ценность. Разработанная методика позволяет как при эксплуатации, так и на стадии проектирования оценивать износостойкость направляющих, что дает возможность разрабатывать рекомендации по эффективному использованию потенциальной долговечности существующих станков, подбирать наиболее износостойкие материалы и рационально конструировать новые станки, а также прогнозировать их точностную надежность. Результаты работы использованы при разработке методики оценки износостойкости направляющих станков, выпускаемых и проектируемых заводом "Красный пролетарий" и НПО "Техника", а также при разработке мероприятий для оценки качества, прогнозирования и повышения надежности изделий одного из предприятий. Суммарный экономический эффект от внедрения данной методики и мероприятий составит более 10 (десяти) тысяч рублей.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на: — научных семинарах и заседаниях кафедры "Металлорежущие станки и автоматы механосборочного производства" МВТУ им. Н.Э.Баумана 1980-1983 г.г.; — IX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ЦО ЗИЛ, Москва, 1981 г.; — Всесоюзной научно-технической конференции "Надежность и контроль качества", Москва, 1981 г.; — Всесоюзном научно-техническом семинаре "Опыт разработки и внедрения передовых технологических решений в области сборочного производства на предприятиях Минсельхозмаша", Павлодар, 1982 г.; — Всесоюзной научно-технической конференции "Теоретические и прикладные проблемы износостойкости в машиностроении", Ленинград, 1982 г.

Публикации. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертации опубликованы в 3 печатных работах.

Объем работы. Диссертационная работа, изложенная на 237 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения (основных результатов и общих выводов), списка литературы из 116 наименований и приложений. Она содержит 149 страниц основного текста, 59 рисунков, 11 таблиц и 3 распечатки программ расчетов на ЭВМ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показана область применимости данных исследований.

В первой главе на основе литературного обзора показана роль процесса изнашивания в снижении точности станков и произведен анализ факторов, влияющих на его протекание.

Общая теория параметрической надежности и методика оценки потери точности станков, разработанная А.С.Прониковым, которая положена в основу работы, базируется на изучении различных процессов, приводящих к изменению первоначальной точности станка. При этом исследовать и выявить влияние быстро протекающих процессов и процессов средней скорости можно путем проведения краткосрочных испытаний станка и в настоящее время существуют различные частные методики таких испытаний. Основную сложность представляет выявление влияния главного из медленно протекающих процессов — процесса изнашивания направляющих базовых деталей станка. Для этого необходимо, в первую очередь, оценить скорости изнашивания материалов направляющих, а затем установить зависимость изменения исследуемого выходного параметра от скорости изнашивания или величины износа и формы изношенных поверхностей направляющих. Следует особо отметить, что для прогнозирования точностной надежности требуется полная оценка скорости изнашивания $\dot{U}$ или другой характеристики износостойкости материала — закон распределения и его математические параметры. Математические модели зависимостей выходных параметров точности станка от величин износа направляющих разработаны для многих станков, а универсальной методики полной оценки $\dot{U}$ в настоящее время не существует.

В области исследования процессов изнашивания известны фундаментальные труды таких ученых, как Н.Н.Давиденков, Д.Н.Гаркунов,

И.В.Крагельский, Б.И.Костецкий, А.С.Проников, М.М.Хруцов, М.М.Тененоbaum, И.Арчард, Ф.Боуден, Г.Данов, Е.Рабинович, Д.Павелеску, Г.Иошимомто, Т.Сасада и многих других. Разработан целый ряд гипотез, моделей и механизмов изнашивания. Процесс изнашивания направляющих металлорежущих станков относится к абразивно-усталостному. В главе проанализированы модели такого вида изнашивания, установлены факторы, оказывающие влияние на его протекание и степень их влияния.

Установлено, что в качестве характеристики износостойкости наиболее целесообразно использовать коэффициент изнашивания K , который входит в общую формулу для расчета износа:

$$U = K \cdot p^m \cdot V^n \cdot t \quad (I)$$

где U — величина износа; K — коэффициент изнашивания; p — давление; V — скорость скольжения; t — время работы сопряжения; m и n — показатели степени.

Наиболее обобщенной характеристикой износостойкости материала является скорость изнашивания γ , а также может быть использована интенсивность изнашивания J .

Из анализа литературы установлено, что полную оценку γ можно получить, используя методику обработки результатов эксплуатационных наблюдений, разработанную в ЭНИМСе под руководством А.С.Липидуса, или методику, разработанную на каф. АМ-І МВТУ им. Н.Э.Баумана В.В.Садыковым под руководством А.С.Проникова. Однако первая требует больших затрат времени (несколько лет) и средств и неприменима на этапе проектирования новых станков, а вторая, давая полную оценку γ для обобщенных условий всех исследованных станков, не позволяет выделить частную оценку γ (со своим законом распределения) для условий эксплуатации конкретного станка.

Приведен обзор и анализ существующих методов экспериментального определения величин износа, на основе чего сделан вывод, что для решения задач настоящего исследования наиболее приемлемыми являются: метод поверхностной активации и метод микрометрирования (с применением индуктивных преобразователей).

Показано, что для получения полной оценки скорости изнашивания необходимо учитывать все группы влияющих факторов: свойства материалов, режимы работы и условия эксплуатации, а испытания целесообразно проводить без применения способов форсирования на ос-

гове физико-статистического моделирования процесса изнашивания, предложенного А.С.Проникови 1.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Провести теоретические и экспериментальные исследования для оценки влияния свойств материалов, режимов работы и условий эксплуатации на протекание процесса изнашивания направляющих станков и характеристики износостойкости их материалов.

2. На основе физико-статистического моделирования разработать методику определения износостойкости материалов направляющих с учетом всех групп влияющих факторов и их вероятностной природы.

3. Исследовать природу вторичной приработки и разработать математическую модель протекания процесса изнашивания направляющих при переменных режимах работ.

4. Установить общую структуру и возможные методы оценки характеристик износостойкости материалов, а также способы их анализа для выявления оптимального метода.

5. Экспериментально оценить коэффициенты изнашивания типовых материалов направляющих станины и каретки станков токарной группы и сравнить с результатами эксплуатационных испытаний.

6. Используя полученные данные, дать прогноз потери станком точности вследствие изнашивания направляющих.

Вторая глава посвящена разработке методики определения характеристик износостойкости материалов направляющих на основе физико-статистического моделирования процесса изнашивания.

Показана возможность моделирования изнашивания направляющих на образцах, поскольку вначале необходимо знать износостойкость материалов, чтобы затем перейти к выявлению оптимального варианта конструкции и прогнозированию надежности станка. Для этого при разработке конструкции станка и проведении исследований должно быть обеспечено равенство или подобие параметров модели и "оригинала". Установлены основные такие параметры.

В главе рассмотрено два варианта метода физико-статистического моделирования: экспериментальный и экспериментально-расчетный. Суть экспериментального метода заключается в том, что вначале выявляются факторы, влияющие на протекание процесса изнашивания (входные параметры Z_i), затем определяются законы распределения их величин $f(Z_i)$. Методом статистического моде-

лирования (Монте-Карло) формируется программа испытания, состоящая не менее чем из 50 режимов. При этом для каждого j -го режима из законов $f(Z_i)$ выбираются (разыгрываются случайным образом, но с учетом законов распределения) значения $Z_{1j}, Z_{2j}, \dots, Z_{nj}$. В процессе экспериментального испытания в каждом режиме задаются разыгранные величины влияющих факторов и определяется значение выходного параметра — скорости изнашивания χ_j (или K_j). По совокупности полученных значений χ , используя методы математической статистики, определяется закон распределения $f(\chi)$ и его математические параметры. Основными из факторов, влияющих на протекание процесса изнашивания, являются: давление на поверхностях трения P ; скорость относительного скольжения V ; параметры микрогеометрии поверхностей трения; параметры микроструктуры материалов; твердость; концентрация, химический состав и размеры частиц, загрязняющих поверхности трения и удельный расход масла. Для получения информации о диапазонах изменения и законах распределения величин влияющих факторов необходимо анализировать: а) технологические процессы изготовления деталей, обрабатываемых на исследуемом станке и его конструкцию; б) технологические процессы и параметры качества изготовления направляющих (особенно, материала поверхностного слоя); в) условия эксплуатации исследуемых станков.

Экспериментальный метод физико-статистического моделирования позволяет получить полную оценку износостойкости материала. Однако, если надо получить характеристику износостойкости для других условий эксплуатации или надо учесть условия работы конкретного станка, т.е., если изменяются законы распределения $f(Z_i)$, требуется проведение новой серии экспериментов. Поэтому данный метод рекомендуется применять при достаточно стабильных законах распределения входных параметров.

В основу оценки износостойкости материалов экспериментально-расчетным методом положено выявление аналитической зависимости выходного параметра (χ или K) от входных (Z_i). После нахождения такой зависимости, рассматривая аргументы полученной функции как случайные величины со своими законами распределения и применяя метод статистического моделирования, можно многократно рассчитывать значения выходного параметра. Применение для этой цели ЭВМ позволяет получить выборку любого необходимого объема, на основе которой можно достоверно оценить закон рас-

пределения исследуемой величины (γ или K). Для выявления аналитической зависимости наиболее целесообразно применять методы теории планирования и анализа результатов экспериментов.

Совместное применение планирования эксперимента и метода статистического моделирования сокращает количество опытов и время испытания, необходимое для получения аналогичной информации, по сравнению с экспериментальным методом. Экспериментально-расчетный метод позволяет дать новую оценку закона распределения γ при любом изменении режимов работы и условий эксплуатации станка в пределах исследованных диапазонов без проведения повторных экспериментальных испытаний.

На основе физико-статистического моделирования разработан также метод ускоренного определения математического ожидания $\bar{\gamma}$ (или $\bar{K}$). Здесь программа испытания составляется так, что время каждого цикла испытания берется в несколько десятков раз меньше, а величина износа и, соответственно, γ определяется только один раз — после завершения всего испытания. Доказано, что полученная таким образом величина является математическим ожиданием γ . Показано, что ускоренный метод позволяет в 50 и более раз сократить время на определение математического ожидания исследуемой характеристики по сравнению с экспериментальным методом. Этот метод может быть применен при проведении сравнительных испытаний материалов на износостойкость, в результате которых необходимо не только выявить наиболее износостойкий материал, но и получить числовую характеристику его износостойкости.

В третьей главе приведены результаты экспериментальной оценки коэффициентов изнашивания материалов, представляющих наиболее типичное их сочетание для токарных станков, когда направляющие станины, изготавливаемой из серого чугуна СЧ 28-48, закалены и шлифованы, а направляющие каретки, изготавливаемой из СЧ 24-44, незакаленные, шабренные.

Приведен анализ, который показал, что существующие машины трения и испытательные стенды не имеют возможностей для проведения экспериментальных исследований с целью решения задач, поставленных в настоящей работе. В связи с этим для наших исследований был использован специальный стенд, созданный на кафедре АМ-1 МВТУ им. Н.Э. Баумана, позволяющий достаточно достоверно (с соблюдением требований, изложенных во 2-й главе) моделировать

условия эксплуатации направляющих металлорежущих станков. Он состоит из: машины трения, задатчика режимов испытания и измерительного комплекса. Задатчик режимов позволяет задавать программу испытания в виде последовательности необходимых значений нагрузочных факторов, формирующих режимы испытания (до 60 режимов), которые автоматически обрабатывает машина трения. Измерительный комплекс предназначен для контроля параметров, характеризующих величины воздействующих факторов и протекание процесса изнашивания. Он позволяет контролировать: давление, скорость скольжения, силу трения, путь трения, сближение образцов и величины износа в процессе исследования без остановки машины трения.

При проведении исследований основную сложность представлял контроль величин износа. Он производился с применением метода поверхностной активации (МПА), а в некоторых случаях — и методом микрометрирования с применением индуктивных преобразователей. В главе рассмотрены особенности применения этих методов в настоящих исследованиях. Для применения МПА образцы активировались на циклотроне У-150 протонами с энергией 11,4 МэВ. Требуемая глубина активированного слоя и чувствительность метода обеспечивались за счет установки экранирующих пластинок перед пучком заряженных частиц и изменения угла наклона пучка относительно активируемой поверхности. В работе приведены тарировочные зависимости изменения активности от глубины активированного слоя, полученные расчетным путем и проверенные экспериментально.

Определение износа и сближения образцов методом микрометрирования с применением индуктивных преобразователей позволяло проверить метод поверхностной активации.

Априорный анализ факторов, влияющих на протекание процесса изнашивания исследованных материалов направляющих, и предварительные зондирующие эксперименты показали, что для станков токарной группы основное влияние на этот процесс оказывают: давление на поверхностях трения P ; скорость скольжения V ; количество частиц железа (и его окислов) $Q(Fe)$, двуокиси кремния $Q(SiO_2)$ и окиси алюминия $Q(Al_2O_3)$, находящихся на трущихся поверхностях; удельный расход масла m ; размеры включений графита ℓ_{gr} (характеристика микроструктуры материала); твердость $HВ$ (только для материала направляющих каретки). Использо-

зуг известные и специально разработанные методики, выявлены диапазоны изменения и законы распределения величин данных факторов.

Оценка законов распределения коэффициентов изнашивания произведена экспериментально-расчетным методом физико-статистического моделирования. Учитывая, что для направляющих скольжения станков токарной группы характерен вид изнашивания, при котором коэффициент изнашивания не зависит от давления и скорости скольжения (эта предпосылка проверена и подтверждена в 1-й работе), и то, что В.П.Митровицем (ЭНИМС) установлены аналитические зависимости скорости изнашивания от размеров включений графита и твердости для исследуемых материалов, экспериментально определялись только зависимости коэффициентов изнашивания от пяти оставшихся факторов. Для этой цели были спланированы и проведены экспериментальные испытания образцов направляющих путем реализации матрицы планирования дробной реплики полного факторного эксперимента 2^{5-1} . После математической обработки результатов экспериментов, учитывая влияние размеров включений графита и твердости, установлены обобщенные аналитические зависимости коэффициентов изнашивания материалов направляющих станины K_c (формула (2)) и каретки K_k от влияющих факторов.

$$K_c = 2,25 \cdot 0,0149 \cdot \ell_{rp} + 0,0000426 \cdot \ell_{rp}^2 \cdot [551,0 + 0,030 \cdot Q(Fe) + 1,62 \cdot Q(SiO_2) + 5,73 \cdot Q(Al_2O_3) - 4,96 \cdot m + 4,34 \cdot D + 0,00185 \cdot Q(Fe) \cdot Q(SiO_2) + 0,00164 \cdot Q(Fe) \cdot Q(Al_2O_3) + 0,00172 \cdot Q(Fe) \cdot m + 0,0254 \cdot Q(SiO_2) \cdot Q(Al_2O_3) - 0,0208 \cdot Q(Al_2O_3) \cdot m] \cdot 10^{-11} \quad (2)$$

В соответствии с методикой экспериментально-расчетного метода физико-статистического моделирования составлены программы розыгрыша случайных значений влияющих факторов из законов распределения их величин и программы расчета значений K_c и K_k . Рассчитано по 400 значений этих параметров, после математической обработки которых установлено, что они с 90% доверительной вероятностью подчиняются нормальным законам распределения. Законы определены для двух случаев: - для всей совокупности условий эксплуатации исследованных станков ($K^{обш}$); - для условий эксплуатации одного конкретного станка (K'). Математические параметры, характеризующие полученные законы, следующие: а) математичес-

кое ожидание: $K_c^{обш} = 0,75 \cdot 10^{-8}$ I/МПа; $\bar{K}_c' = 0,66 \cdot 10^{-8}$ I/МПа;
 $K_k^{обш} = 1,85 \cdot 10^{-8}$ I/МПа; $K_k' = 1,56 \cdot 10^{-8}$ I/МПа;
 б) среднее квадратическое отклонение: $\sigma(K_c^{обш}) = 0,24 \cdot 10^{-8}$ I/МПа;
 $\sigma(K_c') = 0,06 \cdot 10^{-8}$ I/МПа; $\sigma(K_k^{обш}) = 0,58 \cdot 10^{-8}$ I/МПа;
 $\sigma(K_k') = 0,17 \cdot 10^{-8}$ I/МПа. Расчеты производились на ЭВМ ЕС 1022.

Для условий эксплуатации конкретного станка определено математическое ожидание коэффициента изнашивания материала направляющих станины ускоренным методом $\bar{K}_{ум}$. Величина $\bar{K}_{ум}$ определялась, исходя из формулы:

$$U = \sum_{i=1}^n K_i \cdot p_i \cdot S_i \quad (3)$$

по зависимости

$$\bar{K}_{ум} = U_{\phi} / \sum_{i=1}^n p_i \cdot S_i \quad (4)$$

где U_{ϕ} — суммарная, фактическая величина износа; p_i и S_i — соответственно, давление и путь трения в i -м режиме.

Результаты экспериментов показали значительное рассогласование между $\bar{K}_{ум}$ и $\bar{K}_c'$. При этом в некоторых экспериментах сумма: $\sum_{i=1}^n p_i \cdot S_i$ и условия, влияющие на величину K , задавались постоянными, а изменялась только частота (n) и последовательность режимов испытания, т.е. U и $\bar{K}_{ум}$ должны быть также постоянными. Однако этого не наблюдалось. В данном случае обнаружено несоответствие между $\bar{K}_{ум}$ и $\bar{K}_c'$ от +11% до -28%, т.е. в пределах 39%, что нельзя объяснить только влиянием погрешностей расчетной модели, метода определения износа и погрешностью задания режимов испытания. Поэтому необходимо было более подробно исследовать механизм протекания процесса изнашивания при изменении режимов работы сопряжения.

Четвертая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию этого процесса. Разработана физическая модель протекания изнашивания, учитывающая последствие второго рода, которое при изменении режимов работы сопряжения приводит к возникновению процессов вторичной приработки. В основу модели положено, что при переходе от одного режима к другому происходит изменение условий трения, пока не установится новая равновесная шероховатость. Причем интенсивность изнашивания $\bar{J}$ на этом участке постепенно изменяется от величины установившейся интенсивности изнашивания в предыдущем режиме $\bar{J}_{i-1}$ до $\bar{J}_i$, соответствующей новым условиям трения.

С нашей точки зрения физику этого явления можно объяснить

тем, что при увеличении давления сближение трущихся поверхностей и увеличение числа актов взаимодействия микрообъемов, которое определяет J , происходит не мгновенно, т.к. требуется время на перераспределение остаточных напряжений в поверхностных слоях материалов, на более глубокое внедрение или дробление абразивных частиц, на вытеснение смазочного материала и т.п. Результаты экспериментальных исследований подтвердили предположение о существовании участков вторичной приработки, на которых функции интенсивности изнашивания - $J = \varphi(S)$ и сближения образцов направляющих - $\Delta\varphi(S)$ не имеет разрывов. Установлено, что продолжительность приработки тем больше, чем больше величина отношения давлений в смежных режимах. Выведена эмпирическая зависимость, по которой можно определить путь трения на этом участке:

$$S^{np} = L \cdot \ln(j \cdot V), \quad (5)$$

где S^{np} - путь трения на участке вторичной приработки; L - коэффициент, определяемый экспериментально, имеющий размерность пути трения. Для условий проведенного эксперимента $L = 1365$ м; j - отношение давлений в смежных режимах:

$$\text{при } P_i / P_{i-1} \geq 1 \quad j_i = P_i / P_{i-1} \quad (6)$$

$$\text{при } P_i / P_{i-1} < 1 \quad j_i = P_{i-1} / P_i \quad (7)$$

V - безразмерный коэффициент, определяемый экспериментально. Для условий проведенного эксперимента:

$$\text{при } P_i / P_{i-1} \leq 0,5 \quad V_i = 3,9 \quad (8)$$

$$\text{при } 0,5 < P_i / P_{i-1} < 2,0 \quad V_i = 1,0 \quad (9)$$

$$\text{при } P_i / P_{i-1} \geq 2,0 \quad V_i = 1,1 \quad (10)$$

Разработана математическая модель протекания процесса изнашивания, учитывающая влияние процессов вторичной приработки. В основу модели положена проверенная нами предпосылка, что в условиях граничного трения для абразивного и усталостного видов изнашивания величина износа U при установившемся изнашивании прямо пропорционально зависит от K_i , P_i , S_i и для каждого

такого участка она может быть определена по формуле (3), когда $n = 1$. На участках вторичной приработки принята степенная зависимость износа от пути трения:

$$U_i = K_i \cdot P_i \cdot C_i \cdot S_i^{A_i} \quad (II)$$

где C_i - коэффициент, согласующий размерность правой и левой частей уравнения; A_i - показатель степени:

$$A_i = K_i \cdot P_i / K_{i-1} \cdot P_{i-1} \quad (I2)$$

Математическая модель протекания процесса изнашивания разработана для двух случаев: а) для случая, когда общий путь трения в каждом режиме работы сопряжения больше пути, необходимого для окончания вторичной приработки; б) для случая, когда общий путь трения в каком-либо режиме меньше пути, необходимого для окончания вторичной приработки. Составлена программа и произведены расчеты износа по данной модели на ЭВМ, которые показали лучшую сходимость с результатами экспериментов, чем расчеты величин износа без учета влияния процессов вторичной приработки - по формуле (3). Погрешность уменьшается на 10-30%.

В пятой главе произведен анализ методов определения характеристик износостойкости материалов направляющих и прогнозирование потери точности станка вследствие изнашивания направляющих на примере станка модели 16К20ФЗ.

В основу прогнозирования положен общий методический подход и модель формирования параметрического отказа, разработанная А.С.Прониковым, а также частная методика В.М.Утенкова. Показано, что прогнозирование потери точности станка включает в себя следующие этапы: - формирование гистограмм распределения входных параметров, влияющих на протекание изнашивания направляющих; - разыгрывание значений входных параметров и моделирование процесса изнашивания направляющих; - определение зон контакта направляющих; - расчет траектории движения вершины резца и расчет показателей точностной надежности станка.

Показано, что непосредственный расчет величин износа на направляющих с учетом процессов вторичной приработки по модели, разработанной в главе 4, представляет значительную сложность даже при использовании для этой цели ЭВМ. Чтобы упростить такие

расчеты, предложено учитывать влияние процессов вторичной приработки путем введения безразмерного поправочного коэффициента η , который представляет собой отношение характеристики износостойкости, определенной с учетом процессов вторичной приработки для заданных условий эксплуатации, например $K_{пр}$, к величине характеристики, определенной без учета вторичной приработки для таких же условий ($K_{фам}$):

$$\eta = K_{пр} / K_{фам}. \quad (13)$$

Разработано два метода определения законов распределения поправочных коэффициентов и их математических параметров: расчетный и экспериментально-расчетный. Экспериментально определены $f(\eta)$, $\bar{\eta}$ и $S(\eta)$, а также уточненные характеристики законов распределения коэффициентов изнашивания материалов направляющих станка модели 16K20ФЗ (см. "Основные результаты и общие выводы", п. 7).

Экспериментально определен коэффициент изнашивания материала направляющих станины станка модели 16K20ФЗ, который эксплуатируется в механическом цехе завода "Красный пролетарий". Его величина составила $0,91 \cdot 10^{-8}$ I/МПа. Для соответствующих условий рассчитан коэффициент изнашивания по результатам настоящей работы ($K_c = 0,77 \cdot 10^{-8}$ I/МПа). Погрешность составила менее 15%, что, по нашему мнению, подтверждает достоверность результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Разработана общая структура методов оценки характеристик износостойкости материалов направляющих, обобщающая результаты теоретических и экспериментальных исследований. Она состоит из следующих операций: а) априорное выявление факторов, влияющих на протекание изнашивания направляющих; б) проведение зондирующих экспериментов для оценки значимости влияющих факторов; в) определение диапазонов изменения и законов распределения влияющих факторов; г) проведение основного эксперимента и полная оценка γ или K методом физико-статистического моделирования; д) частная оценка характеристики износостойкости ускоренным методом и сравнение с результатами п. г); е) определение (при необходимости) закона распределения поправочного коэффициента; ж) уточненная оценка исследуемой характеристики износостойкости.

Показано, что возможны 6 вариантов методов оценки характе-

ристик износостойкости материалов направляющих. Для выбора оптимального необходимо устанавливать показатели эффективности характеристик износостойкости, полученных различными методами, и проводить анализ этих показателей. В качестве таковых нами приняты - достоверность и неопределенность характеристики, а также затраты времени и средств на проведение испытаний. Проведен анализ методов оценки коэффициентов изнашивания K исследованных материалов направляющих. Оценка достоверности K , получаемых различными методами, производилась по суммарной величине относительной погрешности его значений δ . Степень неопределенности K оценивалась путем расчета энтропии $H(K)$ на основе анализа вероятностных характеристик K с точки зрения теории информации. Затраты на определение K различными методами оценивались через обобщенный показатель затрат R , представляющий собой полную себестоимость проведения испытаний. Для окончательного определения оптимального варианта составлена минимизируемая целевая функция:

$$\Theta = \delta \cdot H(K) \cdot R. \quad (14)$$

В заключении работы приведен расчет потери точности конкретного станка модели 16K2013 повышенной точности (№ 25388) вследствие изнашивания направляющих (результаты см. п.10 на стр.16).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В работе показано, что полной характеристикой износостойкости материалов направляющих станков является закон распределения скоростей V (или коэффициентов K) изнашивания и его числовые параметры. Этот закон является основой для прогнозирования точностной надежности станка.

2. Разработан новый вариант оценки характеристик износостойкости материалов методом физико-статистического моделирования процесса изнашивания, при котором с применением методов теории планирования экспериментов определяется аналитическая зависимость исследуемой характеристики от влияющих факторов. Это позволяет исключить проведение повторных экспериментов при изменении законов распределения входных параметров.

3. Разработан метод ускоренного определения математического ожидания исследуемой характеристики износостойкости. Он может

быть применен для ориентировочного прогнозирования точностной надежности и сравнения износостойкости материалов направляющих при разработке конструкций новых станков.

4. Установлено, что изменение режимов работы направляющих приводит к возникновению и протеканию процессов вторичной приработки, которые изменяют общую скорость изнашивания. Так погрешность математического ожидания коэффициента изнашивания материала направляющих станины станка модели 16К2043, определенная без учета влияния процессов вторичной приработки, изменяется в пределах 39% (от +11% до -28%).

5. Выявленные закономерности протекания процессов вторичной приработки показывают, что основное влияние на их характер оказывает отношение давлений и коэффициентов изнашивания в смежных режимах, а также величины пути трения. Поэтому при расчете износа необходимо учитывать не только диапазоны изменения и законы распределения влияющих факторов, но также последовательность и частоту изменения их величин.

6. Разработанная математическая модель процесса изнашивания направляющих скольжения металлорежущих станков, позволяет более достоверно, по сравнению с существующим методом, рассчитывать величины износа (погрешность уменьшается на 10-30%).

7. При оценке характеристик износостойкости материалов предложено учитывать влияние процессов вторичной приработки путем введения поправочных коэффициентов η в характеристики, полученные методом физико-статистического моделирования. Разработана методика определения таких коэффициентов. Экспериментально определены законы распределения их величин для условий работы направляющих станины и каретки станка модели 16К2043 (с 95% доверительной вероятностью - закон нормальный: $\bar{\eta} = 1,24$; $\sigma(\eta) = 0,05$). Получена уточненная оценка коэффициентов изнашивания материалов этих направляющих (с 90% доверительной вероятностью - закон нормальный: - для станины: $K = 0,93 \cdot 10^{-8}$ I/МПа; $\sigma(K) = 0,30 \cdot 10^{-8}$ I/МПа; - для каретки: $K = 2,29 \cdot 10^{-8}$ I/МПа; $\sigma(K) = 0,72 \cdot 10^{-8}$ I/МПа).

8. Разработанная общая структура методов определения характеристик износостойкости показывает, что возможны различные варианты (рассмотрено 6 методов). Для выбора оптимального необходимо производить анализ предложенных показателей эффективности (погрешность оценки коэффициента изнашивания - δ , энтропия -

- $H(K)$ и обобщенные затраты - R) объединенных в виде целевой функции Θ .

9. Сравнение экспериментальных данных с результатами эксплуатационных испытаний показало, что погрешность оценки коэффициента изнашивания материала направляющих станины конкретного станка модели 16K2023 не превышает 15% (расчетный $K_c = 0,77 \cdot 10^{-8}$ I/МПа, фактический $K_c = 0,91 \cdot 10^{-8}$ I/МПа).

10. На основе полученных данных дан прогноз оценки вероятности безотказной работы конкретного станка по параметрам прямолинейности траектории движения вершины резца в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Показано, что использование данного станка, как станка класса точности П, возможно только в течение первого года эксплуатации. Если исследованный станок использовать как станок нормальной точности, то он проработает безотказно в течение 5,6 лет.

11. Экономический эффект от внедрения методики и других мероприятий, разработанных на основе настоящего исследования, составит 15 (пятнадцать) тысяч рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Проников А.С., Додонов В.В., Бугаков А.В. Физико-статистическое моделирование процесса изнашивания направляющих металлорежущих станков. - Надежность и качество машин: Тез. докл. Всесоюзной научно-техн. конф. М., 1981, с.120-121.

2. Бугаков А.В. Метод оценки износостойкости сопряжений механизмов сборочных станков и автоматов для прогнозирования их надежности. - Опыт разработки и внедрения передовых технологических решений в области сборочного производства на предприятиях Минсельхозмаша: Тез. докл. Всесоюзного семинара. Павлодар, 1982, с.82-84.

3. Проников А.С., Бугаков А.В. Вероятностная оценка скоростей изнашивания на основе физико-статистического моделирования. - Трение и износ, 1983, т.IV, № I, с.26-33.

Бугаков

