

На правах рукописи

Грубый Сергей Витальевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМНЫМИ
ПАРАМЕТРАМИ И ПРОЦЕССОМ ИЗНАШИВАНИЯ
ИНСТРУМЕНТОВ КАК ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ**

**Специальность 05.03.01 – Технологии и оборудование механической
и физико-технической обработки**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Москва - 2004

Работа выполнена в МГТУ имени Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Ярославцев В.М.
Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор
технических наук, профессор Гречишников В.А.
Доктор технических наук, старший научный сотрудник
Ашкеров Ю.В.

Ведущее предприятие: ЗЭМ РКК "Энергия" им. С.П. Королева

Защита состоится "_____" _____ 2004 г. в _____ час.
на заседании диссертационного совета Д212.141.06 при Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в 1-м экземпляре, заверенный печатью, просим
направить по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке М
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Телефон для справок 267-09-63.

Автореферат разослан "_____" _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



А.С. Васильев

Подписано к печати 15 . 03 2004 г. Объем 2 п.л. Тир. 100 экз.

Заказ № 34г

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана

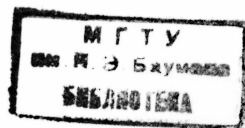
Актуальность темы. Характерной чертой современного этапа развития механосборочного производства является постановка и решение экстремальных задач по поиску оптимальных условий протекания технологических процессов. Подобный рост исследовательского интереса к экстремальным задачам связан с ограниченностью природных, материальных и людских ресурсов, необходимостью жесткой экономии энергии и материалов. Анализ литературных данных и имеющийся производственный опыт показывают, что в краткосрочном периоде развития предприятия существенный эффект может быть достигнут без привлечения значительных трудовых и материальных затрат путем управления режимными параметрами на основе автоматизированного расчета по количественным моделям за счет снижения себестоимости, энергоемкости, повышения производительности и качества обработки.

В долгосрочном периоде прогнозируется развитие чистовых методов, основанных на использовании уникального оборудования и нанотехнологий лезвийной обработки прецизионных деталей машин и приборов, точность размеров, формы и расположения поверхностей которых составляет микрометры или доли микрометров, и эффективность которых определяется прежде всего выбором условий и режимов их применения.

Цель и задачи работы. *Целью работы является разработка методологии управления режимными параметрами и процессом изнашивания инструментов как основы повышения эффективности: снижения переменной части себестоимости и штучного времени, повышения качества поверхностного слоя металлооптических поверхностей - на примере токарной обработки.*

Исходя из результатов анализа, для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи исследования:**

1. Реализовать возможности и обосновать преимущества управления режимными параметрами с использованием нелинейных моделей скорости изнашивания инструментов как средства повышения эффективности лезвийной обработки.
2. Предложить эффективные методики для моделирования нестационарного процесса резания и изнашивания инструмента, и количественные модели как основу оптимизации и управления режимными параметрами.
3. Разработать модель процесса, исследовать закономерности изнашивания резцов из природных алмазов и показатели качества поверхностного слоя при точении протяженных металлооптических поверхностей.
4. Сформулировать интегральные целевые функционалы, разработать математический аппарат и программные алгоритмы для решения численными методами задач по управлению режимными параметрами и процессом изнашивания инструментов как основу базового математического обеспечения САПР ТП.
5. Разработать теоретические основы технологии и управления режимными параметрами алмазного точения протяженных и асферических металлооптических



поверхностей. Предложить научно обоснованный прогноз развития лезвийной обработки поверхностей металлооптики для перспективных лазерных систем.

Методы исследований. Для решения поставленных задач применены экспериментальные методы исследования процесса резания, стружкообразования и изнашивания инструментов, а также теоретические методы и положения векторной и матричной алгебры, теории резания, трибологии, математической теории оптимальных процессов и управления, математической теории многофакторного планирования экспериментов и математической статистики, математического моделирования, методов вычислительной математики и математического программирования (стохастическая аппроксимация, численные методы, нелинейное программирование, минимизация функций) и др. Все разработанные вычислительные алгоритмы и программы имеют оригинальное авторское содержание.

Экспериментальные и технологические исследования проведены в лаборатории кафедры МТ-2 МГТУ и заводской лаборатории МосавтоЗИЛ, на опытно-промышленной базе НПО "Композит" с использованием современных приборов, методов и средств измерений. Достоверность и обоснованность теоретических выводов подтверждена многочисленными экспериментальными данными, в том числе полученными лично соискателем. Результаты исследований, выводы и предлагаемые технические решения прошли производственную проверку.

Научная новизна. Определены теоретические и методологические основы управления режимными параметрами и процессом изнашивания инструментов на примере токарной обработки, в том числе алмазного точения протяженных и асферических металлооптических поверхностей. Впервые на основе экспериментирования и моделирования выявлены количественные связи процесса изнашивания и фрикционного контакта по задней поверхности в виде уравнений скорости изнашивания инструментов как функций режимных и геометрических параметров, величины износа и других факторов. По результатам моделирования даны количественные характеристики процесса алмазного точения металлооптических поверхностей и оценки предельных возможностей метода по качеству поверхностного слоя.

На защиту выносятся **новые научные результаты**:

- основные положения теории и методологии управления режимными параметрами и процессом изнашивания инструментов, основанные на использовании нелинейных моделей скорости изнашивания и направленные на повышение эффективности лезвийной обработки;

- методика моделирования и аппроксимации результатов экспериментальных исследований, и разработки многофакторных полиномиальных моделей характеристик резания и скорости изнашивания инструментов;

- модели процесса косоугольного несвободного резания, стружкообразования и изнашивания резцов из твердых сплавов и нитрида бора как основы оптимизации и управления; расчетная методика исследований обрабатываемости сталей и сплавов;

- модели числа циклов фрикционного контакта микрообъемов изнашиваемой инструментальной поверхности до разрушения;

- многофакторные полиномиальные модели скорости изнашивания резцов из твердых сплавов и сверхтвердых материалов, полученные аппроксимацией экспериментальных данных или теоретическим расчетом для условий обработки широкой гаммы конструкционных сталей и сплавов;

- модель процесса точения металлооптических поверхностей, отражающая связь режимных параметров с характеристиками качества поверхностного слоя, методика выбора и аттестации кристаллов природных алмазов для специальных алмазных резцов и обработки протяженных металлооптических поверхностей;

- технологические аспекты и теоретические основы технологии алмазного точения поверхностей металлооптики, алгоритмы управления режимными параметрами при непрерывном и прерывистом характере обработки протяженных и асферических поверхностей; научный прогноз, перспективы и результаты практического применения метода.

Все результаты исследований, представленные в диссертации, получены лично соискателем или при непосредственном его участии.

Практическая ценность работы заключается в разработке теоретического, методического и программного комплекса, направленного на повышение эффективности лезвийной обработки, в основе которого находятся:

- научно-методическая база - общая методология; комплекс частных методик по исследованиям, аппроксимации, моделированию; методические рекомендации по оптимизации; методика испытаний резцов и исследований обрабатываемости сталей и сплавов; математический аппарат, банки исходных уравнений и расчетных программ - обеспечивающие реализацию управления режимными параметрами лезвийной обработки;

- результаты автоматизированного расчета и варианты управления режимными параметрами на токарных операциях, в том числе для инструментов из твердых сплавов без и с износостойкими покрытиями, режущей керамики, синтетических алмазов, нитрида бора, заготовок из стали, серого чугуна, алюминиевого и титанового сплава в условиях одноинструментной, многоинструментной последовательной и параллельной многопозиционной многоинструментной обработки, а также алмазного точения протяженных металлооптических поверхностей.

Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 121300 "Инструментальные системы машиностроительных производств". Разработана новая учебная дисциплина "Информационные банки и оптимизация механической обработки".

Реализация работы. Результаты работы представлены для реализации в виде методического, математического и программного обеспечения как составляющих автоматизированных систем подготовки производства, управления технологическими процессами и CALS- технологий на машиностроительных и приборо-

строительных предприятиях. Разработанные методические рекомендации по оптимизации, методика испытаний резцов и исследований обрабатываемости сталей и сплавов переданы для практического применения на ряде предприятий.

В период 1986-2001 г.г. проведен комплекс совместных работ с ОАО "НПО Композит", АО "Красный пролетарий", СКТБ ИСМ АН Украины и др. по разработке и освоению специальных станков для обработки поверхностей металлооптики методом алмазного точения. При непосредственном участии соискателя в НПО "Композит" были освоены станки алмазного точения моделей МО1805, САТ1805, САТ1815, МК6516, предназначенные для обработки металлооптических отражателей диаметром до 1500 мм. Создана экспериментально-промышленная база, включая инженерное обеспечение, комплекты технологической оснастки, системы измерений и контроля, лазерные измерители микроперемещений, системы управления от ЭВМ для коррекции погрешностей и возможности обработки асферических поверхностей. Разработаны и внедрены типовые технологические процессы алмазного точения металлооптических поверхностей диаметром до 1000 мм, включая асферические. Внедрение технологических процессов алмазного точения обеспечило существенное снижение трудоемкости, повышение производительности и качества обработки металлооптических крупногабаритных и асферических поверхностей. Изготовлены оптические элементы различных типоразмеров и назначения и переданы для контроля во ВНИИМС, фирму TAYLOR HOBSON и для проведения стендовых испытаний в ОАО "НПО Энергомаш". Разработаны технические требования на станки алмазного точения нового поколения в обеспечение изготовления зеркал перспективных лазерных систем.

Представленные в диссертационной работе исследования по алмазному точению металлооптических поверхностей выполнены в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством соискателя по планам научно-технических программ: грант Министерства образования РФ в 1998-2000 г.г.; "Научные исследования высшей школы в области производственных технологий" в 2000 г.; "Сотрудничество Министерства образования РФ и Министерства обороны РФ по направлению "Научно-инновационное сотрудничество" в 2001-2002 г.г.

Апробация работы. Основные положения работы были доложены и одобрены на: Всесоюзной НТК "Проблемы производства и применения твердых сплавов", Орджоникидзе, 1981 г.; Всесоюзной НТК "Повышение производительности и качества механообработки на машиностроительных предприятиях Сибири и Дальнего Востока", Иркутск, 1983 г.; Всесоюзной НТК "Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических методов обработки", Москва, 1988 г.; семинаре "Обработка деталей оптических систем и электронной техники методом алмазного микроточения", Москва, 1992 г.; четвертой Всероссийской НТК "Состояние и проблемы технических измерений", Москва, 1997 г.; Всероссийской научно-методической конференции "Стратегия развития университетского технического образования в России", Москва, 1998 г.; пятой Всероссийской

НТК "Состояние и проблемы технических измерений", Москва, 1998 г.; Всероссийской НТК "Машиностроительные технологии", Москва, 1998 г.; научно-практической конференции "Алмазный инструмент" на первой международной выставке "Intercool-98", Москва, 1998 г.; межрегиональной научно-практической конференции "Метрологическое обеспечение испытаний и сертификации (ГОСТСТАНДАРТ России)", Москва, 1999 г.; семинаре в рамках научной программы второй международной выставки "Intercool-99", Москва, 1999 г.; шестой Всероссийской НТК "Состояние и проблемы измерений", Москва, 1999 г.; НТК "Технология производства и обработки оптического стекла и материалов", Москва, 2000 г.; научно-практической конференции "НПО Энергомаш", Химки, 2001 г.; Российской НТК "Проблемы определения технологических условий обработки по заданным показателям качества изделий", Рыбинск, 2003 г.; международной НТК "Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения", Орел, 2003 г.; международной НТК "Инструментальные системы – прошлое, настоящее, будущее", Тула, 2003 г.; международной НТК "Контактная жесткость. Износостойкость. Технологическое обеспечение", Брянск, 2003 г.

Полное содержание работы доложено на научных семинарах кафедр: "Автоматизированные технологические системы" Брянского государственного технического университета; "Технология авиационных двигателей и общего машиностроения" и "Металлорежущие станки и инструменты" Рыбинской авиационной технологической академии; "Металлорежущие станки", "Инструментальная техника и технологии" МГТУ им. Н.Э. Баумана - в период 2002-2003 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 60 работ. Под руководством соискателя выполнено 3 научно-исследовательские работы.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 196 наименований, и 10 приложений. Работа содержит 535 страниц, в том числе 265 страниц основного текста, 266 рисунков, 60 таблиц, а также приложений на 33 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обоснована актуальность темы, научные положения и результаты, выносимые на защиту, а также изложена структура работы.

В первой главе показано, что основная рассматриваемая в диссертации проблема повышения эффективности на основе управления режимными параметрами, процессом резания и изнашивания инструментов, используя моделирование, нелинейные модели и оптимизацию как средство, является актуальной для теории и практики лезвийной обработки.

Отмечено, что традиционная практика назначения режима резания имеет субъективную методическую основу, когда рассматривается конечное изношенное состояние режущих инструментов без учета последовательного изменения параметров износа во времени, что не обеспечивает оптимальных условий протекания процесса. Вместе с тем в работах В.А. Гречишникова, Ю.М. Соломенцева,

А.Г. Схиртладзе, В.К. Старкова, М.М. Тверского, В.Н. Подураева, А.Д. Макарова, В.Ф. Безъязычного, В.А. Козлова предлагается использовать принципы оптимизации для выбора условий механической обработки. В ряде работ В.Н. Брюханова, В.А. Медведева, М.С. Невельсона, В.И. Кантора, А.Г. Суслова, А.М. Дальского, А.С. Васильева, Г.Н. Васильева, С.И. Петрушина, А.Е. Древалю, С.В. Лукиной, В.Ц. Зориктуева рассматриваются задачи оптимального управления точностью обработки, изложены основные положения автоматического и адаптивного управления технологическим процессом, направленного формирования качества изделий, оптимизации вариантного конструирования металлорежущих станков, оптимизации свойств инструментального материала и формы режущего лезвия, оптимизации конструкторско-технологических решений при проектировании и эксплуатации режущих инструментов с учетом их надежности, повышения эффективности обработки труднообрабатываемых материалов путем автоматического управления температурно-силовым режимом точения.

По результатам анализа методов и средств оптимизации процесс резания и изнашивания инструмента в диссертации представлен как управляемый детерминированный целенаправленный процесс, характеризующийся известной целью управления, достижение которой возможно через закономерное изменение во времени управляемых (режимных) параметров. Процесс резания внешне проявляется через процесс изнашивания режущего инструмента и, учитывая нелинейный характер моделей, описывается системой уравнений конечно-разностного типа:

$$X_{j+1} = F_j(X_j, U_j, P_j), \quad (1)$$

где вектор X_j ; $j = 1, 2, \dots, N-1$ - имеет компоненты - фазовые координаты и определяет состояние процесса в данный момент времени. Вектор U_j - вектор управления содержит в качестве компонентов управляемые (режимные) параметры, а вектор P_j является вектором параметров, характеризующих условия обработки. Фазовые координаты и вектор управления должны удовлетворять системе технологических ограничений

$$G = (X, U, P) \leq 0, \quad (2)$$

где $G = [G_1, G_2, \dots, G_N]$ - заданная вектор-функция. В соответствии с формулировкой общей задачи оптимального управления требуется найти такую дискретную функцию управления $U = [U_1, U_2, \dots, U_N]$, которая переводит систему уравнений (1) из начального состояния $X(0)$ в конечное $X(N)$ с учетом ограничений (2) так, чтобы целевой функционал достигал экстремального значения:

$$W = \text{extr} W(X, U, P); (X, U) \in G. \quad (3)$$

В качестве фазовой координаты, характеризующей состояние процесса изнашивания, использована величина износа по задней поверхности инструмента. Тогда система (1) сведена к рекуррентному соотношению

$$h_{z,j+1} = h_{z,j} + I_{nt,j}(h_{z,j}, u_{1,j}, u_{2,j}, \dots, p_{1,j}, p_{2,j}, \dots) \cdot \delta_t; \quad j = 1, 2, \dots, N-1, \quad (4)$$

где $I_{nt,j}$ - скорость изнашивания инструмента как функция величины износа, режимных и других параметров; δ_t - дискретное значение по времени обработки, определяет число точек управления.

Общий концептуальный замысел работы заключается в использовании уравнений, характеризующих скорость изнашивания инструментов, для последовательного описания процесса во времени и управления режимными параметрами. Проблема управления сводится к математическому описанию функции скорости изнашивания, ограничений (2), функционала качества управления (3), а также к выбору и адаптации математических методов и средств оптимизации применительно к рекуррентным соотношениям величины износа (4). В частности, в зависимости от формулировки вычислительной задачи в качестве функционала (3) в последующих главах работы проанализированы интегральные целевые функционалы, минимизирующие по точкам управления переменную часть себестоимости обработки деталей на операции, штучное время, погрешность, шероховатость обработанной поверхности, энергозатраты, а также стабилизирующие скорость изнашивания инструмента и температуру резания.

В методологическом аспекте рассматриваемая проблема является предметом системотехники и направлена на повышение эффективности процессов механической обработки резанием, а в методическом аспекте дополняет математическое, программное и информационное обеспечение САПР. Задача поиска функций $I_{nt,j}$, входящих в (4), является одной из совокупности задач по формированию автоматизированных систем технологической подготовки производства. Алгоритмы управления предназначены для реализации автоматизированными системами управления технологическими процессами АСУТП на уровне цеха и участка механической обработки, в состав которых входит оборудование с системами ЧПУ и программируемыми контроллерами.

Рассмотренные методики нашли проверку по экспериментальным данным, полученным для токарных проходных резцов из различных инструментальных материалов. В работе обобщены многолетние исследования, проведенные на кафедре "Инструментальная техника и технологии" при непосредственном участии соискателя в соответствии с общим методическим подходом школы резания металлов МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронные базы данных включают значения: износа и стойкости резцов с твердосплавными СМП при обработке стали марки 60 на основании 125 кривых износа и 500 измеренных значений величин износа; сил резания для резцов с твердосплавными СМП различных марок при обработке 10 марок сталей в различном состоянии на основании 497 опытов; шероховатости обработанной поверхности на стальных заготовках по 186 опытам; износа и стойкости резцов, оснащенных СМП из твердого сплава и режущей керамики, при обработке серого чугуна марок СЧ21 и СЧ24 на основании 167 кривых износа и 851 измерен-

ных значений величин износа; шероховатости обработанной поверхности на заготовках из серого чугуна на основании 38 опытов; износа и стойкости синтетических алмазных резцов АСПК, АСБ при обработке алюминиевых сплавов Д16, 01541 на основании 20 кривых износа; износа и стойкости резцов с СМП Томал-10 при обработке закаленной стали 40Х на основании 3 кривых износа; износа и стойкости твердосплавных резцов при обработке титанового сплава ВТ3-1 на основании 8 кривых износа и 46 измеренных значений величин износа; шероховатости и глубины наклепа поверхностного слоя на заготовках из титанового сплава на основании 28 опытов. Таким образом, закономерности изнашивания резцов отражают 323 кривые износа, из которых 292 получены экспериментальными исследованиями при непосредственном участии соискателя, а остальные заимствованы из литературных источников с приведенными ссылками.

Разрабатываемые алгоритмы управления режимными параметрами приобретают особую значимость и актуальность для алмазного точения поверхностей металлооптики, относящейся к классу перспективных нанотехнологий. Так, допустимые макроотклонения поверхностей оптических элементов, входящих в лазерные резонаторы и системы транспортировки и фокусировки лазерного излучения, определяются типом лазера и доходят до значений величин $\lambda/40$, где λ – длина волны лазерного излучения. Отражательная способность металлооптической поверхности должна характеризоваться коэффициентом зеркального отражения до 0.99 и выше, коэффициентом поглощения менее 0.01, шероховатостью $R_{\max} < 50$ нм.

В работе дан подробный анализ условий алмазного точения, технических требований и характеристик специальных токарных станков. Отмечено, что на протяжении ряда лет соискатель принимал непосредственное участие в совместных работах с рядом организаций по созданию гаммы станков алмазного точения (мод. МО1805, САТ1805, САТ1815 – разработка СКТБ с ОП ИСМ под руководством Г.Г. Добровольского, М.А. Соломко; МК6516, МК6521Ф3 – разработка МСПО "Красный пролетарий" под руководством Г.В. Маринина, В.С. Горохова) и их внедрению на производственно-экспериментальной базе НПО "Композит" в коллективе под руководством И.В. Милова, В.П. Наумкина. Особый интерес представляет обработка крупногабаритных поверхностей на отражателях диаметром до 1500 мм на уникальном крупногабаритном станке мод. САТ1815. В результате комплекса работ по созданию, внедрению и практическому применению этого станка были получены эталонные для отечественного станкостроения результаты по точности лезвийной обработки крупногабаритных и асферических поверхностей. Предельные возможности алмазного точения металлооптических поверхностей по качеству обработки реализуются, если применены резцы, оснащенные монокристаллами природных алмазов, учитывая их уникальные свойства. В проведенных технологических исследованиях использованы алмазные резцы ИР292, ИР361 и специальные, предназначенные для обработки крупногабаритных металлооптических поверхностей.

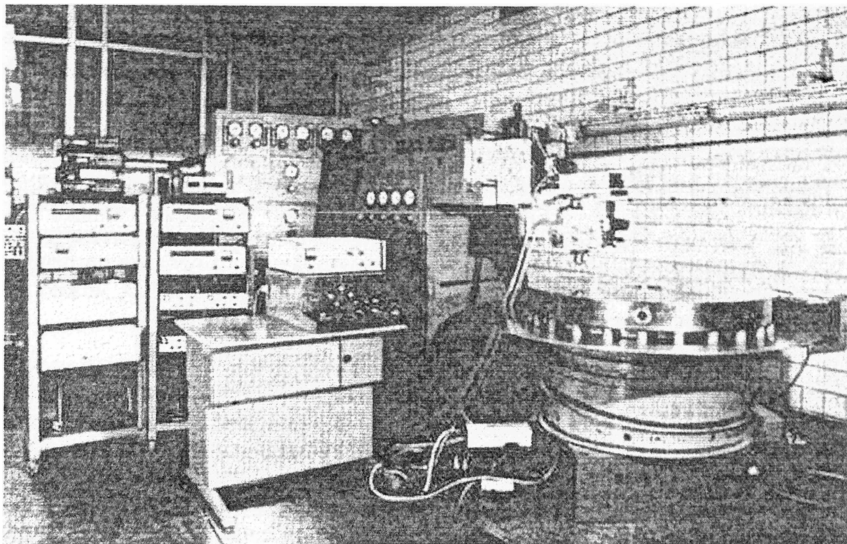


Рис. 1. Общий вид станка алмазного точения мод. CAT1815

Во второй главе поставлена и решена задача по разработке многофакторных полиномиальных моделей характеристик резания и скорости изнашивания инструментов на базе аппроксимации экспериментальных данных в рамках общей функции

$$y_i = \eta(x_i) + \epsilon_i = \sum_{j=1}^k b_j \cdot f_{ij}(x_i) + \epsilon_i ; i = 1, 2, \dots, N \text{ или в матричном виде } y = \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{f}(x), (5)$$

где N - общее число точек, k - число коэффициентов (членов) модели, x_i - матрица-столбец входных переменных, $f_{ij}(x_i)$ - функции (полиномы), b_j - неизвестные коэффициенты, ϵ_i - суммарная ошибка, $\mathbf{B}$ - матрица коэффициентов. На первом этапе реализованы трехфакторные планы проведения опытов и получены оценки коэффициентов полиномиальных моделей по методу наименьших квадратов (МНК). Отмечена неэффективность МНК при произвольном расположении опытных точек в факторном пространстве вследствие неопределенности случайного отклонения, вызванной изменением дисперсии опыта по области планирования. В частности, показано существенное влияние скорости резания на дисперсию опыта стойкости. С учетом особенностей МНК предложено использовать для расчета коэффициентов метод стохастической аппроксимации (МСА), который не

накладывает ограничений на число и расположение точек в факторном пространстве, на количество, порядок, вид взаимодействий факторов и число членов моделей. Общая теоретическая проработка метода как одного из методов вычислительной математики выполнена в ряде работ со ссылками в диссертации и впервые метод предложен для многофакторной аппроксимации зависимостей резания металлов в работах соискателя. Алгоритм МСА предусматривает осуществление вычислительных процедур, когда матрица коэффициентов уточняется на каждой итерации последовательно и многократно по каждой опытной точке, а программный алгоритм предписывает цикл по базе данных до тех пор, пока средняя погрешность аппроксимации не станет меньше заданной. Общую процедуру МСА можно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$B_r = B_{r-1} + g_r \cdot f(x_i) \cdot [y_{ei} - B_{r-1}^T \cdot f(x_i)] \quad (6)$$

где y_{ei} - экспериментальное значение функции в i -ой точке; $g_1, \dots, g_r$ - последовательность положительных чисел; r - номер итерации. Получено около 30 итоговых уравнений по аппроксимации функций периода резания, величины износа, скорости резания, сил резания, энергозатрат, шероховатости обработанной поверхности, глубины наклепа и др. Эти уравнения имеют сложную структуру, в ряде случаев включают в исходном состоянии до 100 и более членов с учетом большого числа сильнодействующих факторов, что характерно для процесса резания и изнашивания инструментов. Например, общая модель периода резания (T , мин) отражает влияние кодированных факторов - скорости резания, подачи, глубины, величины износа, угла в плане, угла наклона кромки, переднего угла, угла при вершине, переднего угла на стружечной канавке, фаски на передней поверхности, радиуса при вершине, заднего угла - при обработке стали марки КНТ16; имеет УП порядок взаимодействия факторов, 119 членов в исходном состоянии, обобщает 500 опытных точек:

$$\begin{aligned} \lg(T) = f(v, s, t, h_z, \varphi_0, \lambda_0, \gamma_0, \varepsilon, \gamma_k, f, r, \alpha_0) = \sum_{j=1}^{119} b_j \cdot f_{ij}(x_i) = & b_1 + b_2 \cdot v + b_3 \cdot t + b_4 \cdot h_z + \dots \\ & + b_{11} \cdot v^2 + b_{12} \cdot s^2 + b_{13} \cdot t^2 + b_{14} \cdot h_z^2 + \dots + b_{40} \cdot v \cdot t + b_{41} \cdot v^2 \cdot t + b_{42} \cdot v^2 \cdot s + b_{43} \cdot v \cdot s^2 + \dots \\ & + b_{72} \cdot v^2 \cdot h_z + b_{73} \cdot s^2 \cdot h_z + b_{74} \cdot t^2 \cdot h_z + b_{75} \cdot s \cdot t \cdot h_z + b_{76} \cdot v^3 \cdot h_z + \dots \\ & + b_{102} \cdot v \cdot \varphi_0^3 + b_{103} \cdot v^2 \cdot \varphi_0 + b_{104} \cdot v^3 \cdot \varphi_0 + \dots + b_{117} \cdot h_z \cdot \varphi_0^3 + b_{118} \cdot h_z^2 \cdot \varphi_0 + b_{119} \cdot h_z^3 \cdot \varphi_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Расчетный анализ многофакторных полиномиальных уравнений показал, что они представляют собой гладкие дифференцируемые функции, однозначно определяющие поведение соответствующих экспериментальных значений в исследованной области факторного пространства. Погрешности аппроксимации уменьшаются до значений погрешности опыта с увеличением до определенного предела числа членов модели и количества итераций. Связь расчетных и исходных значе-

ний практически линейная с высоким коэффициентом корреляции. Показана возможность использовать процедуры численного решения трансцендентных уравнений для анализа изолиний сил резания, мощности, энергозатрат, себестоимости обработки, расположенных в факторных плоскостях. Впервые раскрыта возможность по аппроксимации скорости изнашивания режущих инструментов полиномиальными многофакторными моделями по алгоритму МСА (6). Для этого каждая экспериментальная кривая износа была представлена рядом пар значений "скорость изнашивания – величина износа"; в расчетном алгоритме было использовано до нескольких тысяч исходных значений одновременно. Итоговое уравнение скорости изнашивания (I_{nt} , мм/мин) твердосплавных резцов при обработке стали имеет исходную структуру, аналогичную уравнению (7), т.е.

$$\lg I_{nt} = b_1 + b_2 v + b_3 t + b_4 h_z + b_5 \varphi_0 + b_6 \lambda_0 + \dots + b_{119} h_z^3 \varphi_0, \quad (8)$$

где факторы включены в кодированном виде.

Уравнение скорости изнашивания сборных резцов, оснащенных СМП из сплава ВК6, при обработке серого чугуна в исходном состоянии включает 87 членов, учитывает влияние в кодированном виде режимных параметров, величины износа, геометрических параметров инструмента, твердости чугуна, получено по 990 значениям исходных данных:

$$\lg I_{nt} = b_1 + b_2 v + b_3 t + b_4 h_z + b_5 s + b_6 \varphi_0 + b_7 \lambda_0 + b_8 \gamma_0 + b_9 \varepsilon + b_{10} HB + \dots + b_{87} HB^4. \quad (9)$$

Аналогично получены полиномиальные уравнения скорости изнашивания: резцов из твердых сплавов различных марок и режущей керамики при обработке серого чугуна; алмазных синтетических резцов при обработке алюминиевых сплавов; резцов с СМП Томал-10 при обработке закаленной стали; твердосплавных резцов при обработке титанового сплава. Анализ уравнений типа (8) – (9) показывает, что на скорость изнашивания оказывают влияние все исследованные факторы, прежде всего – режимные параметры, величина износа, геометрические параметры инструмента, свойства инструментального и обрабатываемого материалов. Проведен дополнительный анализ по расчету стойкости инструмента численным интегрированием по различным квадратурным формулам (прямоугольников, трапеций, Симпсона, Гаусса) с использованием уравнений скорости изнашивания.

Структурная оптимизация уравнений выполнена методом последовательного исключения переменных. Отмечено общее уменьшение числа членов, для ряда моделей существенное, после оптимизации структуры, и тенденция роста числа членов моделей с увеличением числа задействованных факторов и объема данных. Так, по 29 уравнениям установлена связь в виде соотношения: $k = 1.26 \cdot (f \cdot N)^{0.41}$ – между числом членов уравнений и произведением числа факторов на число исходных данных. Матрицы полиномов и коэффициентов некоторых моделей в исходном состоянии и после структурной оптимизации приведены в ПРИЛОЖЕНИИ 1 – 7 диссертации. Разработанная методика рекомендована для аппроксимации результатов многофакторных экспериментов: математического (вычислительного) и фи-

зического, активного (лабораторного) и пассивного (производственного) - в различных областях науки и техники.

В третьей главе впервые получены расчетные модели скорости изнашивания резцов из твердого сплава и нитрида бора по результатам физического и математического моделирования. Отмечено, что трудами таких отечественных и зарубежных ученых как В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев, А.М. Розенберг, Т.Н. Лоладзе, А.Н. Резников, М.В. Полетика, А.И. Бетанели, Г.Л. Куфарев, В.А. Остафьев, С.С. Силин, И.П. Третьяков, А.С. Верешака, В.М. Ярославцев, В.С. Кушнер, С.И. Тахман, Ю.Г. Кабалдин, С.А. Васин, И.Дж. Армарего, Р.Х. Браун, Е.М. Трент и др. изучены механика процесса резания, зона стружкообразования, контактные процессы, силы и тепловые явления, характеристики прочности, износа и стойкости режущих инструментов. Однако предложенные количественные соотношения не доведены до уровня расчета скорости изнашивания инструментов как функций режимных параметров, величины износа и других факторов. Эта задача решена на примере разработки расчетной физической модели процесса косоугольного несвободного резания, стружкообразования и изнашивания резцов для условий обработки конструкционных сталей и сплавов. Область существования модели определена для механизма адгезионно-усталостного изнашивания в условиях пластического контакта и температур до 1000 °С на задней поверхности инструмента. Отличительной особенностью разработанной модели является установленная количественная связь выходных параметров – скорости изнашивания и величины износа инструмента с первичными – режимными, геометрическими параметрами и характеристиками обрабатываемого и инструментального материалов. Модель включает математическую интерпретацию: геометрии режущего лезвия сборного резца с прямолинейной и радиусной частью кромки; направления схода стружки, заданного суммарным вектором по элементарным участкам на кромке; параметров сечения срезаемого слоя с эффективной толщиной среза в направлении схода стружки; поверхности сдвига с переменным значением угла сдвига вдоль кромки; пятна контакта стружки с передней поверхностью; сил стружкообразования по элементарным участкам через среднее касательное напряжение на поверхности сдвига и общим действием сил на СМП в направлении схода стружки; контактного давления; параметров фрикционного контакта по задней поверхности инструмента. Так, предложены выражения для расчета углов сдвига по участкам на режущей кромке в виде:

- по прямолинейной части главной режущей кромки, рад

$$\beta_0 = \beta \cdot (1 + k_b \delta_{c0}) + \beta \cdot k_{db} \cdot |\lambda_0| ; \quad (10)$$

- по радиусной части главной режущей кромки, рад

$$\beta_i = \beta \cdot (1 + k_b \delta_{ci}) + \beta \cdot k_{db} \cdot |\lambda_i| , \quad (11)$$

где β - среднее значение угла сдвига; δ_c - углы между общим вектором схода стружки и условным вектором схода на элементарном участке; λ - углы наклона

кромки; коэффициент $k_b = 0.1$ учитывает влияние направления схода стружки; коэффициент $k_{ab} = 2.45$ - наклона участка режущей кромки. Среднее значение угла сдвига отражает обобщенное положение условной плоскости сдвига с учетом свойств инструментального и обрабатываемого материалов, и влияния скорости резания. Тогда толщина стружки выражается через толщину среза и углы сдвига. Коэффициент утолщения стружки имеет переменное значение вдоль режущей кромки и уменьшается с ростом угла наклона кромки, снижением радиуса при вершине и увеличением подачи инструмента.

Основываясь на молекулярно-механической теории трения, коэффициент трения по задней поверхности лезвия принят состоящим из молекулярной (адгезионной) f_m и деформационной (механической) f_d составляющих:

$$f_{tr} = f_m + f_d = \tau_0 / p_c + \beta_0 + f_d, \quad (12)$$

где τ_0 определяет прочность адгезионного шва при отсутствии сжимающих напряжений, p_c – среднее нормальное давление на контактной поверхности, β_0 – коэффициент упрочнения адгезионных связей. На основании обработки данных Г.И. Грановского, Б.И. Костецкого, А.Д. Макарова, Л.Ш. Шустера по адгезионному взаимодействию при трении твердых сплавов и быстрорежущих сталей по углеродистым, легированным, жаропрочным и жаростойким сталям и сплавам предложены аппроксимации параметра τ_0 и коэффициента β_0 от температуры.

Для расчета деформационной составляющей коэффициента трения неровности шероховатости моделировались сферическими сегментами одинакового радиуса расположенными так, что опорная кривая поверхности модели и реальной инструментальной поверхности совпадают. Молекулярная составляющая имеет тенденцию к уменьшению, а деформационная составляющая несколько увеличивается с ростом температуры задней поверхности. Деформационная составляющая, а значит и общий коэффициент трения увеличиваются с ростом шероховатости задней поверхности инструмента.

По результатам обработки опубликованных опытных данных установлены количественные аппроксимации влияния температуры на: твердость однокарбидных и двухкарбидных твердых сплавов; микротвердость твердых сплавов с износостойкими покрытиями; твердость нитрида бора; теплопроводность твердого сплава; твердость и прочность обрабатываемых сталей и сплавов.

Механизм адгезионно-усталостного изнашивания применительно к парам трения различного назначения изучен в ряде работ И.В. Крагельского, М.Н. Добычина, В.С. Комбалова, В.В. Алисина, Б.И. Костецкого, Н.Б. Демкина, Э.В. Рыжова, А.Г. Суслова. Выражение для расчета нормальной интенсивности изнашивания поверхности трения имеет вид или после преобразований:

$$I_{n0} = \frac{\alpha \cdot b_2 \cdot \varepsilon^{v_2+1} \cdot R \max_2 \cdot \eta_{ca}}{(v_2 + 1) \cdot d_2 \cdot n_2} = \frac{v_2^{0.5} \cdot R \max_2^{0.5} \cdot \eta_{ca}^{2+1/(2v_2)}}{2\sqrt{2} (v_2 + 1) \cdot b_2^{1/(2v_2)} \cdot r_2^{0.5} \cdot n_2}, \quad (13)$$

где n_2 – число циклов фрикционного контакта микрообъемов поверхностного слоя инструментального материала до разрушения; b_2 , v_2 – параметры аппроксимации начального участка относительной опорной кривой профиля; $R_{\max 2}$ – параметр шероховатости; η_{ca} – отношение площадей контакта фактической и номинальной; d_2 – средний диаметр пятен контакта; коэффициент α характеризует вид контакта, для условий пластического контакта $\alpha = 1$. Вместе с тем подобные зависимости не находят применения для расчета интенсивности изнашивания поверхностей инструментов в связи с отсутствием количественных соотношений для числа циклов n_2 .

Выражение (13) преобразовано к виду, когда число циклов фрикционного контакта является функцией интенсивности изнашивания и остальных параметров. В свою очередь, параметры фрикционного контакта зависят от среднего контактного давления, поверхностной твердости, коэффициента трения и средней температуры контакта. Взаимная связь этих величин определена в рамках рассмотренной физической модели, а количественные соотношения учитывают влияние температуры контакта T_2 на характеристики инструментального и обрабатываемого материалов. В работе предложена функциональная связь для числа циклов фрикционного контакта до разрушения микрообъемов инструментальной поверхности с параметрами, входящими в физическую модель, в виде:

- для твердого сплава без покрытий

$$\begin{aligned} n_2 &= f_1(v, t, s, h_z, I_{n0}, HV|_{T_2}, E_2, \lambda_2|_{T_2}, HB_1|_{T_2}, E_1, r_2, f_{tr}, \dots) = \\ &= f_2(HV|_{T_2}, q_z, r_2); \end{aligned} \quad (14)$$

- для твердого сплава с износостойкими покрытиями

$$n_2 = f_1(v, t, s, h_z, I_{n0}, H_\mu|_{T_2}, E_2, \lambda_2|_{T_2}, HB_1|_{T_2}, E_1, r_2, f_{tr}, \dots) = f_2(H_\mu|_{T_2}, q_z, r_2);$$

- для нитрида бора

$$n_2 = f_1(v, t, s, h_z, I_{n0}, HV|_{T_2}, E_2, \lambda_2, HB_1|_{T_2}, E_1, f_{tr}, \dots) = f_2(HV|_{T_2}, p_r),$$

где функция f_1 характеризует первый уровень связей, в том числе с интенсивностью изнашивания I_{n0} , рассчитанной по экспериментальным кривым износа для твердого сплава или по справочным стойкостным зависимостям для нитрида бора; твердостью HV или H_μ , модулем упругости и коэффициентом теплопроводности E_2, λ_2 инструментального материала; твердостью и модулем упругости HB_1, E_1 обрабатываемого материала; коэффициентом трения f_{tr} на задней поверхности и др. параметрами.

Проводя аналогию с моделью изнашивания А.С. Проникова, отражающую в качестве основных факторов контактное давление, скорость трения и твердость изнашиваемого материала, и учитывая установленную связь скорости резания с уровнем контактного давления и температурой задней поверхности лезвия, впервые предложено функцией f_2 характеризовать второй уровень связей для уравне-

ний (14): с твердостью твердого сплава или микротвердостью покрытия как функций температуры контакта; номинальным контактным давлением q_z и значением радиуса микронеровностей твердосплавной поверхности r_z ; с твердостью нитрида бора как функцией температуры и фактическим контактным давлением p_r . Исходная база данных по числу циклов фрикционного контакта была сформирована для условий: обработки стали марки 60 сборными токарными твердосплавными резцами с СМП четырех форм в диапазонах режимных параметров: скорость резания $0.5 \div 5$ м/с, глубина $0.7 \div 4$ мм, подача $0.1 \div 0.6$ мм/об, величина износа 0.3 мм, и содержит 1676 значений; обработки закаленной стали марки ШХ15 HRC 62 резцами из нитрида бора в диапазонах режимных параметров: скорость резания $1.2 \div 5.8$ м/с, глубина $0.2 \div 1.5$ мм, подача $0.03 \div 0.23$ мм/об, величина износа 0.5 мм, и содержит 201 значение.

Анализируя выражения (14), следует отметить, что функции f_2 характеризуют единый адгезивно-усталостный механизм изнашивания задней поверхности инструмента и поэтому имеет обобщающий характер для различных значений режимных параметров, величин износа, марок инструментальных материалов и конструкционных сталей. Количественные выражения функции f_2 найдены в рамках трехфакторной полиномиальной модели седьмого порядка, содержащей в исходном состоянии 27 членов и представленной в общем виде:

$$\lg(n_2) = b_1 + b_2 \tilde{H}V + b_3 \tilde{q}_z^7 + b_4 \tilde{r}_z^2 + \dots + b_{15} \tilde{q}_z^7 + \dots + b_{27} \tilde{r}_z^5, \quad (15)$$

где коэффициенты $b_1 \dots b_{27}$ рассчитаны с использованием алгоритма МСА (6), факторы включены в кодированном виде.

p_r , МПа

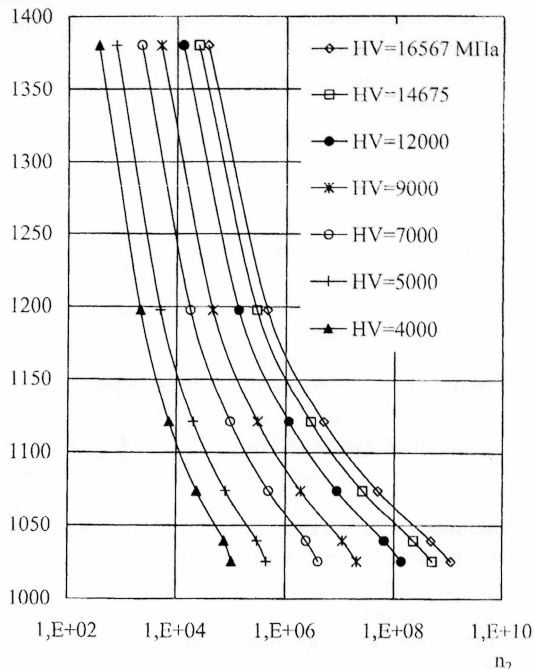


Рис. 2. Кривые фрикционной усталости твердых сплавов без износостойких покрытий для различной поверхностной твердости

Установлены количественные соотношения между отношением площадей контакта фактической и номинальной η_{ca} с номинальным контактным давлением q_z для твердосплавной изнашиваемой поверхности. Физический смысл этих соотношений заключается в том, что с ростом номинального давления увеличивается фактическая площадь

контакта, что приводит к снижению фактического давления на пятнах контакта, и наоборот. По аналогии с кривыми объемной выносливости материалов впервые получены расчетные кривые фрикционной усталости твердых сплавов, связывающие фактическое контактное давление с числом циклов фрикционного контакта до разрушения - рис. 2. По результатам проведенного анализа подчеркнута общая тенденция изменения числа циклов фрикционного кон-

такта для твердых сплавов без и с износостойкими покрытиями при обработке конструкционных сталей и сплавов, и нитрида бора при обработке закаленной стали - рис. 3. Число циклов снижается с увеличением фактического контактного давления на пятнах контакта и возрастает с увеличением поверхностной твердости инструментального материала. Кривые, приведенные на рис. 3, описаны полиномиальным уравнением одного вида (15) и тремя матрицами коэффициентов, учитывая значительные расхождения по диапазонам твердости твердых сплавов, износостойких покрытий и нитрида бора.

Анализируя физическую модель, следует отметить рост температуры контакта, уменьшение номинального контактного давления и поверхностной твердости инструментального материала и обрабатываемой стали с увеличением износа задней поверхности инструмента. Отмечена тенденция увеличения отношения площадей контакта η_{ca} и среднего диаметра пятен контакта d_z с увеличением прочности обрабатываемого материала, что одновременно с ростом температуры объясняет причину роста интенсивности изнашивания инструментов при обработке

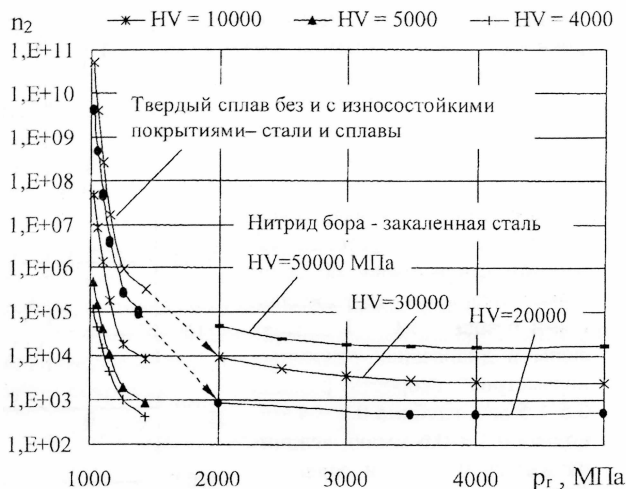


Рис. 3. Влияние фактического контактного давления на число циклов для различных значений твердости

труднообрабатываемых материалов. Предложена расчетная методика для оперативного автоматизированного анализа процесса изнашивания резцов и обрабатываемости конструкционных сталей и сплавов. Анализ расчетных зависимостей износа, скорости изнашивания, стойкости резцов с СМП из различных марок твердых сплавов без и с износостойкими покрытиями, и нитрида бора при обработке материалов в диапазоне от алюминиевого сплава и углеродистых сталей до высоколегированных коррозионно-стойких и жаростойких сталей и сплавов, включая титановый сплав, показывает их полное соответствие по качественным и количественным показателям опубликованным экспериментальным данным.

Результаты физического моделирования процесса изнашивания твердосплавного инструмента для частных случаев токарной обработки предложено использовать в виде многофакторных полиномиальных уравнений, характеризующих влияние на скорость изнашивания изученных факторов. Такой подход позволяет применить единый математический, программный аппарат и процедуры оптимизации как для уравнений, полученных на основе аппроксимации экспериментальных данных в главе 2, так и для уравнений, рассчитанных по результатам моделирования. Сформирована многотысячная база данных, содержащая значения скорости изнашивания сборных резцов с СМП из твердых сплавов без и с износостойкими покрытиями при обработке различных марок сталей и сплавов. Матрицы полиномов и коэффициентов для уравнений скорости изнашивания резцов Т5К10-ТiС при обработке стали 40Х, резцов ВК8 при обработке титанового и жаропрочного сплавов приведены в ПРИЛОЖЕНИИ 8, резцов Т15К6 с различными геометрическими параметрами при обработке стали 60 – в ПРИЛОЖЕНИИ 9 диссертации.

В четвертой главе осуществлено развитие и детализация модели процесса резания и изнашивания инструментов применительно к условиям алмазного точения поверхностей металлооптики. Проведен комплекс исследований (совместно с "Гиналмаззолото") и разработана методика выбора и аттестации кристаллов при-

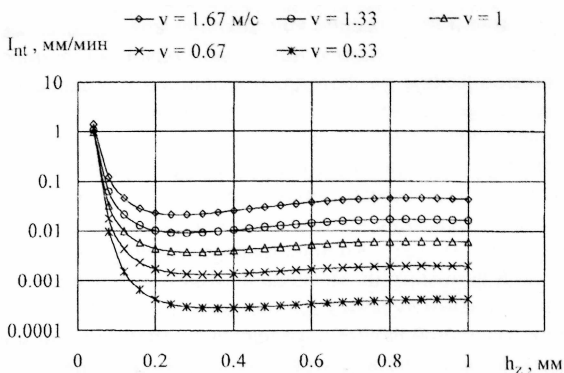


Рис. 4. Расчетные кривые скорости изнашивания резцов ВК8 при обработке титанового сплава ВТ3-1; $t = 2$ мм, $s = 0.22$ мм/об

1668359

родных алмазов, обеспечивающая повышение износостойкости резцов. Внутреннее строение и напряжение кристаллической решетки исследовали методами: поляризационно-оптическим с помощью поляризационного микроскопа МПС-2У42, фотометрическим на фотополяризационном микроскопе "Opton" с автоэкспонометром. Электронно-микроскопические исследования поверхности {111} исходных кристаллов и рабочих поверхностей резцов {100} и {110} после предварительной огранки, после доводки перед эксплуатацией и после рекуперации из резца проведены на электронном микроскопе-анализаторе ЭММА-2 методом реплик. Напряженное состояние кристаллической решетки и наличие примесей изучено в поляризованном свете. Количественную оценку яркости провели методом микроскопической фотометрии. Изучена фотолюминесценция алмазов при облучении ультрафиолетовыми лучами с длиной волны 256 и 365 нм. Концентрация примесного азота в различной форме определена с использованием спектрофотометрического метода поглощения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра на спектрофотометре "Perkin Elmer-402,983". По результатам предварительной аттестации отобрана коллекция из 35 кристаллов, которые были использованы для изготовления резцов повышенной износостойкости.

Накоплен положительный многолетний опыт при непосредственном участии соискателя по алмазному точению поверхностей металлооптических элементов различных типоразмеров и назначения. Окончательное алмазное точение выполняется в диапазонах режимных параметров при $s \leq 9$ мкм/об и $t = 3 \div 4$ мкм и обеспечивает получение медных и алюминиевых поверхностей оптического класса. В качестве СОТС используется спирто-воздушная смесь при подаче в зону резания со стороны передней поверхности резца с расходом спирта 100...130 мл/ч. Период стойкости резцов оценивали по суммарному пути резания до выхода параметров качества поверхностного слоя за пределы допустимого. Средние значения стойкости алмазных резцов составляют: при непрерывном характере обработки 191.1 км по пути резания; при прерывистом характере – 69.7 км. Определены количественные оценки изнашивания алмазных резцов: интенсивность изнашивания тангенциальная (в направлении скорости резания) $I_t = 2.2554 \cdot 10^{-10} \cdot L^{-0.463} \cdot I_d$; скорость изнашивания тангенциальная, мм/мин, $I_{nt} = I_t \cdot v$; интенсивность изнашивания нормальная $I_{n0} = I_t \cdot \text{tg}(\alpha_0)$, где L – путь резания, км; v – скорость резания, мм/мин; α_0 – задний угол, $I_d = 2.74$ – коэффициент повышения интенсивности изнашивания при прерывистом характере обработки. Процесс изнашивания алмазных резцов характеризуется малой интенсивностью $\sim (1 \div 5) 10^{-11}$, величина которой на несколько порядков меньше, чем интенсивность изнашивания твердосплавных инструментов.

Наилучшие результаты по шероховатости поверхностного слоя получены при алмазном точении мелкокристаллического сплава системы алюминий-магний. Результаты исследований шероховатости по параметру R_{max} составили: диапазон

изменения $14,2 \pm 25,3$ нм; среднее 17,3 нм (46 измерений, подача $6,3 \pm 9,6$ мкм/об). Влияние подачи на значения параметров шероховатости аппроксимировано степенными зависимостями. Шероховатость по параметру $R_{\max}$ со значением менее 50 нм обеспечивается при значениях подачи менее 9 мкм/об, что позволяет использовать эти поверхности как отражающие в оптических элементах различного назначения. Спектральные характеристики отражения оптических поверхностей образцов после алмазного точения измеряли на спектрофотометрах "У-3400" и "270-50" фирмы "НТАСНИ" с использованием приставок на отражение. Коэффициенты зеркального отражения образцов на длине волны 10,6 мкм и угле падения излучения, близком к нормальному, измеряли на ИК- спектрофотометре "270-50" с использованием приставки на отражение "IRR-31" путем сравнения с калиброванным стандартом. Поверхности натуральных изделий на длине волны 10,6 мкм контролировали на специальном стенде с погрешностью $\pm 0,2\%$. Для поверхностей, обработанных алмазным точением, характерна высокая отражательная способность. В ИК- области спектра отражательная способность оптических поверхностей после алмазного точения практически соответствует отражательной способности оптических поверхностей после полирования - доводки.

Проведен анализ кинематических схем обработки на станках алмазного точения, геометрических параметров инструмента, в т.ч. кинематических. Разработана модель процесса алмазного точения, которая устанавливает связь режимных параметров, обеспечивающих долемикронные толщины среза, с погрешностями обработки. Анализ модели показывает следующее: контактное давление на задней поверхности алмазного резца при движении от периферии к центру вращения медной заготовки диаметром 1000 мм (частота вращения 150 об/мин, глубина 4 мкм, скорость подачи 1.37 мм/мин) уменьшается в пределах от 180 до 130 МПа; коэффициент трения на задней поверхности алмазного резца определяется в основном молекулярной составляющей и составляет 0.06 ± 0.07 ; силы резания находятся в пределах от десятых до сотых долей Ньютона; температура резания даже при обработке периферийной зоны не превышает 55 ± 60 °С. Прерывистый характер обработки имеет место для случая внеосевого расположения деталей на планшайбе станка и при обработке прямоугольной по форме детали, и проведен теоретический анализ условий такой обработки. Общая погрешность обработки включает составляющие: деформацию технологической системы под действием радиальной силы резания, радиальный износ и тепловую деформацию (удлинение) резца. Установлено преобладающее влияние радиального износа и теплового удлинения резца на погрешность обработки. Отмечена возможность достижения общего макроотклонения около 1.0 мкм при непрерывном характере обработки поверхности диаметром 1000 мм и рациональном выборе режимных параметров. Общая погрешность при прерывистом характере обработки может составить недопустимо большие значения от 4 до 9 мкм при недостаточной жесткости технологической системы. Помимо фактора жесткости, на общую погрешность обработки существ-

венное влияние оказывают режимные параметры. Так, общая погрешность увеличивается с ростом частоты вращения шпинделя станка и с уменьшением скорости подачи, что связано с увеличением пути резания и радиального износа резца.

В пятой главе изложены теоретические и методические основы *управления режимными параметрами (УРП)*, под которым понимается закономерное изменение режимных параметров во времени или по мере обработки деталей, обеспечивающее взаимосвязанное изменение скорости изнашивания инструментов и достижение принятых критериев оптимизации. Управление реализуется через программное устройство в составе металлорежущего станка в виде задающего воздействия на технологическую систему и процесс резания. Решения задач по управлению режимными параметрами найдены с использованием общих положений математической теории оптимальных процессов и управления, изложенных в работах Л.С. Понtryгина, В.Г. Болтянского, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко, В.И. Ванько, О.В. Ермошиной, Г.Н. Кувыркина, В.Н. Афанасьева, В.Б. Колмановского, В.Р. Носова и др. Здесь в качестве управляемого процесса рассмотрен процесс изнашивания задних поверхностей лезвийного инструмента, а основная задача сформулирована так, что среди всех допустимых управлений режимных параметров, увеличивающих фазовую координату (величину износа) от значения h_{z0} до значения h_{zmax} , найти такое, для которого интегральный функционал качества управления (целевой функционал) принимает наименьшее значение.

В работе последовательно рассмотрены и решены задачи управления скоростью резания с фиксированным временем на примерах обработки твердосплавными резцами гладкого стального вала, торцевого точения заготовок из алюминиевого сплава синтетическими алмазными резцами, точения стального закаленного ступенчатого вала резцами с СМП Томал-10, а также задачи управления скоростью резания и подачи при одноинструментной и многоинструментной обработке.

В этих задачах процесс изнашивания инструментов характеризуют соответствующие полиномиальные уравнения скорости изнашивания, полученные либо аппроксимацией экспериментальных данных, либо по результатам моделирования процессов. Для одноинструментной обработки общее уравнение скорости изнашивания инструмента и целевой функционал выглядят как:

$$f_1 = \frac{dx_1}{d\tau} = \frac{dh_z}{d\tau} = I_{nt}(h_{zn}, v_n, s_n, \tau) |_{t_n = \text{const}, P_1 = \text{const}, \dots, P_n = \text{const}}, \quad (16)$$

$$x_0 = \int_0^{T_v} f_0(h_{zn}, v_n, s_n, T_v) d\tau = \sum_{j=1}^{N_v} C_{pj} \cdot t_{0j} \rightarrow \min, \quad (17)$$

где T_v – заданное время обработки; N_v – число точек управления; C_{pj} – переменная часть себестоимости обработки поверхности длиной L_j , t_{0j} – шаг по времени обработки. Смысл предложенного интегрального функционала заключается в минимизации суммы произведений переменной части себестоимости на время, что для

рассмотренных задач с общим фиксированным временем эквивалентно минимизации себестоимости обработки деталей на операции. *Учитывая интегральный характер целевого функционала, здесь впервые реализовано понятие оптимальности в широком смысле как обеспечивающее оптимальные условия протекания процесса в каждый момент времени и за весь период стойкости инструмента.*

Рассматривается неавтономный процесс, так как фазовая координата – величина износа в явном виде зависит от времени τ и в подинтегральное выражение функционала (17) входит значение стойкости инструмента как время достижения предельной величины износа. Изменение износа во времени оказывает непосредственное влияние на скорость изнашивания (16) и через изменение силы резания – на величину затрат на электроэнергию в (17). Учитывая неавтономность процесса изнашивания, показана необходимость рассмотрения функции Гамильтона-Понтрягина, которая определяет связь скорости изнашивания инструмента с подинтегральной функцией целевого функционала через сопряженные переменные:

$$H = \Psi_{0j} f_0(h_{zn}, v_n, s_n, T_v) + \Psi_{1j} f_1(h_{zn}, v_n, s_n, \tau). \quad (18)$$

Сопряженные переменные в свою очередь связаны через систему дифференциальных уравнений относительно величины износа, решения которой по точкам управления зависят от их начальных значений Ψ_{0n}, Ψ_{1n} :

$$\frac{d\Psi_{0j}}{dh_z} = -\frac{1}{f_0} \left(\Psi_{0j} \frac{df_0}{dh_z} + \Psi_{1j} \frac{df_1}{dh_z} \right); \quad \frac{d\Psi_{1j}}{dh_z} = -\frac{1}{f_1} \left(\Psi_{0j} \frac{df_0}{dh_z} + \Psi_{1j} \frac{df_1}{dh_z} \right). \quad (19)$$

Решения дифференциальных уравнений найдены в рамках постановки общей задачи Коши на конечном множестве точек управления $h_{zn} = h_{z0} + j \cdot \Delta h$; $j = 0, 1, 2, \dots$; $h_{z0} \leq h_{zn} \leq h_{zmax}$ по методу Рунге-Кутты четвертого порядка точности, а решения частных производных – численным дифференцированием второго порядка точности. Для каждого варианта управления рассмотрена и решена последовательными приближениями краевая задача и показано, что выбор краевых условий относительно сопряженных переменных регулирует общий период резания инструмента в широких пределах.

Оптимизация значений скорости резания и подачи в каждой точке управления выполнена в соответствии с принципом максимума Понтрягина. В качестве рабочего алгоритма оптимизации выбрана минимизация функции $f_u = -H$, где H есть функция (18), которая проведена по методу градиентного спуска с переменным шагом. Условие нахождения оптимума принято в виде:

$$v_{optj} = v_{n,i+1}; \quad s_{optj} = s_{n,i+1}; \quad f_u(v_{ni}, s_{ni}) - f_u(v_{n,i+1}, s_{n,i+1}) \leq \varepsilon; \quad (20)$$

$$v_{min} \leq v_{n,i+1} \leq v_{max}; \quad s_{min} \leq s_{n,i+1} \leq s_{max}$$

с краевыми условиями: $h_{zn}(0) = h_{z0}$; $\Psi(0) = (\Psi_{0n}, \Psi_{1n})$;
 $h_{zn}(T_v) = h_{zn}(\tau) \leq h_{zmax}$; $\Psi(T_v) = (\Psi_0(\tau), \Psi_1(\tau))$,

где ε – малая величина, а пределы изменения скорости и подачи $v_{min}, v_{max}, s_{min}, s_{max}$

определены соответствующими диапазонами в полиномиальном уравнении скорости изнашивания инструмента.

Вычислительная задача (20) в общем случае есть задача нелинейного программирования, принимая во внимание возможные ограничения в каждой точке управления: по шероховатости поверхностного слоя и глубине наклепа; температуре резания; мощности привода главного движения станка. Наиболее эффективным путем решения этой задачи признано движение с постоянным шагом из точки минимума целевого функционала по направлению антиградиента относительно функции соответствующего технологического ограничения до пересечения с предельной линией уровня.

Наряду с целевым функционалом (17) выполнен анализ целевых функционалов, минимизирующих по точкам управления шгучное время, энергозатраты и шероховатость обработанной поверхности. Показана близкая эффективность по себестоимости и производительности обработки рассмотренных целевых функционалов, за исключением минимизации шероховатости поверхности. Для подтверждения обобщающего характера методологии управления режимными параметрами поставлены и решены задачи по стабилизации скорости изнашивания инструмента и оптимизации режимных параметров со стабилизацией температуры резания жа-

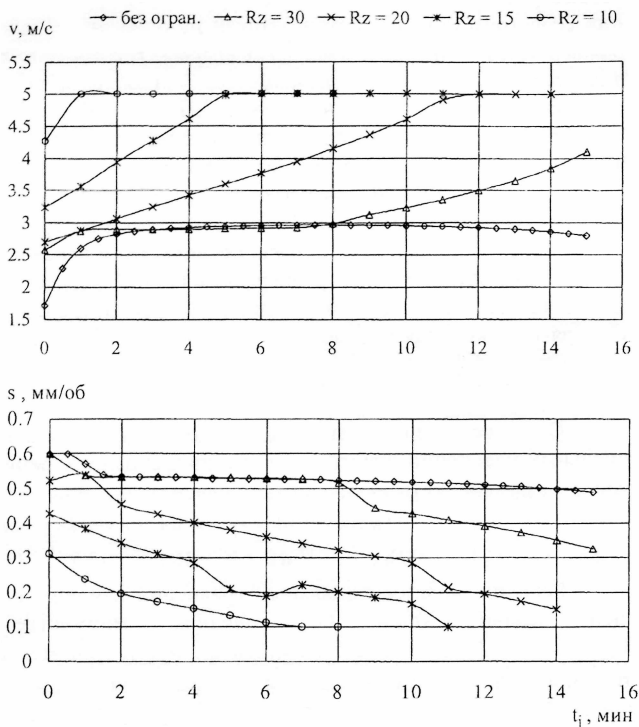


Рис. 5. Варианты управления скоростью и подачей с ограничениями по шероховатости R_z , мкм при одноинструментной обработке: КНТ16 – сталь 60, $t = 1.5$ мм

ропрочного сплава. Здесь использованы расчетные полиномиальные уравнения скорости изнашивания инструмента, силы и температуры резания, полученные по результатам моделирования процессов при обработке жаропрочного сплава. Характерно, что абсолютно лучшую эффективность имеет вариант управления режимными параметрами по целевому функционалу, минимизирующему переменную часть себестоимости обработки. Подтверждена эффективность управления по производительности, себестоимости и числу обработанных деталей в сравнении с нормативными стационарными режимами. Отмечено существенное влияние геометрических параметров резцов на процесс изнашивания, в том числе на режимах управления. Характерно, что для вариантов управления режимными параметрами фактическая себестоимость близка к минимуму, а фактическая производительность – к возможному для этих условий максимуму. Преимущества управления возрастают для случаев обработки деталей со сложной конфигурацией поверхностей, причем характер и расположение обрабатываемых поверхностей на заготовке не накладывает дополнительных ограничений на методику решения вычислительной задачи.

Предложенные процедуры управления режимными параметрами нашли проверку на характерных примерах токарной обработки: одноинструментная обработка гладкого стального и чугунного валов резцами с твердосплавными СМП различных марок; одноинструментная обработка ступенчатого вала резцом с твердосплавными СМП; многоинструментная обработка с последовательной сменой инструментов вала сложной конфигурации из стали марки 60 резцами с СМП КНТ16, стального ступенчатого вала резцами с пластинами различных форм из твердых сплавов без и с износостойкими покрытиями, заготовок из серого чугуна резцами из твердого сплава и режущей керамики, заготовок из титанового сплава твердосплавными резцами. Рассматривая предложенные процедуры как автоматизированный метод независимого и последовательного расчета режимных параметров по каждому инструменту, устанавливается связь между числом обработанных деталей и стойкостью для различных вариантов управления. Таким образом, для многоинструментной последовательной обработки предлагается стратегия принудительной замены инструментов через заданное равное число обработанных деталей, что увеличивает производительность обработки в $1.2 \div 1.5$ раза и снижает себестоимость в $1.4 \div 1.5$ раза по сравнению с нормативными режимами.

Параллельная многопозиционная многоинструментная обработка является одним из наиболее общих случаев токарной обработки. В соответствии со схематизацией условий на позиции k станка осуществляется обработка заготовки инструментами, расположенными на суппортах n и $n+1$. Режимными параметрами такой обработки являются: частота вращения шпинделя w_k , подача суппорта $n - s_{k,n}$, подача суппорта $n+1 - s_{k,n+1}$. Определен целевой функционал как сумма по обработанным деталям на позиции произведений переменной части себестоимости по всем поверхностям и для всех инструментов на шаг по времени обработки:

$$\begin{aligned}
x_0 = \int_0^{T_v} (h_{zn1j}, \dots, h_{znij}, \dots, h_{z,n+1,lj}, \dots, h_{z,n+1,mj}, \dots, w_{kj}, s_{knj}, s_{k,n+1,j}, T_{vkn}, T_{vk,n+1}) d\tau = \\
= \sum_{j=1}^{N_d} [t_{o,max} E + \sum_{i=1}^{I_{kn}} t_{onij} C'_{esnij} + \frac{1}{N_{dni}} \sum_{i=1}^{I_{kn}} (T_{cmni} E + E_{uni}) + \\
+ \sum_{m=1}^{I_{k,n+1}} t_{o,n+1,mj} C'_{es,n+1,mj} + \frac{1}{N_{d,n+1,m}} \sum_{m=1}^{I_{k,n+1}} (T_{cm,n+1,m} E + E_{u,n+1,m})] t_{oj} \rightarrow \min,
\end{aligned} \quad (21)$$

где заданное время обработки $T_{v(\dots)}$ заменено эквивалентным числом обработанных деталей до затупления инструмента $N_{d(\dots)}$; $C'_{es(\dots)}$ - минутные затраты на электро-энергию по каждому инструменту $I_{k(\dots)}$; $t_{o,max}$ - наибольшее основное технологическое время; $T_{cm(\dots)}$ - время на замену инструмента после затупления; $E_{u(\dots)}$ - затраты по инструменту; E - минутные затраты на эксплуатацию станка.

Функция Гамильтона-Понтрягина определяет связь скорости изнашивания каждого инструмента и подинтегрального выражения в целевом функционале (21) через сопряженные переменные, связанные системой дифференциальных уравнений, где общее число уравнений на единицу больше, чем число параллельно работающих инструментов на позиции. На решения накладываются ограничения: по допустимым диапазонам изменения режимных параметров; суммарной мощности привода на позиции; заданной шероховатости каждой обработанной поверхности.

В качестве примера рассмотрены варианты обработки деталей автомобиля ЗИЛ - диска из стали марки 40Х и ступицы из чугуна на токарном вертикальном восьмишпиндельном полуавтомате модели 1К282. Общее число задействованных инструментов на станке равно 15 и 21, соответственно. Расчет управления задает эталонный уровень режимных параметров, соответствующих гибкому производству, устанавливает связь между числом обработанных деталей и операционным временем для каждой позиции, а также позволяет выбрать стратегию принудительной замены всех инструментов. Жесткие кинематические связи снижают эффективность работы полуавтомата по производительности в 1.25 раза, по себестоимости в 1.35 раза и ограничивают число обработанных деталей.

В шестой главе разработаны теоретические основы технологии алмазного точения металлооптических поверхностей. Изложены технологические аспекты алмазного точения и подтверждена эффективность обработки прежде всего в части высокой производительности, значительного снижения общей трудоемкости и повышения качества поверхностного слоя. Общая погрешность обработки оптических элементов диаметром до 340 мм составляет менее 0.8 мкм, коэффициент зеркального отражения - 97.4÷99.3% (алюминиевые и медные поверхности, в т.ч. с

отражающим покрытием).

Для крупногабаритных оптических элементов диаметром от 340 до 1000 мм, в том числе при прерывистом характере обработки, общая погрешность с технологическим контролем по пробному стеклу составляет $N = 1 \pm 3$ интерф. кольца. Например, для медной сферической поверхности $\varnothing 1000$ мм результаты технологического контроля показали: $N = 1$, $\Delta N = 0.8$ ($N = 0.28$ мкм, $\Delta N = 0.22$ мкм). В число обработанных на станке CAT1815 крупногабаритных отражателей входят: плоский отражатель из алюминиевого сплава АМгб $\varnothing 1250$ мм; облегченный отражатель $\varnothing 1000$ мм с медной сферической поверхностью; сферический отражатель из спецсплава с медным конструкционным слоем; параболический отражатель из алюминиевого сплава АМгб $\varnothing 406$ мм; отражатель по форме эллипса с размерами 380 x 270 мм из спецсплава с медным конструкционным слоем; бронзовый кольцевой отражатель $\varnothing 340$ и 178 мм с перфорированной отражающей поверхностью и др.

Например, реализована уникальная обработка одновременно трех крупногабаритных внеосевых параболических алюминиевых зеркал с диаметром каждого зеркала 406 мм. Максимальная величина асферизации составила 9,92 мкм, что соответствует 496 точкам управления (дискретность хода пьезопривода 0.04 мкм). Учитывая фактическое распределение глубин резания, предварительный проход относительно базовой сферической поверхности был выполнен с глубиной резания 12 мкм, а окончательное точение после замены резца проведено с равномерной глубиной резания 4 мкм. Скорость рабочей подачи на окончательном проходе была

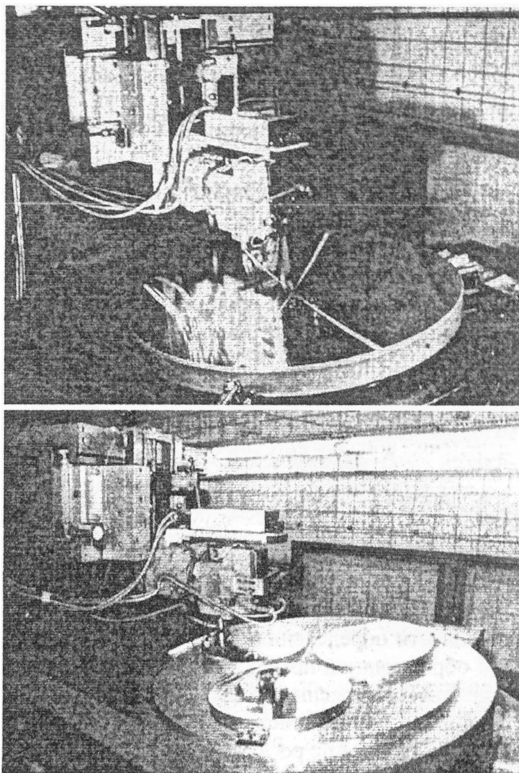


Рис. 6. Обработка медной сферической поверхности $\varnothing 1000$ мм и трех алюминиевых внеосевых параболюидов $\varnothing 406$ мм каждый на станке CAT1815

$v_s = 3.04$ мм/мин, частота вращения шпинделя $w = 106.5$ об/мин. Коэффициенты зеркального отражения на длине волны 10.6 мкм измерены непосредственно на обработанных поверхностях и составили: изделие 01, покрытие Al_2O_3 - $96.7 \pm 0.2\%$; изделие 02, покрытие $Cr/Ag/HfO_2$ - $97.4 \pm 0.2\%$. Величина макроотклонения отражающей поверхности была ~ 3.95 мкм и соответствует техническим требованиям. Размеры измеренного фокусного расстояния изделий были в пределах 2535÷2537 мм, что практически соответствует заданному фокусному расстоянию 2540 мм.

Управление режимными параметрами алмазного точения выполнено с учетом общего методологического подхода, разработанного в главе 5. В качестве объекта управления рассмотрен процесс изнашивания природных монокристаллических алмазных резцов. Процесс изнашивания управляется режимными параметрами: частотой вращения шпинделя ω и скоростью подачи инструмента v_s . Рассматривается неавтономный процесс изнашивания с подвижным значением фазовой координаты в момент окончания чистового прохода инструмента. Качество процесса управления оценено целевым функционалом, минимизирующим сумму произведений абсолютных значений погрешностей на время перехода

$$x_0 = \int_{t_0}^{t_1} f_0(h_z, \omega, v_s) d\tau = \sum_{j=1}^{N_y} |y + h_r + d_t| \cdot 10^{-3} \cdot t_{0j} \rightarrow \min, \quad (22)$$

где y , h_r , d_t – деформация технологической системы, радиальный износ и тепловая деформация резца, соответственно, мкм. На решения накладываются ограничения по области определения режимных параметров станка CAT1815 и по шероховатости обработанной поверхности оптического класса. Выбор краевых условий относительно сопряженных переменных регулирует время обработки и обеспечивает наименьшее время чистового прохода. Учитывая, что время окончания чистового прохода заранее не регламентируется, правомерно также частное решение с постоянными значениями сопряженных переменных по точкам управления, т.е.: $\Psi_{0j} = -1 = \text{const}$; $\Psi_{1j} = 0 = \text{const}$.

Рассчитаны варианты управления режимными параметрами при непрерывном и прерывистом характере алмазного точения поверхностей: медной вогнутой сферической поверхности $\varnothing 1000$ мм; медной выпуклой гиперболической поверхности $\varnothing 1116$ мм; одновременно трех алюминиевых вогнутых параболических поверхностей $\varnothing 406$ мм каждая. Кривые режимных параметров имеют переменный характер, учитывающий значительное изменение скорости изнашивания алмазного резца при движении от периферии к центру вращения заготовки. Оценки предельных возможностей метода показывают, что при реализации УРП и непрерывном характере обработки суммарная погрешность составляет менее 1.2 мкм, при прерывистом характере – менее 2.4 мкм, и отмечена тесная связь между точностью обработки и заданной шероховатостью в пределах $R_{\max} = 20 \div 50$ нм. Погрешности обработки корректируются до минимальных значений в пределах дискретного значе-

ния хода пьезопривода или суппорта станка в режиме реального времени.

Предложен проект технологии алмазного точения крупногабаритного внеосевого параболического зеркала и внешнего аксикона с апертурой 600 мм, входящих в состав оптической схемы резонатора цилиндрического типа перспективного силового химического лазера. Рассчитанный вариант УРП с формообразованием в прямоугольной системе координат как у экспериментального станка с УЧПУ МК6523 (ОАО "Красный пролетарий") обеспечивает время чистового прохода ~ 125 мин, заданную шероховатость $R_{\text{max}} = 20$ нм, макроотклонение обработанной поверхности ~ 0.8 мкм и коррекцию погрешностей до значений 0.01 мкм за счет хода суппорта в процессе обработки.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе комплекса проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методология управления режимными параметрами (УРП) и процессом изнашивания инструментов с использованием количественных моделей, описывающих развитие процессов во времени. Предложенная методология предусматривает проведение этапов, характерных для большинства видов лезвийной обработки: разработка уравнений скорости изнашивания режущих инструментов и характеристик резания на базе экспериментирования и моделирования процессов; математическая формулировка задач управления и целевых функционалов, алгоритмизация, программирование и создание банка расчетных программ; расчет и реализация режимов управления на операциях как структурная составляющая автоматизированных систем подготовки производства и управления технологическими процессами.

2. Выдвинуты базовые положения о нестационарности процессов резания и изнашивания инструментов и нелинейности математических моделей, описывающих эти процессы. Учитывая нестационарность процессов, показана необходимость поиска оптимальных условий обработки с применением положений теории оптимальных процессов и управления, и принципа максимума Понтрягина. Учитывая нелинейность моделей и ограничений, предложены эффективные пути решения вычислительной оптимизационной задачи как задачи нелинейного программирования численными и градиентными методами. На основании разработанных количественных моделей изнашивания инструментов сформулированы интегральные целевые функционалы, которые обеспечивают оптимальные условия протекания процесса в каждый момент времени и за весь период стойкости инструмента.

3. На основании теоретического анализа погрешностей и сопоставления расчетных значений с обширной базой экспериментальных данных обосновано применение многофакторных полиномиальных моделей и предложено использовать метод стохастической аппроксимации (МСА) для разработки уравнений скорости изнашивания инструментов и характеристик резания. Подтверждены расчетами и

проверены экспериментально преимущества МСА по точности моделей при произвольном расположении опытных точек, большом количестве факторов и значительном объеме исходных данных. Получены и рекомендованы для использования в алгоритмах управления режимными параметрами полиномиальные уравнения скорости изнашивания резцов как количественные отражения результатов проведенных экспериментальных исследований и моделирования процессов.

4. Физическое и математическое моделирование процесса косоугольного несвободного резания, стружкообразования и изнашивания резцов из твердого сплава и нитрида бора позволило выявить и количественно описать связь режимных параметров с характеристиками фрикционного контакта по задней поверхности через геометрию инструмента, физико-механические характеристики контактируемых пар обрабатываемого и инструментального материалов, контактные давления, температуру и коэффициент трения. Показано, что интенсивность изнашивания определяется совокупным действием температур, контактных давлений и числом циклов фрикционного контакта до разрушения микрообъемов изнашиваемой инструментальной поверхности.

5. Основываясь на механизме адгезионно-усталостного изнашивания, обоснована физическая взаимосвязь числа циклов фрикционного контакта до разрушения с поверхностной твердостью инструментального материала, зависящей от температуры, контактным давлением и радиусом выступов микронеровностей изнашиваемой поверхности. Предложена единая по структуре полиномиальная модель для расчета числа циклов фрикционного контакта до разрушения и три матрицы коэффициентов, учитывая существенные различия диапазонов твердости для твердых сплавов, износостойких покрытий и нитрида бора. Разработанная на основе физических закономерностей изнашивания методика исследований обрабатываемости конструкционных сталей и сплавов, включая труднообрабатываемые, позволяет рассчитать износ и стойкость инструментов, сократить число экспериментов до контрольных опытов.

6. Модель процесса алмазного точения является развитием и детализацией общей модели процесса косоугольного несвободного резания и отражает, с одной стороны, количественные связи режимных параметров, характеризующихся долемикронными толщинами среза, и, с другой стороны, силами, температурами и параметрами качества поверхностного слоя обработанных оптических поверхностей, включая макроотклонения. Определены количественные ограничения, раскрывающие возможность алмазного точения протяженных металлооптических поверхностей с качеством и отражательной способностью на уровне полированных поверхностей.

7. Результатами проведенного моделирования процессов резания и изнашивания инструментов являются количественные модели и расчетные алгоритмы, определяющие возможность управления режимными параметрами. Подтверждена расчетами и экспериментально эффективность УРП по производительности, себе-

стоимости, числу обработанных деталей, качеству поверхностного слоя на примерах токарной обработки с использованием твердых сплавов, режущей керамики, сверхтвердых материалов, заготовок из сталей, серого чугуна, титанового сплава в условиях одноинструментной, многоинструментной последовательной и параллельной многопозиционной многоинструментной обработки, а также алмазного точения крупногабаритных и асферических металлооптических поверхностей.

8. В соответствии с общей методологией УРП разработаны процедуры выбора варианта управления, обеспечивающего наименьшее время алмазного точения протяженных металлооптических поверхностей. При реализации режимов управления и непрерывном характере алмазного точения поверхностей диаметром до 1000 мм суммарное макроотклонение составляет менее 1.2 мкм, при прерывистом характере – менее 2.4 мкм и погрешности корректируются до минимальных значений $0.04 \div 0.01$ мкм за счет хода пьезопривода резцовой головки или суппорта станка в режиме реального времени.

9. Проведенные исследования подтвердили перспективность алмазного точения для изготовления оптических элементов лазерных систем различного назначения. По результатам моделирования процессов, анализа режимов управления и достигнутых показателей качества поверхностного слоя обработанных поверхностей сформулированы научно обоснованные технические требования на станки алмазного точения нового поколения.

10. Методические рекомендации по аппроксимации, моделированию процессов и управлению режимными параметрами имеют обобщающий характер для большинства видов лезвийной обработки и рекомендованы для внедрения на машиностроительных и приборостроительных предприятиях. Практическое применение результатов исследований, в т.ч. методики исследований обрабатываемости сталей и сплавов, станков и технологий алмазного точения, и полученный технический эффект подтверждены на ряде предприятий: НПО "Композит", НПО "Энергомаш", АО "Красный пролетарий", ИСМ АН Украины, ЗЭМ РКК "Энергия", НИИНАШ, АО "Юрмаш", АО "Завод им. Дегтярева" и др.

11. В результате проведенных исследований достигнута цель и разработаны теоретические и методологические положения по управлению режимными параметрами и процессом изнашивания инструмента, обеспечивающие на примере точения повышение эффективности лезвийной обработки: снижение себестоимости и штучного времени, повышение качества поверхностного слоя металлооптических поверхностей.

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Петрушин С.И., Грубый С.В. Обработка чугунов и сталей сборными резцами со сменными многогранными пластинами. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 156 с.

2. Грубый С.В. Сверхточная токарная обработка крупногабаритных поверхностей// Технология металлов. – 2000. - №3. - С. 13-18.

3. Грубый С.В. Многофакторная аппроксимация полиномиальными моделями экспериментальных зависимостей резания металлов// Вестник машиностроения. – 2000. - №9. - С. 29-35.
4. Грубый С.В. Теоретические основы операционной технологии сверхточной лезвийной обработки протяженных металлооптических поверхностей// Вестник машиностроения. – 2000. - №10. - С. 27-33.
5. Грубый С.В. Повышение эффективности аппроксимации многофакторных зависимостей резания металлов// Вестник МГТУ. Машиностроение. – 2000. - №3. – С. 55-66.
6. Грубый С.В. Разработка теории и технологии сверхточной токарной обработки// Резание и инструмент/ Под ред. А.Е. Древалю. - М.: МГТУ, 2000. - С. 112-122.
7. Грубый С.В. Рациональный выбор режимных параметров на токарных операциях// Технология металлов. – 2001. - №8. – С. 25-32.
8. Грубый С.В. Оптимальное управление скоростью резания при одноинструментной токарной обработке// Технология металлов. – 2002. - №1. – С. 17-24.
9. Грубый С.В. Физическое моделирование процесса изнашивания твердосплавных резцов// Справочник. Инженерный журнал. – 2002. - №2. - С. 37-43.
10. Грубый С.В. Оптимизация режимных параметров на операциях механической обработки// Технология металлов. – 2002. - №11. – С. 33-37.
11. Грубый С.В. Развитие метода алмазного микрооточения на сверхточных станках для обработки отражающих поверхностей металлооптики// Технология металлов. – 1999. - №5. - С. 26-30.
12. Грубый С.В. Расчетная методика по исследованиям обрабатываемости конструкционных сталей и сплавов// Технология металлов. – 2003. - №8. – С. 22-28.
13. Грубый С.В. Моделирование процесса изнашивания резцов из нитрида бора при обработке закаленных сталей// Технология металлов. – 2003. - №11. – С.11-16.
14. Разработка научных основ сверхпрецизионной лезвийной обработки отражающих поверхностей металлооптики, в том числе крупногабаритных и асферических: Отчет по теме Гр3.3/ МГТУ. Руководитель темы С.В. Грубый. ГР№ 01.2.00106923, инв.№ 02.2.00104080. – М., 2000. – 204 с.
15. Разработка теории и технологии прецизионной обработки протяженных металлооптических поверхностей СТМ- материалами: Отчет по теме 001.04.0135/ МГТУ. Руководитель темы С.В. Грубый. ГР№ 01.2.00104540, инв.№ 02.2.00103258. – М., 2000. – 102 с.
16. Грубый С.В. Повышение режущих свойств сборных резцов при прерывистом точении// Известия вузов. Машиностроение. – 1992. - №7-9. – С. 136-141.
17. Грубый С.В. Выбор условий алмазного микрооточения крупногабаритных поверхностей// Вестник машиностроения. – 1994. - №11. - С. 40-43.
18. Грубый С.В. Расчет сил и контактных нагрузок для резцов с радиусной режущей вершиной// Известия вузов. Машиностроение. – 1990. - №2. - С. 134-139.
19. Грубый С.В., Муратова Н.И. Повышение эффективности прецизионной об-

работки резцами, оснащенными природными алмазами// Известия вузов. Машиностроение. – 1990. - №9. - С. 107-112.

20. Грубый С.В., Милов И.В. Технологические особенности алмазного микроточения крупногабаритных прецизионных поверхностей// Вестник машиностроения. – 1995. - №6. - С.37-40.

21. Грубый С.В., Боговцева Л.П., Костеев В.А. Исследования состояния прецизионных поверхностей, обработанных методом алмазного микроточения// Вестник машиностроения. – 1996. - №7. – С. 19-24.

22. Грубый С.В., Татьяна Н.А. Исследование и применение кристаллов природных алмазов и резцов повышенной износостойкости// Вестник машиностроения. – 1997. - №4. - С.19-23.

23. Грубый С.В., Зверев Е.К., Петрушин С.И. Обработка резанием серого чугуна резцами с многогранными пластинами// Труды МВТУ. – 1981. - №364. - С. 60 – 77.

24. Грубый С.В., Цейтлин Л.Б., Зверев Е.К., Колесниченко В.Д. Исследование и применение резцов, оснащенных безвольфрамовыми твердыми сплавами// Технология автомобилестроения. – 1982. - №7. – С. 23-26.

25. Грубый С.В. Особенности точения стали резцами из безвольфрамовых твердых сплавов// Обработка резанием (технология, оборудование, инструмент). – 1982. - Вып. 7. – С. 12-15.

26. Грубый С.В. Сила резания и энергозатраты при точении стали резцами из безвольфрамовых твердых сплавов// Известия вузов. Машиностроение. – 1983. - №6. - С. 109-113.

27. Грубый С.В., Зверев Е.К., Подураев В.Н. Определение стойкости резцов с использованием полиномиальных моделей// Известия вузов. Машиностроение. – 1983. - №10. - С. 119-125.

28. Грубый С.В., Зверев Е.К. Режущие свойства резцов, оснащенных безвольфрамовыми твердыми сплавами// Вестник машиностроения. – 1983. - №12. - С. 41–45.

29. Грубый С.В. Последовательное снижение погрешностей полиномиальных моделей стойкости резцов// Известия вузов. Машиностроение. – 1986. - №2. - С.146-150.

30. Грубый С.В. Повышение эффективности применения резцов, оснащенных безвольфрамовыми твердыми сплавами// Вестник машиностроения. – 1986. - №7. - С. 40-42.

31. Зверев Е.К., Грубый С.В. Чистовое точение серого чугуна резцами из твердого сплава и режущей керамики// Известия вузов. Машиностроение. – 1981. - №9. – С. 115-118.

32. Грубый С.В., Цейтлин Л.Б. Исследование режущих свойств безвольфрамовых твердых сплавов// Проблемы производства и применения твердых сплавов.: Тез. докл. Всесоюз. НТК. – М., 1981. – С. 52-53.

33. Грубый С.В. Режущие свойства резцов из вольфрамосодержащих и без-

вольфрамовых твердых сплавов// Обработка резанием (технология, оборудование, инструмент). – 1981. – Вып. 8. – С. 19-21.

34. Грубый С.В. Реализация методов многофакторного планирования для аппроксимации стойкости резцов// Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических методов обработки.: Тез. докл. Всесоюзной НТК. – М., 1988. – С. 262.

35. Грубый С.В. Особенности применения сборных резцов, оснащенных пластинами безвольфрамовых твердых сплавов// Резание и инструмент. – 1988. – Вып. 40. – С. 58-63.

36. Древаль А.Е., Грубый С.В., Зеленцова Н.Ф., Литвиненко А.В. Повышение работоспособности режущих инструментов// Тез. докл. Всеросс. НТК. – М., 1995. – Ч1. – С. 42.

37. Грубый С.В. Контроль качества металлооптических поверхностей, обработанных алмазным микроточением// Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докл. четвертой Всеросс. НТК. – М., 1997. – С. 203-204.

38. Грубый С.В. Разработка методики аппроксимации экспериментальных зависимостей полиномиальными моделями// Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докл. пятой Всеросс. НТК. – М., 1998. – С.397.

39. Грубый С.В. Аппроксимация зависимостей резания металлов многофакторными полиномиальными моделями// Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всеросс. НТК. – М., 1998. – С. 156-157.

40. Грубый С.В. Математическое моделирование и обработка результатов испытаний режущих инструментов// Метрологическое обеспечение испытаний и сертификации: Тез. докл. межрегиональной научно-практич. конфер. – М., 1999. – С. 70.

41. Грубый С.В. Контроль качества кристаллов природных алмазов и повышение износостойкости специальных резцов// Состояние и проблемы измерений: Тез. докл. шестой Всеросс. НТК. – М., 1999. – С. 355-356.

42. Грубый С.В. Обоснование критерия эффективности операционных технологий: Сборник научных работ МЭЛИ. – 2001. – Вып. 1. – С. 30-37.

43. Грубый С.В. Обеспечение качества поверхностного слоя с учетом особенностей изнашивания инструмента// Материалы Росс. НТК. – Рыбинск, 2003. – С. 174-176.

44. Грубый С.В. Методика расчета скорости изнашивания лезвийных инструментов// Материалы международной НТК. – Орел, 2003. – С. 168-171.

45. Грубый С.В. Повышение эффективности точения на основе управления процессом изнашивания инструмента// Известия ТулГУ. Машиностроение. –2003. – Вып. 2. – С. 170-174 (Труды международной НТК).

46. Грубый С.В. Моделирование процесса изнашивания твердосплавных резцов// Контактная жесткость. Износостойкость. Технологическое обеспечение.: Сб. трудов междунар. НТК/ Под общ. ред. А.Г. Суслова. – Брянск, 2003. – С. 53-56.