


05.02.08

A 424

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

Челябинский государственный технический университет

На правах рукописи



АКСЕНОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ  
(ШЛИФОВАНИЕ С УПРАВЛЯЕМЫМ  
ТЕРМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ)  
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Специальность 05.02.08 — «Технология машиностроения»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Челябинск — 1995

Работа выполнена в Новосибирском государственном  
техническом университете

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и  
техники РСФСР,  
доктор технических наук,  
профессор **Дальский А. М.**;  
доктор технических наук,  
профессор **Аршанский М. М.**;  
доктор технических наук,  
профессор **Мухин В. С.**

Ведущая организация — НПО «Текстильмаш»  
(ВНИИЛтекмаш), г. Москва

Защита состоится «25» апрель 1995 г. в 10 часов,  
в ауд. 502 на заседании диссертационного Совета Д 053.13.05  
в Челябинском государственном техническом университете  
по адресу: 454080, Челябинск, пр. В. И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧГТУ.

Автореферат разослан «20» марта 1995 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,  
доктор экономических наук, профессор

**И. А. БАЕВ.**

Актуальность проблемы. Повышение надежности, долговечности и конкурентоспособности машин и оборудования, создание высокопроизводительных энергоресурсосберегающих технологий и автоматизированных систем их проектирования является важнейшей задачей современного машиностроения.

Перспективным направлением в решении поставленной задачи является создание технологических процессов и оборудования механической и поверхностной термической обработок, способных обеспечить изготовление деталей машин с повышенным уровнем эксплуатационных свойств, гарантирующим долговечность и надежность работы машин и аппаратов. К числу наиболее прогрессивных технологий относятся процессы абразивного шлифования, лазерные и плазменные методы обработки, другие способы упрочнения поверхностных слоев. Однако существующие возможности решения этой задачи предусматривают создание специального оборудования, разрывают технологический процесс изготовления деталей, значительно увеличивают энергозатраты, не решают всей проблемы управления уровнем эксплуатационных свойств и автоматизации проектирования.

Новые перспективы в решении поставленной проблемы открывают технологические процессы совмещающие методы механической и поверхностной термической обработок, исключающие разрывность цикла изготовления деталей, осуществляемые при значительно меньших энергозатратах с возможностью существенного повышения уровня эксплуатационных свойств.

Одним из таких методов является абразивное глубинное шлифование, когда за счет тепла, выделяемого в зоне резания, становится возможным осуществить, вместе с получением окончательных размеров изделия, термическую обработку и упрочнение поверхностных слоев. По уровню эксплуатационных свойств, достигаемых при этом, традиционные методы гораздо менее эффективны. Современные возможности высокотемпературного нагрева, (например ТВЧ, лазерная обработка и т.д.) также позволяют реализовать требуемое термическое воздействие, используя при этом возможности существующего металлорежущего оборудования. В настоящее время недостаточно изучены особенности этих технологий, взаимосвязь свойств поверхностных слоев с эксплуатационными характеристиками с одной стороны и режимами обработки с характером тепловых процессов с другой. Это не позволяет обеспечить управление уровнем эксплуатационных свойств и создать систему автоматизированного проектирования новых технологических процессов и оборудования реализующего совмещение механической и поверхностной термической обработок. Указанные обстоятельства обуславливают важность и актуальность темы диссертационной работы, исследования по которой входили в программу "Сибирь" раздел 02, блока 6.01, задание 02.03.09. Исследование комплекса физико-механических характеристик

и эксплуатационных свойств материалов, подвергаемых поверхностному термическому воздействию нагревом ТВЧ; в работу по постановлению СМ СССР № 82 от 01.03.86. "О создании производства рапирных ткацких станков"; в тематические планы Министерства машиностроения НГУ-486-81 "Проведение комплекса работ по совершенствованию конструкции и технологии производства с целью увеличения показателя надежности станков", НГ-2-416-86. Проведение работ по повышению надежности, долговечности и модернизации станков; планы совместных исследований ИЭТИ и ИСМ АН УССР, института теплофизики СО РАН и ИЭТИ и в планы Региональной научно-образовательной программы "Научные основы создания высокоэффективных технологических комплексов" и выполнены непосредственно соискателем или под его руководством.

Цель и задачи исследований. Целью настоящей работы является повышение эксплуатационных свойств деталей машин на основе системного анализа теплофизических процессов, сопровождающих механические и поверхностные термические методы обработки, создание базы для интеграции этих процессов, разработка новых способов, и системы автоматизированного проектирования технологических процессов комбинированной обработки.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ существующих направлений улучшения эксплуатационных свойств деталей машин и обоснование способов решения этой проблемы путем интеграции процессов механической и поверхностной термической обработок;
- создание системы математического моделирования тепловых явлений в поверхностных слоях материалов и определение численных значений комплекса наиболее информативных параметров термических циклов и динамики их изменений в поверхностных слоях конструкционных сталей и их связи с режимами и условиями различных схем обработки;
- разработка методик и проведение исследований структурнонапряженного состояния и эксплуатационных свойств при высокоскоростном нагреве и установление взаимосвязи численных значений параметров термических циклов со структурой и эксплуатационными свойствами поверхностных слоев;
- разработка автоматизированной системы проектирования новых технологических процессов, реализующих принципы совмещения механической и поверхностной термической обработок с повышенным уровнем эксплуатационных характеристик;
- создание новых способов и разработок на их основе легко управляемых технологических процессов обработки деталей машин с требуемым уровнем эксплуатационных свойств;
- разработка, испытания и практическое использование новых технологических процессов и системы автоматизированного проектирования.

Предложена методология системного анализа тепловых явлений, ответственных за формирование структурно-напряженного состояния поверхностных слоев конструкционных сталей в процессах совмещающих механические и поверхностные термические методы обработок, включающая математические модели, методы расчета, алгоритмы и программы основного и прикладного программного обеспечения, подсистемы, базы и банки данных связи динамики распределения температурных полей, оцениваемой комплексом численных значений параметров термических циклов, со структурой и показателями конструктивной прочности, применительно к рассматриваемым условиям обработки, что явилось базой для создания основ автоматизированного проектирования технологических процессов с повышенным уровнем эксплуатационных свойств.

Установлены преимущества интеграции процессов механической и поверхностной термической обработок в решении проблемы повышения эксплуатационных свойств деталей машин из конструкционных сталей, позволяющей, кроме того, исключить разрывность процесса изготовления, уменьшить величину припуска, увеличить производительность с уменьшением энергозатрат.

Установлены связи между требуемой структурой и режимами шлифования на базе использования расчетной методики анализа тепловых явлений в процессах комбинированной обработки, позволяющие исключить из технологического цикла изготовления деталей машин традиционные операции термообработки.

Предложен ряд новых способов обработки и на их основе разработаны новые технологические процессы, комбинированной обработки деталей машин с повышенным уровнем эксплуатационных характеристик.

#### Практическая ценность работы

Решена важная для народного хозяйства задача, позволяющая впервые в практике проектирования технологических процессов, совмещающих механические и поверхностные термические методы обработки внедрить систему автоматизированного проектирования. Ее применение дает возможности провести анализ различных технологических процессов, определить схему и режимы обработки, оптимизировать значение показателей эксплуатационных свойств. Предложенная система заменяет длительный и дорогостоящий малоэффективный экспериментальный путь и повышает качество проектирования новых технологических процессов.

Подтверждена эффективность интеграции процессов механической и поверхностной термической обработок, в том числе с использованием высокоэнергетического нагрева ТВЧ, реализующая идею управления уровнем эксплуатационных свойств путем назначения и поддержания в процессе обработки требуемого диапазона значений параметров термических циклов. Разработан ряд новых способов обработки (запатентованных

авторскими свидетельствами), использование которых дает значительное повышение уровня эксплуатационных свойств деталей машин из конструкционных сталей (сталь 45, 40Х, 40ХН и др.). Предложена новая конструкция технологического модуля (защищенная патентом СССР) для оснащения серийных металлорежущих станков, которая позволяет практически реализовать возможность совмещения высокоэнергетического нагрева ТВЧ и операций механической обработки.

Разработаны технологические процессы и оборудование, обеспечивающие существенное в 1,6-2,8 раза повышение уровня эксплуатационных свойств деталей ткацких станков, инструментов, деталей автомобильной и сельскохозяйственной промышленности. Внедрение их в производство путем создания специализированного участка (Новосибирский завод "Сибтекстильмаш") на базе станков ХШЗ-20Н, ЗМ151В, 312М и др., другого оборудования и приспособлений для разработанных процессов обработки в массовом производстве позволили увеличить производительность до 18 раз (например, при обработке пружины прокладчика утка ткацкого станка СТБ), снизить энергоемкость до 35-40% за счет оптимизации термического воздействия, решить вопросы экологии и охраны жизнедеятельности.

Суммарный экономический эффект от внедрения составил 1,5 млн. рублей (в ценах 1991 года).

В учебном процессе Новосибирского государственного технического университета основные положения диссертационной работы отражены в учебных пособиях автора и применяются при подготовке инженеров-механиков. С 1980 года результаты исследований используются при подготовке кандидатских диссертаций, выполнении курсовых и дипломных работ, НИР студентов, включены в лекционные и практические занятия.

Личный вклад автора в представленной работе. Основой диссертации послужили теоретические, экспериментальные исследования и производственные испытания, отражающие длительный период (с 1980 года) работы диссертанта и в дальнейшем становления и деятельности научной группы из числа сотрудников и преподавателей НГТУ, организованной и руководимой им по научно-технической проблеме "Управление качеством поверхностного слоя деталей машин".

Диссертант внес определяющий вклад в постановку, обоснование и осуществление программ исследований. Он является также автором основных идей и выводов, изложенных в работе, что подтверждается публикациями и патентными документами.

В диссертации обобщены результаты экспериментальных исследований, выполненных автором самостоятельно и вместе с сотрудниками научной группы. Некоторые работы выполнены по линии хозяйственных договоров и личных творческих связей автора в содружестве с сотрудниками других организаций (КПИ (Киев), СКТБ (ПО "Электросетьизоляция"), завод "Сибтекстильмаш", ИФ СОРАН и др.), что отражено в совместных публикациях, заявках на патенты и др. документах.

Автор принимал непосредственное участие в разработке и создании экспериментальных и опытно-промышленных установок, внедрение их в производство, разработке основных методик и проведении экспериментов, обработке результатов и их интерпретации. Автору принадлежит также написание большинства статей, докладов и основных разделов отчетов по спецтемам.

Результаты теоретических исследований, представленные в диссертации, принадлежат автору, и выполнены на основе личного научного творчества.

Апробация работы. Материалы диссертации и основные результаты работы докладывались на Всесоюзных научных и научно-технических конференциях: "Комбинированные электроэрозионно-электрохимические методы размерной обработки" (Уфа, 1983 г.), "Интенсификация технологических процессов механической обработки" (Ленинград, 1986 г.), "Новые технологические процессы и оборудование для поверхностной пластической обработки материалов" (Брянск, 1986 г.), "Повышение эффективности и качества в механосборочном производстве" (Пермь, 1985 г.), "Автоматическое манипулирование объектами и технологическая оснастка в станках с ЧПУ и ГПС" (Тернополь, 1988 г.), "Проблемы экономии энергетических, материальных и трудовых ресурсов" (Новосибирск, 1988 г.), "Структура и свойства материалов" (Новокузнецк, 1988 г.), "Поверхностный слой, точность, эксплуатационные свойства и надежность деталей машин и приборов" (Москва, 1989 г.), Первом Всесоюзном съезде технологов машиностроителей (Москва, 1989 г.), "Новые материалы и ресурсосберегающие технологии термической обработки" (Махачкала, 1989 г.), "Типовые механизмы и технологическая оснастка станков-автоматов, станков с ЧПУ и ГПС" (Киев, 1992 г.), Сибирской конференции по прикладной и индустриальной математике (Новосибирск, 1994 г.), на ежегодных научных семинарах академической лаборатории по проблеме упрочнения металлических сплавов СО РАН (г.Новосибирск), научных семинарах института теплофизики СО РАН (г.Новосибирск).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 50 работах, в том числе 4 учебных пособиях, получено 5 авторских свидетельств, патент и серебряная медаль ВДНХ СССР, подготовлено 8 отчетов по научным темам.

Автор защищает

Теоретические и экспериментальные исследования по повышению эксплуатационных свойств деталей машин, на основе чего решена важная научно-техническая проблема, заключающаяся в развитии теории и практики комбинированных методов обработки;

- методология интеграции процессов механической и поверхностной термической обработок;

- заключение о роли высокоскоростного термического воздействия

и численных значений параметров термических циклов, в формировании структуры и свойств поверхностных слоев;

- комплексную оценку температурных полей, в том числе, впервые установленные численные значения параметров термических циклов и динамики их изменений по глубине поверхностного слоя;

- экспериментально установленные взаимосвязи численных значений параметров термических циклов с формированием структуры и комплексом эксплуатационных свойств;

- методики, установки и оборудование для исследований, в частности методику расчета температур и параметров термических циклов, определение режимов и условий обработки, глубины упрочнения, оптимизации производительности и энергозатрат;

- методологию разработки системы автоматизированного проектирования новых технологических процессов комбинированной (шлифование с управляемым термическим воздействием) обработки;

- новые методы и технологические процессы обработки шлифованием и высокочастотным нагревом ТВЧ деталей ткацких станков, автомобильного и сельскохозяйственного машиностроения из конструкционных сталей с требуемым уровнем эксплуатационных характеристик.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов и приложений. Изложена на 254 странице машинописного текста, содержит 110 рисунков и 16 таблиц. Приложения на 79 страницах. Список цитируемой литературы содержит 287 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении освещена актуальность проблемы повышения уровня эксплуатационных свойств путем интеграции процессов механической и поверхностной термической обработки, необходимость создания системы автоматизированного проектирования новых технологических процессов. Показана научная и практическая значимость и новизна работы, изложены основные положения, выносимые диссертантом на защиту.

Первая глава посвящена анализу состояния вопроса, целям и задачам исследования.

Известно, что в процессах абразивной, а также лезвийной обработки конструкционных сталей качество поверхностного слоя, достигаемое и зависящее от условий резания и оцениваемое структурой, твердостью, величиной и знаком остаточных напряжений, параметрами шероховатости обработанной поверхности, в основном, и определяет уровень их эксплуатационных свойств. При этом в зависимости от условий обработки, особенно, при шлифовании, состояние поверхностных слоев определяется, в основном, характером тепловых явлений. В большинстве случаев тепловыделение отрицательно сказывается на качестве поверхностного слоя, особенно, при шлифовании предварительно закаленных деталей, сопровождая этот процесс множеством различных дефектов, снижающих эксплуатационные свойства деталей машин. Бóльшой



вклад в теорию данного вопроса внесли такие ученые, как Е.И. Маслов, А.Ф. Худобин, Д.Г. Евсеев, А.Н. Резников, А.В. Якимов, А.В. Подзей, П.И. Ящерицин, В.А. Сипайлов, С.Н. Корчак и др.

Развитие процессов глубинного абразивного шлифования привело многих исследователей к необходимости более детального изучения структурных изменений в поверхностных слоях обрабатываемых материалов. Благодаря работам А.В. Якимова, М.С. Наермана, В.Д. Кальнера было установлено, что при определенных условиях шлифования, в поверхностных слоях может формироваться упроченный слой с образованием специфического мелкодисперсного мартенсита закалки твердостью до HRC 65...70, т.е. появляется возможность совмещения операций шлифования и термообработки. Последующие исследования этого вопроса, установление связи условий формирования упроченных слоев с режимами обработки, длительностью теплового контакта, в силу специфики процесса шлифования не могут объяснить характер структурно-фазовых превращений, наметить дальнейшие пути эффективного развития и создание новых способов шлифования, их автоматизации проектирования.

Среди других методов, способных провести поверхностную термическую обработки вместе с механической и обеспечить повышенный уровень эксплуатационных свойств является высокоэнергетический нагрев ТВЧ. Теоретические и практические основы этих технологий были разработаны С.Я. Турлыгиным, В.В. Александровым, И.П. Русинковским и другими. Основное их отличие от широко известных состоит в кратковременном характере термического воздействия, значительных удельных мощностях нагрева ( $2...20 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ ), увеличенных значениях КПД, меньшей энергоемкости процесса.

Основные исследования формирования структуры поверхностных слоев, также связываются в основном с режимами обработки, сдерживающими решение проблемы оптимизация теплового воздействия с целью получения требуемых свойств. Общими проблемами, присущими рассматриваемым методам обработки являются разноречивость мнений относительно свойств и механизма формирования структур поверхностных слоев.

В решение этих вопросов в материаловедении большой вклад внесли такие ученые, как Ю.М. Лахтин, Л.И. Тушинский, Б.Г. Гуревич, Б.Ф. Трахтенберг, М.Г. Лозинский, М.А. Тылкин, В.Д. Кальнер и другие.

Однако, рассматриваемые в настоящей работе методы характеризуются на порядок более высокими значениями скоростей нагрева - охлаждения, неравномерностью распределения температур по глубине поверхностного слоя, малыми значениями продолжительности нагрева, не позволяющими объяснить всю совокупность явлений, связанную с условиями формирования структуры в поверхностных слоях.

Отсутствие сведений о динамике распределения термических циклов, их параметров в реальных условиях обработки и связи с характером структурно-фазовых превращений в значительной степени сдерживает дальнейшее развитие высокоинтегрированных технологий для изго-

товления деталей машин с повышенным уровнем эксплуатационных свойств и современных методов их проектирования.

Общее представление о всем комплексе исследований, выполненных в полном соответствии с целями и задачами данной работы, дает структурная схема, представленная на рис. 1.

Вторая глава содержит результаты исследований по созданию системы математического моделирования тепловых явлений в процессах механической и поверхностной термической обработок и исследований параметров в термических циклах, организации баз и банков данных, пакетов прикладных программ.

Расчет температурного поля, выполненный с учетом всех основных особенностей рассматриваемых технологических процессов обработки материалов, представляет собой ключевую задачу, без решения которой переход к анализу структурных превращений и оценке термомеханических процессов оказываются невозможными. Формирование математической модели для оценки теплового состояния материала сводится к рассмотрению уравнения нестационарной теплопроводности - уравнение Фурье (1)

$$\nabla^2(\rho_T \cdot T) - \frac{\partial}{\partial t} (\rho_T \cdot c_T \cdot T) = 0, \quad (1)$$

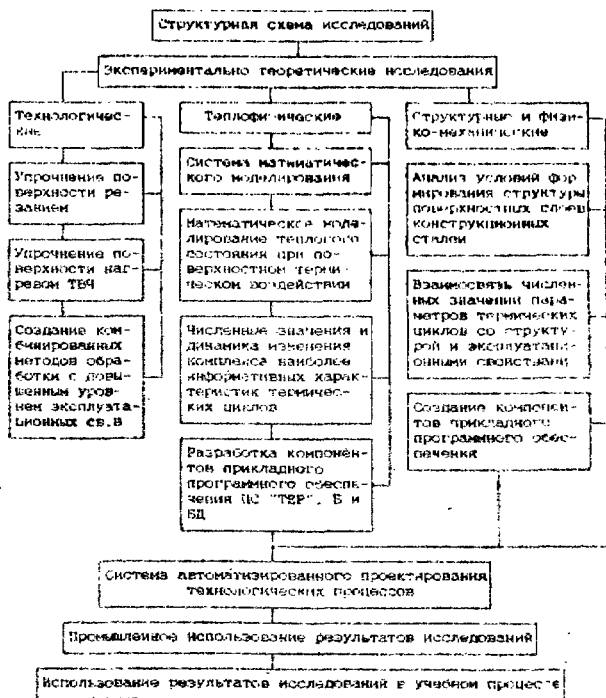


Рис. 1.

где  $T$  - температура;  $\tau$  - время;  $\lambda_T$  - удельная теплопроводность материала;  $C_T$  - удельная теплоемкость;  $\rho_T$  - удельная плотность; с начальными и граничными условиями, учитывающими особенности действия технологических факторов. Обобщенная расчетная схема, сформированная на основе проведенного анализа, имеет вид, указанный на рис.2. Начальные и граничные условия следующие:

- до начала действия источника ( $\tau < 0$ ) температура во всех точках материала одинакова и равна температуре окружающей среды;

$$T = T_{\text{окр.}} \quad (2)$$

- после начала и в течении всего времени нагрева  $0 < \tau < \tau_n$  на поверхности материала действует тепловой источник с удельной мощностью  $Q$ ;

- считаем, пренебрегая потерями на нагрев охлаждающей жидкости, что вся подводимая источником мощность расходуется в области его действия на нагрев тела

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

- на поверхности, где действует источник (вне его) и противоположной ей принимаются граничные условия вида

$$\alpha_1 T = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} ; \quad (4) \quad \alpha_2 T = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} ; \quad (5)$$

Кроме того, учитывая разнообразие реальных схем обработки нами рассмотрены два варианта построения математической модели в двухмерной постановке. асимметричная (двух видов) и плоская. Для практической реализации метода выбран метод конечных разностей (МКР).

Движение источника в расчетной схеме реализовано путем учета динамики изменения граничных условий в каждый из рассматриваемых в расчете моментов времени.

Конечно-разностные уравнения в МКР легко программируются и решаются методом итераций на ЭВМ. При выборе  $H$  - шага сетки и расчете  $\Delta T$  - временного интервала необходимо учитывать их взаимосвязь через критерий Фурье  $Fo$ . Уравнения имеют устойчивое решение при  $Fo < 0,25$ .

Предложенные расчетные схемы позволяют осуществить определение температуры в поверхностных слоях конструкционных сталей для раз-

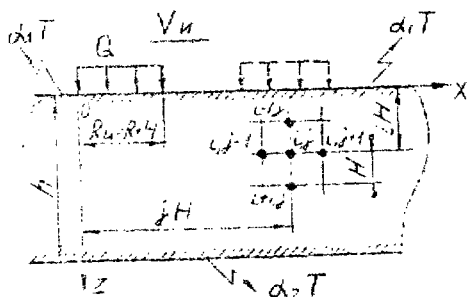


Рис.2. Обобщенная расчетная схема

личных схем шлифования. При этом значения удельной мощности источника принимаются равной 30...45% от значений эффективной мощности шлифования в зависимости от схемы и условий обработки, скорость движения - равной скорости вращения (движения) детали, - радиус (размер) источника - длине дуги контакта, а значения теплофизических характеристик металлов и коэффициентов теплоотдачи для разных способов охлаждения - по литературным данным.

Несмотря на отличия, имеющие место при применении нагрева ТВЧ, от поверхностных внешних источников тепла, найдена возможность использования рассматриваемых выше подходов. Это объясняется более широким использованием в практике генераторов ТВЧ, работающих в радиочастотном диапазоне до 500 кГц, снижающим значение глубины проникновения тока до десятых долей миллиметра, и результатами исследований, которые позволили установить характер перераспределения мощности источника при перемещении зоны нагрева вглубь материала. Последнее, как известно, связано с режимом изменением при достижении температуры точки Кюри, значений удельного электросопротивления и магнитной проницаемости. Величину мощности, выделенную на поверхности и в глубине материала определяли с учетом коэффициента перераспределения мощности источника ТВЧ.

Разработка метода расчета температурных полей и программных средств его реализации позволила решить комплексную задачу по созданию программной системы ПС, ориентированной как на исследователя проблемы, так и на разработчика комбинированных технологических процессов. Ядром системы является ПС "ТЕР" (рис.3), предназначенная для расчета температурных полей, модуля расчета термонапряжений, базу и банки данных по основным теплофизическим свойствам конструкционных материалов, их зависимостям от температур, режимным параметрам реальных технологических процессов, программных средств для расчета параметров термических циклов, комплекс программы для организации взаимодействия с создаваемыми базами и банками данных, многофункциональную сервисную систему. Работают модули в интерактивном режиме. Практическая реализация баз выполнена с помощью ПС "Clipper", формат баз данных - dBase. Используемая для визуализации результатов универсальная ПС "FEM SERVER" является средством графического отображения расчетов в виде цветного спектра, цветных изолиний, графиков по произвольно выбранному сечению, поверхностей в трехмерном пространстве, а также поддерживает менюобразный интерфейс с пользователем. Функции вывода позволяют получить твердые копии результатов. Состав технических средств, необходимых для функционирования ПС, ориентирован на IBM PC/AT.

Комплексная экспериментальная проверка расчетных методов, проведенная в работе, подтвердила работоспособность, эффективность и достаточную для практического применения (5...8%) точность созданного на основе разработанного расчетного метода программного комплекса.

Управляющая программа

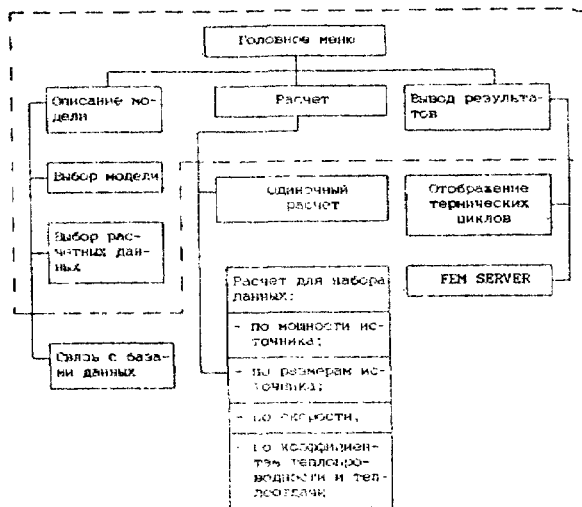


Рис.3. Структура программной системы расчета температурного поля ПС "ТЕР".

На основе экспериментально-теоретических исследований определена совокупность режимов обработки для различных схем упрочняющего исследования и нагрева ТВЧ. Сформированы базы и банки данных по режимам и условиям обработки для использования в ПС "ТЕР" при определении численных значений параметров термических циклов, динамике их изменений по глубине поверхностного слоя. Установлено подобие вида термического цикла на поверхности при упрочняющем шлифовании и нагреве ТВЧ, что подтверждает высказанное ранее предположение о возможности совмещения процессов механической и поверхностной термической обработок.

Определены зависимости численных значений параметров термических циклов от вида и характеристик источника нагрева, режимов и условий обработки. Так, значения скоростей нагрева ( $V_n$ ), рассчитываемые в интервале температур от  $400^{\circ}\text{C}$  до  $T_{\text{max}}$ , на поверхности увеличивается с ростом значений удельной мощности, размера источника и скорости его перемещения, достигая значений  $5,6 \cdot 10^3$   $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Зависимость максимальной температуры цикла ( $T_{\text{max}}$ ) от удельной мощности и размеров источника характерна ростом  $T_{\text{max}}$  при их увеличении, в то время как повышение скорости движения источника, а также применение способов увеличивающих охлаждающую способность приводит к уменьшению значений максимальной температуры цикла, темп которого различен для процессов упрочняющего шлифовании и нагрева ТВЧ.

Безличина длительности теплового воздействия в интервале температур выше критических ( $T_c$  в), определяемой как промежуток времени цикла между краями нагрева и охлаждения может достигать в модели-

руемом диапазоне условий - 4,5 с. Наибольшее влияние на изменение  $\tau$  в оказывает скорость движения источника. Скорость охлаждения (Vохл) рассчитывалась в интервале температур кривых охлаждения термических циклов от Tмах до 200°C.

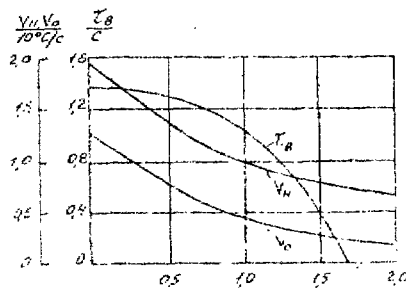
Установлено, что с увеличением размеров и мощности источника нагрева значения скоростей охлаждения уменьшаются, а повышение скорости движения источника и интенсивности охлаждения приводит к их росту. Анализ результатов позволил сделать вывод о преобладающем влиянии на значения Vохл теплоотода во внутренние слои материала по сравнению с теплоотдачей в окружающую среду. Подтверждением этому служит тот факт, что значения скоростей охлаждения рассчитанные как для процессов упрочняющего шлифования, так и для нагрева ТВЧ без СОЖ заметно превышает критическую скорость закалки. Это объясняет возможность, отмечаемую многими исследователями в осуществлении эффекта "самозакалки" за счет теплофизических свойств материала детали.

Определяющим, с точки зрения структурных изменений в поверхностном слое, является характер зависимости численных значений параметров термических циклов по глубине слоя.

Сформирован программный модуль для оценки динамики изменений параметров по глубине слоя с требуемой дискретизацией. Анализ результатов показал отличия, имеющие место в случае упрочняющего шлифования и применения нагрева ТВЧ. Это объясняется различием вида источников нагрева, что приводит, как показано в главе III к уменьшению количества структурных составляющих в поверхностном слое, т.е. переход к более однородной структуре при использовании нагрева ТВЧ.

В результате проведенного анализа впервые установлены численные значения параметров термических циклов и динамика их изменений по глубине упрочненного слоя (рис.4). Для конструкционных сталей в исследуемой области режимов и условий обработки диапазон значений параметров термических циклов лежат в следующих пределах:

Распределение скоростей нагрева и охлаждения,  
длительности теплового воздействия по глубине



глубина слоя, мм.

$$Q = 30 \text{ кВт/м}^2, V_n = 2,7 \text{ мм/с}, R_n = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \alpha = 15 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{°C}$$

Рис 4

$V_{н} - 200 \dots 4000 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ ;  $T_{\text{max}} - 1750 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $\tau_{в} - 0,2 \dots 5 \text{ с}$ ;  $V_{охл} - 500 \dots 2500 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ . На основе полученных результатов сформированы базы и банки данных по режимам и условиям обработки, численным значениям параметров термических циклов, созданы программные модули для системы автоматизированного проектирования. Для решения задачи оптимизации разрабатываемых технологических процессов по производительности и энергоёмкости предложен способ, основанный на использовании установленных по результатам математического моделирования закономерностей влияния значений удельной мощности источника и скорости его перемещения на глубину упрочнения. В главе 6 приведены результаты практического применения предложенного способа. Отличительная особенность его заключается в существенном уменьшении рассматриваемой области режимных параметров, внутри которой реализована задача оптимизации.

Сформирована подсистема "параметры термических циклов", включающая программные средства определения численных значений параметров, адаптированных к процессам скоростного нагрева, имеющих собственную информационную среду с использованием созданных баз и банков данных, и средств взаимодействия с другими подсистемами.

В третьей главе рассмотрены вопросы взаимосвязи основных закономерностей формирования структуры поверхностного слоя и уровня эксплуатационных свойств в зависимости от параметров термических циклов и создания баз и банков данных типовых структурных комплексов как элементов автоматизированной системы проектирования.

Исследовалось влияние скорости нагрева, максимальной температуры термического цикла, продолжительности выдержки при температурах выше критических точек, скорости охлаждения в диапазоне значений, приведённых во второй главе. Анализ структуры поверхностных слоёв проводился методами оптической и электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального исследованиями для широкоиспользуемых на практике конструкционных сталей 45, 40Х, 40ХН2МФА и сталей У8.

Высокие значения скоростей нагрева ( $200 \dots 4000 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ ) оказывают значительное влияние на формирование конечной структуры, определяющей уровень упрочнения стали. Так, увеличение скорости нагрева стали 45 до  $1500 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$  приводит к уменьшению величины аустенитного зерна с 30 до 5,5 мкм. Это связано с резким увеличением термодинамического потенциала, приводящее к зарождению большого количества центров кристаллизации  $\gamma$ -фазы, что и приводит при последующем их росте к уменьшению среднего диаметра зерна. Дальнейшее увеличение скорости нагрева не ведёт к сколько-нибудь ощутимым изменениям величины аустенитного зерна. При высокоскоростном нагреве сохраняются известные из практики обычной термической обработки процессы, приводящие к измельчению зерна аустенита. Применяя различные скорости нагрева и используя закономерности структурной наследственности стали, можно в широком диапазоне регулировать параметры структуры поверхностного слоя (Таблица 1).

Таблица 1

Влияние предварительной термической обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 45

№ п/п	Предварительная термическая обработка	Исходный размер зерна, мкм	Поверхностная термическая обработка	Диаметр зерна аустенита, мкм	HV
1.	Отжиг	50	Упрочняющее шлифование	15	5800
2.	Нормализация	30	- " -	10	6570
3.	Закалка	-	- " -	5	8050
4.	Закалка	-	Обработка ТВЧ	7	7600

В процессе поверхностной термической обработки с использованием высокоэнергетических источников нагрева максимальная температура достигаемая в процессе термического цикла обычно выше той, которая предпочтительна при объемной термической обработке (до 2000 °С). Рост максимальной температуры нагрева практически не оказывает влияние на размер зерна аустенита. Однако существенное повышение  $T_{max}$  не желательно из-за резкого увеличения размеров кристаллов  $\gamma$ -фазы.

Активная пластическая деформация в процессе упрочняющего шлифования в сочетании с высокой температурой нагрева приводит к активизации диффузии атомов углерода в результате чего в тонком поверхностном слое наблюдается его повышенное содержание, что приводит к увеличению микротвердости стали 45 до 7900 HV.

При скоростном нагреве и незначительной выдержке при температуре аустенитизации отмечается незавершенность диффузионных процессов. После образования аустенита при переходе через критические точки  $A_{c1}$  и  $A_{c2}$ , вследствие малого времени не успевают проходить гомогенизационные процессы. В результате после закалки электронномикроскопические исследования показывают наличие в поверхностном слое мартенсита разных морфологических форм.

В сочетании с высокой температурой термического цикла выдержка в течение 2 с. достаточна для завершения образования аустенита. Увеличение продолжительности выдержки приводит к прогреву деталей на большую глубину и, как следствие, увеличению толщины упрочненного слоя, которая при упрочняющем шлифовании может достигать 1,5...2,0 мм (рис.5).

С одной стороны увеличение длительности выдержки способствует более полному протеканию диффузионных процессов при температуре аустенитизации, что приводит к выравниванию химического состава в объеме зерна, а с другой стороны к росту кристаллов  $\gamma$ -фазы (что наблюдается при высоких  $T_{max}$ ), и как следствие к увеличению размеров конечной структуры (рис.6). Структурный оптимум наблюдается при



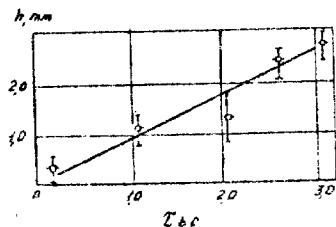


Рис.5

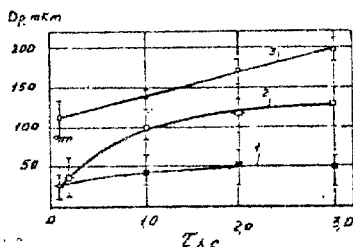


Рис.6

1- $T_{max} = 900^{\circ}C$ ; 2- $T_{max} = 1500^{\circ}C$ ;  
3- $T_{max} = 1800^{\circ}C$  - исходный размер

длительных выдержках - до 3 с. и невысоких значениях  $T_{max}$  (1300...1500 $^{\circ}C$ ), что приводит к увеличению толщины упрочненного слоя, имеющего мелкозернистую структуру, хотя осуществление такого термического цикла не желательно с точки зрения производительности процессов поверхностного упрочнения.

Для упрочняющего шлифования, или закалки ТВЧ, подробно рассматриваемых в данной работе скорость охлаждения разогретого поверхностного слоя можно менять в достаточно широких пределах путем непосредственного охлаждения за счет теплоемкости самой детали и применения внешних охлаждаемых сред, подаваемых с различной интенсивностью в зону обработки после прохождения инструмента.

Реальный диапазон изменений скорости охлаждения для упрочняющего шлифования лежит в пределах от 200 до 1800 $^{\circ}C/c$ , и для индукционной закалки от 200 до 2100 $^{\circ}C/c$ .

В работе подтверждено, что при поверхностном упрочнении критическая скорость охлаждения для получения мартенсита у сталей данного химического состава должна быть выше, чем в случае объемной термической обработки, во избежание выделения перлита в участках, где кристаллы аустенита имеют низкую концентрацию углерода или других химических элементов из-за неоднородности структуры. Как показано во второй главе, значения параметров термических циклов по глубине упрочненного слоя отличаются друг от друга. Таким образом, для каждого из слоев поверхности существуют свои значения комплексов параметров, что приводит к образованию различных структур. В таблице 2 приведены результаты исследований по взаимосвязи параметров термического цикла с образующейся структурой в различных слоях упрочненной зоны.

В результате широких экспериментальных исследований в реальной области рассматриваемых схем обработки, реализующих различные формы термических циклов и совокупность численных значений параметров, были установлены 5 типовых структурных комплексов. Последнее позволяет осуществить на практике идею управления комплексом эксплуатационных характеристик путем назначения и поддержания в процессе об-

Связь параметров термических циклов с различными типами структуры поверхностных слоев

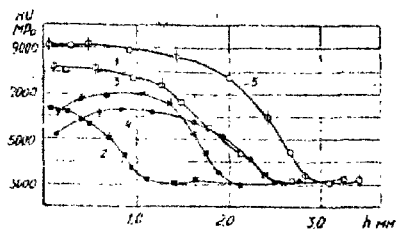
Значения параметров термических циклов				Тип структуры слоя	Твердость Н <sub>у</sub> , МПа
V <sub>н</sub> , °C/с	T <sub>max</sub> , °C	T <sub>в</sub> , C	V <sub>охл</sub> , °C/с		
500...4000	950	0,5	800...1800	Мартенсит	9800...8000
200...1500	850...900	0,4...1,5	250...400	Переходы структ.	6300...5100
до 1550	720...850	0,3...0,15	50...100	Перлит	-
200...1000	720...780	0,3...0,5	500...700	Феррит + мартенсит	-

работки требуемых для получения необходимого структурного комплекса значений параметров термических циклов.

Комплекс эксплуатационных свойств оценивался показателями конструктивной прочности, остаточных напряжений и изменений микротвердости в поверхностных слоях, износостойкости при сухом и граничном трении, контактной выносливостью. Установлено, что величина и значения остаточных напряжений определяется структурным состоянием и глубиной упрочненной зоны. Наиболее благоприятны с точки зрения конструктивной прочности величина (до 800 МПа) сжимающих напряжений на поверхности наблюдается у пятого типа структуры характерной наличием "белого слоя". Снижение уровня сжимающих напряжений до 500 МПа и глубины их залегания присуще четвертому типу структуры с наличием на поверхности троостита. Следует отметить, что распределение величины остаточных напряжений и их знака по глубине образцов достаточно сложное и зависит от типа структуры в том или ином слое и параметров термических циклов.

Так у образцов имеющих структуру второго типа на поверхности наблюдаются растягивающие напряжения величиной до 200 МПа. При переходе от ферритно-мартенситного слоя к слою имеющему структуру мелкоигльчатого мартенсита остаточные напряжения меняют свой знак с плюса на минус и по величине достигают значения 400 МПа. Величина и знак остаточных напряжений для основных типов структурных комплексов приведены в таблице 3. На рис. 7 приведен график распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя для различных типов структур. Попытки по сравнению с обычной термической обработкой с получением той или иной структуры, значения микротвердости объясняются во-первых дисперсностью структуры из-за высоких скоростей нагрева, а во-вторых наличием высоких значений сжимающих напряжений на поверхности образца. Как видно из рисунка 7 наибольшими значениями микротвердости и глубины упрочненного слоя обладает структура пятого типа. Поверхностное упрочнение по режимам, обеспечивающим образование на поверхности "белого слоя" или мелкоигльчатого март-

Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя



1-(М)+(ФМ)+(ПП)+(ФП); 2-(ФМ)+(ФП); 3-(ФМ)+(М)+(ФП);  
4-(Тр)+(М)+(ФМ)+(ФП); 5-(БС)+(М)+(ФП).

Рис. 7.

Таблица 3

Взаимосвязь структурного состояния поверхностных слоев с эксплуатационными свойствами среднеуглеродистых сталей

Типы структурных комплексов	Глубина упрочнения, мм	Контактная выносливость (число циклов до разрушения)	Микротвердость на поверхности, НУ	Остаточное напряжение на поверхности, МПа	Изнашивание без смазки мм <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> за 1000 м	Изнашивание со смазкой мм <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> за 1000 м
1	1.5...2.5	$6 \cdot 10^5$	8050	-720	0.25	0.15
2	0.5...0.7	-	-	+200	0.42	-
3	1.2...2.0	$3.7 \cdot 10^5$	-	+250	0.33	-
4	0.8...2.4	$4.9 \cdot 10^5$	4900	-480	0.35	0.23
5	1.8...3.0	$5.6 \cdot 10^5$	9000	-800	0.22	0.12
6ж	-	$4.2 \cdot 10^5$	5200	-500	0.40	0.21

6ж - Сталь У8. Объемная закалка с отпуском (100°С).

тенсита существенно снижает скорость изнашивания стали по сравнению с объемной закалкой и низким отпуском. На рис. 6 показана кинетика изнашивания стали 45 при трении скольжения без смазки с различными типами структур, полученных после упрочняющей поверхностной обработки. Наименьшая потеря веса при изнашивании, независимо от длины пути трения наблюдается у пятого типа структуры. Высокая сопротивляемость изнашиванию данной структуры объясняется самой высокой твердостью поверхностного слоя. Уменьшение микротвердости поверхности при переходе от пятого типа структуры к первому, где на поверхности наблюдается образование неэквивалентного мартенсита приводит к увеличению потери веса, то есть к снижению износостойкости материала. Получая ту или иную структуру при помощи различных методов поверхностной обработки упрочнения можно в определенном диапазоне изменять сопротивляемость ее изнашиванию при сухом трении скольжения.

Зависимость потери веса образцов из стали 45 после  
поверхностного упрочнения от длины пути трения.

Трение скольжение без смазки.



1-(М)+(ФМ)+(ПП)+(ФП); 2-(ФМ)+(ФП); 3-(ФМ)+(М)+(ФП);  
4-(Тр)+(М)+(ФМ)+(ФП); 5-(БС)+(М)+(ФП); 6-Зак+НО(1000 С)

Рис.8.

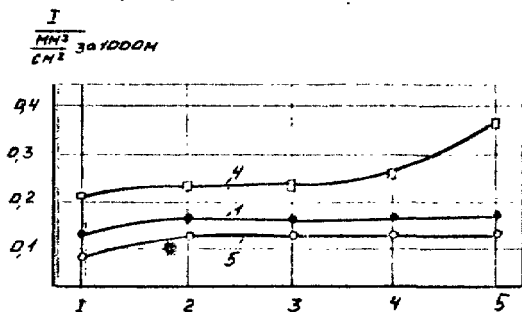
Данные структуры можно применять для увеличения износостойкости трущихся деталей в машинах и аппаратах для текстильной и пищевой промышленности, где специфические условия работы не позволяют использовать смазку. В работе также проводилась оценка влияния различных структур, получаемых в процессе поверхностной термической обработки на износостойкость при трении скольжения в условиях граничной смазки (рис.9).

Как и при сухом трении скольжения наименьшая интенсивность изнашивания независимо от удельной нагрузки на пару трения, наблюдается для образцов первого и пятого типов. Интенсивность изнашивания у них остается постоянной не зависимо от удельной нагрузки на пару трения. Упрочняющая поверхностная обработка, приводящая к образованию на поверхности троостита (четвертый тип структуры) обладает меньшей износостойкостью вследствие своей низкой твердости по сравнению с первыми двумя образцами. Резкое увеличение интенсивности изнашивания в данном случае наблюдается при удельной нагрузке на пару трения свыше 4 МПа. Оценка контактной выносливости упрочненных слоев производилась по определению диаметра пятна контакта в зависимости от количества циклов нагружения до момента интенсивного пittingобразования. Как показали проведенные исследования, наилучшей контактной выносливостью обладают образцы со структурой первого типа. Увеличение контактной выносливости в 1,5 раза по сравнению со сталью У8 подвергнутой закалке объясняется высоким уровнем сжимающих напряжений в поверхностном слое.

Данные о свойствах поверхностного слоя для всех типов структурных комплексов приведены в таблице 3.

В четвертой главе рассмотрены вопросы, относящиеся к практике комбинированной (шлифование с управляемым термическим воздействием) обработки.

Влияние типа структуры поверхностного слоя после упрочняющего шлифования на интенсивность изнашивания (I) при трении скольжения со смазкой.



Удельная нагрузка на пару трения,  $P$ , МПа.

1-(М)+(ФМ)+(ПП)+(ФП); 4-(Тр)+(М)+(ФМ)+(ФП);

5-(ВС)+(М)+(ФП).

Рис. 9.

Основной объем этих исследований выполнен на специализированных лабораторных и промышленных установках, созданных на базе серийных шлифовальных станков моделей ХШЗ-20Н, 3М151В, 312М и др. и подкреплен применением разработанной математической модели процесса упрочняющего шлифования с использованием теории планирования эксперимента. Это позволило определить и исследовать количественные связи режимов резания с основными технологическими параметрами обработки: точностью, производительностью, шероховатостью обработанной поверхности, глубиной упрочнения, износом абразивного круга и эффективной мощностью, и определить режимы чистой обработки, исключающие возможность изменения исходного состояния упрочненной поверхности и их влияния на точность деталей и шероховатость поверхности.

Последнее существенно расширяет область применения разработанных технологических процессов для изготовления деталей с повышенными требованиями к точности и шероховатости.

Теплофизическими и технологическими исследованиями установлена область режимов резания, гарантирующая осуществление упрочняющего эффекта. Так, значения скорости резания, оказывающие заметное влияние на температуру и динамику ее распространения по глубине детали, могут быть ограничены только из условий безопасных режимов работы (для применяемых абразивных кругов — до 35 м/с). Значения глубины резания, которые увеличивают теплонапряженность процесса, могут ограничиваться жесткостью технологической системы. Ее величина в зависимости от этого может колебаться от  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м до  $1,2 \cdot 10^{-3}$  м.

Величины скорости вращения детали в условиях круглого наружного глубинного шлифования необходимо изменять в пределах

$(1...6) \cdot 10^{-3}$  м/с. В качестве абразивного инструмента следует использовать, обладающие оптимальной стойкостью, шлифовальные круги из электрокорунда белого зернистостью 16...25, твердостью СТ2...СТ3. В случае применения автономного источника нагрева (нагрев ТВЧ) в качестве инструмента использовались шлифовальные круги с характеристиками, рекомендуемыми для чистовой механической обработки. Из условия, обеспечивающих требуемое качество поверхности деталей, стойкость круга, оптимальную теплонапряженность и условия охлаждения в качестве ОЖ выбран водный раствор, содержащий 1% -  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и 2% -  $\text{NaNO}_2$ .

При использовании теории планирования эксперимента в качестве входных факторов принимались: глубина резания, скорость вращения детали и ширина шлифования. Выходными же являлись: эффективная мощность шлифования, упругие отжата технологической системы, износ круга и глубина упрочненного слоя. Установлено, что точность линейных размеров детали определяется, в основном, износом круга и упругими отжатами. Анализ зависимости износа инструмента (рис.10) показывает, что ширина шлифуемой поверхности на износ круга практически не влияет, в то время как износ увеличивается пропорционально глубине резания. Рост скорости вращения детали приводит к повышению износа только при достижении ее величины 0,003 м/с, что связывается с изменением механизма износа.

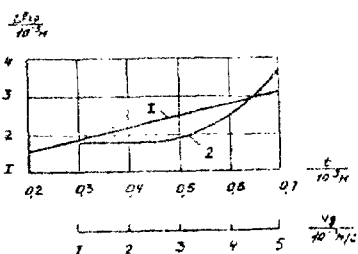
Исследования показали, что при скоростях вращения детали до 0,003 м/с наибольшее влияние на точность обработки оказывают упругие отжата. При дальнейшем увеличении скорости вклад упругих отжата и износа круга становится сопоставимым (рис.11). Это дало возможность установить величину погрешности диаметра детали, которая меняется в пределах  $(3,0...15,5) \cdot 10^{-5}$  м и фактически определяет этим основную часть припуска под чистовую обработку. Дополнительными экспериментами установлено, что величина погрешности диаметра детали при использовании одно- и двухоборотного выхаживания уменьшается в среднем более, чем в 2 раза, и составляет  $(2...6) \cdot 10^{-5}$  м, определяясь в основном износом инструмента.

Зависимость шероховатости поверхности по критерию Ra свидетельствует об ее увеличении с ростом глубины резания и скорости вращения детали, до величины 0,003 м/с с последующей стабилизацией, что объясняется особенностью процесса стружкообразования, который характеризуется прекалыванием процесса резания или пластического течения. Значения шероховатости в исследуемой области режимов изменяется, по критерию Ra, от 1,25...6,3 мкм до 0,8...0,63 мкм после однооборотного выхаживания (рис.12).

Исходя из этого были сформулированы требования по формированию оптимального цикла обработки.

Глубина упрочненного слоя изменяется в пределах  $(0,25...1,3) \cdot 10^{-3}$  м, с ростом глубины резания, она увеличивается, а с увеличением ширины шлифования и скорости вращения детали, снижается.

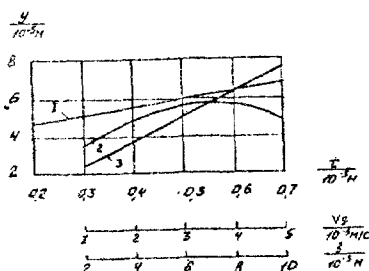
Зависимость износа инструмента от глубины резания и скорости вращения детали.



1- $V_{\text{в}} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  м/с;  
2- $t = 0,3 \cdot 10^{-3}$  и.

Рис.10.

Зависимость упругих отжатий технологической системы от режимов шлифования.



$\delta = 6 \cdot 10^{-3}$  м; 1- $V_{\text{в}} = 2 \cdot 10^{-3}$  м/с;  
2- $t = 0,3 \cdot 10^{-3}$  м;  
3- $t = 0,6 \cdot 10^{-3}$  м;  $V_{\text{в}} = 1 \cdot 10^{-3}$  м/с.

Рис.11.

Исследования производительности комбинированных процессов обработки показывают, что она заметно превосходит производительность обычного шлифования.

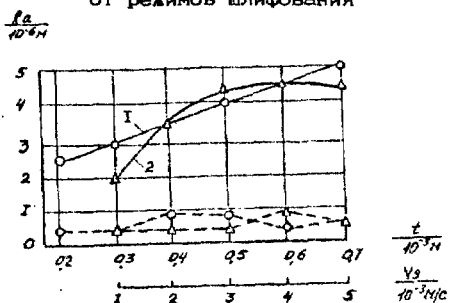
Проведенным анализом технологических возможностей новых методов обработки, с учетом технических требований на деталь, сформулированы подходы к решению задачи оптимизации режимов обработки. Суть их заключается в определении типа структуры, которую надо сформировать в поверхностных слоях детали, чтобы обеспечить заданный уровень ее эксплуатационных свойств. Далее с учетом результатов, приведенных в главах 2 и 3 определяются режимы и условия термического воздействия, и с учетом требований по точности и шероховатости обработки, уточняются режимы и условия обработки, способные обеспечить решения этой задачи. Для реализации указанного подхода сформированы базы и банки данных, порядок использования которых рассматривается в главе 5.

При исследовании эффективной мощности и силы резания, с помощью ПК "ТЕР" были определены численные значения параметров термических циклов и установлена их взаимосвязь с технологическими параметрами. По результатам этого сформированы базы данных "Режимы обработки".

Пятая глава работы посвящена разработке и практической реализации концепции системы автоматизированного проектирования технологических процессов комбинированной обработки и рассматривает вопросы практического ее использования при разработке новых способов обработки.

Разработанные в главе 2 математические модели расчета температурных полей, а также подсистемы "Параметры термических циклов", "Технология", "Структура", "Свойства" формирование которых рассмотрено в 3, 3 и 4 главах работы составляют функциональное ядро созд-

Зависимость шероховатости поверхности от режимов шлифования



1- $V_g = 2 \cdot 10^{-3}$  м/с; 2- $t = 0,4 \cdot 10^{-3}$  м; - после упрочняющего шлифования. --- - после однооборотного выхаживания.

Рис. 12.

данной системы автоматизированного проектирования совмещенных технологических процессов (СТП). Помимо использования в задачах проектирования новых технологических процессов, система представляет собой мощный инструмент для исследований высокоскоростных термических воздействий на поверхностный слой обрабатываемого материала. Структура системы традиционна и включает мониторинговую систему, подсистему прикладного программного обеспечения, базу данных с соответствующей системой управления (СУБД). Функции и задачи, решаемые системой, отражены в наиболее важном - прикладном компоненте, содержащем все основные проектирующие и обслуживающие процесс проектирования технологических процессов подсистемы прикладного программного обеспечения (рис. 13).

Из других основных функциональных подсистем следует выделить роль подсистемы "Свойства", которая дает возможность комплексного сопоставления уровня эксплуатационных свойств конструктивных ступеней по показателям контактной выносливости и изнашивания в различных условиях с результатами работы деталей в реальных условиях, что позволяет правильно сформулировать стратегию всех этапов проектирования технологического процесса. Подсистема "Опыт эксплуатации" разработана для сбора и анализа данных о характере работы деталей ткацких станков. Результаты этого анализа были использованы в главе 3 при разработке методик исследования эксплуатационных свойств. Проведение оперативного анализа данных об условиях эксплуатации означает практическую реализацию в системе принципа "обратной связи" разработчика, позволяющего повысить качество проектирования.

Важная роль в поддержке всего процесса проектирования принадлежит обслуживающим подсистемам, таким как "Деталь" по подготовке необходимой информации о конкретных деталях ткацкого станка, "Графика" - подсистеме графического отображения результатов расчетов и объектов проектирования. Подсистема "Деталь" включает основные типоразмеры элементов деталей и их характеристики, и имеет дополни-



1. Программная система математического моделирования ПС "ТЕР"	Основной аппарат расчета температурных полей
2. Подсистема "Параметры термических циклов"	Расчетные методы оценки численных значений параметров термических циклов: - скорости нагрева, °C/с; - максимальной температуры цикла, °C; - длительности цикла при температуре выше критических, с; - скорости охлаждения, °C/с
3. Подсистема "Структура"	Программные средства исследования структуры поверхностных слоев, БД типовых структурных комплексов
4. Подсистема "Свойства"	Программные средства оценки уровня эксплуатационных свойств, БД
5. Подсистема "Режимы"	Программные средства, БД режимов и условия обработки
6. Подсистема "Графика"	Реализация графического интерфейса пользователя для подготовки графической и текстовой информации
7. Подсистема "Текст"	
8. Подсистема "Нормативы"	
9. Подсистема "Деталь"	
10. Подсистема "Опыт эксплуатации"	Система сбора и анализа данных о работе деталей и узлов
11. ППИ "Статистика"	Программы для обработки результатов экспериментов и их хранения
12. ППО "Оптимизация"	Пакеты программ регистрационного анализа и оптимизации
13. Интегрированная система "Справочник"	Интегрированная база данных по физическим характеристикам и другим БД

Рис.13. Основные компоненты прикладного программного обеспечения системы автоматизированного проектирования "СТП"

тельные стандартные программные средства (AutoCAD) для формирования машинного архива чертежей или эскизов деталей и их элементов.

На основе разработанных компонентов, сформирована новая автоматизированная технология проектирования, существенно изменившая содержание основных этапов разработки технологических процессов изготовления деталей таких станков с необходимым уровнем эксплуатационных свойств.

Например, предварительный этап проектирования по новой технологии с использованием подсистемы "Опыт эксплуатации" и подсистемы "Свойства" позволяет более обоснованно сформулировать стратегию проектирования, осуществить оценку предполагаемого уровня производительности и энергоемкости технологического процесса.

Использование на раннем этапе проектирования подсистемы "Опыт эксплуатации" представляет, по существу, практическую реализацию принципа обратной связи "эксплуатация-проектировщик" в разрабатываемой системе.

Применение основных расчетных подсистем ПС "ТЕР", "Параметры термических циклов", "Технология" и других, позволяет выполнять численные эксперименты с использованием оптимизационных подходов, определить необходимую схему, режимы и условия обработки, обеспечивающие требуемый уровень эксплуатационных свойств, повышение произ-

водительности и возможность снижения энергоемкости спроектированного технологического процесса.

Разработанная система и ее компоненты нашли широкое применение при разработке и исследовании новых технологических процессов.

Так, по результатам исследований, приведенных в главе 3, определены условия создания в поверхностных слоях пяти основных структурных комплексов, имеющих различный уровень эксплуатационных свойств. Для обеспечения необходимых, в каждом конкретном случае, условий их создания на участке врезания разработаны новые способы шлифования, устанавливающие алгоритмы изменения поперечной подачи шлифовального круга при врезании в неподвижную и подвижную деталь. Это обеспечивает получение требуемых свойств по всему профилю детали и расширяет технологические возможности процессов шлифования с одновременным упрочнением поверхностного слоя за счет тепла, выделяемого при резании. С целью повышения эффективности упрочняющего шлифования, уменьшения износа инструмента, увеличения глубины упрочнения на базе использования основных элементов разработанной системы предложен новый способ шлифования абразивным инструментом с винтовыми канавками, значения угла подъема и размеры которых определяются по предложенной в работе зависимости.

Важной задачей, решение которой с помощью высказанных выше подходов удалось найти, являлась разработка нового способа и устройства для изготовления одной из самых ответственных деталей ткацкого станка - пружины прокладчика утка. Она предназначена для захвата и надежного удержания утка (нити) в процессе производства ткани на современных бесчелночных ткацких станках СТБ, определяя возможность бесперебойной работы оборудования.

По предложенному способу шлифования, взамен немеханических или слесарных, возможно образование любого профиля разжимных губок пружины с требуемым качеством поверхностного слоя, обеспечивающего долговременную и надежную работу станка.

Предложенный способ поверхностной термической обработки с использованием нагрева ТВЧ позволил решить проблему упрочнения пазовых и торцепазовых кулачков ткацких автоматов. Это достигнуто путем оптимизации теплового воздействия на рабочих поверхностях криволинейного контура, воспринимающих различные нагрузки в процессе эксплуатации, что дало возможность повысить производительность обработки и снизить энергоемкость.

Приведенные результаты не исчерпывают всех возможностей, которые были реализованы с использованием разработанной системы или отдельных ее компонентов и положены в основу ряда изобретений и патента, по которым получены авторские свидетельства.

Шестая глава посвящена разработке и практическому использованию новых технологических процессов и оборудования для совмещения механической и поверхностной термической обработок, с учетом вопросов экологии и охраны жизнедеятельности. Проведен анализ экономической эффективности разработок, а также состояние и развитие лабораторной базы и учебно-методических разработок.

Из результатов исследований, приведенных в главах 4, 5 по формированию в поверхностных слоях конструкционных сталей требуемого типа структурных комплексов, определена область рациональных режимов шлифования:  $t = (0,3...0,6) \cdot 10^{-3}$  м,  $V_s = (2...5) \cdot 10^{-3}$  м/с,  $V_p = 35$  м/с, а также основные технологические параметры процесса - производительность  $(0,6...2,0) \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup> /с.м, износ круга -  $(1,6...3,2) \cdot 10^{-5}$  м, погрешность диаметра образцов -  $(6,9...9,5) \cdot 10^{-5}$  м, толщина упрочненного слоя -  $(0,4...0,8) \cdot 10^{-3}$  м, шероховатость поверхности -  $(1,25...6,3) \cdot 10^{-6}$  м.

Исходя из этого, с помощью основных компонентов автоматизированной системы проектирования были определены режимы и условия обработки, обеспечивающей повышенный уровень эксплуатационных свойств и производительности более 40 видов дисковых кулачков ткацких станков СТБ. В разработанном технологическом процессе реализованы, защищенные авторскими свидетельствами, способы шлифования, устанавливающие алгоритмы изменения поперечной подачи круга при врезании. Для обеспечения равномерности упрочнения криволинейной поверхности кулачков, проведена разработка и исследование 2-х вариантов технологических процессов: с САУ и без нее. Для этого осуществлена модернизация копировально-шлифовального станка ХШЗ-20Н и установлена эффективная область применения САУ. По результатам практического использования установлено, что эксплуатационные свойства кулачков с упрочненным профилем увеличиваются в 1,7-2,3 раза, при снижении трудоемкости на одну деталь, в среднем, на 0,6 минуты.

Разработка промышленной технологии фасонного шлифования самой массовой и ответственной детали ткацкого станка СТБ - пружины прокладчика утка основывалась на способе, защищенном авторским свидетельством, устройстве и инструменте для его реализации. Способ обработки, предложенный на базе использования основных компонентов системы, обеспечивает требуемое термическое воздействие на поверхности губок пружины любой формы с максимально возможной в этом случае производительностью. Это обеспечивается установленной зависимостью изменения подачи губок пружины на шлифовальный круг в устройстве, которое размещено на рабочий стол заточного станка мод. 3Д642Е и работает в полуавтоматическом режиме. За счет этого повышена надежность захвата нити на 5%, а производительность процесса увеличена в 18 раз. Данный технологический процесс используется на Новосибирском заводе "Сибтекстильмаш", Чебоксарском заводе текстильного машиностроения, на многих технических центрах ткацких фабрик государств СНГ.

Разработанные на основе предложенных способов обработки технологические процессы упрочняющего шлифования деталей автомобилей и тракторов металлорежущих инструментов внедрены на ряде предприятий России и государств СНГ.

В результате проведенного анализа возможностей интеграции операций механической и поверхностной термической обработкой спроекти-

рован и изготовлен типовой технологический модуль, состоящий из автономного закалочного контура, полуавтоматического устройства, выполненного в виде манипулятора, для базирования, зажима и транспортировки в зону обработки инструмента (индуктора). Модуль имеет автономную систему подвода энергии и охлаждения индуктора и закалочного контура. Эта разработка защищена патентом СССР. На базе этого созданы ряд станочных комплексов на базе шлифовальных станков мод. 312М, 3М151В, ХШЗ-20Н, 3А151 и др., что позволяет без переустановки получить окисчатые размеры детали (шлифованием) и требуемые уровни эксплуатационных свойств (нагрев ТВЧ). Это обеспечивается путем установления и поддержания в процессе обработки назначенных режимов и условий термического воздействия. Причем поверхностная термическая обработка, в этом случае, может осуществляться с использованием всех формообразующих движений станка со значениями удельных мощностей  $(2...8) \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, обеспечивающих режимы высокоэнергетического нагрева ТВЧ и величинами зазоров в системе деталь-индуктор в пределах 0,1..0,8 мм.

Указанное оборудование реализует новый технологический процесс поверхностной термической обработки, защищенный авторским свидетельством. Данное оборудование используется на целом ряде заводов России и стран СНГ. На базовом предприятии текстильного машиностроения (завод "Сибтекстильмаш") создан специализированный участок в одном из цехов механической обработки, на который переведена вся номенклатура деталей ткацких станков СТБ и СТР свыше 60 наименований, изготавливаемых из конструкционных сталей (сталь 60, 45, 40Х, 40ХН и др.). Это позволило уменьшить припуск и исключить одну из операций шлифования, увеличить производительность на 20%, уменьшить энергозатраты до 30%, повысить уровень эксплуатационных свойств.

Успешно реализованы технологические процессы обработки криволинейных пазов на основе предложенного способа поверхностной термической обработки, защищенного авторским свидетельством. Большая группа пазовых и торцепазовых кулачков и кулачковых валов основных модификаций ткацких станков СТБ и рапирных СТР обрабатывается по разработанной технологии с высокой эффективностью.

С учетом особенностей рассматриваемых в работе новых технологических процессов и оборудования для его реализации проработаны вопросы экологии и обеспечения безопасности жизнедеятельности. Разработанные технические и практические решения обеспечивают соблюдение необходимых требований указанных аспектов проектирования и эксплуатации оборудования.

Суммарный экономический эффект от использования разработанных технологических процессов, оборудования и системы автоматизированного проектирования составляет 1,5 млн. рублей (в ценах 1991 года).

1. Разработаны актуальные проблемы теории и практики комбинированных (шлифование с управляемым термическим воздействием) методов обработки и предложены новые технологические процессы, обеспечивающие повышенный уровень эксплуатационных свойств деталей машин. Найдены и обоснованы способы управления этими свойствами, за счет формирования в поверхностных слоях среднеуглеродистых сталей требуемого структурно-напряженного состояния, обеспечиваемого поддержанием в тепловых процессах комбинированной обработки установленных значений комплекса параметров термических циклов.

2. Разработан и реализован на практике эффективный инструмент оценки и анализа системы наиболее информативных параметров термических циклов от теплового воздействия в технологических процессах комбинированной обработки. Таким инструментом является программная система ПС "ТЕР", базирующаяся на рассмотренных в работе математических моделях, учитывающих динамику теплофизических процессов, особенности реальных схем и условий обработки. ПС "ТЕР" включает модули для расчета и анализа температурных полей, параметров термических циклов, банки данных и многофункциональную сервисную систему.

3. Впервые получены численные значения параметров термических циклов (скоростей нагрева и охлаждения, максимальной температуры и длительность выдержки при температурах выше критических), определена область режимов комбинированной обработки, в том числе с использованием нагрева ТВЧ, обеспечивающих получение эффекта упрочнения. Установлен диапазон значений параметров термических циклов для конструкционных сталей;  $V_n$  - 200-4000 °C/с;  $T_{max}$  до 1750 °C;  $\tau_v$  - 0,2-3 с;  $Vo_{охл}$  300-2500 °C/с, который зависит от вида источника нагрева, глубины упрочненного слоя, режимных параметров технологических процессов, и характеристик материала. Сформированы базы данных, используемых в автоматизированной системе проектирования.

4. Структурными и физико-механическими исследованиями показано, что совокупность численных значений параметров термических циклов в каждом из слоев по глубине упрочнения закономерно определяет характер структуры формирующейся в результате термического воздействия на поверхностный слой. Так например, при  $V_n = 500-4000$  °C/с;  $T_{max} = 950$  °C;  $\tau_v = 0,5$  с;  $Vo_{охл} = 600-1800$  °C/с структура слоя представляет мартенсит с твердостью 7400-8050 МПа, если  $V_n = 200-1500$  °C/с;  $T_{max} = 850-900$  °C;  $\tau_v = 0,4-1,5$  с;  $Vo_{охл} = 250-400$  °C/с, то образуется структура с твердостью 6300- 5100 МПа, а при  $V_n = 1500$  °C/с;  $T_{max} = 720-850$  °C;  $\tau_v = 0,15-0,3$  с;  $Vo_{охл} = 50-100$  °C/с образуется перлит и при  $V_n = 200-1000$  °C/с;  $T_{max} = 720-780$  °C;  $\tau_v = 0,3-0,5$  с;  $Vo_{охл} = 500-700$  °C/с структура представляет собой смесь (феррит + мартенсит). Сформированы базы данных по связи численных значений параметров термических циклов со структурой упрочненной зоны.

5. Для исследованных среднеуглеродистых конструкционных сталей установлены 5 разновидностей структурных комплексов, отличающихся друг от друга количеством структур и распределением их по глубине упроченной зоны. Показано, что все основные типы структурных комплексов имеют большие значения сжимающих остаточных напряжений на поверхности, достигающие величины до 800 МПа у структуры содержащей на поверхности "белый слой". При этом износостойкость указанных материалов по сравнению с закаленной сталью У8 повышается на 18-45% при сухом трении скольжения и на 28-43% при трении со смазкой при одновременном увеличении контактной выносливости в 1,3-1,6 раз. Сочетание высокого уровня эксплуатационных свойств на поверхности с вязкой сердцевинной обеспечивает несомненное преимущество обрабатываемых деталей по параметрам конструктивной прочности, гарантирующее повышение ресурса работы узлов и механизмов.

6. Доказана возможность управления уровнем эксплуатационных свойств деталей ткацких станков путем назначения и поддержания в процессе обработки требуемых значений параметров термических циклов. Первое предусматривает рассмотрение связи условий эксплуатации с базами данных автоматизированной системы проектирования "Свойства", "Структуры" и "Параметры термических циклов", "Режимы обработки", осуществляемое с помощью программных средств системы. Реализована возможность оптимизации на стадии проектирования задачи повышения уровня эксплуатационных свойств, которая зависит от технических возможностей выбранного технологического процесса по поддержанию рекомендованных режимов обработки в заданных пределах.

7. На основе комплексных экспериментально-теоретических исследований:

- разработана и реализована на практике система автоматизированного проектирования новых технологических процессов, совмещающих механические и поверхностные термические методы обработок - инструмент для разработки и оптимизации технических решений и повышению уровня эксплуатационных свойств деталей машин;

- предложены и широко апробированы в промышленности новые методы и оборудование, реализующие интеграцию процессов механической и поверхностной термической обработок с использованием в том числе высокоэнергетического нагрева ТВЧ, обеспечивающие требуемый уровень эксплуатационных свойств, а именно: способы круглого наружного глубинного шлифования, шлифование фасонных поверхностей, способы обработки и конструкции базового технологического модуля, встраиваемого в станочные системы механической обработки, для осуществления их совмещения с поверхностным термическим воздействием высокоэнергетическим нагревом ТВЧ. Эти методы и оборудование позволяют надежно реализовать на практике требуемое структурно-напряженное состояние с соответствующим уровнем эксплуатационных свойств путем изменения режимов и условий комбинированной обработки.

В результате практического использования обеспечено повышение эксплуатационных характеристик деталей машин в 1,5-3,5 раза, при

значительном повышении производительности обработки в среднем в 1,6 раза с уменьшением энергоемкости (до 20-35%). Годовой экономический эффект составляет 1,5 млн. рублей по ценам 1991 года. Научные и программные разработки экспонировались на ВДНХ СССР (серебряная медаль Выставки).

Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Аксенов В.А. Высокоинтегрированные станочные системы, совмещающие процессы механической и поверхностно-термической обработок // Приборы и сист. управления. - М. - Машиностроение, 1993, - № 5.
2. Аксенов В.А. Математическое моделирование тепловых явлений в процессах механической и поверхностной термической обработок. // Математическое моделирование в машиностроении. Учебное пособие. Глава 2. Новосибирск: НГТУ, 1993.
3. Аксенов В.А. О возможностях совмещения механической и термической обработок в ГПС. // Тезисы докладов научно-технической конференции "Станки" - 92. Киев, 1992.
4. Аксенов В.А. Математическое моделирование технологических процессов и оборудования для поверхностной термической обработки и упрочнения конструкционных материалов. // Автоматизированные электротехнологические установки: Межвузовский сб. научных трудов. Новосибирск: НЭТИ, 1991.
5. Аксенов В.А. Закономерности структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях конструкционных материалов при высокоскоростном нагреве. // Объемное и поверхностное упрочнение конструкционных сталей: Межвузовский сборник научных трудов. Новосибирск: НЭТИ, 1991.
6. Аксенов В.А. Оценка параметров конструктивной прочности стали 45 после упрочняющего шлифования // Структура и свойства упрочненных конструкционных материалов: Межвуз. сборник научных трудов. Новосибирск: НЭТИ, 1990.
7. Аксенов В.А. Система математического моделирования температурных полей и напряженно-деформированного состояния материалов при механической и поверхностно-термической обработках. // Динамика и прочность элементов авиационных конструкций: Межвуз. сб. научных трудов. Новосибирск: НЭТИ, 1990.
8. Аксенов В.А. Технологический модуль для процессов комбинированной (шлифование+закалка) обработки деталей машин. // Динамика механических систем: Межвуз. сб. н. трудов. Новосибирск, НГТУ, 1994.
9. Аксенов В.А. Математическое моделирование тепловых явлений в процессах механической и поверхностной термической обработок. // Тезисы докладов Сибирской конференции по прикладной и индустриальной математике. Новосибирск, ИМ СОРАН, 1994.
10. Ерин В.А., Дорохов С.А., Аксенов В.А., Птицын С.В. Расширение технологических возможностей гибких производственных систем // Тезисы докладов конф. "Проблемы экономики материальных и трудовых ресурсов", Новосибирск, 1988.

11. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Исследование параметров точности и шероховатости поверхности деталей при абразивном упрочнении / Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента. Межвуз. сб. н. тр., Пенза, ППИ, 1991.
12. Аксенов В.А., Аксенов Вяч.А. Чесов Ю.С., Стрижак А.Н. Метод расчета температурного поля в материалах при упрочняющей обработке. //Повышение эффективности и качества в механосборочном производстве. Тезисы докладов конференции. Пермь, 1985.
13. Аксенов В.А., Птицын С.В., Иванцовский В.В. Оборудование и технологии для совмещения операций механической и термической обработок в ППС. //Тезисы докладов научно-технической конференции "Станки-82", Киев, 1992.
14. Аксенов В.А., Чесов Ю.С. Моделирование тепловых явлений при механической обработке: Учеб. пособие. Новосибирск: НЭТИ, 1990.
15. Аксенов В.А., Чесов Ю.С. Математическое моделирование в машиностроении. Учеб. пособие. Раздел 3. Новосибирск: НЭТИ, 1990.
16. Аксенов В.А., Чесов Ю.С. Автоматизированный расчет параметров термических циклов при шлифовании. М., 1986. Деп. в ВНИИТИ 20.11.86, N 467-мш.
17. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Связь режимов обработки с тепловыми явлениями при шлифовании. // Изв. вузов. Машиностроение. 1988, N 8.
18. Аксенов В.А., Чесов Ю.С. Расчет температурного поля в материалах при упрочняющем шлифовании. //Изв. вузов. Машиностроение, 1986, N6.
19. Аксенов В.А., Чесов Ю.С. Определение глубины упрочнения деталей машин при шлифовании. //Вестник машиностроения, 1985, N 12.
20. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В., Птицын С.В. Интеграция процессов механической и термической обработки в ППС. //Металлорежущие станки: Республ. междуад. науч.-технич. сборник. Киев, 1991. Вып. 19.
21. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Упрочнение профиля дисковых кулачков абразивной обработкой. //Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструментов: Межвуз. сб. научных трудов. Пенза. ППИ. 1990. Вып. 19.
22. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Структура и свойства поверхностного слоя в условиях высокоскоростного нагрева. // Структура и оптимальное упрочнение конструкционных материалов: Межвуз. сб. научн. тр. Новосибирск: НЭТИ, 1988.
23. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Управление качеством поверхностного слоя деталей машин шлифованием. //Интенсификация технологических процессов механической обработки. Физические методы обработки: Всесоюзн. н/тех. конф. Л.: ЛМИ, 1986.
24. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Новые технологические процессы упрочнения деталей из конструкционных материалов. //Тез. докл. 1-го Всесоюзн. съезда технологов машиностроителей (секция 7). М.,: Внешторгиздат, 1989.



25. Аксенов В.А., Чесов Ю.С. Метод расчета температурного поля в материалах при движущемся источнике нагрева. // Новые методы повышения конструктивной прочности стали: Межвуз. сб. научн. тр. Новосибирск, НЭТИ, 1985.
26. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В., Птицын С.В. Упрочнение поверхностного слоя деталей ткацких станков при высокоэнергетическом нагреве ТВЧ. // Новые материалы и ресурсосберегающие технологии термической обработки деталей машин и инструментов: Всесоюз. н/тех. конф. Махачкала: МАДИ-ДагПИ, 1989.
27. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Патрушев С.Г. Особенности формирования поверхностного слоя при упрочняющем шлифовании. // Структуры объемно-поверхностно-упрочненной стали: Межвуз. сб. научн. тр. Новосибирск: НЭТИ, 1984.
28. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Патрушев С.Г. Влияние режимов упрочняющего шлифования на эксплуатационные свойства деталей машин. // Новые методы повышения конструктивной прочности стали: Межвуз. сб. научн. тр. Новосибирск, НЭТИ, 1985.
29. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В., Птицын С.В. Управление качеством поверхностного слоя деталей машин: Инф. листок ВДНХ СССР. Новосибирск, НЭТИ, 1989.
30. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Аксенов Вяч.А. Исследование тепловых явлений при упрочнении материалов. // Новые методы упрочнения и обработки металлов. Межвуз. сб. н. тр. НЭТИ. Новосибирск, 1983.
31. Аксенов В.А., Чесов Ю.С. Исследование процесса упрочняющего шлифования деталей машин. // Комбинированные электроэрозионно-электрохимические методы размерной обработки металлов. Всесоюз. научн.-техн. конф. - Уфа: УАИ, 1983.
32. Аксенов В.А., Чесов Ю.С. Повышение эксплуатационных свойств деталей машин при упрочняющем шлифовании. // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении. Межвуз. сб. научн. тр. Пермь, ППИ, 1986.
33. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Роль тепловых явлений при упрочнении деталей машин. // Новые технологические процессы и оборудование для поверхностей пластической обработки материалов. Всесоюз. н/тех. конф. Брянск, БИТИ, 1986.
34. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Расчет и анализ параметров термических циклов при упрочняющем шлифовании. // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении: Межвуз. сб. н. тр. Пермь, ППИ, 1987.
35. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Анализ термических циклов при упрочняющем шлифовании. // Объемное и поверхностное упрочнение деталей машин: Межвуз. сб. научн. трудов. Новосибирск, НЭТИ, 1987.
36. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В., Птицын С.В. Поверхностная термическая обработка и упрочнение с высокоэнергетичес-

- кого нагрева в ГПС. // Структура и свойства материалов Всесоюзн. научн.-техн. конф. Новокузнецк, 1988.
37. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Возможности повышения эксплуатационных свойств деталей машин при шлифовании. // Структура и свойства материалов. Всесоюзн. н/тех. конференция. Новокузнецк, 1988.
  38. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Влияние условий формирования поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей машин. // Поверхностный слой, точность, эксплуатационные свойства и надежность деталей машин и приборов. Научный семинар. - М. МДНТП, 1989.
  39. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Поверхностная термическая обработка и свойства стали при высокоэнергетическом нагреве. // Структура и конструктивная прочность стали: Межвуз. сб. научн. тр. Новосибирск, НЭТИ, 1989.
  40. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Управление уровнем эксплуатационных свойств деталей машин при шлифовании. // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении: Межвуз. сб. н. трудов, Пермь, ППИ, 1990.
  41. Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В. Технологические возможности создания оптимальных структур конструкционных сталей поверхностным упрочнением. // Структура и свойства упрочненных конструкционных материалов: Межвуз. сб. научн. трудов. Новосибирск, НЭТИ, 1990.
  42. Бирюков Б.И., Левицкий Л.В., Рубинович Б.Х., Аксенов В.А. Профессия - инженер-машиностроитель. Иркутск, ИГУ, 1985.
  43. А.С. 1188391 СССР, В24 В 1/00. Способ шлифования деталей из конструкционной стали. (Аксенов В.А., Чесов Ю.С.).
  44. А.С. 1199584. СССР, В24 В1/00. Способ глубинного шлифования цилиндрических деталей. (Аксенов В.А., Чесов Ю.С., Патрушев С.Г., Бороздин В.Н.).
  45. А.С. 1348148 СССР, В24 В1/00. Способ шлифования губок прокладчика утка ткацкого станка. (Аксенов В.А., Попалух И.Л., Чесов Ю.С., Соболева М.А., Косых Ю.Д., Макаричев В.А.).
  46. А.С. 1540037 СССР Н05 В6/36. Высокочастотное устройство для нагрева поверхности детали. (Аксенов В.А., Птицын С.В., Чесов Ю.С., Иванцовский В.В.).
  47. А.С. 1852359 СССР С21 Д1/10. Способ закалки с нагревом ТВЧ. (Аксенов В.А., Иванцовский С.В., Птицын С.В., Чесов Ю.С.).
  48. Патент N 1779265. Устройство для индукционного нагрева. (Аксенов В.А.).
  49. Исследование, разработка и внедрение высокопроизводительных процессов обработки деталей ткацких станков // Отчет о НИР. рук. Аксенов В.А. Г.Р. N 01830014409 - Новосибирск, ИЭТИ, 1985.
  50. Основы управления качеством поверхности деталей машин // Отчет рук. Аксенов В.А., Г.Р. N 01850015885, Ин. N 02690003455 - Новосибирск, ИЭТИ, 1988.

Объем 2,0 п. л. - Тир. 100

---

Типография филиал РАО «ЕЭС России». Телефон 220-58-91