

КОВАЛЬНОГОВ Владислав Николаевич

**МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕПЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ОБЪЕКТОВ,  
КОНТАКТИРУЮЩИХ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКЕ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ**

Специальности: 05.03.01 – Технологии и оборудование механической  
и физико-технической обработки  
05.02.08 – Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» Ульяновского государственного технического университета.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**КИСЕЛЕВ Евгений Степанович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**ВОЛКОВ Дмитрий Иванович**

доктор технических наук, профессор  
**МАКАРОВ Владимир Федорович**

доктор технических наук, профессор  
**САЛОВ Петр Михайлович**

Ведущая организация: **ОАО «АвтоВАЗ»**

Защита диссертации состоится 30 сентября 2009 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ212.277.03 в первом корпусе Ульяновского государственного технического университета по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3 (почтовый адрес: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета.

Автореферат разослан 17 августа 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук

Н.И. Веткасов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы.* Технологическое обеспечение качества и повышение конкурентоспособности продукции машиностроения, являющиеся залогом устойчивого роста национальной экономики, неразрывно связаны с переходом на «высокие» технологии, отличающиеся интенсификацией производительности механической обработки, которая, по оценкам экспертов, в первой четверти нашего столетия должна возрасти вдвое. Как правило, увеличение производительности обработки сопряжено с ростом теплообразования в зоне резания и увеличением тепловой нагрузки на поверхностные слои (ПС) заготовки и режущего инструмента, которая, в свою очередь, лимитирует период стойкости инструмента и качество обработанных деталей.

В современных условиях стремление к увеличению производительности механической обработки входит в противоречие с все большим ухудшением условий тепломассопереноса из зон контакта режущего инструмента с заготовкой в связи с переходом на резание со сверхвысокими скоростями, переориентацией на обработку с ограниченным (дозированным) применением смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), увеличением доли заготовок из труднообрабатываемых конструкционных материалов и материалов со специальными свойствами, уменьшением операционных припусков, увеличением концентрации элементарных технологических переходов в структуре операций. В результате интенсивное теплообразование в зоне резания технически все труднее компенсировать адекватным отводом теплоты, и механическая обработка выполняется в условиях тепловых ограничений, когда избыточный тепловой поток, концентрирующийся в ПС заготовки или инструмента, сдерживает повышение ее эффективности.

С учетом изложенного, высокая эффективность механической обработки, выполняемой в условиях тепловых ограничений, достижима лишь при максимально допустимых (критических) тепловых нагрузках на ПС взаимодействующих при обработке объектов. Научной основой ее реализации в современных условиях должна стать принципиально новая методология анализа тепловых взаимодействий, отличающаяся высокой точностью, ориентированностью на аналитический и имитационный подходы в решении взамен эмпирического, эвристичностью, адекватно отражающей существующие тенденции технического прогресса в машиностроении, и адаптируемостью к новым «высоким» технологиям.

В связи с тенденцией к ресурсосберегающему применению СОЖ все отчетливее обозначается необходимость в организации эффективной защиты ПС заготовки и инструмента от теплового воздействия в зоне механической обработки как на основе интенсификации функциональных действий СОЖ, подаваемых в минимально необходимом количестве, так и за счет альтернативных технических и технологических решений, в частности основанных на рациональном применении ультразвука для воздействия на элементы технологической системы и на подаваемую СОЖ. В ряде случаев, особенно при изготовлении ответственных прецизионных деталей машин, возникла необходимость

разработки новых технологических методов и приемов (как правило, на основе концентрации физических принципов воздействия, в том числе ультразвукового (УЗ), на объект обработки), которые препятствовали бы технологическому наследованию внесенных в теплонагруженный ПС изменений.

Поэтому тема работы, направленной на разработку методологии моделирования теплового взаимодействия объектов, контактирующих при механической обработке, с целью исследования и повышения ее эффективности рациональным использованием энергии УЗ поля, является актуальной.

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-технической программы Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» в составе НИР 205.03.01.011 «Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей автомобилей при высокопроизводительном шлифовании в процессах изготовления и ремонта» (2001 – 2002 гг.), НИР 205.03.01.003 «Технологическое обеспечение заданных эксплуатационных характеристик деталей наземных транспортных средств в процессах экологически чистого изготовления и ремонта» (2003 – 2004 гг.) и НИР 205.09.01.003 «Новые ультразвуковые ресурсосберегающие технологии механической обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов в машино- и приборостроении» (2003 – 2004 гг.). Выполненные исследования поддержаны грантом Президента РФ по проекту № МК-2423.2008.8 «Ресурсосберегающее технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей транспортных, авиационных и космических систем при высокоскоростном формообразовании в процессе изготовления путем рационального применения ультразвука» (2008 – 2009 гг.), грантами Российского фонда фундаментальных исследований по проектам № 08-08-00200-а «Теплообмен в системе механически взаимодействующих объектов в условиях дозированной подачи в контактную зону смазочно-охлаждающей среды» (2008 – 2010 гг.) и 09-08-97003-р «Разработка атермической технологии релаксации остаточных напряжений в шлифованных деталях машин и сварных металлоконструкциях на основе применения ультразвука» (2009 – 2010 гг.) и грантом Минобразования РФ на развитие приборной базы научных исследований подведомственных вузов (приказ № 1002 от 17.03.2003).

*Цель работы* – повышение эффективности механической обработки заготовок за счет рационального применения энергии УЗ поля для минимизации теплообразования в зоне резания, интенсификации теплоотвода в СОЖ, а также для воздействия на процесс технологического наследования остаточных напряжений в теплонагруженном ПС.

В соответствии с поставленной целью, были решены следующие *задачи*:

1. Разработаны методология теплофизического анализа, математические модели и алгоритмы расчета нестационарных температурных полей в системе объектов, контактирующих при выполнении операций механической обработки в УЗ поле, с учетом ограничивающих и управляющих технологических факторов, включая ресурсосберегающую подачу СОЖ.

2. Аналитически и экспериментально исследована возможность интенсификации проникающей способности СОЖ и ее функциональных действий в

контактных зонах механической обработки, а также большей или почти полной реализации части из них за счет альтернативных технических и технологических решений на основе рационального применения энергии УЗ поля.

3. Аналитически и экспериментально исследованы закономерности формирования и технологического наследования механического состояния ПС, теплонагруженного при механической обработке в УЗ поле, с учетом силового и теплового воздействий, структурно-фазовых изменений и обновления ПС.

4. Разработаны (на основе результатов исследований по пп. 1 – 3) новые УЗ технологии и техника, определены их технологическая и технико-экономическая эффективность в действующем производстве.

*Методы исследований.* Реализация цели и решение поставленных задач в работе обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, математической физики, термомеханики и теплофизики контактных взаимодействий, теории теплообмена, теоретической и технической механики, нелинейной акустики, математического моделирования и численных методов. В экспериментальных исследованиях использовали современные средства автоматизации измерения температурно-силовой напряженности в контактных зонах механической обработки, а также новые экспериментальные методы оценки проникающей способности смазочно-охлаждающей среды и неразрушающего измерения технологических остаточных напряжений.

Достоверность теоретических разработок и эффективность практических рекомендаций подтверждены результатами испытаний на лабораторных установках и промышленном технологическом оборудовании.

*Основные научные положения, составляющие научную новизну работы и выносимые на защиту:*

1. Методология, математические модели и результаты исследования тепловых взаимодействий объектов, контактирующих при выполнении операций механической обработки в УЗ поле всухую и с применением СОЖ.

2. Математические модели и результаты теоретико-экспериментальных исследований возможности интенсификации проникающей способности, смазочного и охлаждающего действий СОЖ в контактных зонах механической обработки за счет введения энергии модулированного УЗ поля, а также новые способы (патенты РФ 2151044, 2152297) и реализующие их устройства (патенты РФ 2146601, 2157311, 2279963, 2284878) для подачи СОЖ.

3. Комплекс математических моделей, расчетных алгоритмов и результаты исследования формирования в процессе механической обработки теплонагруженных ПС заготовок с учетом технологического наследования: распределения технологических остаточных напряжений, степени разупрочнения, погрешностей формы и взаимного расположения обработанных поверхностей, обусловленных термическими деформациями.

4. Результаты теоретико-экспериментальных исследований процесса УЗ релаксации технологических остаточных напряжений в ПС заготовок, а также численного моделирования остаточных напряжений, наследуемых в технологи-

ческом процессе изготовления вала, с учетом УЗ релаксации и упрочнения выглаживанием.

*Практическую полезность* составляют:

1. Разработанный программно-информационный комплекс для теплофизического анализа технологических операций механической обработки заготовок в УЗ поле и прогнозирования эффективности различных технологических методов и приемов тепловой защиты ПС с учетом управляющих воздействий ультразвуком.

2. Методики определения проникающей способности СОЖ и коэффициентов ее гидравлического сопротивления в капиллярно-пористом пространстве зон резания в условиях УЗ воздействий.

3. Новые УЗ технологии и техника упрочнения теплонагруженных ПС и релаксации технологических остаточных напряжений, способы шлифования (патент РФ 2276004) и выглаживания (патент РФ 2329131) в УЗ поле, способы и реализующая их техника подачи СОЖ в зоны шлифования, глубокого сверления и внутреннего резьбонарезания с наложением модулированных ультразвуковых колебаний (УЗК) на СОЖ и режущий инструмент (патенты РФ 2146601, 2151044, 2152297, 2157311, 2279963, 2284878).

*Реализация результатов.* Методология и программно-информационный комплекс для теплофизического анализа операции шлифования используются в технологической подготовке производства патронов кассетных магнитных сепараторов, выпускаемых ЗАО «НПП «Волга-Экопром» (г. Ульяновск). Новые УЗ технологии и техника апробированы на 9 машиностроительных предприятиях, в том числе с внедрением на ОАО «Спецоборудование» (г. Киров). Фактический годовой экономический эффект от внедрения разработок составил около 450 тысяч рублей.

Новые модели и методики теплофизического анализа технологических операций и прогнозирования формируемого на них состояния ПС заготовок, реализующее их программное обеспечение, а также экспериментальные установки и методики внедрены на кафедре «Технология машиностроения» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ) в учебный процесс подготовки студентов старших курсов машиностроительного факультета, обучающихся по направлению 15090068 – Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств и по специальности 15100165 – Технология машиностроения.

*Апробация работы.* Основные результаты работы доложены на научно-технических конференциях УлГТУ в 2000 – 2009 гг.; всероссийских научно-технических конференциях «Теплофизика технологических процессов», (Рыбинск, 2000), «Технический вуз – наука, образование и производство в регионе», (Тольятти, 2001), «Современные проблемы машиностроения и транспорта», (Ульяновск, 2003), «Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении», (Тольятти, 2005), «Повышение эффективности механообработки на основе моделирования физических явлений» (Рыбинск, 2009); международных научно-технических конференциях «Процессы абразивной обработки. Абразивные инструменты и материалы», (Волжский,

2000 и 2004), «Динамика технологических систем», (Саратов, 2004), «Машиностроение и техносфера XXI века», (Севастополь, Украина, 2004 – 2008); «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики» (Казань, 2007), «Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении» (Тольятти, 2008), «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (Ростов-на-Дону, 2008); Минском международном форуме по тепломассообмену, (Минск, Беларусь, 2000 и 2004), международном научном симпозиуме «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки кадров», (Москва, 2000) и др.; 19 международном конгрессе по конечно-элементным технологиям, (Берлин, Германия, 2001); XXVII Российской школе по проблемам науки и технологий (Миасс, 2007); научно-технических семинарах кафедр «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» УлГТУ в 2005, 2006 и 2008 гг.; заседании научно-технического совета машиностроительного факультета УлГТУ в 2009 г.

Результаты работы апробированы путем опытно-промышленных испытаний новой УЗ техники на ОАО «Автодизель» (г. Ярославль), ОАО «Автодеталь-Сервис», ЗАО «Авиастар-СП», (оба – г. Ульяновск), ООО «Димитровградский инструментальный завод» (г. Димитровград), ЗАО «Кардан» (г. Сызрань), ОАО «Спецоборудование» (г. Киров) и др.

Новая УЗ техника для упрочнения ПС и релаксации технологических остаточных напряжений, а также для ресурсосберегающей подачи СОЖ в зоны шлифования, глубокого сверления и внутреннего резьбонарезания, экспонировалась и отмечена дипломами международной специализированной выставки «Современные технологии обработки материалов, интеллектуальные станочные системы, оборудование, приборы и инструмент – ТЕХНОФОРУМ-2007» (Москва, МВЦ «Крокус-Экспо», 2007), VIII Московского международного салона инноваций и инвестиций «ИнновЭкс-2008» (Москва, ВВЦ, 2008). Проект «Технология и техника для ультразвукового атермического снятия технологических остаточных напряжений в шлифованных деталях машин и сварных металлоконструкциях» стал лауреатом ульяновского областного конкурса «Лучший инновационный проект 2007 года».

*Публикации.* По теме диссертации опубликовано более 80 работ, в том числе 2 монографии, 12 публикаций в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК, и 9 патентов на изобретения.

*Структура и объем работы.* Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка (239 наименований) и приложений, включает 356 страниц машинописного текста, 117 рисунков и 24 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы объект, цель и задачи исследований, научная новизна и практическая зна-

чимось работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, кратко проаннотировано содержание и структура рукописи диссертации.

*В первой главе* приведены результаты обзора научно-технической информации и анализа состояния проблемы научного и технологического обеспечения качества ПС деталей машин и эффективности механической обработки в контексте современных тенденций технического прогресса в машиностроении.

Значительный вклад в развитие концепции и различных аспектов технологического обеспечения и исследования качества ПС, в том числе формирующегося в условиях тепловых ограничений, внесен трудами В.Ф. Безъязычного, А.М. Дальского, Б.А. Кравченко, А.А. Маталина, В.М. Смелянского, В.К. Старкова, А.М. Сулимы, А.Г. Сулова и др. Исследованиям и моделированию тепловых процессов, сопровождающих механическую обработку, посвящены работы Я.И. Бараца, Д.И. Волкова, Д.Г. Евсеева, В.Д. Кузнецова, В.С. Кушнера, С. Малкина, А.Н. Резникова, Н.Н. Рыкалина, С.С. Силина, Л.В. Худобина, А.В. Якимова и др. Различные аспекты использования энергии УЗ поля в процессах механической обработки заготовок исследовали Е.С. Киселев, Д. Кумабэ, А.И. Марков, М.С. Нерубай, В.Н. Подураев, Б.Л. Штриков и др. Логическим продолжением работ этих ученых стало настоящее исследование.

Выводы по результатам анализа научно-технической литературы, патентной информации и производственного опыта по теме диссертации сводятся в основном к следующему:

1. Тепловая нагрузка на ПС заготовки и инструмента в современных процессах механической обработки увеличивается как за счет интенсификации теплообразования в контактных зонах, так и в результате усложнения отвода теплоты в контактирующие при обработке объекты, что учитывается в научном и технологическом обеспечении эффективности механической обработки, выполняемой в условиях тепловых ограничений, на основе разработанной методологии исследования тепловых взаимодействий.

2. Анализ известных подходов к теплофизическому анализу контактных взаимодействий показал, что наибольшую точность обеспечивают те из них, которые основаны на совместном решении дифференциальных уравнений теплопроводности каждого из контактирующих объектов с общим граничным условием в зоне контакта. Это позволяет исключить использование в расчетах данных о распределении тепловых потоков, которые носят преимущественно эмпирический характер и количественно различаются в разных источниках в несколько раз.

3. По результатам анализа характерных условий контактных взаимодействий и тепловых ограничений, возникающих в процессе механической обработки, для последующего углубленного исследования в качестве типовых приняты следующие технологические операции: внутреннее резьбонарезание, отличающееся низкой скоростью стружкообразования с тепловыми ограничениями, связанными с особенностями геометрии режущего инструмента в виде большого числа клиновых лезвий малого размера; глубокое сверление отверстий малого диаметра, которому присуще стружкообразование с тепловыми ограничениями, связанными с затрудненным доступом СОЖ и низкой стойко-

стью сверл в результате их быстрого нагрева до высоких температур; алмазное выглаживание – пластическое деформирование с ограничением в связи с низкой теплостойкостью алмазного инструмента; шлифование, выполняемое, как правило, при смешанном режиме высокоскоростного микрорезания и пластического деформирования с экстремально высоким теплообразованием и тепловыми ограничениями, обусловленными высокой вероятностью дефектообразования в ПС заготовок. Таким образом, охвачены различные тепловые ограничения, условия и скоростные режимы контактных взаимодействий объектов в процессе механической обработки (абразивной, лезвийной, поверхностным пластическим деформированием), а также представительная номенклатура материалов режущего инструмента и заготовок, включая труднообрабатываемые, и применяемых смазочно-охлаждающих технологических средств (водные и масляные СОЖ, аэрозоли, газообразные среды).

4. Радикальным средством воздействия на теплосиловую напряженность в зонах обработки, особенно в условиях ограниченного применения СОЖ, является активация элементов технологической системы (станок – инструмент – заготовка – приспособление) УЗ полем, способствующая резкому снижению затрат на внешнее и внутреннее трение в контактных зонах механической обработки.

5. В связи с резонансным характером эффектов, связанных с поглощением энергии УЗ волн, научный и практический интерес представляют исследования, направленные на интенсификацию проникающей способности и функциональных действий СОЖ в капиллярно-пористом пространстве зон резания за счет воздействия колебаниями, модулированными по частоте и амплитуде. Однако отсутствуют теоретические наработки, позволяющие количественно оценивать их эффективность и разрабатывать рекомендации по практическому применению.

6. В теплонагруженных при механической обработке ПС, как правило, формируются значительные растягивающие технологические остаточные напряжения, которые нежелательны с позиции эксплуатационных свойств детали. Так как традиционные методы и средства их снятия (низкотемпературный отпуск, естественное и искусственное старение) сопряжены со значительными материальными, временными или энергетическими затратами, привлекательным с точки зрения ресурсосбережения и в то же время малоизученным средством снятия остаточных напряжений является УЗ релаксация с использованием модулированных колебаний.

7. Направленное формирование сжимающих остаточных напряжений и заданных глубины и степени упрочнения ПС обеспечивают, в частности, методы поверхностного пластического деформирования. При этом требуемое упрочнение ПС предпочтительнее обеспечивать за счет минимально достаточного для этого силового воздействия. Перспективны, но недостаточно изучены и реализованы резервы минимизации усилия деформирования путем совмещения поверхностного пластического деформирования с резанием в УЗ поле.

В завершающей части первой главы сформулирована цель, обоснованы и поставлены задачи работы, представленные выше.

*Вторая глава* посвящена разработке методологии теплофизического анализа и математических моделей теплового состояния инструмента и заготовки в процессе механической обработки на операциях, отличающихся экстремальными условиями тепломассопереноса в зоне формообразования новых поверхностей. Разработаны базовая математическая модель и уточнения этой модели применительно к ряду особо теплонапряженных технологических операций, эффективная реализация которых невозможна без применения СОЖ (шлифование, глубокое сверление отверстий малого диаметра, внутреннее резьбонарезание, выглаживание), а также к учету влияния прогрессивных методов и приемов технологического воздействия на теплосиловую напряженность обработки, основанных на применении модулированных УЗ полей.

С учетом выводов по первой главе, в основу методологии положен принцип системного теплофизического анализа путем совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности каждого из взаимодействующих при механической обработке объектов (заготовки и инструмента) в трехмерной нестационарной постановке с общим граничным условием в зоне контакта:

$$\lambda_{и} \left( \frac{\partial T}{\partial n_{и}} \right)_{n_{и}=0} + \lambda_{з} \left( \frac{\partial T}{\partial n_{з}} \right)_{n_{з}=0} = q_{\text{выд}} - q_{\text{ж}} - q_{\text{ст}}; \quad (1)$$

$$T_{и} = T_{з},$$

где  $\lambda_{и}$ ,  $\lambda_{з}$  – теплопроводность соответственно инструментального и обрабатываемого материала, Вт/(м·К);  $T$  – температура, К;  $n_{и}$ ,  $n_{з}$  – нормаль к поверхности соответственно инструмента и заготовки на анализируемом участке зоны контакта, м;  $q_{\text{выд}} = P_z V / S$  – поверхностная плотность теплового потока, выделившегося в зоне контакта, Вт/м<sup>2</sup>;  $P_z$  – касательная составляющая силы резания, Н;  $V$  – скорость резания, м/с;  $S$  – фактическая площадь контакта инструмента с заготовкой, м<sup>2</sup>;  $q_{\text{ж}}$ ,  $q_{\text{ст}}$  – поверхностная плотность теплового потока, отводимого из зоны контакта соответственно вместе с СОЖ и стружкой, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_{и}$ ,  $T_{з}$  – местная контактная температура инструмента и заготовки соответственно, К.

Помимо системы дифференциальных уравнений теплопроводности заготовки и инструмента и граничного условия (1), в структуру базовой математической модели входят представленные в диссертации геометрические, физические, начальные и граничные условия однозначности, отражающие технологические условия выполнения конкретной операции. В диссертации разработаны также условия однозначности, адаптирующие базовую модель применительно к различным схемам обработки шлифованием, сверлением, внутренним резьбонарезанием и выглаживанием в УЗ поле всухую и с применением СОЖ.

В отличие от традиционных подходов к теплофизическому анализу технологических операций, использование системного принципа и граничного условия зоны контакта в форме теплового баланса (1) обеспечивает возможность исключить необходимость априорного определения доли теплоты  $q$ , отводимой из зоны контакта в анализируемый объект, что, в свою очередь, обеспечивает повышенную достоверность и точность получаемых результатов (рис. 1). Вместе с тем, невозможность априорного определения составляющих теплового

баланса (1) в зоне контакта, а также необходимость учета изменения теплофизических свойств взаимодействующих объектов в зависимости от температуры затрудняют аналитическое определение их теплового состояния. Поэтому для решения системы дифференциальных уравнений теплопроводности с учетом условий однозначности разработана методика численного расчета, базирующаяся на методе конечных объемов. Проанализирована устойчивость численного решения и определены условия, ее обеспечивающие.

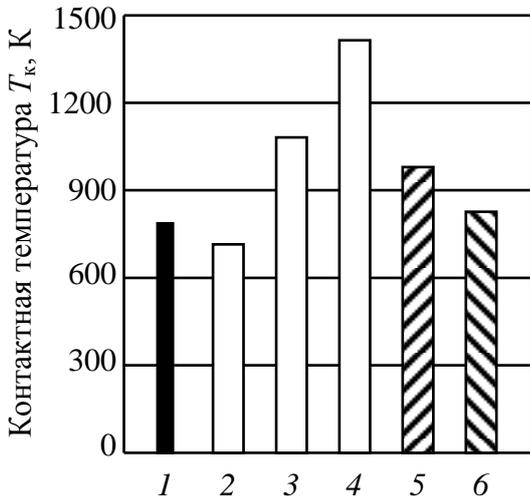


Рис. 1. Контактная температура  $T_k$  в зоне круглого наружного врезного шлифования заготовки из стали 40X: 1 – эксперимент; 2, 3, 4 – расчет на основе подхода Дж. Егера – Н.Н. Рыкалина при доле теплоты, отводимой в заготовку,  $\kappa = 0,4, 0,6$  и  $0,8$  соответственно; 5 – расчет на основе подхода А.Н. Резникова ( $\kappa = 0,56$ ); 6 – численное решение с использованием разработанной методологии системного решения с граничным условием (1). Режим обработки: рабочая скорость круга  $V_k = 50$  м/с; скорость заготовки  $V_z = 50$  м/мин; скорость врезной подачи  $V_f = 0,8$  мм/мин. Подача 3 %-ной эмульсии Укринол-1М поливом с объемным расходом  $30 \text{ дм}^3/\text{мин}$

Среди функциональных действий СОЖ в условиях ограниченного ее расхода технически наиболее трудно обеспечить эффективную реализацию охлаждающего действия, т.е. максимизировать составляющую  $q_{ж}$  в тепловом балансе (1). Поверхностная плотность теплового потока  $q_{ж}$ , отводимого из зоны контакта за счет нагрева и парообразования СОЖ, определяется зависимостью:

$$q_{ж} = \alpha(T - T_f) = \begin{cases} \frac{c_{ж} G_{ж} (T - T_s)}{S} & \text{при } T \leq T_s, \\ \frac{c_{пж} G_{пж} (T - T_s) + c_{ж} G_{ж} (T_s - T_f)}{S} & \text{при } T > T_s, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи к СОЖ в зоне контакта, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_f$  – температура потока СОЖ, К;  $G_{ж}$ ,  $G_{пж} = c_{ж} G_{ж} (T - T_s)/r$  – соответственно массовый расход СОЖ и ее пара через зону обработки, кг/с;  $c_{ж}$  – удельная теплоемкость СОЖ, Дж/(кг·К);  $r$  – удельная теплота парообразования СОЖ, Дж/кг;  $T_s$  – температура насыщения СОЖ, К;  $T_f$  – температура потока СОЖ, К.

Из анализа зависимости (2) следует, что интенсифицировать охлаждающее действие СОЖ можно, во-первых, за счет совершенствования ее состава (в направлении увеличения теплоемкости, плотности, удельной теплоты парообразования); во-вторых, за счет интенсификации теплоотдачи к СОЖ; в-третьих, за счет увеличения ее расхода непосредственно через зону обработки. При этом если возможности первого пути ограничены и к настоящему времени практически исчерпаны, то у второго и третьего остаются резервы, связанные с рациональным применением ультразвука. Для выявления этих резервов устанавли-

ливали количественные взаимосвязи между параметрами УЗ поля и плотностью теплового потока  $q_{ж}$ , уточняющие баланс (1) базовой модели. Эту задачу решали в два этапа.

На первом этапе анализировали возможности интенсификации охлаждающего действия СОЖ за счет интенсификации теплоотдачи без увеличения расхода жидкости через зону обработки. Анализ априорной информации показал, что среди методов интенсификации теплоотдачи наиболее эффективны те, которые основаны на воздействии на пристенную турбулентность. К ним относится, в частности, наложение на движущийся поток акустического поля. Эффективность таких способов интенсификации теплоотдачи обусловлена тем, что кинетическая энергия турбулентного движения мала по сравнению с кинетической энергией потока жидкости, поэтому воздействие на пристенную турбулентность обычно требует небольших (по сравнению с воздействием на поток в целом) энергетических затрат.

Для прогнозирования теплоотдачи провели численное моделирование движения и теплообмена в пограничном слое потока СОЖ под воздействием колебаний давления путем решения системы дифференциальных уравнений энергии, движения и неразрывности совместно с оригинальной моделью турбулентного переноса количества движения  $\mu_T$  и теплоты  $\lambda_T$ :

$$\mu_T = \rho_{ж} l^2 (\partial u / \partial y); \quad (3)$$

$$\lambda_T = \mu_T c_{ж} / Pr_T, \quad (4)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность СОЖ, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  – проекция вектора скорости потока на координатную ось, направленную вдоль обтекаемой поверхности, м/с;  $y$  – координата, направленная по нормали к обтекаемой поверхности, м;  $l$  – длина пути перемешивания, м:

$$l = \alpha y \{1 - \exp[-\rho_{ж} v_* y / (26\mu_{ж})]\}; \quad (5)$$

$\alpha$  – коэффициент, характеризующий интенсивность турбулентного переноса:

$$\alpha = 0,4 \frac{\sqrt{1 - \frac{4,9}{\rho_{ж\infty} u_{0\infty} (\partial u / \partial y)_{y=0}} \left[ \frac{\partial p_{\infty} / \partial \tau}{u_{0\infty}} + (\partial p / \partial y)_{\max} \right]}}{1 - 21,4 \frac{dp_{\infty} / dx}{\rho_{ж\infty} u_{0\infty} (\partial u / \partial y)_{y=0}}}; \quad (6)$$

$v_*$  – динамическая скорость в рассматриваемой точке потока, м/с;  $\mu_{ж}$  – динамическая вязкость, Па·с;  $p$  – давление, Па;  $\tau$  – время, с;  $x$  – координата, направленная вдоль обтекаемой поверхности, м;  $Pr_T$  – турбулентное число Прандтля:

$$Pr_T = \frac{0,9}{1 + 10^7 \frac{\partial T_w / \partial \tau}{u_{0\infty} (\partial T / \partial y)_{y=0}}}; \quad (7)$$

где индексы:  $\infty$  – относится к параметрам за пределами пограничного слоя в анализируемом сечении;  $0\infty$  – то же в исходном сечении (при  $x = 0$ );  $\max$  – к

максимальному значению параметра в анализируемом сечении;  $w$  – к параметрам на обтекаемой поверхности.

Из анализа выражений (6) и (7) следует, что на значения величин  $\alpha$  и  $Pr_T$ , а значит и на интенсивность турбулентного переноса в пограничном слое, оказывают влияние следующие параметры, воздействуя на которые (например, с помощью УЗ техники подачи СОЖ), можно управлять процессом: производные по времени от давления, скорости в ядре потока и продольный градиент давления (скорости) потока. Зависимости (6) и (7) нелинейны относительно управляющих параметров, поэтому при одинаковых по абсолютной величине, но разных по знаку значениях каждого из них их влияние на интенсивность турбулентного переноса будет различным не только по знаку, но и по модулю. Таким образом, при периодическом изменении управляющих параметров во времени или по длине обтекаемой поверхности среднее за соответствующий период влияние этих параметров на интенсивность турбулентного переноса не будет нулевым. Это свидетельствует о принципиальной возможности управления турбулентным переносом посредством периодических знакопеременных воздействий управляющих параметров.

Численные расчеты, выполненные с использованием этой модели и оригинального программного обеспечения, позволили, в частности, установить, что пограничный слой реагирует на периодические управляющие воздействия лишь в определенном частотном диапазоне, а за счет изменения частоты и амплитуды колебаний параметров потока можно управлять интенсивностью теплоотдачи к нему (рис. 2). Начальное (при  $\tau = 0$ ) распределение параметров в пограничном слое приняли соответствующим стационарным условиям течения. Колебания давления во всех сечениях пограничного слоя полагали синфазными, а закон изменения давления – гармоническим.

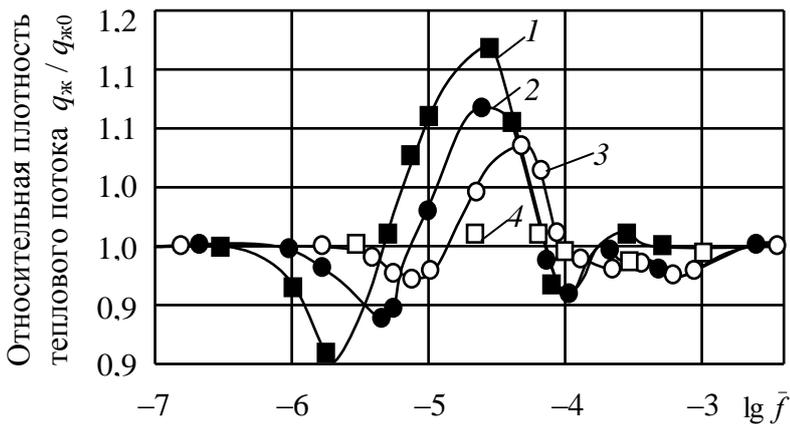


Рис. 2. Влияние безразмерной частоты  $\bar{f} = f v_{ж} / u_{0\infty}^2$  гармонических колебаний давления потока несжимаемой жидкости на осредненные (за период колебания) значения плотности теплового потока на охлаждаемой поверхности при различных значениях числа Эйлера по давлению  $Eu_p$ : 1, ■ –  $Eu_p = 400$ ; 2, ● – 200; 3, ○ – 100; 4, □ – 10

Как видно из рис. 2, зависимость относительной плотности теплового потока в СОЖ ( $q_{ж} / q_{ж0}$ ) от частоты колебаний управляющего параметра немонотонна. При этом на разных участках частотного диапазона возможно как ослабление, так и интенсификация теплоотдачи. По мере увеличения числа  $Eu_p$  степень влияния гармонических колебаний давления на теплоотдачу турбулентного потока увеличивается, а экстремум функции ( $q_{ж} / q_{ж0}$ ) смещается в сторону

меньших частот. По мере уменьшения частоты ниже значения, соответствующего минимуму функции ( $q_{ж} / q_{ж0}$ ), влияние управляющего параметра ослабляется, что связано с переходом к области квазистационарного режима турбулентного переноса, при котором влияние фактора динамической нестационарности становится пренебрежимо малым. Ослабление влияния управляющего параметра происходит и при увеличении частоты  $\bar{f}$  выше значения, соответствующего минимуму функции ( $q_{ж} / q_{ж0}$ ). Это обусловлено переходом к области быстроосциллирующего течения, при котором турбулентные пульсации в большей части сечения пограничного слоя не успевают реагировать на высокочастотные колебания управляющего параметра.

Анализ полученных результатов показал, что наибольшая интенсификация теплоотдачи в СОЖ, обеспечиваемая за счет периодических воздействий, не превышает 12 % и достигается лишь при весьма точной настройке техники подачи СОЖ на заданную частоту (в условиях, характерных для традиционной техники подачи СОЖ – 8...10 кГц). Практическая реализация такого пути интенсификации теплоотдачи при механической обработке представляется затруднительной.

На втором этапе теоретически и экспериментально выявляли резервы интенсификации движения СОЖ в капиллярно-пористом пространстве зон резания за счет воздействия ультразвуком. Для этого измеряли массовый расход СОЖ, фильтрующейся под воздействием УЗК с различными параметрами (варьировали амплитудой механических колебаний волновода, глубиной амплитудной модуляции и девиацией частотной модуляции) через сменную проточную часть экспериментальной установки. Моделировали капиллярно-пористое пространство зон шлифования, глубокого сверления и внутреннего резбонарезания. Результаты экспериментов обобщали в виде вязкостного и инерционного коэффициентов гидравлического сопротивления (табл. 1) путем решения соответствующих уравнений движения жидкости. Установлена инвариантность значений коэффициентов гидравлического сопротивления к технологическим условиям анализируемых операций и геометрии соответствующих зон обработки, в то же время значимым фактором оказалась модуляция УЗК (см. табл. 1).

### 1. Коэффициенты гидравлического сопротивления СОЖ в капиллярно-пористом пространстве зон резания

Параметры УЗ воздействия	Коэффициент гидравлического сопротивления	
	вязкостный $\alpha_v, \text{м}^{-2}$	инерционный $\beta_{ин}, \text{м}^{-1}$
Без ультразвука	$16,9 \cdot 10^{11}$	$19,6 \cdot 10^9$
С наложением НМ УЗК	$3,48 \cdot 10^{11}$	$2,25 \cdot 10^9$
С наложением АМ УЗК	$2,85 \cdot 10^{11}$	$1,66 \cdot 10^9$
С наложением ЧМ УЗК	$2,77 \cdot 10^{11}$	$1,68 \cdot 10^9$

Обозначения: НМ – немодулированные УЗК (синусоидальные); АМ – амплитудно-модулированные; ЧМ – частотно-модулированные

Полученные значения коэффициентов гидравлического сопротивления далее использовали для расчета массового расхода СОЖ через зоны механической обработки и уточнения величины теплового потока  $q_{ж}$ , отбираемого жидкостью, а также последующей количественной оценки эффективности УЗ техники подачи СОЖ (рис. 3).

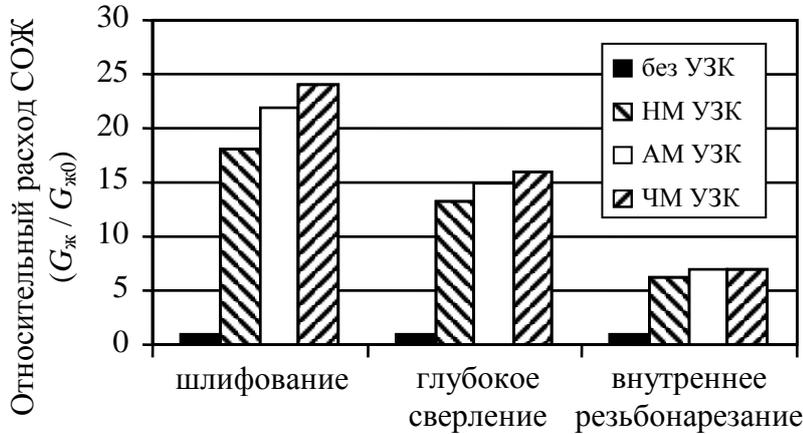


Рис. 3. Относительный расход СОЖ непосредственно через зону механической обработки с применением УЗ техники подачи: аббревиатуры см. в табл. 1

Установлено, что наиболее эффективна УЗ техника подачи СОЖ, генерирующая модулированные по амплитуде или частоте сигналы. По результатам исследований предложены новые способы и устройства для подачи СОЖ в зоны шлифования, глубокого сверления и внутреннего резьбонарезания (патенты РФ 2146601, 2151044, 2152297, 2157311, 2279963 и 2284878), основанные на использовании модулированных УЗК.

Количественную оценку эффективности использования модуляции УЗ поля для снижения силовой напряженности механической обработки проводили экспериментально на установках, оснащенных оригинальной УЗ техникой и тензометрической аппаратурой (табл. 2). Полученную информацию использовали для уточнения составляющей  $q_{\text{выд}}$  теплового баланса (1).

## 2. Сравнительная эффективность применения УЗ полей для снижения силовой напряженности при механической обработке

Технологическая операция	Параметр силовой напряженности	Вид УЗ воздействия			
		без УЗК	НМ УЗК	АМ УЗК	ЧМ УЗК
Шлифование	$P_z$	1	0,75...0,8	0,7...0,75	0,65...0,75
Глубокое сверление	$M_{кр}$	1	0,45...0,5	0,35...0,4	0,3...0,35
	$P_x$	1	0,75...0,8	0,7...0,75	0,65...0,7
Внутреннее резьбонарезание	$M_{кр}$	1	0,8...0,85	0,75...0,8	0,7...0,75
	$P_x$	1	0,85...0,9	0,7...0,8	0,7...0,8
Алмазное выглаживание	$P_z$	1	0,6...0,7	0,5...0,6	0,5...0,6
	$P_x$	1	0,75...0,8	0,65...0,7	0,65...0,7

Обозначения:  $M_{кр}$  – крутящий момент;  $P_x$  – осевая составляющая силы резания. Аббревиатуры см. в табл. 1

Разработанные математические модели и методология положены в основу программно-информационного комплекса для расчета трехмерных нестационарных температурных полей в заготовке и инструменте при механической обработке. Программно-информационный комплекс обеспечивает возможность автоматизированного интерактивного определения размеров и формы взаимодействующих объектов и зоны контакта, траектории их взаимного перемещения в процессе обработки, теплофизических свойств инструментального и обрабатываемого материалов и СОЖ (в том числе в зависимости от температуры), режима теплообмена в зоне контакта и на поверхностях анализируемой системы по заданным пользователем технологическим условиям обработки, включая параметры УЗ воздействий.

В заключительной части главы приведены результаты экспериментальной проверки адекватности теоретических разработок путем сопоставления результатов численного моделирования теплового состояния взаимодействующих при обработке объектов с результатами измерения методом полуйскусственной термопары. Удовлетворительное совпадение результатов численного расчета и эксперимента (расхождение не превышало 12 %) свидетельствует об адекватности разработанных математических моделей, расчетных алгоритмов и реализующего их программно-информационного комплекса реальным условиям механической обработки.

*Третья глава* содержит результаты теоретико-экспериментальных исследований и численного моделирования с помощью разработанного программно-информационного комплекса таких условий тепломассопереноса, при которых наиболее производительно обеспечивался бы заданный температурный режим обработки, характеризуемый температурой  $T_{кр}$ :

$$T_{кр} = \min\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6\}, \quad (8)$$

где  $T_1$  – температура начала вторичных структурно-фазовых превращений в ПС;  $T_2$  – температура выгорания компонентов ПС;  $T_3$  – пороговая (с позиции обеспечения точности обработки) температура термических деформаций ПС;  $T_4, T_5, T_6$  – пороговая температура соответственно трещинообразования в ПС, расслоения многослойных ПС, ограничиваемая стойкостью инструмента.

Целью этих исследований было выявление технологических возможностей и определение эффективности различных средств защиты ПС от теплового воздействия, необратимого с позиции либо исключения прижогов, либо обеспечения заданной точности обработки или стойкости режущего инструмента.

Условия тепломассопереноса, ограничивающие производительность обработки, определяли по результатам выполнения серии имитационных расчетов. При этом варьировали значениями элементов режима обработки, определяющими интенсивность съема материала с заготовки, и значениями управляющих параметров – УЗ воздействий, сообщаемых технологической системе и СОЖ; техники подачи и состава смазочно-охлаждающих технологических средств; техники стабилизации и восстановления режущей способности инструмента и др.

Результаты анализа производительности процессов шлифования (рис. 4) и глубокого сверления отверстий малого диаметра показали наличие значимых резервов увеличения производительности обработки без ухудшения качества деталей, вскрываемых в каждом конкретном случае путем теплофизического анализа технологических условий обработки на основе применения разработанной методологии.

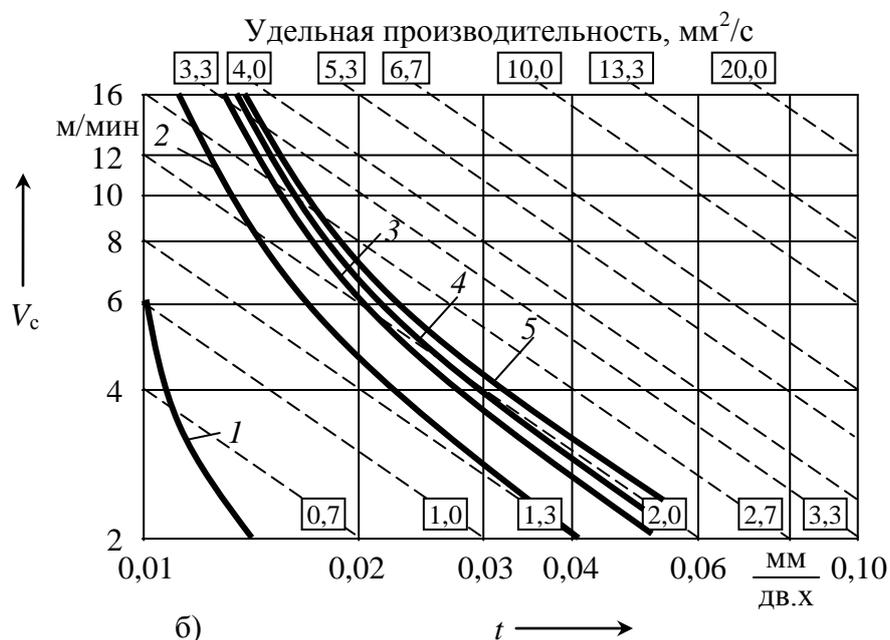
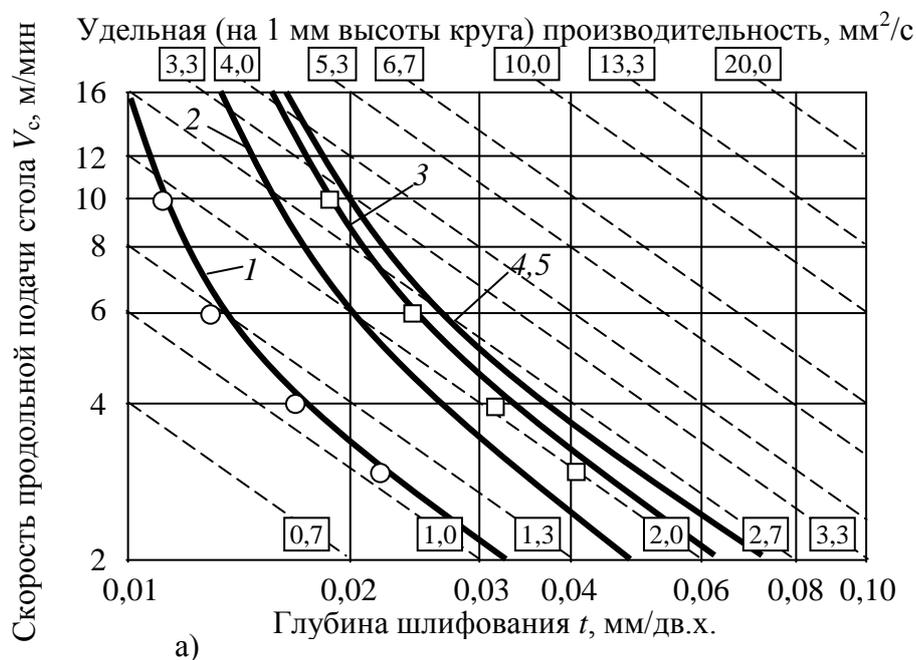


Рис. 4. Области бесприжогового плоского маятникового шлифования заготовок из стали 40X (а) и 95X18 (б) кругом 24A16HC17K11 с подачей СОЖ разными способами: 1 – поливом; 2 – одновременно поливом и к торцу круга; 3 – то же с наложением немодулированных УЗК; 4, 5 – то же с наложением соответственно амплитудно- и частотно-модулированных УЗК;  $\circ$ ,  $\square$  – эксперимент, сплошные линии – расчет; штриховые – изолинии удельной производительности. СОЖ – 2 %-ый водный раствор продукта Синхо-2М. Расход СОЖ – 10  $\text{дм}^3/\text{мин}$

Так, на основе теплофизического анализа определяли области режимов бездефектного шлифования, при которых контактная температура не превышала температуры  $T_1$  начала вторичных структурно-фазовых превращений в ПС, поскольку именно они, как показали предварительные исследования, лимитировали увеличение производительности. Области режимов бездефектного шлифования строили в логарифмической координатной плоскости, в которой изолинии удельной производительности представляют собой семейство парал-

лельных прямых (штриховые линии на рис. 4). При этом каждая из построенных кривых, по-существу, отображает тепловое ограничение производительности шлифования в анализируемых условиях: область ниже и левее кривой соответствует бездефектным режимам, а область выше и правее кривой – режимам, сопровождающимся образованием дефектов. Таким образом, применение УЗ техники подачи СОЖ (см. рис. 4, кривые 3 – 5) по сравнению с подачей ее поливом (кривая 1) «сдвигает» тепловое ограничение в область более производительных режимов, что позволяет увеличить производительность шлифования заготовок из стали 40Х до 2,3 раза, а из стали 95Х18 – до 3,6 раза при одинаковом расходе подаваемой жидкости.

Аналогичные результаты получены при исследовании возможностей и условий форсирования за счет рационального применения ультразвука производительности глубокого сверления маломерных отверстий при сохранении заданного периода стойкости сверла и точности обработки. Установлено, что наиболее эффективно наложение частотно-модулированных колебаний одновременно на сверло и СОЖ, при котором производительность обработки удалось увеличить до 4 раз по сравнению с обработкой без ультразвука.

В этой же главе представлены результаты численного исследования возможностей и условий минимизации (дозирования) расхода СОЖ на операциях механической обработки. Дана количественная оценка максимально возможного теплового потока  $q_{ж}$ , отводимого в СОЖ, в зависимости от размеров этой зоны, скорости резания и контактной температуры. Разработан алгоритм и приведены результаты численного определения расхода СОЖ, минимально достаточного для обеспечения защиты ПС заготовки от деструктивного термомеханического воздействия в зоне обработки.

Алгоритм основан на поиске решения путем последовательных приближений по результатам серии имитационных расчетов с использованием разработанного программно-информационного комплекса. Установлено, что наиболее целесообразна реализация преимуществ от снижения (за счет применения УЗ техники подачи СОЖ) температурного режима в зоне обработки не путем сокращения расхода подаваемой СОЖ, а путем форсирования производительности обработки. В этом случае, помимо всего прочего, пропорционально снижению машинного времени уменьшается расход СОЖ в расчете на одну обработанную заготовку.

В заключительной части главы представлены результаты численного и экспериментального исследования возможностей и условий замены СОЖ аэрозолями и ионизированным воздухом. Как можно было предположить, технологическая эффективность СОЖ и аэрозолей по сравнению с ионизированным воздухом в целом выше, особенно в части реализации охлаждающего действия (рис. 5). По результатам численного моделирования тепловой напряженности установлено, что за счет варьирования значениями элементов режима обработки при сохранении или незначительном снижении производительности можно обеспечить близкие значения температуры в зонах шлифования с подачей аэрозоли СОЖ и ионизированного воздуха (см., например, кривые 2 и 4 на рис. 5, а при  $V_{пр} = 10$  м/мин).

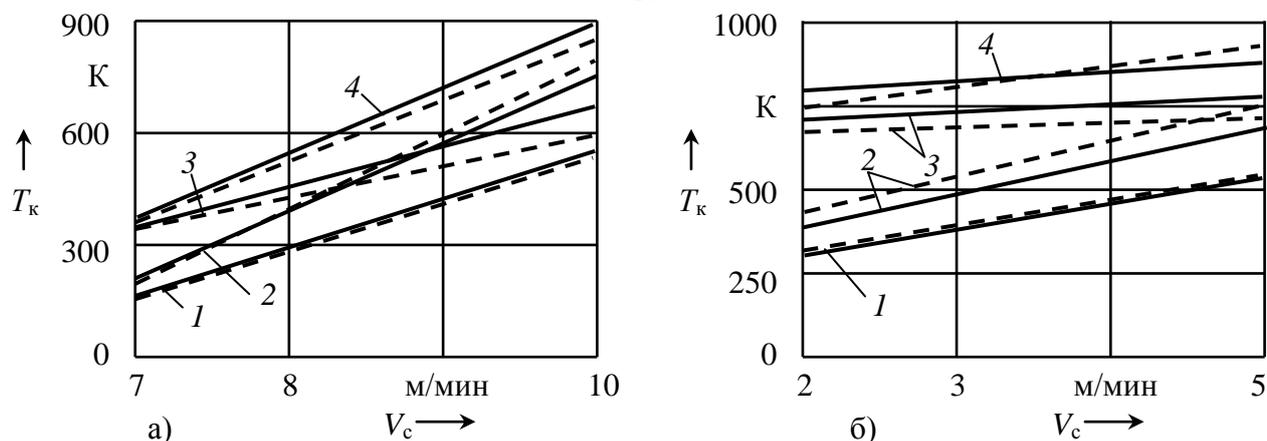


Рис. 5. Контактная температура в зоне плоского торцевого шлифования заготовок из сталей 40X (а) и 95X18 (б) с подачей аэрозоли СОЖ НГЛ-205 (кривые 1 и 2) и ионизированного воздуха (кривые 3 и 4): сплошная линия – эксперимент; штриховая – расчет; 1, 3 –  $t = 0,02$  мм/дв.х; 2, 4 –  $t = 0,04$  мм/дв.х

Качественно эти результаты подтвердили и непосредственные измерения контактных температур с помощью полусинтетических термопар (сплошные линии 2 и 3 на рис. 5), хотя пороговые значения скорости продольной подачи стола сместились в сторону больших значений. При этом расхождение между расчетными и экспериментальными значениями контактных температур не превышало 12 %, что находилось в пределах погрешности эксперимента.

С форсированием режима обработки технологический эффект от применения СОЖ по сравнению с ионизированным воздухом нивелируется. Это свидетельствует о возможном применении ионизированного воздуха взамен СОЖ при черновой (предварительной) обработке. Однако в каждом конкретном случае такая замена помимо детального теплофизического анализа должна быть обоснована технико-экономическими расчетами.

В *четвертой главе* представлены физическая модель ПС заготовки, теплонагруженного при механической обработке в УЗ поле, и комплекс математических моделей и алгоритмов расчета с учетом технологического наследования параметров качества теплонагруженного ПС: технологических остаточных напряжений, степени разупрочнения, термических деформаций. В соответствии с задачами диссертации модели разрабатывали как теоретическую основу для технологического обеспечения эффективности механической обработки в УЗ поле.

Обобщая результаты известных и собственных исследований формирования свойств теплонагруженных ПС заготовок в процессах механической обработки, в качестве физической модели ПС приняли структуру (рис. 6), состоящую из следующих субслоев: субслоем I ( $y < 0$ ), удаляемый вместе с операционным припуском; субслоем II ( $0 \leq y \leq h_{II}$ ), свойства которого формируются как результат совокупного воздействия трех факторов – структурно-фазовых превращений, термопластических деформаций и пластических деформаций под действием силы резания; субслоем III ( $h_{II} < y \leq h_{II} + h_{III}$ ), формирующийся в результате одновременного воздействия двух из трех перечисленных факторов (как правило, пластических деформаций под действием силы резания и температуры); субслоем IV ( $h_{пс} - h_{IV} < y \leq h_{пс}$ ), формирующийся в результате пластических деформаций под действием только силы резания или температуры; наконец,

ниже субслоя  $IV$  ( $h_{nc} < y$ ) расположен слой основы, испытывающий лишь упругую деформацию, не изменяющую его физико-механические свойства, но в ряде случаев способную лимитировать точность обработки. Приняли также, что УЗ поле воздействует на формирование свойств ПС опосредовано, через изменение в процессе обработки его напряженно-деформированного и теплового состояния.

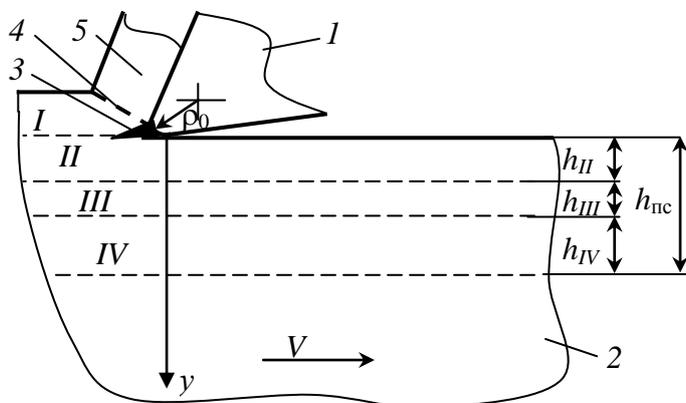


Рис. 6. Физическая модель ПС заготовки, формируемого при механической обработке: 1 – инструмент; 2 – заготовка; 3 – зона образования опережающей трещины; 4 – условная плоскость сдвига; 5 – стружка; I, II, III, IV – характерные субслои

Естественно, в конкретных технологических условиях в зависимости от режима взаимодействия инструмента  $I$  с заготовкой  $2$  (пластическое деформирование или резание) отдельные из указанных субслоев могут отсутствовать и должны исключаться из анализа. Так, при поверхностном пластическом деформировании отсутствует срезаемый субслоем  $I$ , а при обработке, исключающей структурно-фазовые превращения, вырождается субслой  $II$ . В ряде частных случаев ПС по всей глубине  $h_{nc}$  может подвергаться одновременному воздействию только силы резания и температуры, при этом вырождаются субслои  $II$  и  $IV$ .

Толщины характерных субслоев теплонагруженного ПС (см. рис. 6) выражаются следующими зависимостями:

$$h_{II} = \min_y \{h_T, h_P, h_{cf}\}; \quad (9)$$

$$h_{III} = \min_{y>0} \{h_T - h_{II}, h_P - h_{II}, h_{cf} - h_{II}\}; \quad (10)$$

$$h_{nc} = \max_y \{h_T, h_P, h_{cf}\}; \quad (11)$$

$$h_{IV} = h_{nc} - h_{III}, \quad (12)$$

где  $h_T$  – глубина распространения термопластических деформаций, определяемая положением критической изотермы  $T_{кр} = \sigma_T / (\beta_3 E)$ , м;  $E$ ,  $\sigma_T$  – соответственно модуль упругости и предел текучести материала заготовки, Па;  $h_P$  – глубина распространения пластических деформаций под действием силы резания, м;  $h_{cf}$  – глубина распространения структурно-фазовых изменений, м.

Известно, что силовой и тепловой факторы влияют на формирование физико-механического состояния ПС разнонаправлено. Поэтому при технологическом обеспечении качества теплонагруженного ПС необходимо достоверно оценивать интенсивность каждого из них и столь же достоверно прогнозировать толщины субслоев на основе анализа напряженно-деформированного и теплового состояния зоны механической обработки в УЗ поле в конкретных тех-

нологических условиях. Глубины  $h_T$  и  $h_{сф}$  определяли непосредственно по результатам расчета температурного поля заготовки на основе разработанной методологии и математических моделей с последующей локализацией положения соответствующих изотерм. Глубину  $h_P$  определяли на основе критерия Губера-Мизеса по результатам решения пластической задачи механики сплошных сред, деформируемых под действием силы резания, с учетом напряжений, создаваемых температурным полем, и зависимости механических свойств материала заготовки от температуры.

На основе принятой физической модели разработаны математические модели и алгоритмы для расчета степени разупрочнения теплонагруженного ПС и распределения в нем остаточных напряжений, а также погрешностей обработки, обусловленных термическими деформациями в системе «режущий инструмент – заготовка», с учетом технологического наследования. Так, тензор остаточных напряжений после выполнения  $i$ -й технологической операции определяли по рекуррентной зависимости:

$$\left(\sigma_{\Sigma}^{\text{ост}}\right)_i = \left(\tilde{\sigma}_{\Sigma}^{\text{ост}}\right)_{i-1} + \left(\sigma_P^{\text{ост}} + \sigma_T^{\text{ост}} + \sigma_{сф}^{\text{ост}}\right)_i, \quad (13)$$

где  $\left(\tilde{\sigma}_{\Sigma}^{\text{ост}}\right)_{i-1}$  – скорректированный тензор остаточных напряжений после предыдущей технологической операции:

$$\left(\tilde{\sigma}_{\Sigma}^{\text{ост}}\right)_{i-1} = \begin{cases} \left(\sigma_{\Sigma}^{\text{ост}}\right)_{i-1}, & \text{в зоне } y > h_{пци}; \\ \{0\}, & \text{в зоне } 0 \leq y \leq h_{пци}; \end{cases} \quad (14)$$

$\sigma_P^{\text{ост}}$ ,  $\sigma_T^{\text{ост}}$ ,  $\sigma_{сф}^{\text{ост}}$  – тензоры остаточных напряжений, формирующихся под воздействием соответственно силы резания, температуры и структурно-фазовых изменений в ПС.

Аналогичный подход использовали для определения степени разупрочнения как относительной остаточной деформации в теплонагруженном ПС. При этом тензоры остаточных напряжений и деформаций определяли на основе теоремы о разгрузке путем последовательного решения упругой и пластической задач механики деформируемых сплошных сред. Поскольку точность таких расчетов, а значит и практическая ценность получаемых результатов, напрямую определяется точностью закладываемого в расчет распределения температуры в ПС, то исходные данные импортировали из разработанного программно-информационного комплекса в программно-вычислительный комплекс ANSYS в виде объемных и поверхностных нагрузок.

В отличие от остаточных напряжений и деформаций, термические деформации могут накапливаться за время обработки во всем объеме заготовки и режущего инструмента, и обусловленные ими погрешности размера, формы и взаимного расположения обработанных поверхностей технологически наследуются не только в пределах толщины  $h_{пс}$  на отдельных операциях. С увеличением степени концентрации элементарных технологических переходов в структуре операции также происходит накопление термических деформаций заготовки и инструмента, сопровождающееся технологическим наследованием погрешностей обработки от перехода к переходу.

В качестве примера на рис. 7 представлены некоторые результаты моделирования погрешностей  $\Delta(x)$  диаметра отверстий, обусловленных наследованием накапливающихся термических деформаций по мере последовательного сверления группы близкорасположенных отверстий в прецизионном корпусе:

$$\Delta(x) = \Delta D(x) - \Delta D_0(x), \quad (15)$$

где  $\Delta D(x)$  – линейное тепловое расширение сверла, м:

$$\Delta D(x) = 2\beta_c \int_0^{D/2} [T(r, x) - T_0] dr, \quad (16)$$

где  $\beta_c$  – температурный коэффициент материала сверла,  $K^{-1}$ ;  $D$  – диаметр сверла, м;  $T$ ,  $T_0$  – соответственно текущая и начальная температура, К;  $x$ ,  $r$  – соответственно осевая и радиальная координата, м (рис. 7, а);  $\Delta D_0(x)$  – линейное тепловое расширение заготовки, м:

$$\Delta D_0(x) = 2\beta_3 \int_{D/2}^{H-D/2} [T(r, x) - T_0] dr, \quad (17)$$

где  $\beta_3$  – температурный коэффициент материала заготовки,  $K^{-1}$ ;  $H$  – длина шага между осями соседних отверстий, м.

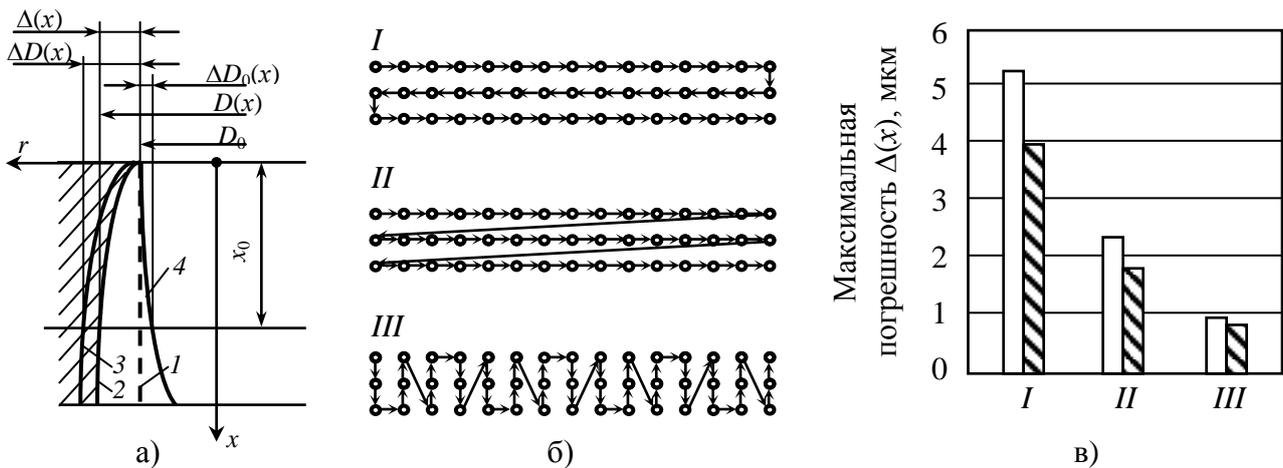


Рис. 7. Схема (а) к определению погрешности формы отверстия, обусловленной термическими деформациями сверла и заготовки, анализируемые варианты последовательности сверления группы отверстий (б) и максимальная погрешность  $\Delta(x)$  при различных вариантах (в): 1, 2 – соответственно номинальная и итоговая образующие отверстия; 3, 4 – искажение образующей за счет термических деформаций соответственно сверла и заготовки; белые и заштрихованные столбцы – сверление без ультразвука и в УЗ поле соответственно

В зависимости от теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов и распределения тепловых потоков в зоне сверления возможно доминирование как погрешности  $\Delta D(x)$ , сопровождающееся «тепловой» разбивкой отверстия, так и погрешности  $\Delta D_0(x)$ , приводящее к «тепловой» усадке отверстия. При этом величина результирующей погрешности  $\Delta(x)$  определяется температурным полем системы «режущий инструмент – заготовка» и напрямую зависит от интенсивности теплообразования в зоне резания. Резуль-

таты моделирования (см. рис. 7) подтвердили возможность минимизировать термические деформации в системе «режущий инструмент – заготовка» путем воздействия УЗ полем, снижающим трение и, как следствие, тепловую напряженность обработки, а также за счет рационального проектирования последовательности технологических переходов, обеспечивающей достаточное охлаждение объектов системы.

Разработанные расчетные алгоритмы и модели использовали для анализа возможностей коррекции параметров качества теплонагруженных ПС за счет воздействия УЗ полями и пластической деформацией (см. далее главу 5).

*Пятая глава* посвящена численным (с использованием разработанных моделей и алгоритмов) и экспериментальным исследованиям закономерностей технологического наследования изменений, внесенных в теплонагруженные при механической обработке ПС заготовок. Исследовали возможности и эффективность применения ультразвука для релаксации остаточных напряжений, сформированных в ПС шлифованных деталей, а также для направленного формирования остаточных напряжений в ПС обработанных деталей поверхностным пластическим деформированием.

Эффект УЗ релаксации связан с дислокационным поглощением энергии УЗ волны и преобразованием ее в энергию перемещения дислокаций, что способствует пластическим сдвигам, уменьшающим остаточные напряжения. Известно, что частотная зависимость дислокационного поглощения энергии ультразвука имеет резонансный характер, а собственная резонансная частота дислокации определяется длиной дислокационного отрезка, т.е. расстоянием между соседними точечными дефектами. Последнее свидетельствует о том, что УЗК фиксированной частоты воздействуют лишь на дислокации определенной длины, а для вовлечения в процессы поглощения ультразвука дислокаций разной длины необходимо изменять частоту колебаний. На практике это может быть реализовано путем использования модулированных колебаний. Расширение полосы частот, занимаемой модулированным колебанием, способствует вовлечению в процесс большего числа дислокаций. В результате следует ожидать более интенсивную релаксацию технологических остаточных напряжений.

Опытную проверку этой гипотезы выполняли с помощью аппаратуры для неразрушающего измерения остаточных напряжений СИТОН-АРМ на образцах из материалов, относящихся к разным группам обрабатываемости.

Характерные графики распределения остаточных напряжений по глубине ПС образца из стали 3ХЗМЗФ в зависимости от продолжительности релаксации и усилия прижима волновода приведены на рис. 8, а сводные данные для всех исследованных материалов – в табл. 3 и 4. Как видно из рис. 8, УЗ релаксация обеспечила снижение остаточных напряжений до 5,5 раз (кривые 5, 6 и 7). По мере увеличения продолжительности релаксации уровень остаточных напряжений уменьшается, однако интенсивность этого уменьшения не одинакова: на первой минуте релаксации она максимальна, а к восьмой минуте снижается практически до нуля, и остаточные напряжения стабилизируются на определенном уровне. По-видимому, стабилизация остаточных напряжений связана с исчерпанием количества дислокаций, вовлеченных в процессы поглощения УЗК.

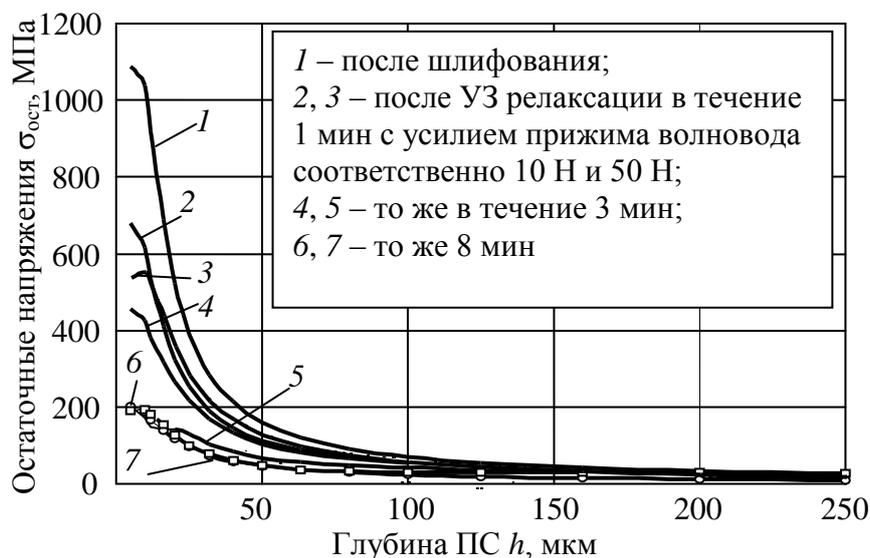


Рис. 8. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  в ПС образцов из стали 3Х3М3Ф:  $V_k = 35$  м/с,  $V_{пр} = 10$  м/мин,  $S_{поп} = 4,2$  мм/ход,  $S_{вр} = 0,01$  мм/дв.х. Круг 1 –  $250 \times 20 \times 76$  14A16HC17K11. СОЖ – 2 %-й раствор Синхо-2М. Режим УЗ релаксации: синусоидальные колебания,  $f = 18,6$  кГц;  $A = 5$  мкм

### 3. Эффективность УЗ релаксации остаточных напряжений в ПС шлифованных образцов синусоидальными колебаниями без модуляции УЗ сигнала

Марка материала	Эффективность* УЗ релаксации $E$ , %, в зависимости от ее продолжительности, мин				
	1	3	5	8	10
40X	31 / 44 **	49 / 63	55 / 68	68 / 68	68 / 68
95X18	32 / 44	46 / 60	60 / 60	60 / 60	60 / 60
3Х3М3Ф	36 / 50	59 / 82	75 / 82	82 / 82	82 / 82
P18	36 / 49	61 / 70	70 / 73	72 / 73	73 / 73
BT3-1	23 / 32	35 / 39	39 / 40	40 / 40	40 / 40

\* Эффективность релаксации оценивали соотношением:  $E = (1 - \sigma/\sigma_0) \times 100$  %, где  $\sigma$ ,  $\sigma_0$  – соответственно текущие и исходные (после шлифования) максимальные остаточные напряжения в ПС, МПа.  
\*\* В числителе – усилие прижима волновода 10 Н, в знаменателе – 50 Н.

### 4. Эффективность УЗ релаксации и время стабилизации остаточных напряжений в ПС образцов в зависимости от формы сообщаемых колебаний

Марка материала	Эффективность УЗ релаксации $E$ , %			Время стабилизации остаточных напряжений, мин		
	НМ	АМ	ЧМ	НМ	АМ	ЧМ
40X	68	82	89	5	6	6
95X18	60	77	81	3	5	6
3Х3М3Ф	82	86	92	3	5	6
P18	73	86	88	5	6	7
BT3-1	40	49	53	4	5	6

Качественно такой характер влияния продолжительности релаксации на распределение остаточных напряжений наблюдали и на образцах из других материалов (см. табл. 3). Примечательно, что во всех случаях увеличение усилия

прижима не позволило стабилизировать остаточные напряжения на более низком уровне, но способствовало более ранней стабилизации (см. также рис. 8). При этом для всех исследованных материалов продолжительность релаксации более 8 минут нецелесообразна. Установлено также, что процесс УЗ релаксации остаточных напряжений не сопровождается сколь-либо значимым изменением других показателей физико-механического состояния ПС.

Заметно уменьшить уровень стабилизации остаточных напряжений позволила модуляция колебаний, сообщаемых ПС образцов (см. табл. 4). По сравнению с синусоидальными колебаниями применение модулированных колебаний увеличило эффективность релаксации в среднем дополнительно на 10...21 % в зависимости от материала образцов. Как и ожидалось, наилучшие результаты зафиксированы при использовании частотно-модулированных колебаний. По результатам этих исследований предложен новый способ шлифования (патент РФ 2276004) с УЗ релаксацией формирующихся при этом растягивающих остаточных напряжений.

В этой же главе представлены результаты расчета (с использованием моделей, разработанных в главах 2 и 4, и полученных данных по эффективности УЗ релаксации) и экспериментального исследования технологического наследования остаточных напряжений в процессе изготовления вала при различных технологических маршрутах, в том числе с применением УЗ релаксации. Часть этих результатов в качестве примера приведена на рис. 9 и 10.

Образцами при исследованиях и моделировании служили валы диаметром 60 мм и длиной 150 мм из сталей 40X и 95X18. Результаты исследования теплосиловой напряженности обработки (см. рис. 9) и остаточного напряженного состояния ПС заготовок (см. рис. 10) при различных технологических маршрутах обработки вала подтвердили адекватность разработанных математических моделей реальным условиям обработки. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями остаточных напряжений не превышало 20 % как по их величине, так и по глубине распространения.

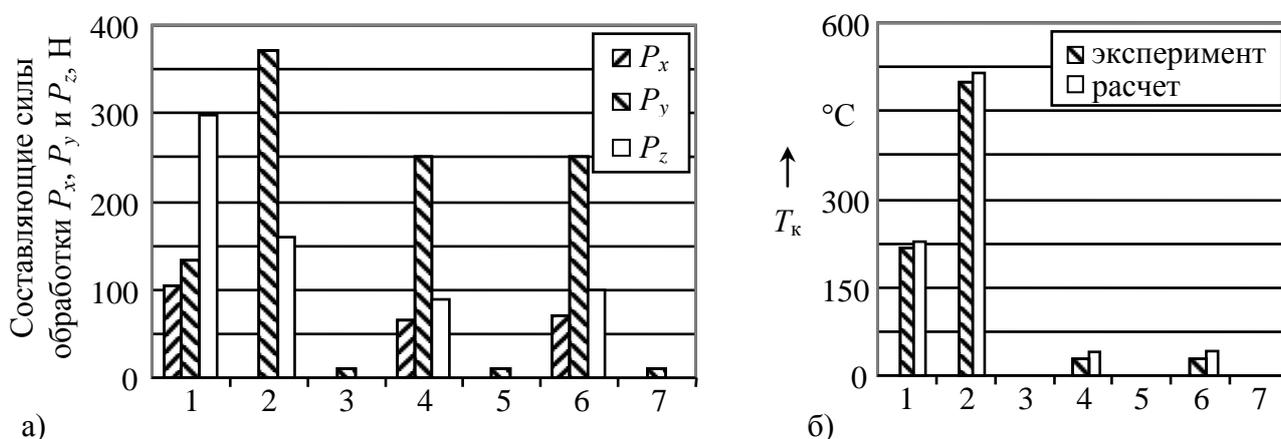


Рис. 9. Силовая (а) и тепловая (б) напряженность обработки заготовок из стали 95X18 на технологических операциях при различных технологических маршрутах обработки: 1 – точение; 2 – шлифование; 3 – УЗ релаксация после шлифования; 4 – выглаживание после шлифования и УЗ релаксации; 5 – УЗ релаксация после шлифования, УЗ релаксации и выглаживания; 6 – выглаживание после шлифования; 7 – УЗ релаксация после шлифования и выглаживания

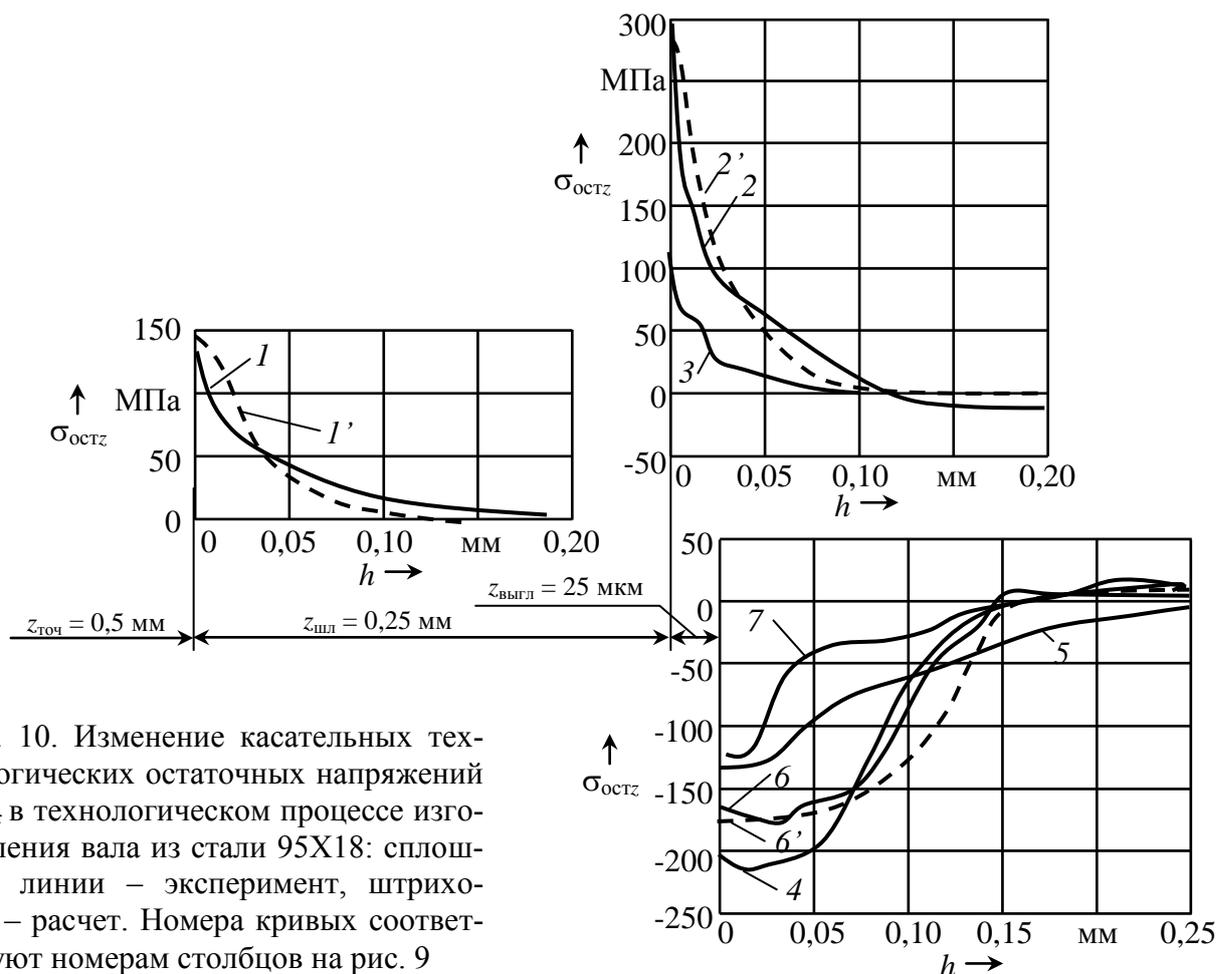


Рис. 10. Изменение касательных технологических остаточных напряжений  $\sigma_{остz}$  в технологическом процессе изготовления вала из стали 95X18: сплошные линии – эксперимент, штриховые – расчет. Номера кривых соответствуют номерам столбцов на рис. 9

Установлено, что УЗ релаксация является «барьером», препятствующим технологическому наследованию растягивающих напряжений, сформированных в теплонагруженном ПС. Включение в технологический процесс изготовления вала вслед за шлифованием операции УЗ релаксации (кривая 3 на рис. 10) уменьшило уровень растягивающих напряжений втрое.

После выглаживания в ПС образцов формируются сжимающие остаточные напряжения на глубине до 150...200 мкм (см. рис. 10, кривые 4, 6 и 6'). При этом у образцов, прошедших операцию УЗ релаксации шлифовочных остаточных напряжений (кривая 4), по сравнению с непрошедшими ее (кривые 6 и 6'), выглаживание формирует до 1,5 раз большие по величине сжимающие напряжения. УЗ релаксация остаточных напряжений в выглаженных образцах способствовала снижению в 1,5...2 раза остаточных напряжений сжатия в ПС при одновременном увеличении глубины напряженного слоя (кривые 5 и 7 по сравнению с кривыми 6, 6' и 4).

Установлено также, что применение промежуточной УЗ релаксации в технологическом маршруте «шлифование – выглаживание» обеспечивает возможность формирования выглаживанием сжимающих остаточных напряжений, больших по абсолютной величине, даже при меньшем на 15...20 % усилии прижима выглаживателя, что особенно важно при обработке нежестких и тонкостенных заготовок.

Направленно формировать остаточное напряженное состояние и качество ПС в целом можно путем последовательного или параллельного совмещения

операций механической обработки, выполняемых в условиях тепловых ограничений, с поверхностным пластическим деформированием. При прочих равных условиях требуемое упрочнение ПС предпочтительнее создавать за счет минимально достаточного для этого силового воздействия, которое можно обеспечивать за счет снижения внешнего и внутреннего трения в УЗ поле. Установлено, что, несмотря на обеспечиваемое некоторыми схемами совмещения более чем двукратное уменьшение силового воздействия на обрабатываемую поверхность, сжимающие остаточные напряжения в ПС образцов за счет совмещенной обработки в УЗ поле распространяются на большую глубину. При этом наблюдается более равномерное распределение остаточных напряжений по глубине ПС без приповерхностного уменьшения их абсолютной величины.

В *шестой главе* дано описание новой УЗ техники для выполнения операций механической обработки, включающей УЗ устройства для подачи СОЖ в контактные зоны механической обработки, выглаживания и совмещенной (резанием и поверхностным пластическим деформированием) обработки заготовок, а также УЗ устройства для релаксации технологических остаточных напряжений. В этой же главе представлены результаты промышленных испытаний и внедрения разработок.

Так, применение новой УЗ техники подачи СОЖ на операциях шлифования в производстве ОАО «Автодизель» (г. Ярославль), ОАО «Автодеталь-Сервис» (г. Ульяновск), ЗАО «Кардан» (г. Сызрань) и ОАО «Спецоборудование» (г. Киров) за счет снижения теплосиловой напряженности обработки обеспечило увеличение периода стойкости абразивных кругов в 2...2,5 раза. По результатам испытаний технологии и техники УЗ глубокого сверления в производстве ЗАО «Авиастар-СП», ООО «Димитровградский инструментальный завод» (г. Димитровград) и ОАО «Спецоборудование» (г. Киров) зафиксировано двукратное уменьшение увода оси отверстий и увеличение периода стойкости сверл в 1,3...1,8 раза при сокращении числа их поломок.

Выявлены основные источники и приведено экономическое обоснование эффективности использования разработок в производственных условиях. Установлено, что срок окупаемости новой УЗ техники не превышает 1,5 лет.

В *заключении* изложены основные результаты исследований и показаны пути дальнейшего их использования для совершенствования существующих и разработки новых технологий механической обработки заготовок.

В *приложениях* представлены: методика численного расчета нестационарного температурного поля системы «заготовка – инструмент» при механической обработке; описание программно-информационного комплекса для теплофизического анализа технологических операций; методики численного расчета полей остаточных напряжений и температурных деформаций заготовки при механической обработке в условиях тепловых ограничений с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS; копия сертификата о типовом соответствии аппаратуры СИТОН и сравнительные результаты измерения остаточных напряжений на установках СИТОН-АРМ и ПИОН; акты и справки по опытно-промышленным испытаниям и внедрению результатов диссертации; копии дипломов международных выставок и конкурсов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основным результатом аналитических и экспериментальных исследований, представленных в настоящей работе, является методология моделирования тепловых взаимодействий объектов, контактирующих при выполнении технологических операций механической обработки в УЗ поле всухую и с применением СОЖ, реализованная и апробированная в виде программно-информационного комплекса.

В ходе разработки новой методологии и на основе ее использования получены следующие основные научные выводы и практические решения:

1. В основу разработанной методологии моделирования положен принцип системного анализа тепловых взаимодействий контактирующих при механической обработке объектов путем совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности с общим граничным условием в зоне контакта. Закономерности влияния УЗ полей на теплообразование и теплоотдачу в анализируемой системе объектов учтены полученными аналитически и экспериментально условиями однозначности. В результате исключена необходимость априорного определения долей теплоты, отводимых в контактирующие объекты и в СОЖ, что обеспечивает повышенную достоверность и точность моделирования.

2. Разработаны: базовая математическая модель теплового взаимодействия контактирующих объектов при механической обработке в УЗ поле; методика ее адаптации применительно к операциям шлифования, глубокого сверления, внутреннего резьбонарезания и выглаживания; методика и алгоритмы численного расчета нестационарных температурных полей в системе объектов, контактирующих при выполнении операций механической обработки в УЗ поле. Тем самым обеспечена возможность количественного анализа тепловых ограничений, характеризующих процесс обработки, с последующей выработкой технологических решений по повышению ее эффективности рациональным использованием энергии УЗ полей. Адекватность разработок подтверждена удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных результатов.

3. На основе теоретических и экспериментальных исследований возможной интенсификации в УЗ поле проникающей способности СОЖ в капиллярно-пористом пространстве контактных зон механической обработки впервые получены значения коэффициентов гидравлического сопротивления, позволяющие рассчитать расход СОЖ через зону обработки с учетом воздействия на СОЖ УЗК, в том числе модулированными. Установлено, что именно модулированные колебания наиболее эффективно снижают гидравлическое сопротивление СОЖ в капиллярно-пористом пространстве, способствуя многократному увеличению полезного расхода жидкости непосредственно через зону обработки без увеличения ее общего расхода и усилению тем самым охлаждающего действия СОЖ. Таким образом, созданы предпосылки заметного увеличения производительности обработки.

4. На основе предложенной методологии и разработанных математических моделей, методик и алгоритмов численно проанализированы тепловые ограничения при механической обработке в УЗ поле с применением СОЖ. Уста-

новлена возможность увеличения производительности обработки по машинному времени до 2 раз и более без изменения качества деталей и периода стойкости инструмента, либо резкого увеличения периода стойкости инструмента при сохранении заданного режима обработки. По результатам исследований разработаны новые способы и реализующая их техника для эффективной подачи СОЖ в зоны шлифования, глубокого сверления и внутреннего резьбонарезания с наложением модулированных УЗК на СОЖ и режущий инструмент (патенты РФ 2146601, 2151044, 2152297, 2157311, 2279963 и 2284878).

5. В результате экспериментального исследования процесса УЗ релаксации растягивающих технологических остаточных напряжений, формирующихся в теплонагруженных при механической обработке ПС заготовок, подтверждена гипотеза о предпочтительности применения для релаксации частотно-модулированных УЗ полей. Получены количественные данные по эффективности УЗ релаксации остаточных напряжений в зависимости от ее продолжительности, усилия прижима волновода, параметров УЗ воздействия.

6. На основе разработанного комплекса математических моделей и алгоритмов расчета параметров состояния теплонагруженного ПС, с использованием полученных экспериментальных данных выполнены исследования процесса формирования теплонагруженных ПС заготовок при механической обработке в УЗ поле с учетом технологического наследования и решен ряд частных задач: разработаны технологические рекомендации по минимизации термических деформаций, выполнению УЗ релаксации и совмещенной обработки; предложены новые способы шлифования (патент РФ 2276004) и выглаживания (патент РФ 2329141) в УЗ поле.

7. Основные теоретические положения работы подтверждены результатами промышленных испытаний. Фактический совокупный годовой экономический эффект от внедрения разработанных в рамках выполнения диссертации новой УЗ техники и программно-информационного комплекса для теплофизического анализа составил около 450 тысяч рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

*Монографии*

1. Киселев, Е.С. Теплофизический анализ концентрированных операций шлифования / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 140 с.
2. Киселев, Е.С. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса. Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов. – М.: РАН, 2008. – 250 с.

*Публикации в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК, и патенты*

3. Киселев, Е.С. Численное моделирование тепловых процессов при совмещенном шлифовании с применением ультразвуковой техники подачи СОЖ / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов // Изв. вузов. Машиностроение, 2000. – № 3. – С. 65 – 71.
4. Киселев, Е.С. Эффективность применения новой ультразвуковой техники подачи СОЖ при совмещенном и фасонном шлифовании заготовок / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, А.Н. Унянин // Вестник машиностроения, 2001. – № 1. – С. 48 – 50.
5. Киселев, Е.С. Ультразвуковая обработка СОЖ при шлифовании заготовок деталей / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, А.Н. Унянин // Автомобильная промышленность, 2001. – № 4. – С. 37 – 38.
6. Киселев, Е.С. Повышение эффективности шлифования заготовок с помощью ультразвука /

- Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, А.Н. Тулисов // Автомобильная промышленность, 2001. – № 9. – С. 26 – 27.
7. Киселев, Е.С. Ультразвуковая релаксация технологических остаточных напряжений в шлифованных деталях / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, А.А. Яшин // СТИН, 2006. – № 1. – С. 18 – 21.
8. Ковальногов, В.Н. Теплофизический анализ как основа проектирования композиционных шлифовальных кругов / В.Н. Ковальногов, С.М. Михайлин // Изв. вузов. Машиностроение, 2006. – № 3. – С. 53 – 65.
9. Киселев, Е.С. Применение ультразвуковой техники подачи СОЖ для повышения эффективности плоского шлифования с непрерывной правкой круга / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, А.А. Яшин // СТИН, 2006. – № 10. – С. 33 – 36.
10. Киселев, Е.С. Использование ультразвука при обработке заготовок шлифованием и алмазным выглаживанием / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, З.В. Степчева // Упрочняющие технологии и покрытия, 2007. – № 8. – С. 43 – 53.
11. Ковальногов, В.Н. Минимизация расхода СОЖ при шлифовании с ультразвуком // Справочник. Инженерный журнал, 2007. – № 7. – С. 17 – 21.
12. Киселев, Е.С. Тепловая напряженность и эффективность плоского торцового шлифования с применением в качестве СОТС ионизированного воздуха / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, В.А. Коршунов // Вестник машиностроения, 2007. – № 8. – С. 59 – 61.
13. Киселев, Е.С. Технологическое обеспечение качества деталей с биметаллическими поверхностными слоями в процессе механической обработки / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, В.А. Коршунов // Упрочняющие технологии и покрытия, 2009. – № 3. – С. 29 – 33.
14. Ковальногов, В.Н. Эффективность алмазного выглаживания с малым силовым воздействием на обрабатываемую поверхность // СТИН, 2009. – № 4. – С. 36 – 39.
15. Пат. 2146601 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> В 24 В 55/02. Устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости / Е.С. Киселев, А.Н. Унянин, Д.Г. Нечаев, В.Н. Ковальногов. – № 98117012/02; заявл. 11.09.1998; опубл. 20.03.2000, бюл. № 8.
16. Пат. 2151044 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> В 24 В 55/02. Способ подачи смазочно-охлаждающей жидкости / Е.С. Киселев, А.Н. Унянин, В.И. Деревянко, В.Н. Ковальногов, А.В. Семенов. – № 98103610/02; заявл. 27.02.1998; опубл. 20.06.2000, бюл. № 17.
17. Пат. 2152297 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> В 24 В 55/02. Способ подачи смазочно-охлаждающей жидкости / Е.С. Киселев, А.Н. Унянин, В.И. Деревянко, В.Н. Ковальногов, А.В. Семенов. – № 98116975/02; заявл. 11.09.1998; опубл. 10.07.2000, бюл. № 19.
18. Пат. 2157311 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> В 24 В 55/02. Устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости / Е.С. Киселев, А.Н. Унянин, В.Н. Ковальногов, Д.Г. Нечаев. – № 99112374/02; заявл. 11.06.1999; опубл. 10.10.2000, бюл. № 28.
19. Пат. 2164855 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> В 24 В 53/08. Устройство для непрерывной правки шлифовального круга / Е.С. Киселев, А.Н. Унянин, А.Н. Тулисов, С.Е. Королев, В.Н. Ковальногов. – № 99124134/02; заявл. 16.11.1999; опубл. 10.04.2001, бюл. № 10.
20. Пат. 2276004 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> В 24 В 1/04. Способ шлифования / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, М.А. Чудинов. – № 2004129025/02; заявл. 01.10.2004; опубл. 10.05.2006, бюл. № 13.
21. Пат. 2279963 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> В 24 Q 11/10. Устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости при обработке отверстий малого диаметра / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, М.В. Табеев. – № 2005103997/02; заявл. 15.02.2005; опубл. 20.07.2006, бюл. № 20.
22. Пат. 2284878 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> В 24 Q 11/10. Устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости при обработке отверстий малого диаметра / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, М.В. Табеев. – № 2005103998/02; заявл. 15.02.2005; опубл. 10.10.2006, бюл. № 28.
23. Пат. 2329131 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> В 24 В 35/00. Способ создания регулярного микрорельефа на цилиндрических заготовках / Е.С. Киселев, З.В. Степчева, В.Н. Ковальногов. – № 2006128858/02; заявл. 08.08.2006; опубл. 20.07.2008, бюл. № 20.

*Публикации в других изданиях*

24. Киселев, Е.С. Аналитическое исследование тепловых взаимодействий контактирующих объектов при шлифовании заготовок деталей машин / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов // Вестник инженерной академии Украины: международный сборник научных трудов. – Киев, 2001. – № 3. – С. 407 – 410.

25. Kovalnogov, N.N. The methods and the software of modeling of non-stationary spatial temperature fields in the system of rotated bodies at their mechanical interaction / N.N. Kovalnogov, V.N. Kovalnogov // Proc. of the 19-th International Congress on FEM Technology. – Berlin, 2001. – Vol. 2. Russian Science & Technology. – 7 p.
26. Киселев, Е.С. Модель теплосилового взаимодействия заготовки и инструмента при глубоком сверлении с применением СОЖ и наложением ультразвука / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, М.В. Табеев // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сборник научных трудов. – Донецк: ДНТУ, 2003. – Вып. № 25. – С. 172 – 177.
27. Киселев, Е.С. Математическая модель теплосилового взаимодействия заготовки и инструмента при резьбонарезании в маломерных отверстиях / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, В.В. Горностаев // Современные проблемы машиностроения и транспорта: материалы всероссийской научно-технической конференции. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – С. 153 – 156.
28. Киселев, Е.С. Моделирование и численное исследование теплосилового взаимодействия заготовки и инструмента при глубоком сверлении с применением смазочно-охлаждающей жидкости и наложением ультразвука / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, М.В. Табеев // Труды V Минского международного форума по теплообмену. – Минск: Изд-во АНК «ИТМО им. А.В. Лыкова» НАНБ, 2004. – Т. 2. – С. 376 – 378.
29. Киселев, Е.С. К вопросу о формировании остаточных напряжений в поверхностных слоях шлифованных заготовок / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, А.А. Яшин // Процессы абразивной обработки. Абразивные инструменты и материалы «Шлифабразив-2004»: сборник трудов международной научно-технической конференции. – Волжский: ВИСИ, 2004. – С. 118 – 122.
30. Киселев, Е.С. Использование ультразвука для усиления проникающей способности СОЖ при глубоком сверлении маломерных отверстий / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, М.В. Табеев // Вестник УлГТУ, 2004. – № 2. – С. 33 – 36.
31. Киселев, Е.С. Новые методы ультразвуковой стабилизации остаточных напряжений в прецизионных шлифованных деталях технологических машин / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, А.А. Норкин // Динамика технологических машин: сб. трудов VII международной научно-технической конференции. – Саратов: СГТУ, 2004. – С. 192 – 196.
32. Киселев, Е.С. Теплофизический анализ операций механической обработки, выполняемых в условиях стесненного теплопереноса / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XI международной научно-технической конференции. – Донецк: ДНТУ, 2004. – Т. 2. – С. 72 – 76.
33. Киселев, Е.С. Повышение эффективности операций отделочной технологии механической обработки валков прокатных станков на основе использования энергии ультразвукового поля / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XI международной научно-технической конференции. – Донецк: ДНТУ, 2004. – Т. 2. – С. 68 – 72.
34. Киселев, Е.С. Теплофизический анализ технологических процессов механической обработки как основа обеспечения производительности и качества выпускаемой продукции / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении: труды всероссийской научно-технической конференции. – Тольятти: ТГУ, 2005. – С. 108 – 110.
35. Киселев, Е.С. Научные основы и технология шлифования заготовок: сборник учебно-исследовательских лабораторных работ / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 52 с.
36. Киселев, Е.С. Особенности моделирования состояния поверхностного слоя заготовки, формируемого при механической обработке в условиях интенсивного теплопереноса / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XIII международной научно-технической конференции. – Донецк: ДНТУ, 2006. – Т. 2. – С. 139 – 145.
37. Киселев, Е.С. Реализация потенциала функциональных действий СОЖ при механической обработке на основе рационального применения ультразвука / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов // Вестник двигателестроения. – Запорожье: Мотор Сич, 2007. – № 2. – С. 112 – 117.
38. Ковальногов, В.Н. Эффективность комбинированной обработки прецизионных валов точением и алмазным выглаживанием // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сборник научных трудов. – Донецк: ДНТУ, 2007. – Вып. 34. – С. 109 – 114.
39. Ковальногов, В.Н. Снижение силовой напряженности алмазного выглаживания за счет совмещения с обработкой резанием / В.Н. Ковальногов, Д.Н. Малышев, З.В. Степчева // В сб.: Ма-

териаловедение и технология конструкционных материалов – важнейшие составляющие компетенции современного инженера. Проблемы качества технологической подготовки. – Волжский: ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ, 2007. – С. 224 – 227.

40. Киселев, Е.С. Технологическое наследование остаточных напряжений в процессе обработки вала с применением ультразвука / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, В.А. Коршунов // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики: материалы международной научно-технической конференции. – Казань: КГТУ, 2007. – С. 93 – 97.

41. Ковальногов, В.Н. Исследование термических деформаций при сверлении группы высокоточных отверстий / В.Н. Ковальногов, Ю.А. Полуэктов // Вестник УлГТУ, 2007. – № 4. – С. 45 – 48.

42. Киселев, Е.С. Использование теплофизического анализа для оценки возможностей форсирования производительности глубокого сверления маломерных отверстий / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении: труды II международной научно-технической конференции. – Ч. 1. – Тольятти: ТГУ, 2008. – С. 293 – 297.

43. Киселев, Е.С. Научные основы и технология применения смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке: сборник учебно-исследовательских лабораторных работ / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 57 с.

44. Ковальногов, В.Н. Теплофизический анализ технологических операций механической обработки как основа реализации концепции «СОТС разового действия» // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении: труды II международной научно-технической конференции. – Ч. 1. – Тольятти: ТГУ, 2008. – С. 297 – 304.

45. Киселев, Е.С. Ультразвуковое снятие технологических остаточных напряжений / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов // Техномир, 2008. – № 2 (38). – С. 44 – 45.

46. Ковальногов, В.Н. Новые ультразвуковые технологии для снятия технологических остаточных напряжений в поверхностных слоях шлифованных деталей // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: материалы международной научно-технической конференции. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2008. – С. 113 – 118.

47. Киселев, Е.С. К вопросу назначения технологических условий механической обработки заготовок с наплавленными поверхностными слоями или металлопокрытиями / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, В.А. Коршунов // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: материалы международной научно-технической конференции. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2008. – С. 145 – 150.

48. Киселев, Е.С. Ресурсосберегающее технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей транспорта при высокопроизводительной механической обработке / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, Е.И. Лобская // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XV международной научно-технической конференции. – Донецк: ДНТУ, 2008. – Т. 2. – С. 86 – 89.

49. Ковальногов, В.Н. К вопросу определения достаточного расхода смазочно-охлаждающей жидкости через зону механической обработки // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XV международной научно-технической конференции. – Донецк: ДНТУ, 2008. – Т. 2. – С. 96 – 101.

**КОВАЛЬНОГОВ В.Н.**

**МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕПЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ОБЪЕКТОВ, КОНТАКТИРУЮЩИХ  
ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

Подписано в печать 19.05.2009. Формат 60x84/16.

Бумага писчая. Усл. п. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ №

Типография УлГТУ. 432027, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.