

На правах рукописи

ЗУБКОВ Николай Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ДЕФОРМИРУЮЩЕГО
РЕЗАНИЯ КАК СПОСОБА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РАЗВИТЫХ
МАКРОРЕЛЬЕФОВ**

Специальность: 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

М.И.У.

Москва – 2001

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э Баумана

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор Гречишников В.А.

Доктор технических наук, профессор Барзов А.А.

Лауреат государственной премии РФ, доктор технических наук Люшинский А.В.

Ведущее предприятие: ФНПЦ ММПП "Салют"

Защита состоится "16" декабря 2001 г. в 14³⁰ час.
на заседании диссертационного совета Д212.141.06 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
107005 Москва 2-я Бауманская ул. д.5.

Для, заверенный печатью, просим
председателя диссертационного совета.

_____ в библиотеке Московского
университета им. Н.Э. Баумана.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1575839

Зубков Н.Н. Разработка и

01 г.

 А.С. Васильев

_____ п.л. Тир.100 экз.
МГТУ им.Н.Э. Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

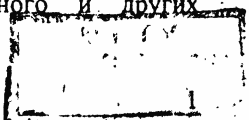
Актуальность темы. В современном машиностроении существует большая номенклатура изделий, работоспособность и эффективность которых определяется макрорельефом и свойствами поверхностей основных деталей. Например, для деталей теплообменного назначения поверхность выполняет рабочую функцию по передаче, трансформации тепловых потоков или изменения фазового состояния вещества. Интенсификация теплообмена достигается путем развития, иначе, увеличения площади поверхности путем создания макрорельефа с оптимальными геометрическими параметрами на поверхностях деталей, контактирующих с теплоносителями. В большинстве случаев для изготовления теплообменников используются трубы из цветных металлов и сплавов. Только для изготовления холодильных и кондиционирующих установок используется около 6% мирового потребления меди и ее сплавов, что составляет около 500 тысяч тонн в год. Интенсификация теплообмена означает сокращение материалоемкости теплообменных аппаратов. Технологические ограничения существующих методов получения развитых поверхностей являются препятствием на пути совершенствования существующих и создания новых конструкций теплообменных устройств различного назначения.

Развитые поверхности используются также для интенсификации химических и электрохимических процессов, для массопереноса за счет капиллярных сил, поглощения механической энергии и электромагнитного излучения. Создание макрорельефа на поверхностях деталей широко используется как средство подготовки поверхности под нанесение покрытий и под последующие технологические операции.

Учитывая вышесказанное, проблема разработки новых высокопроизводительных методов получения высокоэффективного развитого макрорельефа теплообменного и других назначений является актуальной научно-технической задачей.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана автором предложен новый метод лезвийной механической обработки, запатентованный в России и за рубежом, сочетающий процесс частичного срезания припуска и целенаправленного пластического деформирования подрезанного поверхностного слоя, который получил название "деформирующее резание" (ДР). Образующаяся при ДР стружка не отделяется полностью от заготовки, сохраняя с ней связь по своей узкой стороне. Совокупность подрезанных поверхностных слоев, которые сохранили сплошность своего соединения с заготовкой, образует на обработанной поверхности детали развитый макрорельеф.

Цель и задачи работы: Целью работы является разработка теоретических и практических основ нового безотходного метода механической обработки – деформирующего резания, как способа получения на поверхностях деталей высокоэффективного макрорельефа теплообменного и других назначений.



Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи:

1. Обосновать возможность лезвийной обработки при частичном отделении припуска. Установить основные взаимосвязи и общие закономерности процесса деформирующего резания.

2. Создать базу исходных математических зависимостей и разработать методику управления параметрами процесса ДР для получения макрорельефа на поверхности с заданными геометрическими характеристиками.

3. Установить и исследовать взаимосвязь геометрических параметров получаемого макрорельефа с эксплуатационными характеристиками изделий, обработанных методом ДР.

4. Научно обосновать технические решения реализации метода ДР для создания упрочняющих покрытий на деталях трения.

5. Обосновать области рационального использования метода ДР в машиностроении и разработать рекомендации по его практическому применению.

6. Разработать технические требования и варианты схемных решений, необходимые для проектирования высокопроизводительного промышленного оборудования, реализующего оребрение теплообменных труб методом ДР.

7. Реализовать основные результаты работы путем промышленного внедрения технологии ДР, оборудования, реализующего этот метод, и изделий, полученных на его основе.

Методы исследований. Решение поставленных задач осуществлялось проведением теоретических и экспериментальных исследований, разработкой технологических решений и практическим применением полученных результатов. Теоретико-экспериментальные исследования заключались в выявлении совокупного влияния технологических факторов обработки и геометрических параметров инструмента на показатели процесса ДР и качество получаемого макрорельефа. Использованы основные положения теории резания металлов, научных основ технологии машиностроения, механики деформируемого твердого тела, методы математического моделирования, элементы теории тепломассообмена.

Экспериментальные исследования проводились на разработанных лабораторных установках и в реальных производственных условиях с использованием современных приборов, методов и средств измерения. Эксплуатационные характеристики деталей, обработанных с использованием метода ДР, исследовались по методикам и на испытательном оборудовании ИМАШ РАН, ВНИИ "Холодмаш", НПО "Криогенмаш", НПО "НИИТАВТОПРОМ", МЭИ, АНПО "Одессхолд" и других организаций.

Достоверность теоретических выводов и экспериментальных исследований подтверждена производственным внедрением разработанной технологии при получении макрорельефов различного назначения.

Научная новизна.

Научная новизна работы заключается в решении проблемы получения на поверхностях деталей развитых макрорельефов на основе раскрытия основных закономерностей процесса ДР с целью нахождения способов управления этим процессом и заданным качеством обработки, а также в научном обосновании технических решений использования метода ДР с целью повышения эксплуатационных и технологических свойств обработанных по этому методу деталей. В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана кинематическая модель, дано аналитическое описание основных функциональных взаимосвязей процесса ДР, установлены закономерности контактных явлений, на основе которых разработаны методики управления процессом ДР и геометрическими параметрами получаемого макрорельефа.

2. Разработаны кинематические схемы реализации метода ДР, технические требования и конструктивные решения высокопроизводительного промышленного оборудования для формирования оребрения на трубах теплообменных аппаратов. Выполнен анализ точности получаемого оребрения в зависимости от кинематики резания, усадки подрезанного слоя, погрешностей позиционирования инструмента и погрешностей заготовки.

3. Разработан новый метод модификации поверхностей деталей машин – механо-химико-термическая обработка, который основан на диффузионном легировании развитых поверхностных структур, полученных методом ДР на основе которого разработан новый тип композиционных износостойких покрытий с вертикальным расположением упрочняющих и/или смазывающих слоев в пластичной матрице.

4. На основе ДР разработаны новые методы восстановления исходных размеров изношенных деталей машин, формообразования резбовых профилей, изготовления капиллярно-пористых структур, получения сеток из металлических листов и фильтров из полимерных труб, подготовки поверхностей деталей под последующие технологические операции, такие как склеивание, нанесение покрытий, диффузионная сварка и др.

Практическая значимость работы.

1. Созданы технологические основы метода деформирующего резания, позволяющего получать макрорельеф в виде ребер, шипов, ячеек, выступов треугольного профиля с управляемыми геометрическими параметрами с возможностью увеличения площади поверхности детали после обработки до 14 раз. Метод ДР безотходен, высокопроизводителен, обладает широкими технологическими возможностями, может быть реализован на унифицированном металлорежущем оборудовании, обладает высокой конкурентной способностью.

2. Установлены особенности реализации метода ДР, рациональная геометрия инструмента, режимы обработки, состав технологической оснастки, которые явились основой разработанных технологических рекомендаций по

практическому использованию метода ДР при получении развитых макрорельефов на деталях из различных материалов.

3. Разработан высокопроизводительный технологический метод оребрения труб для конденсаторов и испарителей промышленных холодильных и кондиционирующих установок. Коэффициент теплоотдачи у труб с поверхностью, полученной методом ДР на 35...50% выше, чем у труб с оребрением, полученным традиционными способами.

4. Разработаны технические требования и схемные решения для проектирования высокопроизводительного оборудования, формирующего оребрение на трубах теплообменных аппаратов методом ДР. Созданы и внедрены специализированные установки для формирования на трубах наружного оребрения с производительностью 4,0 погонных метров оребренной трубы в минуту (при шаге оребрения 0,8 мм). Разработаны и апробированы принципы автоматизации установок для оребрения таких труб.

5. Разработана технология получения композиционных износостойких покрытий толщиной до 1,5 мм с управляемой структурой и свойствами. Для деталей трения достигнуто повышение износостойкости в 1,5...3,0 раза при уменьшении склонности к образованию задиров в 2,2...3,2 раза по сравнению с традиционными покрытиями.

6. Промышленное внедрение метода ДР доказало его практическую ценность при замене существующих технологических процессов получения развитых поверхностей при производстве изделий теплообменного назначения, а также как средства подготовки поверхности деталей под последующие технологические операции. Так, при оребрении труб теплообменных аппаратов технология ДР повышает производительность в 1,3...1,5 раза, в несколько раз снижает энергоемкость процесса, устраняет необходимость использования СОТС, позволяет использовать трубные заготовки с меньшей толщиной стенки по сравнению с существующей технологией оребрения труб накаткой роликами.

7. Использование изделий с обработанной по методу ДР поверхностью позволило существенно повысить эксплуатационные показатели холодильных установок, водо-масляных теплообменников, плазменных горелок, охлаждаемых зеркал лазеров, ортодонтических устройств, диффузионно-сварных элементов конструкций, а также предложить новые конструкторские и технологические решения при проектировании и освоении изделий новой техники.

Реализация работы. Технология деформирующего резания внедрена в НПО "Композит" (г. Королев) для изготовления систем охлаждения зеркал мощных лазеров, ПТО АвтоВАЗ (г. Тольятти) для оребрения труб масляно-водяных теплообменников, заводе "Химмаш" (г. Снежное, Украина) для оребрения труб промышленных холодильных установок, ММПО "Знамя Революции" (г. Москва), МГП "Пумпа" (г. Москва) для подготовки

поверхностей деталей под склеивание, КБ "Салют" (г. Москва) для подготовки поверхностей деталей под диффузионную сварку.

Винтовые теплообменники из оребренных по методу ДР труб внедрены на АЗЛК (г.Москва), СП "ИМТ-Сервис" (г.Москва). Оребренные методом ДР трубы использованы при изготовлении линий по разливу охлажденных напитков в АО "Орелпродмаш" (г.Орел). В конструкции плазменных установок, выпускаемых в АО "Алплаз" (г.Москва) используются пароперегреватели с макрорельефом в виде шипов, полученных ДР. В АО Мосэнергоремонт и ряде московских ТЭЦ методом ДР восстановлен ряд крупногабаритных деталей теплоэнергетического оборудования.

Опытно-промышленные установки для оребрения труб теплообменных аппаратов с производительностью 4 погонных метра оребренной трубы в минуту внедрены на заводе "Химмаш" (г. Снежное, Украина).

Достоверность подтверждена актами внедрения результатов работы.

Апробация работы. Основные положения работы были доложены и получили одобрение на: Всесоюзном научно-техническом семинаре "Проектирование и производство систем", Москва, 1987 г., Международном форуме "Тепломассообмен", Минск, 1988 г., Всесоюзной научно-технической конференции "Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических методов обработки", Москва, 1988 г., First World Conference "Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics", Dubrovnik (Yugoslavia), 1988 г., научно-техническом семинаре "Новая технология, оборудование, оснастка, инструмент для механической обработки и сборки", Москва, 1989 г., Всесоюзной научно-технической конференции "Восстановительная обработка металлов и сплавов", Москва, 1991 г., Seminar-exhibition "Advanced Russian Technologies", Pretoria (South Africa), 1994 г., Научно-технической конференции, посвященной 165-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 1995 г., Seminar "Russian Technology", Jochor (Malaysia), 1995 г., научно-практической конференции ассоциации метрополитенов, Москва, 1997 г., научном семинаре "Теплообмен на оребренных поверхностях", Москва, 1997 г., Всероссийской научно-технической конференции "Машиностроительные технологии", Москва, 1998 г., научно-техническом семинаре в рамках международной выставки "Intertool", в 1998 и 1999 г., научно-техническом семинаре в рамках 4-й специализированной международной выставки-ярмарки "Инструмент-99", Москва, 1999 г., научно-практической конференции "Энерго-и ресурсосберегающие технологии в городском хозяйстве", Москва, 1999 г. XIV научной конференции, посвященной 300-летию инженерного образования в России, Юрга, 2001 г. Технология деформирующего резания демонстрировалась на 12 международных выставках, удостоена диплома и золотой медали выставки изобретений в Брюсселе (1996 г.), диплома и золотой медали салона изобретений в Женеве (1998 г.). Композиционные износостойкие покрытия, полученные на основе метода ДР, включены в ежегодный отчет РАН за 1994 г. "Важнейшие результаты в области естественных, технических гуманитарных и общественных наук".

Публикации: По теме работы самостоятельно и в соавторстве опубликовано 44 основные работы, получено 11 авторских свидетельств, 3 патента РФ, патент США, положительное решение на Европатент и патент Украины.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, девяти глав, основных выводов, списка использованной литературы из 186 наименований и приложений. Работа содержит 478 страниц, в том числе 276 основного текста, 179 рисунков, 30 таблиц, а также приложений на 64 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан анализ использования развитых макрорельефов в технике и методов их получения. Развитые поверхности широко применяются в различных областях техники. Основная область их использования это интенсификация тепло-массообмена и как средство подготовки поверхностей деталей под последующие технологические операции. Проблема управления макрогеометрией развитой поверхности наиболее актуальна для поверхностей теплообмена, которые требуют получения оптимальных геометрических параметров развитой структуры для каждого конкретного случая их использования в теплообменной аппаратуре.

Показано, что в настоящее время при изготовлении испарителей и конденсаторов промышленных холодильных установок практически единственным производительным способом развития площади поверхности теплообменных труб является получение оребрения путем его накатки блоками роликов из набора профильных дисков. Технологические ограничения, присущие данному методу не позволяют получать на поверхности трубы оптимальные геометрические параметры оребренной поверхности. Максимальная высота ребер при оребрении медных труб составляет не более 1,5 от величины шага при увеличении площади поверхности после обработки не более чем в 4,7 раза, в то время как для холодильных и кондиционирующих установок необходимо оребрение с шагом 0,3...0,8 мм и степенью развития поверхности в 5...10 раз. Накатывание ребер на трубах из медно-никелевых сплавов, титана и сталей неосуществимо без использования внутренних оправок. Учитывая, что в теплообменных аппаратах используются длинномерные трубы (4...6 метров), использование внутренних оправок значительно удорожает операцию оребрения. Накатывание ребер роликами проводится при использовании смазочно-охлаждающих жидкостей, что требует обязательной очистки оребренных труб с использованием экологически небезопасных растворов, с последующей промывкой труб и их сушкой.

Для поверхностей, предназначенных под последующее нанесение покрытий, основными тенденциями увеличения прочности сцепления покрытия с основой являются подготовка поверхности с формированием рельефа, реализующим анкерный эффект, или рельефа, максимально увеличивающего площадь поверхности детали перед нанесением покрытия. Эти методы постоянно совершенствуются как по пути максимального

увеличения прочности сцепления покрытия с основой, так и снижения стоимости операции подготовки поверхности.

Первое упоминание о способе, основанном на подрезании и отгибке поверхностных слоев металла, относится к 1899 году. В. Маджерт (W. Majert) запатентовал инструмент, реализующий этот способ для увеличения площади поверхности свинцовых аккумуляторных пластин. В промышленности метод начал применяться только с семидесятых годов XX века при изготовлении трубчатых и плоских теплообменных элементов из алюминия на таких фирмах, как "Mitsubishi", "Shova Aluminum", "Hitachi" (Япония), "Union Carbide" (США) и др. В настоящее время в литературе этот метод освещен очень слабо, поэтому для детального ознакомления с состоянием в этой области проведен патентный поиск в отношении основных промышленно-развитых стран.

В России и в странах бывшего СССР по этому направлению защищено три кандидатские диссертации, две из которых выполнены под научным руководством автора в МГТУ им. Н.Э. Баумана и одна под руководством профессора Ящерицына П.И. в Белорусском политехническом институте применительно только к обработке алюминия.

Анализ выявленных патентных документов и литературных источников позволил установить, что метод оребрения поверхностей путем подрезания и отгибки слоев металла ограниченно используется для получения теплообменных поверхностей. Большинство выявленных аналогов метода ДР основываются на использовании инструментов с криволинейной режущей кромкой, фасонными рабочими поверхностями и малыми углами заострения режущего клина, что обеспечивает необходимую прочность режущего клина только при обработке алюминия и меди. Существенным недостатком инструмента с фасонными поверхностями и криволинейными режущими кромками является сложность его изготовления, контроля и переточки. Практически во всех выявленных патентах отсутствуют сведения о геометрических параметрах рабочей части инструментов или принципах их назначения, а также используемых режимах обработки. Большинство методов могут быть реализованы только при наличии на заготовках продольных пазов, что значительно снижает общую технологичность рассмотренных методов. Каждый из известных способов и инструментов предназначены для получения узкого диапазона типоразмеров оребрения.

Проведенный анализ выявил, что технологический метод, основанный на подрезании и отгибке поверхностных слоев материала, несмотря на отмеченные недостатки, обладает рядом достоинств перед другими методами получения развитого макрорельефа, поскольку объединяет преимущества процессов резания и пластического деформирования.

Во второй главе установлены и обоснованы основные функциональные зависимости между технологическими параметрами процесса ДР и характеристиками получаемого макрорельефа.

Обработка резанием основана на разрушении поверхностного слоя заготовки и удалении припуска в виде стружки. При лезвийной обработке это

разрушение осуществляется как главной, так и вспомогательной режущими кромками.

Основное внимание при изучении процесса резания традиционно уделялось работе главной режущей кромки, поскольку именно она выполняет основную работу по разрушению припуска. Работа вспомогательной кромки рассматривалась как дополнительная, в основном влияющая на шероховатость обработанной поверхности.

В конце 60-х годов в Брянском институте транспортного машиностроения Э.Е. Киппером зафиксирован эффект образования поперечных неровностей при точении коррозионностойких сталей. Высота неровностей после обработки в 3...4 раза превосходила высоту, рассчитываемую по известным углам инструмента в плане и величине подачи. Авторы не увидели практического применения обнаруженного эффекта, уделив основное внимание борьбе с ним, а не его интенсификации.

По мнению немецкого исследователя W. Degner процесс резания происходит не может при передних углах на режущей кромке меньше $\gamma = -(60...70^\circ)$. Это означает, что если при сохранении режущей способности главной кромки инструмента, обеспечить резко отрицательные передние углы на вспомогательной кромке, то стружка от заготовки не будет отделяться полностью. Взаимосвязь переднего угла на главной и вспомогательной кромках режущего клина описывается выражением

$$\text{tg} \gamma_1 = \text{tg} \gamma \cdot \cos(\varphi + \varphi_1) - \text{tg} \lambda \cdot \sin(\varphi + \varphi_1). \quad (1)$$

Из выражения видно, что для достижения максимально отрицательного переднего угла γ_1 на вспомогательной кромке, необходимо назначать большой положительный передний угол γ на главной режущей кромке, иметь угол заострения инструмента в плане меньше 90° (в этом случае первое слагаемое становится всегда отрицательным), и максимально увеличивать угол наклона главной режущей кромки λ в сторону положительных значений. Внешний вид и схема работы такого инструмента представлены на рис. 1. Совокупность неотделившихся от заготовки подрезанных главной режущей кромкой слоев образует макрорельеф в виде ребер. Характерный профиль оребрения, получаемого методом ДР показан на поперечном срезе (рис.2).

Неспособность вспомогательной рабочей кромки осуществлять работу по разрушению припуска принципиально изменяет процесс формообразования при работе таким инструментом. Несомненно, что деформации металла ярко выражены и в процессе обычного резания, однако при ДР они являются следствием процесса разрушения. Термин "деформирующее резание" отражает те два процесса, которые являются необходимыми для его осуществления: процесс резания главной режущей кромкой и процесс целенаправленной деформации подрезанного слоя передней поверхностью и вспомогательной (деформирующей) кромкой инструмента. Для ДР именно совокупность неотделившихся от заготовки подрезанных слоев (стружки) определяет эксплуатационные характеристики обработанной детали.

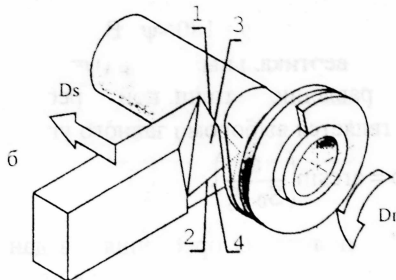
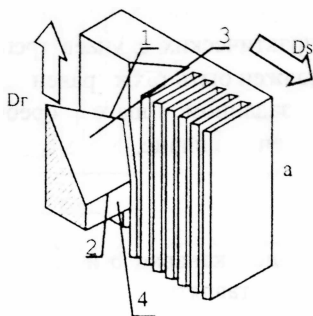


Рис.1. Общий вид обработки по методу деформирующего резания. а-по схеме строгания, б-по схеме точения. 1-главная режущая кромка, 2-вспомогательная (деформирующая) кромка, 3-передняя поверхность, 4-вспомогательная задняя поверхность.

При получении оребренных структур различного назначения требуемыми параметрами являются: p -шаг оребренной структуры, ψ -наклон ребер к основанию, h -высота ребер, a -толщина ребра, b -ширина межреберного зазора, K_{op} -степень развития (увеличения площади) поверхности после обработки.

В силу наличия пластических деформаций толщина (a) и высота (h) ребра не будет полностью соответствовать толщине (a_1) и ширине (b_1) подрезаемого слоя. Введем коэффициент утолщения ребра $\xi_a = a/a_1$, и коэффициент уменьшения высоты ребра $\xi_b = b_1 \cdot \sin \varphi_1 / h$ по сравнению с шириной подрезаемого слоя. Для ДР укорочение подрезанного слоя происходить не может, поскольку подрезанный слой по своей узкой стороне имеет механическую связь с поверхностью детали, т.е. подрезанный слой (ребро) имеет длину, равную пути резания. Это означает, что неизбежное для процесса резания утолщение подрезанного слоя будет компенсироваться только уменьшением его ширины, т.е. $\xi_b = \xi_a = \xi$, где ξ -коэффициент искажения профиля получаемого оребрения.

Требуемый шаг оребренной структуры обеспечивается соответствующим назначением величины подачи инструмента на один оборот детали $S_0 = p$ (для токарной обработки), двойной ход строгального станка $S_{дв.ход} = p$ или подаче на зуб $S_z = p$ (для обработки по схеме фрезерования).

Угол наклона ребер к основанию ψ определяется проекцией вспомогательной рабочей кромки на основную плоскость. При этом возможны два варианта формообразования ребра, когда оно не доходит до вертикального положения или переходит его. Таким образом, для получения заданного наклона ребра ψ вспомогательный угол инструмента в плане должен быть

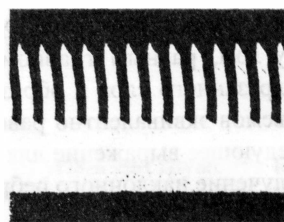


Рис.2. Характерный профиль оребрения, получаемого ДР. Мельхиор МН19. Шаг оребрения 0,25 мм, высота ребер 1,0 мм.

равен $\varphi_1 = \psi$, либо $\varphi_1 = 180^\circ - \psi$. В большинстве практических случаев требуется получение вертикальных ребер ($\psi = 90^\circ$), т.е. φ_1 должен быть также равен 90° .

Управление толщиной ребра при заданном шаге оребрения осуществляется выбором главного угла φ инструмента в плане.

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{a}{S_0 \cdot \xi}\right). \quad (2)$$

Для получения оребрения с заданной шириной канавки b и с заданным шагом главный угол инструмента в плане должен составлять:

$$\varphi = \arcsin\left[\frac{1}{\xi} \cdot \left(\sin \varphi_1 - \frac{b}{S_0}\right)\right]. \quad (3)$$

Высота получаемого оребрения может быть рассчитана, исходя из равенства объемов ребра и подрезанного слоя. В качестве допущения, принималось, что образующееся ребро имеет треугольное заострение вершины с углом, равным главному углу инструмента в плане φ . Поскольку длина подрезанного слоя и образованного ребра одинакова, то условие равенства их объемов эквивалентно равенству площадей их поперечного сечения. Получено следующее выражение для назначения глубины резания t , которая обеспечивает получение наклонного ребра заданной высоты h .

$$t = \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_1} \cdot \left\{ h \cdot \xi + \frac{S_0}{2} \cdot \left[\frac{(\sin \varphi_1 - \xi \cdot \sin \varphi)^2}{\sin \beta} - \xi^2 \cdot \sin \beta \right] \right\}, \quad (4)$$

где β - угол заострения инструмента в плане, равный $\beta = 180 - (\varphi + \varphi_1)$.

При ДР диаметр заготовки по вершинам ребер увеличивается. Это увеличение ΔD равно:

$$\Delta D = \frac{2t \cdot (\sin \varphi_1 - \xi \cdot \sin \varphi)}{\xi \cdot \sin \varphi} - \frac{S_0 \cdot [(\sin \varphi_1 - \xi \cdot \sin \varphi)^2 - \xi^2 \cdot \sin^2 \beta]}{\xi \cdot \sin \beta}. \quad (5)$$

Учитывая, что подрезанный слой полностью остается на заготовке и только главная режущая кромка образует новые поверхности, предложено выражение для вычисления увеличения площади поверхности детали после ДР.

$$K_{\text{оп}} = 1 + \frac{2t}{S_0 \cdot \sin \varphi}. \quad (6)$$

Иллюстрация влияния главного φ и вспомогательного φ_1 углов в плане инструмента на геометрические параметры оребрения, получаемого ДР, показана на рис.3. Величина подачи и глубина резания для всех вариантов, представленных на этом рисунке, одинаковы. Важным фактором является соотношение главного и вспомогательного углов в плане инструмента, определяющим возможность получения канавок чрезвычайно малой ширины. Поскольку ширина межреберного зазора составляет $b = S_0 \cdot (\sin \varphi_1 - \xi \cdot \sin \varphi)$, то это означает, что при равенстве главного φ и вспомогательного φ_1 углов инструмента в плане возможно получение теоретически нулевого зазора между

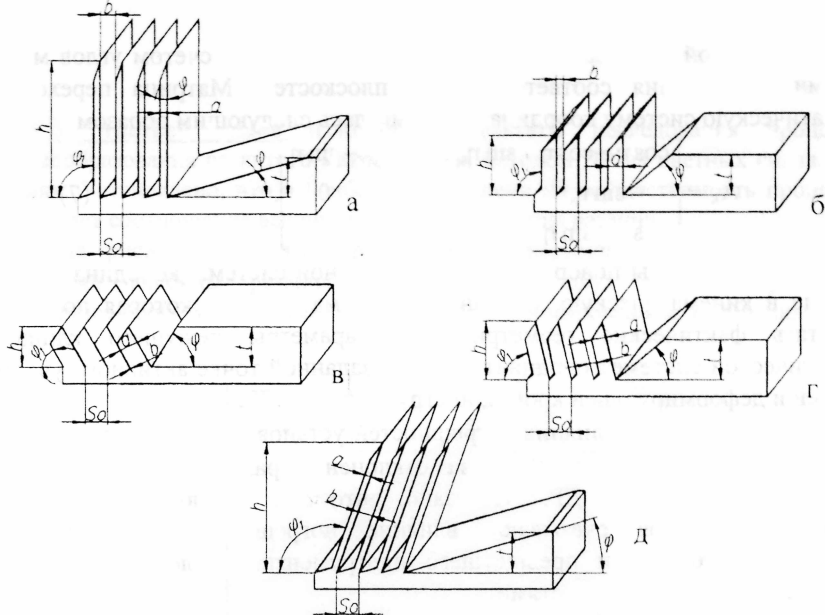


Рис.3. Влияние главного φ и вспомогательного φ_1 углов инструмента в плане на геометрические параметры оребренной поверхности. а,б-ребра, перпендикулярные основанию ($\varphi_1=90^\circ$), в,г,д-наклонные ребра.

ребрами. Межреберные зазоры в данном случае являются лишь границами раздела сплошности поверхностного слоя обработанной заготовки. Таким образом, для метода ДР принципиальных ограничений на минимально получаемую ширину канавок на существует. Практическое применение развитого рельефа с нулевой шириной межреберного зазора рассматривается ниже применительно к созданию композиционных поверхностных структур.

Установленные взаимосвязи позволяют выбрать геометрические параметры инструмента и режимы обработки, обеспечивающие получение всех требуемых геометрических параметров макрорельефа в виде оребрения.

Инструмент для ДР имеет большие углы наклона режущей λ и деформирующей λ_1 кромок, поэтому при обработке цилиндрических поверхностей каждая точка активного участка как режущей, так и деформирующей кромок инструмента будет иметь собственные значения кинематических углов. Для ДР изменение главного φ и вспомогательного φ_1 углов в плане влияет на геометрические параметры получаемых ребер. Это потребовало расчета кинематических углов инструмента для ДР. Данный расчет также необходим для определения допустимых глубин резания при данном радиусе обработки, обеспечивающих положительный главный задний угол инструмента α . Значения кинематических углов в любой точке активного участка кромок инструмента для ДР определено через аналитические выражения положения рабочих поверхностей инструмента в инструментальной

и кинематической системы координат с последующим расчетом углов между линиями пересечения соответствующих плоскостей. Матрица перехода в кинематическую систему координат записывалась следующим образом:

$$A_k = \begin{bmatrix} \cos \eta_s \cdot \cos \eta & \sin \eta_s \cdot \cos \eta & -\sin \eta \\ -\sin \eta_s & \cos \eta_s & 0 \\ \cos \eta_s \cdot \sin \eta & 0 & \cos \eta \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где η и η_s - углы поворота инструментальной системы координат при ее переходе в кинематическую. Создана программа расчета, которая позволяет рассчитать фактические геометрические параметры режущего клина в кинематической системе координат в любой заданной точке активного участка режущей и деформирующей кромок инструмента для ДР.

Выполнен анализ влияния погрешностей установки резцов в осевом (Δx) и радиальном (Δt) направлениях на отклонение размеров оребрения при многоинструментальном ДР. Показано, что на отклонение размеров формируемого ребра оказывают влияние погрешности установки как рассматриваемого, так и предыдущего инструмента. Отклонение размеров ребра определяется зависимостями:

$$\Delta a_i = \cos \varphi (\Delta t_i - \Delta t_{i-1}) + \sin \varphi (\Delta x_i - \Delta x_{i-1}), \quad (8)$$

$$\Delta b_i = \cos \varphi (\Delta t_{i-1} - \Delta t_i) + (1 - \sin \varphi) \cdot (\Delta x_{i-1} + \Delta x_i), \quad (9)$$

$$\Delta h_i = \left(\frac{3}{2 \sin \varphi} - \frac{\sin \varphi}{2} \right) \cdot (\Delta t_i - \Delta t_{i-1}) + \frac{\cos \varphi}{2} \cdot (\Delta x_i - \Delta x_{i-1}), \quad (10)$$

где Δa , Δb , Δh - погрешности толщины ребра, ширины канавки и высоты ребра, индекс i присвоен погрешностям формируемого ребра и погрешностям установки рассматриваемого инструмента, а индекс $i-1$ присвоен погрешностям установки предыдущего инструмента. Данные формулы позволяют определить требования к точности позиционирования инструментов при проектировании высокопроизводительного промышленного оборудования, реализующего многоинструментальный принцип реализации метода ДР.

Выполнен анализ влияния точности изготовления трубной заготовки на точность геометрических параметров получаемого оребрения и разнотолщинность остаточной стенки трубы. Установлены ограничения на допустимую скорость врезания, максимально допустимый радиус округления режущей кромки и радиус скругления при вершине инструмента для ДР в плане.

Методом ДР впервые получен новый тип развитого макрорельефа в виде совокупности частично отделенных от основы и изогнутых ребер, образующих регулярную ячеистую структуру на поверхности детали с количеством ячеек от 10 до 1000 на квадратный сантиметр и глубиной структуры от 0,2 до 4,0 мм. Предложен и обоснован механизм формообразования таких структур как граничный случай реализации метода ДР.

В третьей главе изложены результаты исследования процесса формообразования развитого макрорельефа методом ДР на цветных сплавах и сталях. Установлено, что в наибольшей степени на осуществимость процесса ДР влияет соотношение величины подачи и глубины резания.

На рис.4 представлены результаты экспериментов по определению сочетаний глубины резания и подачи для двух значений угла ϕ , обеспечивающих устойчивый процесс ДР с формированием оребрения или,

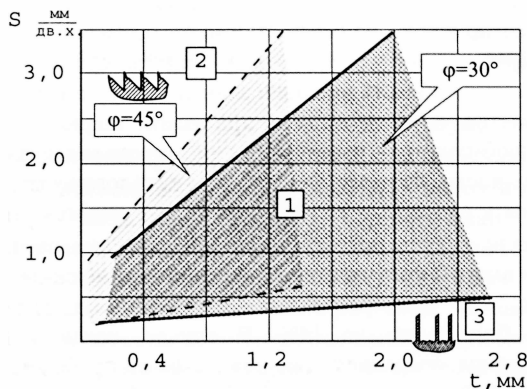


Рис.4. Соотношения глубины резания и подачи, обеспечивающие устойчивый процесс ДР (зона 1) при получении оребрения на меди. ВК8-М06

иначе, области осуществимости процесса ДР. Эта область на рис.4 обозначена цифрой 1 и затемнена. Область имеет две границы. Ниже нижней границы (в зоне 3) происходит отделение формируемого ребра в виде стружки, т.е. обычный процесс резания. Сочетания глубины резания и подачи выше верхней границы (в зоне 2) характеризуется невозможностью отгибки формируемого ребра в канавку, образованную на предыдущем проходе. В этом случае имеет место выдавливание подрезанного слоя на обрабатываемую поверхность заготовки. Как результат, вместо получения ребра с параллельными сторонами, происходит формообразование гребней с треугольным профилем.

Для практического использования результаты по определению области существования процесса ДР целесообразно представлять в виде ограничений по глубине резания. Например, для обработки меди с толщиной ребра, равной половине шага это условие составляет $0,37 \cdot S_{\text{дв.х}} - 0,09 < t < 3,3 \cdot S_{\text{дв.х}} - 0,33$. Аналогичные выражения получены для других условий обработки.

Увеличение главного угла инструмента в плане ϕ в координатах "t-S" изменяет область существования процесса ДР, она сужается и смещается по графику вниз. Это объясняется тем, что при прочих равных условиях, ребро становится толще, а, значит, и прочнее его связь с заготовкой, т.е. переход процесса ДР в обычное резание с отделением стружки при выбранной подаче будет происходить при большей глубине резания.

Для сталей влияние главного угла инструмента в плане на область существования процесса ДР имеет более выраженный характер. Например, незначительное увеличение главного угла в плане ϕ с 42° до 47° позволяет при той же глубине резания формировать оребрение на стали 40Х с шагом в два раза меньшим, чем инструментом с $\phi=42^\circ$. Увеличение скорости резания приводит к расширению области существования процесса ДР, поскольку при больших скоростях за счет возрастания температуры в зоне обработки увеличивается пластичность материала подрезанного слоя. Обрабатываемый материал значительно влияет на осуществимость процесса ДР. С уменьшением пластичности обрабатываемого материала область существования процесса сужается и смещается в область меньших значений глубины резания и подачи.

В большинстве случаев к геометрическим параметрам получаемого оребрения теплообменного назначения не предъявляются повышенные требования по точности, поэтому для выбора технологических параметров ДР можно использовать расчетные зависимости (2...6), полагая, что коэффициент искажения профиля получаемого ребра $\xi=1$. Сравнение расчетных значений толщины ребра и высоты получаемого оребрения и измеренных по поперечным срезам показало, что для различных материалов и режимов ДР, они различаются не более, чем на 14%. В случае, когда к геометрическим параметрам оребрения предъявляются повышенные требования по точности, расчет технологических параметров обработки, обеспечивающих получение требуемой толщины и высоты ребра, необходимо производить с учетом экспериментально определяемого коэффициента искажения профиля ребра ξ , который выступает в роли поправочного коэффициента. Разработана методика определения коэффициента ξ .

Проведено исследование сил, возникающих в процессе ДР. При ДР на вспомогательную заднюю поверхность инструмента дополнительно действуют силы $P_x^{зн}$ и $P_z^{зн}$, возникающие от давления формируемого ребра. Большие передние углы инструмента и огибание формируемым ребром деформирующей кромки приводят к тому, что сумма составляющих силы резания $P_x^{зн}$ и $P_x^{зн}$ оказываются всегда больше, чем силы реакции поверхности резания на главную заднюю поверхность инструмента $P_x^{зн}$ (рис.5). Это приводит к тому, что суммарная составляющая P_x силы резания отрицательна и значительна по величине. Например, при обработке меди М06 при $t=0,8$ мм и $S_0=1,2$ мм, сила $P_x=-400$ Н. Если значение этой составляющей больше сил трения в направляющих устройства подачи то наблюдается "самозатягивание" инструмента. Это необходимо учитывать при разработке устройств технической реализации метода ДР. Возможными техническими решениями являются использование безлюфтовых передач в механизме подачи инструмента или создание силы трения в направляющих гарантированно превышающих P_x . Положение передней поверхности инструмента для ДР должно обеспечивать осуществимость процесса в максимально широком диапазоне используемых глубин резания t и подач S_0 . Это условие

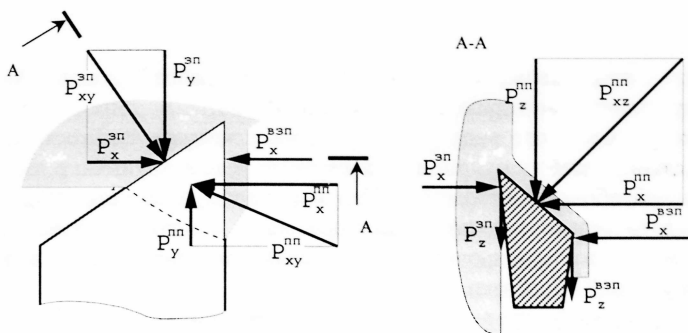


Рис.5. Схема силового взаимодействия инструмента и заготовки при ДР

обеспечивается выбором максимально большого переднего угла γ и угла наклона главной режущей кромки λ . В то же время назначение больших углов γ и λ приводит к снижению прочности режущего клина инструмента и, как следствие, к его возможной поломке. Теоретически найти решение, удовлетворяющее поставленным условиям, не представлялось возможным, поэтому положение передней поверхности инструмента для ДР при обработке различных материалов находилось эмпирическим путем. В таблице 1 представлены рекомендуемые положения передней поверхности при обработке различных материалов. Положение передней поверхности задается через углы γ_1 и λ_1 , поскольку только они остаются неизменными при необходимости изменения толщины или высоты ребра за счет изменения главного угла инструмента в плане.

Таблица 1

Рекомендуемые положения передней поверхности инструмента для ДР

Обрабатываемый материал	γ_1 , град	λ_1 , град
Медь, латунь, медно-никелевые сплавы, титан	-57	-39
Алюминий и его сплавы	-49	-46
Низкоуглеродистые стали, медно-никелевые сплавы повышенной прочности	-59	-26
Среднеуглеродистые и коррозионно-стойкие стали	-60	0
Медь (получение ячеистых структур)	-59	+24

Установлены критерии износа. Для меди и коррозионностойких сталей критерием износа является начало зоны катастрофического износа инструмента. По этому критерию стойкость инструмента из ВК8 при обработке меди М2 составила 92 минуты при скорости обработки 2,2 м/с. То же для коррозионностойких сталей: стойкость 100 минут при скорости 0,67 м/с.

Для конструкционных сталей критерием износа является технологический критерий, определяющийся началом наростообразования и последующими срывами наростов с передней поверхности инструмента в межреберное пространство. Появление наростообразования обусловлено изменением геометрических параметров режущего клина при его износе.

Стойкость инструмента по этому критерию при обработке стали 40Х составила 108 минут при скорости резания 1,2 м/с.

Установлено, что твердые сплавы обеспечивают стойкость в 6...9 раз больше, чем быстрорежущий инструмент и рекомендуются в большинстве случаев обработки методом ДР. Быстрорежущие стали необходимо использовать только при получении оребрения с шагом или высотой ребра более 3 мм, поскольку прочность твердосплавного инструмента недостаточна для этих условий обработки.

В четвертой главе представлены рекомендации по практическому использованию метода ДР и проектированию специализированных установок для оребрения теплообменных труб.

Выполнен анализ возможности использования существующего станочного оборудования для реализации метода ДР. Традиционные токарные станки целесообразно использовать при годовой программе выпуска не более 50 км оребренных труб в год, поскольку производительность, в зависимости от шага и длины заготовки, составляет не более 0,5...1,0 погонных метра оребренной трубы в минуту. Методом ДР на токарных станках возможно получение оребрения с шагом от 0,15 до 3,0 мм, с шириной канавки от 0,02 до 1,5 мм. Максимальная высота ребер при обработке меди составляет до 7 шагов оребрения. При обработке цветных сплавов и сталей максимальная высота ребер составляет 3...5 шагов оребрения. Использование токарных станков позволяет легко перенастраиваться для получения оребрения различных типоразмеров на заготовках диаметром от 6 до 50 мм. Диаметр заготовки ограничен диаметром отверстия шпинделя станка. Могут быть использованы токарные станки, как с ручным, так и с программным управлением. При наличии автоматического патрона, станки с ЧПУ обеспечивают возможность перестановки длинной трубы в автоматическом цикле. Метод ДР позволяет на токарных станках производить обработку теплообменных труб с исходной толщиной стенки от 0,5 мм и более. Минимальная остаточная толщина стенки трубы после оребрения составляет до 0,15 мм. Внутренний диаметр трубы не изменяется. Труба после получения оребрения удлиняется незначительно. Удлинение в наибольшей степени зависит от остаточной толщины стенки трубы. При остаточной толщине стенки трубы более 1,0 мм, удлинение не превышает 0,1%, в то время как для остаточной толщины 0,5 мм может достигать 1,0%. При оребрении труб на обычном токарном станке обязательно наличие подвижного люнета. Трубы с длиной большей величины хода продольного суппорта станка, обрабатываются последовательными участками. При использовании токарных станков возможно получение ребер с разрывами (получение шипов). Для этого на поверхности трубной заготовки перед ДР накатываются рифления накатным роликом, установленным на подвижном люнете.

Проведен анализ возможных кинематических схем, разработаны схемные решения и рекомендации по проектированию специализированного высокопроизводительного оборудования для получения оребрения на

длинномерных трубах. Предложена схема с перемещающейся вдоль оси заготовкой и инструментом (инструментами), вращающимся вокруг нее. Разработаны конструкторские решения, реализующие данную схему обработки. Основными узлами являются инструментальный блок, блок подачи трубы и компенсации крутящего момента, устройство перемещения инструментов на заданную глубину резания, устройства центрирования трубной заготовки и поддержки оребренной трубы. Отработка конструкторских решений проводилась при создании установок для оребрения труб. Изготовлены две лабораторных и две промышленных установки, которые внедрены на СЗХМ (г.Снежное, Украина). Вторая промышленная установка имела устройства автоматизации загрузки трубных заготовок и выгрузки оребренных труб. Инструментальный блок выполнен на базе стандартного клинкового автоматического патрона, на кулачках которого закрепляются с возможностью регулирования радиального положения сменные твердосплавные пластины, затачиваемые в соответствии с разработанными технологическими рекомендациями по заточке инструмента для ДР. Характеристики оребрения, получаемого на промышленной установке, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики макрорельефа, получаемого на установке оребрения труб

Число заходов оребрения	3
Шаг оребрения, S, мм	0,5...1,0
Максимальная высота оребрения, мм	До 3хS
Отношение ширины канавки к шагу	0,1...0,6
Минимальная остаточная толщина стенки оребренной трубы, мм	0,3
Возможность получения неоребренных участков в любом месте трубной заготовки	Имеется
Производительность установки, погонных м/мин	2,4 для шага оребрения 0,5 мм, 4,8 для шага оребрения 1,0 мм
Диаметр трубной заготовки, мм	16...20
Длина обрабатываемых заготовок, м	3...6

В пятой главе представлены результаты исследований эксплуатационных характеристик теплообменных труб, оребренных методом ДР. Проведенные совместно с ВНИИ холодильного машиностроения, МЭИ, НПО "Криогенмаш", АНПО "Одессхолод" исследования показали повышенную тепловую эффективность труб, оребренных по методу ДР при их использовании в конденсаторах и испарителях холодильных и криогенных установок. По результатам теплофизических испытаний установлена оптимальная ширина межреберного зазора при кипении и конденсации хладонов: ширина межреберного зазора должна составлять 0,1...0,3 мм для кипения, и 0,38...0,5 мм для конденсации. Для унификации геометрических параметров оребрения труб в аппаратах промышленных холодильных машин,

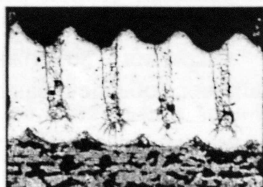
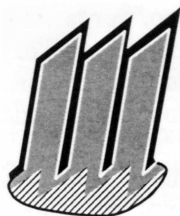
работающих как в режиме конденсации, так и кипения, рекомендовано оребрение с шагом 0,6...0,85 мм, с шириной межреберного зазора 0,3...0,4 мм и высотой ребер 2,2...2,3 мм. При этих параметрах оребрения, как в режиме кипения, так и конденсации хладонов выявлено увеличение коэффициента тепловой эффективности на 35...51% для труб, оребренных по методу ДР, по сравнению с трубами, оребренными методом накатки роликами. Производственные испытания конденсатора водоохлаждающей установки АВ-30 с трубами, оребренными по методу ДР, доказали возможность сокращения материалоемкости по меди и габаритов теплообменных аппаратов на 28% при сохранении, а по некоторым параметрам улучшении, их характеристик по сравнению с аналогичными на основе труб, оребренных методом накатки роликами.

Использование метода ДР для оребрения труб криогенных установок позволяет повысить снимаемый тепловой поток в 3,5...5,0 раз по сравнению с накатным оребрением и в 13...18 раз по сравнению с гладкой трубой.

Исследования капиллярно-транспортных характеристик показали, что микрооребрение, полученное методом ДР, по высоте капиллярного поднятия не уступает лучшим волокнистым и порошковым капиллярно-пористым структурам, а по жидкостной проницаемости превосходит их в 5...10 раз.

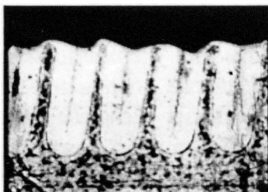
В шестой главе рассматривается использование метода деформирующего резания для создания упрочняющих покрытий на стальных деталях трения. Новым подходом (патент РФ №2015202) при создании покрытий большой толщины с управляемой структурой и свойствами является сочетание метода деформирующего резания и диффузионного легирования посредством химико-термической обработки (ХТО). Основой создания новых покрытий является подготовка поверхности детали методом ДР с формированием оребрения с высотой 0,5...1,5 мм с малыми (0,15...0,6 мм) шагами и узкими (0,01...0,15) мм межреберными зазорами. Межреберные зазоры при последующей ХТО позволяют ускорить за счет газовой диффузии проникновение легирующих элементов вглубь поверхности, после чего происходит диффузионное легирование боковых сторон тонких ребер. Каналы вглубь поверхности детали, полученные ДР, обеспечивают при ХТО практически одинаковый доступ насыщающей среды по всей толщине будущего покрытия. Становится возможным получать диффузионные покрытия большой толщины, поскольку она определяется высотой оребрения, формируемого методом ДР. Длительность получения покрытия определяет его структуру, а не толщину, как для традиционных процессов ХТО. Устраняется присущее ХТО экспоненциальное уменьшение концентрации диффундируемого элемента по толщине покрытия. Обоснована возможность получения покрытий четырех различных типов за счет изменения толщины ребер, ширины межреберного зазора и толщины диффузионного слоя. Схемы и фотографии разработанных типов покрытий представлены на рис.6.

Беспористые покрытия первого и второго типа (рис.6а, и 6б)



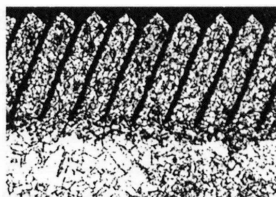
$$a < 2h_{\text{диф}}, b < 2\Delta h_{\text{диф}}$$

Беспористые, полностью
упрочненные покрытия с
чередованием слоев различной
твердости



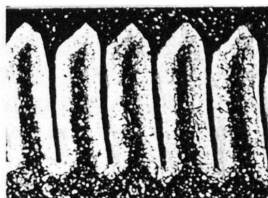
$$a > 2h_{\text{диф}}, b < 2\Delta h_{\text{диф}}$$

Беспористые, частично
упрочненные покрытия с
сохранением пластических прослоек
исходного материала



$$a < 2h_{\text{диф}}, b > 2\Delta h_{\text{диф}}$$

Пористые, полностью
упрочненные покрытия с
регулярной открытой
пористостью в виде узких
щелевых канавок



$$a > 2h_{\text{диф}}, b > 2\Delta h_{\text{диф}}$$

Пористые, частично упрочненные
покрытия с сохранением
пластических прослоек
исходного
материала

Рис.6. Варианты получаемых износостойких структур на стальных деталях трения.

a —толщина ребра, b —ширина канавки, $h_{\text{диф}}$ —толщина диффузионного
слоя, $\Delta h_{\text{диф}}$ —увеличение толщины ребра при ХТО

получены также при насыщении боковых сторон ребер, когда ширина канавки соизмерима с шероховатостью их боковых сторон. В этом случае для получения беспористого покрытия возможно использование процессов диффузионного насыщения, обеспечивающих минимальный прирост толщины ребра.

Покрытия с наличием тонкой прослойки исходного пластичного материала в сердцевине ребра (рис.6б и 6г) способны работать как упрочняющие при динамических и термоударных нагрузках, поскольку неупрочненная сердцевина ребра выполняют роль пластичной матрицы для армирующих твердых слоев боковых сторон ребра.

Остаточная пористость в виде щелей, выходящих на поверхность детали трения (рис.6в и 6г), служит объемом для удержания жидкой смазки и сбора продуктов износа. Апробировано также получение самосмазывающихся покрытий, полученных путем заполнения межреберных зазоров твердыми смазками на основе дисульфида молибдена и фторопласта. Вертикальные слои твердой смазки, выходящие на поверхность трения обеспечивают равномерное распределение смазки по площади контакта, а также постоянное ее наличие, даже по мере износа покрытия.

Триботехнические испытания разработанных покрытий в ИМАШ РАН и НПО "НИИТАВТОПРОМ" показали, что по относительной и абсолютной износостойкости предлагаемые покрытия превосходят традиционные диффузионные в 1,5...3,0 раза, а склонность к задирам уменьшается в 2,2...3,2 раза. Покрытия способны работать в условиях одноразовой смазки при удельных давлениях до 15,0 МПа с интенсивностью изнашивания не более $(3,0...4,0) \cdot 10^{-9}$.

В седьмой главе изложены основы использования метода деформирующего резания для восстановления исходных размеров изношенных деталей машин. В реновационных технологиях метод ДР может использоваться как самостоятельный технологический прием. В этом случае увеличение диаметральных или линейных размеров деталей при обработке методом ДР заключается в перераспределении материала поверхностного слоя за счет создания открытой регулярной пористости в виде узких глубоких канавок в поверхностном слое детали. Для стальных валов, при твердости поверхности не более 240НВ, диаметр может быть увеличен до 0,8 мм при ширине канавок от 10 мкм до 0,5 мм, шаге оребрения от 0,15 до 2,0 мм и глубине канавок - от 0,2 до 2,0 мм.

Поверхностная пористость на детали после ДР, в большинстве случаев, является негативным явлением, т.к. уменьшает несущую поверхность, однако для дорогостоящих деталей даже частичное восстановление их служебных свойств является экономически целесообразным. Материал ребер, образованных в процессе ДР значительно упрочнен и имеет твердость и прочность в 1,3...1,7 раза большую по сравнению с основным материалом, поэтому уменьшение несущей способности поверхности восстановленной

детали компенсируется более высокими механическими характеристиками материала поверхностного слоя. В некоторых случаях регулярная открытая поверхностная пористость может служить положительным фактором, например, для удержания и подвода смазки, а также для сбора продуктов износа, например, в узлах трения скольжения. Остаточная пористость в виде узких щелевых канавок может служить объемом для размещения твердых смазок (медь, олово, дисульфид молибдена, фторопласт), порошковых или проволоочных материалов повышенной твердости и износостойкости. Апробировано также устранение поверхностной пористости пластическим деформированием вершин ребер за счет их развальцовки твердосплавным выглаживателем или свободно вращающимся роликом.

Удаление треугольного заострения ребер, полученных ДР производится отбочкой, либо шлифованием восстановленной детали от касания вершин ребер на глубину t_1 :

$$t_1 \geq \frac{S_0}{2 \cdot \sin(\varphi + \varphi_1)}, \quad (11)$$

В этом случае увеличение диаметральных размеров детали ΔD_p составит:

$$\Delta D_p = \frac{2t \cdot (\sin \varphi_1 - \xi \cdot \sin \varphi)}{\xi \cdot \sin \varphi} - S_0 \cdot \sin(\varphi + \varphi_1), \quad (12)$$

Несущая способность участка оребренной поверхности, у которого удалены треугольные заострения вершин ребер составляет

$$t_p = (1 - \xi \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_1}) \cdot 100\%. \quad (13)$$

Нанесение покрытий является наиболее распространенным в промышленности методом восстановления размеров и свойств изношенных деталей машин. В 7 главе рассмотрено также использование метода ДР в реновационных технологиях, как средства подготовки поверхности под последующее нанесение газотермических покрытий и ремонтных металлополимерных составов. Макрорельеф, получаемый ДР, имеет не только развитую поверхность, но и позволяет реализовать анкерный эффект удержания наносимого покрытия за счет наклонных ребер или расширения межреберного зазора в его нижней части.

Покрытия, наносимые на оребренную поверхность, могут заполнять межреберный зазор полностью или частично. Оребренная структура с частично заполненным межреберным промежутком является демпфирующим слоем между основой детали и формируемым покрытием. Наличие демпфирующего слоя наиболее актуально для сочетания "материал покрытия - материал детали" с резко отличающимися физико-механическими характеристиками, т.е., в первую очередь, для керамических и металлокерамических покрытий на металлических деталях. Частичное заполнение покрытий достигается либо за счет наклонного оребрения, либо установкой сопла, наносящего покрытие, не перпендикулярно напыляемой поверхности, либо соответствующим выбором

фракции напыляемого порошка. Плазменнонапыленное керамическое покрытие из окиси алюминия, нанесенное на поверхность стального вала, подготовленного под напыление методом ДР, выдержало до 28 циклов "нагрев - резкое охлаждение", в то время, как покрытие на поверхности после пескоструйной обработки или черного точения выдерживает не более 3 термоударов. Определены также оптимальные параметры рельефа и реализовано получение твердосплавных (BK15) покрытий на плоских и цилиндрических деталях с использованием сверхзвукового газопламенного напыления.

При восстановлении изношенных поверхностей методом ДР с большими величинами износа целесообразно применение ремонтных составов на основе металло- или керамиконаполненных полимерных компаундов. При нанесении ремонтных составов на поверхность, подготовленную методом ДР, зафиксировано 30% повышение предельных сдвиговых нагрузок, выдерживаемых покрытием по сравнению со штатной технологией их нанесения.

На предприятиях АО "Мосэнергоремонт" и в ремонтных цехах ТЭЦ-21 и ТЭЦ-23 проведена апробация предлагаемого метода при восстановлении крупногабаритных валов из различных сталей. Восстановление проводилось методом ДР как без использования ремонтных составов, так и с их нанесением на поверхность, подготовленную методом ДР.

Апробировано использование оребрения, получаемого ДР для приваривания металлической ленты на изношенные участки цилиндрических деталей. Обеспечено полное сплавление вершин ребер с материалом ленты, за счет более высоких контактных температур и нагрузок при сварке ленты с оребренной поверхностью.

Производительность, стоимость инструмента и операции оребрения практически не отличаются от обычной токарной обработки. Фактором, существенно ограничивающим область использования предлагаемого метода восстановления исходных размеров изношенных деталей машин, является ограничение по их твердости перед обработкой методом ДР, поэтому в настоящее время предлагаемый метод восстановления размеров может быть использован в основном для крупногабаритных деталей, для которых, как правило, не проводится их объемное или поверхностное упрочнение.

В 8 главе рассматриваются теоретические и практические аспекты использования метода ДР для получения выступов треугольного профиля (резьб), получения металлических сеток из тонколистовых материалов и компактных микрощелевых теплообменников.

Проведен анализ кинематических схем получения макрорельефа в виде выступов треугольного профиля методом ДР. При обычном ДР для получения ребер инструмент необходимо перемещать на величину подачи в направлении режущей кромки. В этом случае подрезанный слой отгибается в ранее образованную канавку, формируя ребро с параллельными стенками. При смене

направления подачи (в сторону деформирующей кромки), материал подрезанного слоя не имеет возможности отгибки, и будет выдавливаться в виде гребня на обрабатываемую поверхность в направлении подачи. На следующем проходе режущая кромка инструмента срежет часть ранее образованного гребня с формированием выступа треугольного профиля при одновременном формировании нового гребня на обрабатываемой поверхности. Предлагаемый метод образования рельефов треугольного профиля получил название инверсного деформирующего резания (инверсное ДР). В отличие от ДР, при инверсном ДР происходит срезание верхней части выступа с образованием стружки.

Наклон боковых сторон треугольного профиля, получаемого инверсным ДР, определяется проекциями на основную плоскость главной и вспомогательной кромок, т.е. главным φ и вспомогательным φ_1 углами инструмента в плане. При их равенстве метод инверсного ДР обеспечивает получение симметричных резбовых профилей с увеличением диаметра детали по вершинам профиля по сравнению с исходным диаметром заготовки. Отличие от обычного нарезания резьбы резцом состоит в том, что в процессе инверсного ДР присутствует пластическое перераспределение материала из объема впадины в объем гребня. Это приводит к уменьшению объема материала, удаляемого в виде стружки, уменьшению глубины внедрения инструмента и к возможности использования меньших диаметральных размеров заготовки. Большое значение переднего угла инструмента, улучшенные условия течения металла по передней поверхности, меньшая глубина внедрения инструмента, по сравнению с обычным резбонарезанием значительно снижают силовые нагрузки на инструмент и обрабатываемую заготовку, что позволяет образовывать полный резбовой профиль за один проход инструмента, а также использовать предлагаемый метод при нарезании резьб на тонкостенных трубных заготовках. Метод получения резьб инверсным ДР занимает промежуточное положение между методами, основанными на процессе резания и процессе пластического деформирования.

Выведены формулы для расчета глубины резания и диаметра заготовки, обеспечивающие получение резбового профиля с заданными геометрическими параметрами. Для формирования выступов треугольного профиля с углами наклона боковых сторон β и β_1 , и с учетом того, что главный (φ) и вспомогательный (φ_1) углы инструмента в плане должны быть равны $\varphi = \beta$, и $\varphi_1 = \beta_1$ глубину резания необходимо назначать из выражения:

$$t = p \cdot \frac{\sqrt{\operatorname{tg} \varphi}}{\sqrt{(\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1) + (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1) \cdot \sqrt{\operatorname{tg} \varphi}}}, \quad (14)$$

где p – шаг требуемый резьбы. Диаметр заготовки D_0 для получения резьбы с диаметром D определяется по формуле:

$$D_0 = D - 2 \cdot \left(\frac{p \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1} - t \right). \quad (15)$$

Критериями для вывода этих зависимостей являлись минимальность объема материала заготовки, удаляемого режущей кромкой в виде стружки и условие формирования полного профиля резьбы.

Для метрической резьбы ($\varphi=\varphi_1=60^\circ$) необходимый диаметр заготовки D_0 и глубина внедрения инструмента t составят: $D_0=D-1,225 \cdot p$, $t=0,507 \cdot p$.

Величина экономии металла, по сравнению с обычным резбонарезанием путем удаления стружки составляет:

$$\Delta = \left[1 - \frac{(D - D_0)}{2t \cdot \operatorname{tg} \varphi \sqrt{2 \operatorname{ctg} \varphi \cdot \operatorname{ctg} 0,5(\varphi + \varphi_1)}} \right] \cdot 100\%. \quad (16)$$

Оптимизировано положение передней поверхности инструмента, обеспечивающие устойчивый процесс инверсного ДР при обработке меди. Установлено, что процесс инверсного ДР осуществим при изменении переднего угла γ в диапазоне $43...57^\circ$ и при изменении угла наклона главной режущей кромки λ в пределах $25...41^\circ$.

Произведен анализ качества резьбовых профилей, получаемых инверсным ДР. Точность боковых сторон получаемой резьбы соответствует полю допуска наиболее распространенной посадки 6g среднего класса точности. Шероховатость боковой стороны профиля резьбы, сформированной режущей кромкой составляет $R_z=20,0$ мкм, а для стороны, сформированной деформирующей кромкой $R_z=3,2$ мкм.

Анализ микроструктуры показал, что материал полученных выступов имеет зоны, характерные как для процесса обработки давлением, так и для обычного резания. Наибольшую твердость имеют слои металла, лежащие в приповерхностных слоях, контактировавших с деформирующей кромкой. Для материала, отстоящего от этой боковой поверхности профиля на 40 мкм повышение твердости, по сравнению с твердостью исходного материала составило 1,6...2,3 раза. Такое существенное повышение твердости играет положительную роль при эксплуатации полученного резьбового профиля.

На материалах с низкой прочностью и высокой пластичностью (медь, латунь, алюминиевые деформируемые сплавы, титан ВТ1-0) предлагаемый метод позволяет устойчиво получать резьбовой профиль за один проход инструмента, поэтому метод инверсного ДР наиболее рационально использовать при формообразовании резьб на концах теплообменных тонкостенных труб, используемых в конструкции кожухотрубных теплообменников. В отличие от обычного резания, для которого все сечение подрезанного слоя удаляется в виде стружки, при инверсном ДР большая часть сечения подрезанного слоя остается на детали.

Методом ДР возможно получение оребрения с очень узкими (единицы микрометров) канавками между ребрами. Это позволило предложить ряд новых конструкторско-технологических решений использования метода ДР при получении щелевых фильтрующих структур из металлических и полимерных заготовок.

При получении металлических сеток предлагается следующий подход. Листовая заготовка толщиной 0,2...0,5 мм натянутая на цилиндрическую оправку последовательно обрабатывается методом ДР с двух сторон, причем оребрение со второй стороны производится перпендикулярно или под углом к направлению ребер с первой стороны. Глубину резания при оребрении обеих сторон листа назначают больше половины толщины листа. Это обеспечивает соединение межреберных зазоров на противоположных сторонах листа. Полученная сетка обладает щелевой структурой, особенностью которой является возможность ее регенерации противотоком очищаемой среды. Получены медные, алюминиевые и титановые сетки с шириной щелей от 15 мкм и выше с квадратной и ромбической ячейкой при толщине сеток 0,3...0,6 мм.

Метод ДР был использован также при получении щелевых фильтров из полимерных (полиэтилен, фторопласт-4) труб для систем водоочистки с тонкостью фильтрации от 15 мкм и выше за счет формирования рядов сквозного оребрения на стенке трубной заготовки.

На основе возможностей метода ДР разработана гамма компактных теплообменников микроканального типа. Так, теплообменник с объемом 700 см³ имеет два рабочих контура, каждый из которых состоит из 400 щелевых каналов, работающих параллельно. Сечение каждого канала составляет 0,5х4,0 мм при длине канала 70 мм. Разбиение теплоносителей на множество параллельных микропотоков обеспечивает высокую тепловую эффективность теплообменника при его низком гидравлическом сопротивлении. Цилиндрический корпус обеспечивает возможность работы с большими давлениями теплоносителей. Теплообменник представляет высокотехнологичную конструкцию и состоит всего из двух оребренных труб, вставленных друг в друга и в корпус по плотной посадке. Каждая из оребренных труб имеет по два диаметрально расположенных коллектора, параллельных оси теплообменника. Коэффициент компактности для данного теплообменника составляет 500 м²/м³, что превышает аналогичный показатель для теплообменника фирмы "Alfa Laval" в 1,5 раза. Проведены испытания теплообменника, в том числе в производственных условиях в режимах "вода-вода", "вода-масло" и "вода-воздух". Результаты испытаний подтвердили преимущества разработанной микрощелевой конструкции теплообменника, по сравнению с существующими конструкциями. Теплообменник предназначен для охлаждения или нагрева масла, сжатого воздуха, воды и других рабочих сред промышленного оборудования, транспортных машин, аппаратов химического и пищевого машиностроения, конденсации и испарения теплоносителей. Конструкция позволяет изготовить теплообменники из различных материалов, таких как медь, алюминий, коррозионностойкие стали, титан.

В 9 главе изложены результаты производственного использования метода ДР и изделий, полученных на его основе.

По заказу ПТО ВАЗа разработана конструкция и технология изготовления винтовых теплообменников из оребренной по методу ДР трубы

(патент РФ №2087236). Разработаны теплообменники двух типоразмеров, отличающиеся снимаемой тепловой мощностью. Теплообменник повышенного теплосъема состоит из двух коаксиально-расположенных змеевиков, навитых из медных оребренных труб. Технология ДР, оснастка и инструмент для изготовления винтовых теплообменников переданы и внедрены на ВАЗе (г. Тольятти). Патент на способ изготовления змеевиков из оребренных труб внедрен в цехе №73-1 ПТО ВАЗа. С 1993 г. винтовые теплообменники широко используются при проектировании и изготовлении нового, а также при ремонте и модернизации действующего технологического оборудования во всех производствах ВАЗа, а также на заводах отрасли. Только за 1 квартал 1999 г. экономический эффект от импортозамещения при использования новых теплообменников составил 394 тыс.руб. Теплообменники прошли успешные испытания на АО "КамАЗ" (г.Набережные Челны), внедрены также на АЗЛК (г.Москва), российско-французском СП ИМТ "Сервис" (г. Москва).

На СЗХМ (г. Снежное, Украина) внедрена технология оребрения медно-никелевых труб из сплава МНЖ на токарных станках и технология оребрения труб методом ДР на специализированных установках оребрения труб. Разработаны, изготовлены и внедрены две установки, последняя из которых имела автоматизацию загрузки трубных заготовок и выгрузки оребренных труб. Использование труб, оребренных по методу деформирующего резания по сравнению с трубами, полученными накаткой, обеспечило повышение эффективности конденсационно-испарительных установок на 25...30%, что позволило сократить расход меди на 1,2 тонны на каждый теплообменник, выпускаемый СЗХМ.

В АНПО "Одессхолод" (Украина) заменены теплообменные трубы, производимые накаткой роликами на трубы по методу ДР для конденсаторов водоохлаждающей установки АВ-30. Проведенные сравнительные испытания показали, что при сокращении материалоемкости по меди и габаритов водоохлаждающей установки на 28%, ее холодопроизводительность сохранилась, а гидравлическое сопротивление уменьшилось в 1,3 раза.

В 1996 г. АО "Орелпродмаш" внедрил в изготавливаемую им линию фасования безалкогольных напитков теплообменники новой конструкции на основе труб, оребрение на которых получено методом ДР.

В результате совместной работы с АО "Алплаз" в 1996 г. внедрены пароперегреватели плазменных горелок, изготавливаемые на основе метода ДР. Мощность плазменной горелки была увеличена на 30% при сохранении габаритов устройства, повышена стабильность инициирования плазменной струи, устранены случайные выбросы плазмообразующей жидкости, уменьшена себестоимость изготовления плазменной горелки. Ежегодный выпуск плазменных горелок с пароперегревателями по методу ДР составляет 1000 шт. В 1998 году плазменная горелка с вышеупомянутым пароперегревателем была удостоена "Гран-при" на салоне изобретений в Женеве.

Для НПО "Композит" была разработана и внедрена технология изготовления систем охлаждения медных зеркал силовой оптики. Использование метода ДР при изготовлении теплообменных каналов существенно повысило производительность обработки по сравнению с применявшейся ранее технологией.

По заказу НТП "Техинформавтоматика" (г.Москва) была разработана конструкция и изготовлены медные охлаждаемые зеркала технологических лазеров. Для системы охлаждения была применена микроканальная структура, полученная ДР. После двух лет безотказной работы разработанных зеркал, в НТП "Техинформавтоматика" внедрено 20 охлаждаемых зеркал по разработанной технологии.

Решена проблема повышения надежности соединения склеиваемых деталей в ортодонтии при наклеивании на зубы ортодонтических аппаратов (брекетов) из стали 12Х18Н10Т, предназначенных для исправления положения кривых зубов. Брекеты приклеиваются на поверхность зуба человека и служат опорой для передачи постоянного усилия на исправляемый зуб от проволоки из никелида титана, реализующей эффект сверхупругости. Поверхность с наклонным оребрением с высотой профиля 0,2 мм и шириной канавки 70 мкм обеспечила 100% надежность клеевого соединения в естественных условиях эксплуатации, что подтверждено испытаниями 300 брекетов, проведенных ВНПО "Стоматология". Технология подготовки поверхности ортодонтического брекета методом ДР под склеивание внедрена на ММПО "Знамя Революции" и МГП "Пумпа" при промышленном выпуске комплектов ортодонтической аппаратуры.

В АО "Мосэнергоремонт" для ТЭЦ-8, ТЭЦ-16, ТЭЦ-21 и ТЭЦ-23, методом ДР при использовании токарных станков были восстановлены стальные крупногабаритные детали теплоэнергетического оборудования весом до 900 кг с величиной износа до 1,5 мм на диаметр. Увеличение диаметра для части деталей заключалось только в обработке по методу ДР. Для деталей с величиной износа более 0,8 мм, оребренная методом ДР поверхность была использована под последующее нанесение ремонтного состава "Belzona-суперметалл". При использовании таких ремонтных составов подготовка поверхности методом ДР обеспечила повышение прочности сцепления ремонтных составов с основой, их экономию, удобство нанесения, устранила экологически небезопасные операции пескоструйной обработки и обезжиривания. Себестоимость операции восстановления снижена в 3...4 раза.

Проблема повышения прочности неразъемного диффузионного соединения бор-алюминиевой трубы с законцовочными элементами была решена по заказу КБ "Салют" (г. Москва) за счет изменения макрогеометрии поверхностного слоя детали методом ДР. Проведенные сравнительные испытания показали повышение прочности на разрыв неразъемного соединения с подготовкой поверхности методом ДР не менее, чем в 3 раза, по сравнению с традиционной технологией. Разрушение сборки происходило не по месту диффузионного соединения как ранее, а по сечению бор-алюминиевой трубы.

Технология подготовки методом ДР внутренних поверхностей законцовочных элементов из АМГ6, титана ВТ1-0 и стали 12Х18Н10Т была передана и внедрена в КБ "Салют". Использование метода ДР позволило полностью реализовать прочностные показатели бор-алюминиевого композиционного материала в ферменных конструкциях космических летательных аппаратов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан новый метод механической обработки – метод деформирующего резания, позволяющий получать на пластичных материалах макрорельеф в виде ребер, шипов, ячеек, выступов треугольного профиля с управляемыми геометрическими параметрами и обеспечивающий возможность увеличения площади поверхности детали после обработки до 14 раз. Метод ДР безотходен, высокопроизводителен, обладает широкими технологическими возможностями, может быть реализован как на специальном, так и на унифицированном металлорежущем оборудовании, обладает высокой конкурентной способностью.

2. Показано, что вспомогательная кромка режущего клина играет важную роль в разрушении припуска. Установлено, что существует область значений передних углов на вспомогательной режущей кромке, при которых она становится неспособной производить работу по разрушению припуска, обеспечивая сохранение сплошности соединения с заготовкой слоя, подрезанного главной режущей кромкой, что позволяет образовывать развитую структуру поверхностного слоя, при этом вспомогательная кромка выполняет функцию деформирующей кромки.

3. Геометрические параметры развитого макрорельефа, получаемого ДР, определяются геометрическими параметрами инструмента, траекторией относительного перемещения и физико-механическими свойствами обрабатываемого материала. Установлены и математически выражены основные функциональные взаимосвязи процесса ДР, на основе которых разработаны инженерные методики назначения геометрических параметров инструмента и режимов обработки для получения макрорельефа с заданной высотой ребер, их толщиной, наклоном и шириной межреберного зазора.

4. Проведен анализ точности получаемого оребрения в зависимости от кинематики резания, усадки подрезанного слоя, погрешностей позиционирования инструмента, погрешностей заготовки. Разработаны кинематические схемы реализации метода ДР, технические требования и конструктивные решения высокопроизводительного промышленного оборудования для формирования оребрения на трубах теплообменных аппаратов.

5. Предложен новый метод и технология модификации поверхностей деталей машин – механо-химико-термическая обработка, которая основана на диффузионном легировании развитых поверхностных структур, полученных методом ДР. Объединение методов ДР и ХТО позволило разработать новый тип поверхностных композиционных износостойких структур толщиной до 1,5 мм с

вертикальным расположением упрочняющих и/или смазывающих слоев в пластичной матрице с управляемой структурой и свойствами. Для деталей трения достигнуто повышение износостойкости в 1,5...3,0 раза при уменьшении склонности к образованию задиров в 2,2...3,2 раза по сравнению с традиционными покрытиями.

6. На основе деформирующего резания предложены новые методы восстановления исходных размеров (до 0,8 мм на диаметр) и эксплуатационных свойств поверхностей изношенных деталей машин, формообразования резбовых профилей, изготовления капиллярно-пористых структур с давлением капиллярного напора до 6,7 кПа, получения сеток из металлических листов и фильтров из полимерных труб с толщиной фильтрации от 15 мкм.

7. Подготовка поверхности методом ДР под последующие технологические операции, такие как склеивание, напыление газотермических покрытий, нанесение полимерных композиций, повышает прочность соединения покрытия или клеевого состава с основой за счет анкерного эффекта и повышения адгезионных сил сцепления с развитым макрорельефом, полученным методом ДР.

8. Установлены особенности реализации метода ДР, конструкции инструментов, режимы обработки, состав технологической оснастки, которые явились основой разработанных технологических рекомендаций и методических указаний по практическому использованию метода ДР для получения развитых поверхностных структур на деталях из различных материалов.

9. Доказана высокая тепловая эффективность труб, оребренных по методу ДР, при их использовании в конденсаторах и испарителях холодильных и криогенных установок. Коэффициент теплоотдачи у труб с поверхностью, полученной методом ДР на 35...50% выше, чем у труб с оребрением, полученным традиционными способами.

10. Результаты промышленного внедрения доказали, что метод ДР позволяет не только улучшить эксплуатационные характеристики деталей, но и повысить технологичность их изготовления. Так, при оребрении труб теплообменных аппаратов технология ДР повышает производительность в 1,3...1,5 раза, в несколько раз снижает энергоемкость процесса, устраняет необходимость использования СОТС, позволяет использовать трубные заготовки с меньшей толщиной стенки по сравнению с существующей технологией оребрения труб накаткой роликами.

11. Разработано и внедрено специализированное промышленное оборудование для формирования наружного оребрения методом ДР на трубах теплообменных аппаратов с производительностью 4,0 погонных метров оребренной трубы в минуту (при шаге оребрения 0,8 мм). Разработаны и апробированы принципы автоматизации установки для оребрения труб.

12. Использование изделий с обработанной поверхностью по методу ДР в промышленности позволило существенно повысить эксплуатационные показатели холодильных установок, водо-масляных теплообменников,

плазменных горелок, охлаждаемых зеркал лазеров, ортодонтических брекетов, диффузионно-сварных элементов конструкций, а также предложить новые конструкторские и технологические решения при проектировании и освоении изделий новой техники.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах

1. А.С. 1383592 (СССР). Способ формообразования ребер труб теплообменных аппаратов / В.Н.Подураев, Н.Н.Зубков, А.И.Овчинников и др. – 1986.– д.с.п.
2. А.С. 1463094 (СССР). Зеркало для лазера / В.В.Аполлонов, В.В, Н.Н.Зубков В.И. Кривошеев В.И., и др. – 1987.– д.с.п.
3. Prospekt of the Development of Cooled Mirrors for High Power Technological Lasers / A.M. Prochorov, V.V. Apollonov, N.N. Zubkov etc. // Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics: Proc. of the First World Conference.– Dubrovnik (Yugoslavia), 1988.– P.882-892.
4. Зубков Н.Н. Получение поверхностей теплообмена регулярного макрорельефа // Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических методов обработки.: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – М., 1988. – С.75.
5. Теплофизика охлаждаемой оптики на основе новых типов проницаемых структур / Н.Н. Зубков, В.В. Апполонов, С.А. Четкин и др. // Тепломассообмен.: Тез. докл. международ. форума. – Минск, 1988. – С.49-72.
6. Технология изготовления поверхностных структур глубокого регулярного макрорельефа / В.Н. Подураев, Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников и др.: Проспект МВТУ. – М.: Изд. МВТУ, 1988.– 2 с.
7. А.С. 1625586 (СССР). Инструмент для дробления стружки при токарной обработке пластичных материалов / Н.Н.Зубков, А.И. Овчинников, В.Б.Есов и др. // Б.И.– 1989.– № 5.
8. Зубков Н.Н. Поверхностная обработка материалов деформационным резанием // Новая технология, оборудование, оснастка, инструмент механической обработки и сборки: Материалы семинара МНДТП. – М., 1989.– С.30-33.
9. А.С.1455217 (СССР) Способ выполнения капиллярных канавок на корпусе теплопередающего устройства / Н.Н. Зубков, В.В. Апполонов, В.Н. Харченко и др. // Б.И.– 1989.–№4.
10. А.С. 1558556 (СССР). Способ изготовления капиллярно-пористой структуры тепловой трубы / Н.Н.Зубков, В.Н.Подураев, А.И. Овчинников и др.. // Б.И.– 1990.– №15.
11. А.С. 1592711 (СССР). Теплопередающее устройство / Н.Н.Зубков, В.Н.Моторин, А.И.Ивлютин и др. // Б.И.– 1990.– №34.
12. А.С. 1700848 (СССР). Способ обработки поверхности деталей / Н.Н.Зубков, А.И.Овчинников, А.Г.Кочанов и др. – д.с.п.– 1990.

13. Новый метод упрочняюще-восстановительной обработки / Н.Н. Зубков, В.Н.Симонов, С.Г. Васильев и др. // Восстановительная обработка металлов и сплавов: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф., – М., 1991. – С.22-24.

14. Установка оребрения труб по методу деформационного резания / В.Н. Подураев, Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников и др. // Машины, приборы, стенды: Каталог МГТУ. – М.: Внешторгиздат, 1992. – №13. – С.37-38.

15. Механо-химико-термическая обработка поверхности деталей машин. Б.Н. Арзамасов. Н.Н. Зубков, С.Г. Васильев и др. // Вестник машиностроения. – 1993. №7. – С.32-35.

16. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Кононов О.В. Изготовление теплообменных поверхностей нового класса деформирующим резанием // Вестник МГТУ. – 1993. – №4. – С.79-82.

17. Зубков Н.Н. Основы формообразования функциональных поверхностей методом деформирующего резания // Вестник машиностроения. – 1994. – №10. – С.13-20.

18. Zubkov N.N. Technology for development of composite strengthening coatings // Advanced Russian technologies: Proceedings of seminar-exhibition. – Pretoria (South Africa), 1994. – P.60-61.

19. Пат. 2015202 (РФ). Способ упрочнения поверхности детали / Н.Н. Зубков, А.И.Овчинников, С.Г.Васильев и др. // Изобретения. – 1994. – №12.

20. Пат. 2087236 (РФ). Способ изготовления змеевиков из оребренных труб / Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, В.А. Качалов и др. // Изобретения. – 1994. – №23.

21. Масляно-водяной теплообменник для гидравлического оборудования / Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, В.А. Качалов и др. // Станки и инструмент. – 1994. – №5. – С.26-27.

22. Zubkov N.N. Principles of Forming Special Surfaces by Deforming Cutting Method // Russian Engineering Research. ISSN 0042–4633. – 1994. – №10. – P.13-20.

23. Пат. 2044606 (РФ). Способ получения поверхностей с чередующимися выступами и впадинами и инструмент для его реализации / Н.Н.Зубков, А.И.Овчинников. // Изобретения. – 1995. – №27.

24. Деформирующее резание – новый метод создания управляемой макрогеометрии поверхности / Н.Н.Зубков, А.И.Овчинников, О.В.Кононов и др. // Науч.-техн. конференция посвящ. 165 лет МГТУ им.Н.Э.Баумана: Тезисы докладов. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1995. – С.43.

25. Разработка научных основ новых методов эффективной механической обработки и эксплуатации инструментов: Отчет о НИР (закл.) / МГТУ. НИИКМ и ТП; Руководитель Древаль А.Е.; Исполн.: Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, О.В. Кононов и др. – Инв.№02960006564. – М., 1995. –118с.

26. Zubkov N.N. New class of composite strengthening coatings // Proceedings of Russian technology seminar. – Jochor (Malaysia), 1995. – P.14.

27. Разработка технологии восстановления исходных размеров изношенных , деталей машин методом деформирующего резания: Отчет о НИР (закл.)

/ МГТУ. НИИ КМ и ТП; Руководитель Н.Н. Зубков. – № ГБ33-6/96; № ГР 01970003057; Инв. № 02.9.70002137. – М., 1996. – 43 с.

28. European patent application 0727 269 A1 EP, Method of producing a surface with alternating ridges and depressions and a tool for carrying out the said method / N.N. Zubkov (РФ), A.I. Ovchinnikov (РФ). – № 94918624.1; Заявлено 27.04.94; Оpubл. 21.08.96; МКИ В 23 С 3/00. – 36 p.

29. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Якушев А.А. Токарная обработка без снятия стружки // Технологическое оборудование и материалы. – 1997. – Том 6(24). – С.16-17.

30. Zubkov N.N. Innovative technology of finning of pipes for heat exchangers // International Technology & Business Opportunities. Asian Pacific Centre for Transfer of Technology, – New-Deli (India), 1997. – №7. – P.56-58.

31. Зубков Н.Н. Восстановление исходных размеров и подготовка поверхностей под нанесение покрытий методом деформирующего резания // Метро. – 1998. – №2. – С.38.

32. Зубков Н.Н. Основные закономерности процесса деформирующего резания // Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – М., 1998. – С.151-152.

33. Пат. 5775187 США Method and apparatus producing a surface with alternating ridges and depressions / N.N. Zoubkov (РФ), A.I. Ovtchinnikov (РФ). – № 545640; Заявлено 27.04.94; Оpubл. 07.07.98: НКИ 82/1.11; 407/113; 407/114. – 11 p.

34. Перспективы развития метода деформирующего резания / Н.Н.Зубков, А.И.Овчинников, С.Г.Васильев и др. // Машиностроительные технологии: Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. – М., 1998. – С.152-153.

35. Разработка технологических основ получения щелевых фильтрующих структур на основе новых методов лезвийной обработки: Отчет о НИР / МГТУ. НИИКМ и ТП; руководитель Зубков Н.Н., № ГР 009531; Инв. №005623. – М., 1997. – 48 с.

36. Зубков Н.Н. Высокоэффективные теплообменные трубы и технология их изготовления // Энерго- и ресурсосберегающие технологии в городском хозяйстве: Тез. докл. науч.-практ. конф., – М., 1999. – С.23-24.

37. Зубков Н.Н. Многофункциональная технология деформирующего резания. // Тез. докл. науч.-техн. семинара. – М., 1999. – С.5.

38. Зубков Н.Н., Овчинников А.И. Кононов О.В. Новый инструмент. Новая технология. Новые возможности // Мир инструмента. – 1999. – №1. – С.20-22.

39. Зубков Н.Н. Деформирующее резание // Резание и инструмент: Сб. статей МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М., 2000, С.100-111.

40. Зубков Н.Н. Особенности реализации метода деформирующего резания. // Технология машиностроения. – 2001. – №1. – С.19-26.

41. Зубков Н.Н., Кременский И.Г., Васильев С.Г. Восстановление посадочных мест валов на металлорежущем оборудовании // Технология металлов. – 2001. – №4. – С.22-24.