

1534 344

На правах рукописи

Кононов Олег Вячеславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР**

Специальность:

05.03.01. – Процессы механической и физико-технической
обработки, станки и инструмент

05.02.08. – Технология машиностроения

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



Москва, 1997.

Работа выполнена в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Зубков Н.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Ярославцев В.М.
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Боровский Г.В.

Ведущая организация - АМО ЗИЛ

Защита состоится "26 июня" 1997 года в 10⁰⁰ на за-
седании диссертационного совета К.053.15.15 в Московском госу-
дарственном техническом университете им.Н.Э.Баумана по адресу:
107005, Москва, Б-5, 2-ая Бауманская ул., дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н.Э.Баумана.

Авторефер

Ученый сек
диссертационни

Подписано к п
Заказ 115

ана

1554344

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Увеличение мощности силовых установок, интенсификация технологических процессов, создание новых схем и типов оборудования требует применения все более совершенных теплообменных устройств. Теплообменники используются практически во всех областях техники. Наиболее значительна роль тепло-массообменной аппаратуры для теплоэнергетики, холодильной, криогенной, химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Повышение тепловой эффективности поверхностей теплообмена означает прямую экономию дорогостоящих цветных металлов, которые широко используются при производстве теплообменной аппаратуры.

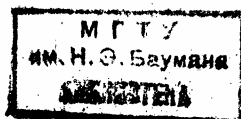
Значительной интенсификации теплообменных процессов при кипении и конденсации можно достичь при наличии капиллярного эффекта на теплообменной поверхности за счет создания на ней пористой поверхностной структуры (ППС), при этом характерные размеры пор не должны превышать десятых долей миллиметра. Используемые в настоящее время технологические методы получения ППС имеют ограничения по геометрическим параметрам получаемых структур.

Высокой производительностью и широким диапазоном типоразмеров получаемого макрорельефа обладает способ, основанный на подрезании и отгибке слоев поверхностного слоя металла обрабатываемой детали. Этот метод разрабатывается в МГТУ им. Н.Э. Баумана и получил название деформирующее резание (ДР). Новым подходом является использование метода ДР для создания ППС с целью существенного повышения эксплуатационных характеристик, снижения материалоемкости, веса и габаритов изделий тепломассообменного назначения.

Учитывая возрастающие требования к эксплуатационным характеристикам тепломассообменной аппаратуры, разработка нового метода получения высокоэффективных пористых поверхностных структур является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы. Создание высокоэффективных пористых поверхностных структур на деталях тепломассообменного назначения на основе метода деформирующего резания.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось проведением теоретических и экспериментальных исследований, разработкой технологических решений и практическим применением



полученных результатов. Объектами исследований являлись как образцы, так и промышленные изделия.

В решении теоретических задач использованы основные положения теории резания, элементы теории тепломассообмена. Обработка и анализ экспериментальных и аналитических результатов исследования осуществлялись численными методами с использованием ПЭВМ. Экспериментальные исследования деформирующего резания проводились на металлорежущем оборудовании с использованием стандартных измерительных приборов и стендов. Микро- и макрогеометрические параметры полученных ППС исследовались на инструментальном микроскопе УИМ-23, профилографе-профилометре модели 252 и сканирующем электронном микроскопе "CAM-SCAN-4-4DV". Износ инструмента исследовался в производственных условиях на установке оребрения труб. Эксплуатационные характеристики полученных ППС исследовались совместно по методикам ВНИИ Холодмаш, ВНИИ Криогенмаш, кафедры "Инженерная теплофизика" МЭИ, АНПО "Одесхолод" на стендах исследования процессов кипения и конденсации.

Научная новизна. Установлены основные взаимосвязи технологических параметров обработки методом ДР с получаемыми геометрическими характеристиками ППС, предложены и подтверждены расчетные зависимости, границы их применимости. Установлены технологические ограничения метода ДР при получении микроканального оребрения. Разработана методика определения погрешностей геометрических параметров получаемого оребрения при многоинструментальной схеме реализации ДР.

Впервые получены ППС ячеистого типа, не имеющие аналогов, обоснован и исследован механизм их формообразования. Установлена область сочетаний технологических параметров процесса ДР, позволяющие получать микроканальные оребренные и ячеистые структуры, обладающие капиллярными свойствами.

Установлены особенности силового взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали при ДР.

Исследованы основные геометрические, теплофизические и капиллярно-транспортные характеристики ППС нового типа.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Разработана технология получения ППС с повышенными эксплуатационными характеристиками на деталях тепломассообменного назначения.

Для ППС, полученных методом ДР, по сравнению с накатным

оребрением, достигнуто повышение плотности снимаемого теплового потока при испарении азота в 3,5...5,0 раз, коэффициента теплоотдачи при кипении и конденсации хладонов на 35...51%. Для полученных ИПС обобщенный показатель капиллярно-транспортных характеристик превысил в 5...10 раз лучший аналогичный показатель для ИПС из спеченных металлических порошков.

Разработана специализированная многоинструментальная установка для получения оребрения на длинномерных медных трубах методом ДР с производительностью 3,5...4,5 погонных метров оребренной трубы в минуту.

Проведена промышленная апробация метода ДР и изготовленных на его основе изделий теплообменного назначения на пяти промышленных предприятиях с техническим эффектом, заключающимся в повышении эксплуатационных характеристик изделий, снижении их материалоемкости и габаритов. Общий объем выполненных работ составил 45 млн. рублей.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на научно-технической конференции молодых специалистов и ученых НПО "Энергия" (г.Калининград, 1993 г.); на семинаре работников авиационной промышленности (г.Москва, 1993 г.), на научно-технической конференции "Автоматизация исследований, проектирования и испытаний сложных технических систем и технологических процессов" (г.Калуга, 1994 г.); на научно-технической конференции, посвященной 165 лет МГТУ им.Н.Э.Баумана (Москва, 1995 г.). Работа обсуждалась на научных семинарах и заседаниях кафедры "Процессы и инструментальные системы механической и физико-химической обработки" МГТУ им.Н.Э.Баумана (1995,1997 гг.).

По результатам исследований опубликовано 5 печатных работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 89 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 102 наименований, 10 приложений. Общий объем работы составляет 231 страницу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе показано, что проблема интенсификации тепло-массообмена наиболее актуальна для теплообменных устройств, использующих фазовые переходы теплоносителя. К таким устройствам относятся: испарители и конденсаторы промышленных холодильных и кондиционирующих установок, теплообменники химических производств, криогенных установок, парогенераторы и пароконденсаторы тепловых станций. Повышение эффективности теплообмена означает сокращение металлоемкости и габаритов этих устройств.

По данным отечественных и зарубежных исследователей (Л.И. Ройзен, В.Е.Позняк, J. Rose, R. Webb и др.) повышение эффективности конденсационно-испарительных теплообменников можно достичь за счет создания на поверхностях пористых поверхностных структур, обладающих капиллярными свойствами. Улучшение характеристик ППС актуально также для повышения эффективности работы таких перспективных теплопередающих устройств как тепловые трубы. Анализ существующих методов получения пористых поверхностных структур показал, что основным фактором, ограничивающим повышение их эксплуатационных характеристик, являются технологические ограничения, обусловленные технической невозможностью или экономической нецелесообразностью получения микроканального оребрения с шириной щелей, составляющих десятки-сотни микрометров. Приведенный в работе анализ существующих технологических методов получения ППС подтверждает это.

ППС в виде мелкошагового оребрения получают обработкой резанием, пластическим деформированием или используя сборные конструкции. К методам получения сборных пористых поверхностных структур относятся также различные способы прикрепления сеток к поверхности теплообмена. Плазменным напылением или методами порошковой металлургии получают ППС в виде спеченного с поверхностью детали слоя металлического порошка.

Обработка резанием при получении оребренных ППС применяется ограниченно ввиду малой прочности режущего клина при нарезании узких глубоких канавок.

Методы пластического деформирования (накатка, протягивание, экструдирование, волочение, штамповка) получили наибольшее распространение при формообразовании оребренных структур. Это обус-

ловлено высокой производительностью процесса и отсутствием отходов материала при обработке. Несмотря на ряд достоинств, методами пластического деформирования невозможно получить высокий профиль оребрения на материалах, прочнее меди, невозможно получать оребренные структуры с шагами менее 0,9 мм. Трубные заготовки для накатывания ребер не могут иметь толщину стенки менее 1,5 мм. К недостаткам методов пластического деформирования относится также необходимость использования смазочных жидкостей в процессе получения теплообменной поверхности, и, как следствие, необходимость последующей очистки деталей теплообменников.

В последнее время динамично начали развиваться методы получения поверхностей теплообмена, основанные на подрезании и отгибке поверхностных слоев металла. За рубежом ведущими фирмами в этом направлении являются Hitachi Calbe, Ltd. (Япония), Union Carbide Corp., Peerless of Amerika Inc., Q-dot Corp. (США). Большое количество технических решений по реализации способа подрезания и отгибки слоев основано на "насекании" лепестков при возвратно-поступательном движении инструмента в направлении к поверхности заготовки. Дискретное движение инструмента принципиально ограничивает производительность такого подхода. Методы с непрерывным движением инструмента базируются на использовании инструмента с криволинейной режущей кромкой, фасонными рабочими поверхностями и малыми углами заострения режущего клина. Такой инструмент обладает малой прочностью и не используется для получения оребрения на материалах прочнее меди. Существенным недостатком криволинейных режущих кромок и поверхностей инструмента является сложность его изготовления. Практически для всех выявленных разработок отсутствуют сведения о режимах обработки, геометрических параметрах рабочей части инструментов и методах его изготовления. Рассмотренные аналоги не позволяют однозначно выбирать геометрические параметры инструмента и режимы обработки для получения заданной геометрии теплообменной структуры. Каждый из рассмотренных способов и инструментов предназначен для получения узкого диапазона типоразмеров оребрения, что существенно снижает их практическую ценность.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана, независимо от зарубежных исследователей, предложен метод деформирующего резания, основанный также на принципе подрезания и отгибки поверхностных слоев материала.

Метод основывается на использовании инструмента, рабочая часть которого образована пересечением трех плоскостей, запатентован в России и патентуется за рубежом. Метод ДР имеет широкие технологические возможности и устраняет ряд недостатков, присущих зарубежным аналогам. Этот метод может быть эффективно использован для формирования ППС, как капиллярно-транспортного, так и тепло-массообменного назначения. Принципиальных ограничений на минимально получаемую ширину канавки между ребрами для метода ДР не существует.

Реализация метода ДР для получения ППС требует теоретических и экспериментальных исследований по установлению взаимосвязи технологических параметров процесса деформирующего резания с эксплуатационными характеристиками получаемых ППС, разработки технологических рекомендаций и оборудования для практической реализации предлагаемого метода обработки.

Первая глава заканчивается формулировкой цели и задач исследований.

Во второй главе проведен теоретический анализ формообразования пористых поверхностных структур методом ДР.

Метод ДР (рис. 1а) заключается в подрезании и отгибке слоев поверхности заготовки инструментом, у которого одна из кромок является режущей (1), а другая – деформирующей (2). Ребра, образующиеся на поверхности детали, являются, по сути, неотделившейся стружкой, имеющей прочную связь с основным материалом. Для обычного резания целью обработки является получение заданных размеров и качества поверхности детали. Для деформирующего резания меняется цель обработки, а именно – получение заданной формы, положения на детали, точности и качества подрезанного слоя.

На схеме (рис. 1б) показаны два положения I и II инструмента на смежных проходах, отстоящих друг от друга на величину подачи. Главная режущая кромка производит разрушение материала по линии ВС. Вспомогательная (деформирующая) кромка имеет большой отрицательный передний угол, что обеспечивает отсутствие на участке CD процесса резания. При работе инструмента слой материала BCDE подрезается по проекции главной режущей кромки ВС, деформируется передней поверхностью, а его конечное положение CB₁E₁F (сформированное ребро) определяется проекцией вспомогательной кромки.

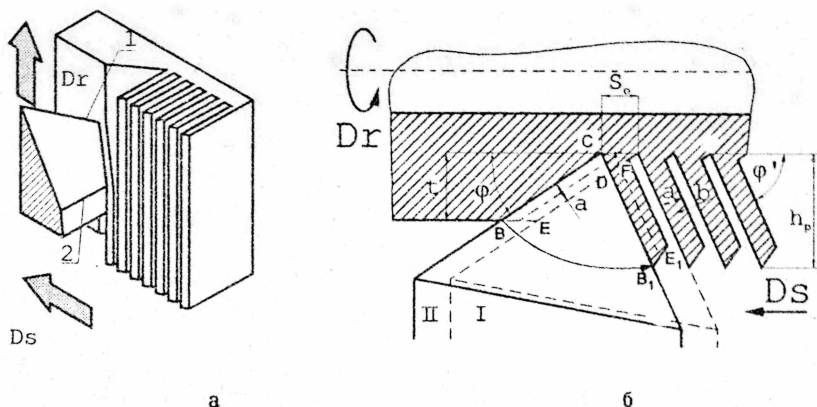


Рис.1. Процесс ДР (а) и схема формообразования ребер (б)

При получении оребренной структуры требуемыми параметрами являются шаг оребренной структуры S_0 , наклон ребер к основанию, высота ребра h_p , толщина ребра a . Для капиллярных структур важным параметром является ширина канавки b .

Требуемый шаг оребренной структуры обеспечивается соответствующим выбором величины подачи. Угол наклона ребер к основе однозначно определяется проекцией вспомогательной рабочей кромки на основную плоскость, т.е. вспомогательным углом инструмента в плане φ^1 . При задании шага и обеспечении требуемой толщины ребра, главный угол инструмента в плане φ должен составлять:

$$\varphi = \arcsin(a/(\xi \cdot S_0)),$$

где ξ – экспериментально определяемый коэффициент искажения профиля ребра.

Если задан шаг оребрения, наклон ребер, и необходимо обеспечить ширину канавок b , то главный угол инструмента в плане должен составлять:

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{S_0 \cdot \sin \varphi^1 - b}{S_0 \cdot \xi} \right).$$

Соотношение главного и вспомогательного углов в плане инструмента определяет возможность получения канавок чрезвычайно малой ширины. Например, при разнице между φ^1 и φ в два градуса

($\varphi^I = 43^\circ$, $\varphi = 41^\circ$) и подаче равной 1 мм, ширина канавки будет составлять 26 мкм. Таким образом, для метода ДР принципиальных ограничений на минимально получаемую ширину канавок не существует.

Для получения оребрения заданной высоты h_p при заданном шаге и угле наклона ребер φ^I , глубина резания t должна составлять:

$$t = \left(h_p \cdot \xi - \frac{S_0}{2} (1 - \sin\varphi) \cdot \operatorname{tg}\varphi - \frac{S_0}{2} \cos\varphi \cdot \sin\varphi^I \right) \cdot \frac{\sin\varphi}{\sin\varphi^I} + \frac{S_0}{2} \cdot (1 - \sin\varphi) \cdot \operatorname{tg}\varphi$$

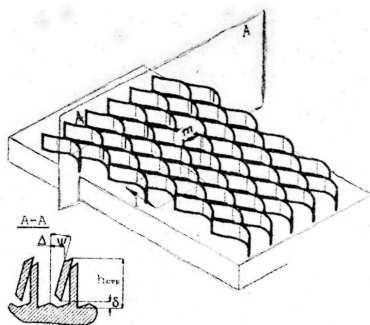
При получении тонких ребер существенное влияние оказывают радиус при вершине инструмента r и радиус округления главной режущей кромки ρ , поскольку они становятся соизмеримы с толщиной подрезаемого слоя. В работе выведены ограничения на эти радиусы:

$$r < \frac{S_0 \cdot (1 - \sin\varphi) \cdot (1 + \cos\varphi)}{2 \cdot (1 + \cos\varphi + \sin\varphi)}, \quad \rho < \frac{S_0 \cdot \sin\varphi \cdot (1 - \sin[\gamma]) \cdot \cos\lambda}{(1 - \sin\lambda)},$$

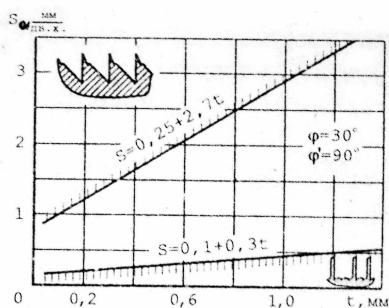
где, по данным В. Дегнера, $[\gamma]$ — предельный передний угол, при котором возможен процесс резания, равный $-60^\circ \dots -70^\circ$. Например, для получения ребер, толщиной 20 мкм, критичным является радиус при вершине r , который должен быть не больше 8 мкм.

В работе приведена методика расчета отклонения геометрических параметров оребрения от расчетных в зависимости от погрешностей установки резцов при многоинструментальной схеме обработки. Анализ показывает, что на толщину ребра, ширину канавки и высоту ребра в наибольшей степени оказывает погрешность установки вершин инструментов в радиальном направлении. Радиальное смещение вершин двух резцов отражается на величине разновысотности ребер с увеличением в 2,75 раза.

Методом ДР впервые получен новый тип ППС в виде совокупности частично оторванных от основы и изогнутых ребер (рис. 2а), образующих регулярную ячеистую структуру на поверхности детали. Предложен и обоснован механизм формообразования таких структур как граничный случай реализации метода ДР. При определенном назначении угловых параметров инструмента и технологических режимов обработки возможно достижение циклично повторяющихся разрывов ребер и получение ячеистых структур с количеством ячеек от 10 до 1000 на квадратный сантиметр поверхности и глубиной структуры от 0,2 до 4,0 мм. В отличие от оребренных, ячеистые структуры обладают проницаемостью во всех направлениях.



а



б

Рис. 2. Ячеистая структура (а) и область существования процесса получения ребер методом ДР (б)

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований процесса деформирующего резания.

Для проведения экспериментов в качестве обрабатываемого материала была выбрана медь М06. В качестве инструментального материала выбран твердый сплав ВК8, имеющий повышенную изгибную прочность. Силовые характеристики процесса фиксировались тензометрической станцией на основе универсального динамометра УДМ-600. Измерение геометрических характеристик получаемого оребрения проводилось на универсальном измерительном микроскопе УИМ-23 по поперечным срезам, полученными электроэрозионной вырезкой. Угловые параметры инструмента обеспечивали получение вертикального оребрения с шириной канавок равной толщине ребра, т.е. $\varphi = 30^\circ$, $\varphi^I = 90^\circ$. Для сравнения, эксперименты также проводились инструментом, имеющим угловые параметры в плане $\varphi = 45^\circ$ и $\varphi^I = 90^\circ$. Диапазон варьирования величины подачи инструмента составлял от 0,2 до 3,8 мм/дв.х., глубина внедрения инструмента изменялась от 0,16 до 2,44 мм.

Установлено, что технологическими параметрами, в наибольшей степени влияющими на осуществимость деформирующего резания, являются соотношение величины подачи инструмента и глубины его

внедрения, поэтому область получения оребренных структур строилась в именно в этих координатах. На рис. 2б представлены результаты экспериментов по определению границ области существования процесса ДР при формировании оребренных структур. Эта область имеет две границы. При переходе за нижнюю границу области существования происходит отделение формируемого ребра в виде стружки. Переход за верхнюю границу характеризуется невозможностью отгибки формируемого ребра в канавку, образованную на предыдущем проходе. В этом случае имеет место выдавливание подрезанного слоя на обрабатываемую поверхность с образованием гребнеобразных выдавок треугольного профиля. Границы области существования являются пределами применимости теоретических зависимостей, приведенных во второй главе.

Максимальный коэффициент оребрения достигается при технологических параметрах обработки, соответствующих нижней границе области существования. Для инструмента с главным углом инструмента в плане 30° максимальное увеличение площади поверхности при обработке меди составило $K_{op}^{max}=14,9$.

Для инструмента с углами в плане $\phi=45^\circ$ и $\phi^I=90^\circ$ и тем же положением передней поверхности область существования уже и смещена вниз в координатах $t-S$, при этом $K_{op}^{max}=17,0$. Аналитические выражения для границ области существования, полученные в результате аппроксимации для этого инструмента имеет вид: $S_{min}=0,1+0,17 \cdot t$, $S_{max}=0,76+1,2 \cdot t$.

В работе приведены графики зависимости коэффициента искажения профиля ребра ξ от параметров обработки, который уточняет ранее полученные расчетные зависимости. Установлено, что ξ изменяется в интервале $0,9 \dots 1,25$.

В области сочетаний глубины резания и подачи, соответствующих верхней границе области существования процесса ДР, составляющие силы резания стабилизируются, что характеризует переход от образования ребер к процессу выдавливания подрезанного материала на обрабатываемую поверхность. Это отличие от традиционного резания, для всех режимов ДР составляющая P_x направлена в направлении подачи. Это обусловлено специфическим положением передней поверхности инструмента для ДР, при котором подрезанный и отгибаемый слой материала оказывает силовое воздействие на переднюю поверхность и вспомогательную рабочую кромку с составляющей в

сторону подачи. Эту особенность необходимо учитывать как при использовании обычных станков, так и при проектировании специализированного оборудования. Скорость резания практически не влияет на величину составляющих силы ДР.

Проведено сравнение силового взаимодействия инструмента с заготовкой при образовании ребер и при отделении стружки. Установлено, что сила резания при обработке со снятием стружки ниже, чем при ДР на 18...20%, что объясняется как уменьшением площади контакта по передней поверхности, так и прекращением контактного взаимодействия подрезанного слоя с инструментом в области вспомогательной рабочей кромки инструмента.

Высота микронеровностей на противоположных боковых сторонах ребер неодинакова. Сторона ребра, находящаяся в процессе обработки в контакте с инструментом имеет шероховатость в пределах $R_a=1...3$ мкм, свободная сторона ребра имеет шероховатость $R_a=10...20$ мкм.

Определена область существования эффекта образования ячеистых структур, проведена оптимизация геометрии режущего клина по критерию максимальной площади области существования процесса получения ячеек в координатах $t-S_0$. Найденные оптимальные геометрические параметры инструмента для получения ячеистых структур на меди составили: $\varphi=35^\circ$, $\varphi^I=90^\circ$, $\lambda=60^\circ$, $\gamma=36^\circ$, $\alpha=\alpha^I=6^\circ$. Экспериментально подтвержден механизм образования ячеистых структур на основе исследования динамических процессов при образовании отдельной ячейки.

Оценочные стойкостные испытания процесса деформирующего резания при формировании оребрения проводились в производственных условиях на установке оребрения труб при скорости резания 2,25 м/с. В первоначальный период работы инструмента на режущей кромке наблюдались микровыкрашивания. По мере износа на главной и вспомогательной задних поверхностях появлялись риски износа, направленные по вектору скорости резания. С течением времени риски увеличиваются с образованием проточин, ослабляющих вершину до такой степени, что происходит ее скол с прекращением процесса ДР. Для оценки износа использовался как линейный, так и массовые показатели. Анализ кривых износа показал, что наиболее информативным для определения периода стойкости является длина проточины по главной задней поверхности. Зона катастрофического износа

наступает после 92 минут работы резца. Учитывая, что характер зависимости величины износа от времени имеет классический характер, за критерий стойкости выбран критерий оптимального износа, принятый в теории резания, а именно – перегиб кривой изменения длины проточкины по главной задней поверхности от времени работы. При выбранном критерии стойкости путь резания составляет 13,3 километра. До наступления катастрофического износа геометрические параметры оребрения изменяются незначительно, в то же время скол вершины резца приводит к прекращению процесса ДР с неизбежным браком на обрабатываемой заготовке.

В четвертой главе приведены результаты исследований эксплуатационных характеристик ППС, получаемых методом ДР.

Исследования по кипению и конденсации фреонов проводились совместно с ВНИИ Холодмаш и кафедрой "Инженерной теплофизики" МЭИ. Оребрение, полученное методом ДР имеет коэффициент теплоотдачи для хладонов (R12, R113) на 35...51% больше, чем оребрение, полученное накаткой, как при кипении, так и при конденсации. Такая интенсификация теплообмена объясняется не только увеличением площади поверхности, но и усилением действия капиллярных сил в межреберных канавках по сравнению с накатными трубами. Повышение тепловой эффективности труб позволяет снизить металлоемкость и габариты теплообменных устройств на величину равную повышению тепловой эффективности. Для унификации геометрии оребрения труб теплообменных аппаратов промышленных холодильных установок, работающих как в режиме конденсации, так и кипения, рекомендовано оребрение с шагом 0,6...0,85 мм, шириной межреберного зазора 0,3...0,4 мм, высотой ребра 2,2...2,3 мм.

Во ВНИИ Криогенмаш испытывались оребренные алюминиевые трубы при испарении азота. На этом предприятии актуальна задача повышения тепловой эффективности теплообменных аппаратов, поскольку в составе только одного аппарата разделения жидкого воздуха содержится 72 км оребренных труб. Наилучшие результаты показало оребрение с межреберным зазором 0,24 мм и высотой 1,66 мм. Для этого оребрения плотность снимаемого теплового потока выше в 3,5...5,0 раз по сравнению с накатным оребрением и в 13...18 раз по сравнению с гладкой трубой. Для оптимального оребрения коэффициент теплоотдачи составил 13,75 кВт/м²·К. Для всех образцов с межреберным зазором меньше 0,65 мм наблюдается существенное по-

вышение коэффициента теплоотдачи, обусловленное целевым эффектом парообразования, когда межреберный зазор меньше отрывного диаметра парового пузыря. В этом случае паровой пузырь растет в деформированном состоянии и подвод тепла осуществляется непосредственно от боковых сторон ребра к стенкам парового пузыря, а не только через его ножку.

Испытания образцов с оребрением, полученным методом ДР показали существенное преимущество их капиллярно-транспортных характеристик по сравнению с лучшими ППС на основе спеченных порошков и волокон. Для микроканального оребрения с шириной канавок 20 мкм высота капиллярного поднятия (по воде) составила 0,38 м. Для образцов с большими межреберными зазорами достигнут обобщенный показатель капиллярно-транспортных характеристик (произведение высоты капиллярного поднятия на коэффициент жидкостной проницаемости), равный $54,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3$. Проведенный эксперимент и сравнение с литературными данными позволяют сделать вывод о том, что конструкционные ППС, получаемые ДР, по высоте капиллярного поднятия не уступают лучшим волокнистым и порошковым КС, а по параметру капиллярного насоса превосходят последние в 5...10 раз. Данные испытаний позволяют рекомендовать эти структуры в качестве фитилей тепловых труб.

В пятой главе приведены сведения о практическом использовании метода ДР и изделий на его основе. Промышленная реализация метода ДР потребовала проектирования и изготовления специализированной установки оребрения труб. В установке для оребрения длинномерных труб реализована кинематическая схема с перемещающейся вдоль оси заготовкой и тремя инструментами, вращающимися вокруг трубы. Производительность установки составляет 3,5...4,5 погонных метров трубы в минуту в зависимости от шага оребрения, который может варьироваться в интервале 0,5...1,5 мм при высоте оребрения до 3 мм. Процесс оребрения производится без использования смазочно-охлаждающих жидкостей.

Разработанная установка передана заводу "Химмаш" (г. Снежное, Украина). На том же заводе был реализован метод ДР на универсальном токарном станке для оребрения труб из медно-никелевого сплава МНЖ5-1. Ранее трубы из этого сплава не оребрялись.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса ДР, а также теплофизические исследования характеристик

получаемых структур позволили предложить для промышленного использования ряд изделий тепломассообменного назначения.

Оребренные по методу ДР трубы внедрены для изготовления испарителей и конденсаторов холодильных установок при производстве линий фасования безалкогольных напитков, изготавливаемых АО "Орелпродмаш".

АНПО "Одессхолод" (Украина) использовало оребренные трубы при изготовлении установки водоохлаждающей АВ-30. Это позволило сократить количество медных труб в конденсаторе на 28% при улучшении его эксплуатационных характеристик, по сравнению с конденсатором на основе труб, оребренных накаткой.

По заказу НТП "Техинформавтоматика" (г.Москва) была разработана конструкция, изготовлены и переданы 20 медных охлаждаемых зеркал технологических лазеров, системы охлаждения которых базировались на микроканальных оребренных структурах.

АО "Алплаз" (г.Москва) использует испарители-пароперегреватели, с поверхностями обработанными методом ДР при серийном выпуске плазменных установок. В результате мощность горелки была увеличена на 30%, повышена стабильность иницирования плазменной струи, устранены случайные выбросы плазмообразующей жидкости.

Суммарный объем внедрения на указанных предприятиях составил 45 млн. рублей.

Общие выводы

1. Обоснована целесообразность и перспективность использования метода деформирующего резания для изготовления пористых поверхностных структур тепломассообменного и капиллярно-транспортного назначения.

2. Установлены взаимосвязи технологических параметров процесса деформирующего резания с получаемыми геометрическими характеристиками ППС; предложены расчетные зависимости для выбора основных технологических факторов, позволяющие управлять процессом ДР при получении оребренных структур с заданными геометрическими характеристиками.

3. Установлена область сочетаний технологических параметров процесса ДР, позволяющие получать ППС в виде оребрения. Подтверждена правомочность расчетных формул, определены границы их

применимости при обработке меди. Установлены технологические ограничения метода ДР при получении микроканального оребрения, а также отклонения профиля оребрения от расчетного в зависимости от технологических параметров обработки.

4. Впервые выявлен и описан новый тип ППС в виде совокупности частично оторванных от основы и изогнутых ребер, образующих регулярную ячеистую структуру на поверхности детали. Предложен, обоснован и исследован механизм формообразования ячеистых структур как граничный случай реализации метода ДР. Определены геометрические параметры инструмента для получения ячеистых структур на меди, найдены границы области существования процесса образования ячеек, установлена зависимость их размеров от режимов обработки.

5. Проведенный анализ схем многоинструментальной обработки методом ДР показал, что на геометрические параметры получаемого оребрения в равной степени влияют как погрешности установки рассматриваемого инструмента, так и погрешности установки инструмента, формировавшего предыдущие ребро. Разработана методика определения погрешностей геометрических параметров получаемого оребрения при многоинструментальной схеме реализации ДР.

6. Установлены особенности силового взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали при ДР. При деформирующем резании наблюдается нетрадиционное отрицательное значение составляющей силы R_x , что требует учета такой особенности при использовании метода ДР и проектировании специализированного оборудования. По сравнению с формированием стружки, процесс оребрения при прочих равных условиях имеет большую на 18...20% энергоемкость, обусловленную дополнительным контактным взаимодействием образующегося ребра с инструментом.

7. По результатам теплофизических испытаний доказана эффективность использования метода ДР для изготовления конденсационно-испарительных поверхностей теплообмена.

Для ППС, полученных методом ДР, по сравнению с накатным оребрением, достигнуто повышение плотности снимаемого теплового потока при испарении азота в 3,5...5,0 раз, коэффициента теплоотдачи при кипении и конденсации хладонов на 35...51%.

Установлены зависимости между эксплуатационными характеристиками ППС капиллярно-транспортного назначения и технологически-

ми параметрами их получения методом ДР. Получаемые ППС по высоте капиллярного поднятия не уступают лучшим волокнистым и порошковым КС, а по параметру капиллярного насоса превосходят последние в 5...10 раз.

8. Разработана специализированная многоинструментальная установка для получения оребрения на длинномерных медных трубах методом ДР с производительностью 3,5...4,5 погонных метров оребренной трубы в минуту.

9. Проведенная промышленная апробация метода ДР и изготовленных на его основе изделий теплообменного назначения на пяти промышленных предприятиях подтвердила технический эффект, заключающийся в существенном повышении эксплуатационных характеристик изделий, снижении их материалоемкости и габаритов. Суммарный объем внедрения составил более 45 млн. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1) Установка оребрения труб по методу деформационного резания / В.Н.Подураев Н.Н.Зубков О.В.Кононов и др. // Машины, приборы, стенды: Каталог МГТУ. - 1992. - №13. - С.37-38.

2) Зубков Н.Н., Овчинников А.И. Кононов О.В. Изготовление теплообменных поверхностей нового класса деформирующим резанием // Вестник МГТУ. - 1993. - №4. - С.79-81.

3) Кононов О.В. Деформирующее резание - новая технология получения развитых поверхностей // Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем и технологических процессов: Тезисы докладов всероссийской научно-технической конференции. - Калуга, 1994. - С.11.

4) Деформирующее резание - новый метод создания управляемой макрогеометрии поверхности / Н.Н.Зубков, А.И.Овчинников, О.В.Кононов и др. // 165 лет МГТУ им.Н.Э.Баумана: Тезисы докладов научно-техн. конференции. - М., 1995. - Ч.1. - С.43.

5) Разработка научных основ новых методов эффективной механической обработки и эксплуатации инструментов: Отчет по теме ГБЗЗ-1/95 / МГТУ, НИИ КМИП; Руководитель Древаль А.Е.; Исполн.: Н.Н.Зубков, Н.Ф.Зеленцова, О.В.Кононов и др. - ГР N01960009309; Инв. N02960006564. - М., 1995. - 118 с.