

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

На правах рукописи

ФИАЛКО Наталья Михайловна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ
ПРОГРЕССИВНЫХ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Специальности: 01.04.14 - Теплофизика и молекулярная физика
05.16.01 - Металловедение и термическая
обработка металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

ФИАЛКО

Киев - 1994



Диссертация является рукописью
Работа выполнена в Институте технической теплофизики
Академии Наук Украины

Официальные опоненты:
доктор технических наук,
профессор

НИКИТЕНКО Н. И.

доктор технических наук,
профессор

КОЛЕСНИЧЕНКО А. Ф.

доктор технических наук,
профессор

КУНИЦКИЙ Ю. А.

Ведущая организация - ЦКБ "Арсенал"

Защита состоится "21" июня 1994 г. в 14 часов
на заседании специализированного совета Д 016.43.01 в Институте
технической теплофизики АН Украины (252057, Киев, ул. Желябова, 2а)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТТФ АН Украины

Автореферат разослан "20" мая 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук

Костенко Н. В.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современных условиях технический прогресс в значительной мере определяется совокупностью используемых в промышленности технологий, среди которых в последний период все более важное значение приобретают ресурсосберегающие технологии, широко применяемые в различных отраслях техники - машиностроении, радиоэлектронике, приборостроении и пр. Среди таких технологий особое место занимают прогрессивные технологии обработки материалов типа упрочнения деталей лучом лазера, газотермического нанесения покрытий, автовакуумного плакирования, поверхностного монтажа электронных компонентов и т.п. Потребности развития и совершенствования этих технологий обуславливают необходимость их всестороннего, углубленного анализа, базирующегося как на экспериментальных исследованиях, так и на применении современных методов математического моделирования.

Одна из характерных особенностей, общая для всех указанных технологий, состоит в том, что ведущая роль в них принадлежит тепловым процессам. Последние оказываются первопричиной различных сопутствующих тепловым физико-химическим явлениям, таких как структурные и объемные превращения в материалах, изменение термонапряженного состояния изделий и т.д. Указанные технологии, как объект теплофизических исследований, представляют собой комплекс сложных задач переноса, характеризующихся во многих ситуациях наличием фазовых и структурных превращений, высокими уровнями температур и скоростей их изменения, физической неоднородностью сред, сложностью конфигурации исследуемых объектов и пр.

Имеющиеся в литературе публикации, посвященные теплофизическим исследованиям рассматриваемых технологических процессов, далеко не исчерпывают растущие потребности технологической практики. Так, для сравнительно новых технологий (например, автовакуумного плакирования, поверхностного монтажа электронных компонентов и пр.) такие исследования либо практически отсутствуют, либо весьма малочисленны. Но и для тех технологий, теплофизические аспекты которых считаются в настоящее время в той или иной мере разработанными (упрочнение лучом лазера, газотермическое напыление и т.д.), существует проблема создания основ теплофизики этих технологий применительно к усложненным физическим ситуациям, новым объектам приложения, различным модификациям известных технологий и пр.

Цель работы. Исследование тепловых и сопутствующих им явлений при реализации прогрессивных ресурсосберегающих технологий обработки материалов (типа газотермического напыления, упрочнения лучом лазера, автовакуумного плакирования, поверхностного монтажа электронных компонентов и т.п.) и получение на этой основе информации, необходимой для совершенствования существующих технологических процессов, осуществления новых технических решений, проектирования эффективных технологий и управления ими.

Задачи исследования.

1. Разработка специального класса методов, эффективных специализированных методик и соответствующего программного обеспечения, ориентированных на исследование процессов теплопереноса при реализации рассматриваемых технологий обработки материалов.

2. Установление для группы изучаемых технологических процессов общих физических закономерностей, связанных с проявлением эффектов регионального влияния условий однозначности.

3. Исследование на этой основе (пункты 1 и 2) теплофизических аспектов рассматриваемых технологий с целью обеспечения их рациональной организации и получения эффективного окончательного технологического результата. При этом для каждой из указанных технологий данные задачи конкретизируются следующим образом:

а) для автовакуумного плакирования - разработка основных положений теплофизики этой технологии и формулировка на данной базе рекомендаций по эффективной организации технологических процессов применительно к условиям производства крупногабаритных деталей пар трения типа изготавливаемых на ПО "Уралмаш";

б) для газотермического напыления - исследование закономерностей протекания тепловых и связанных с ними явлений в процессе формирования газотермических покрытий на основе; при этом для ситуации термического взаимодействия одиночной частицы с основой - изучение особенностей взаимодействия на стадии импульсного давления, анализ температурных эффектов, обусловленных кристаллизацией расплавленной частицы и т.д.; для ситуации термического взаимодействия с основой интегральной совокупности частиц (покрытия в целом) - изучение закономерностей процессов теплопереноса в системах "покрытие в целом - основа" применительно к напылению двух классов покрытий, а именно, покрытий из плакированных композиционных порошков, содержащих твердые смазки, и металлополимерных покрытий;

в) для лазерной закалки - исследование тепловых и сопутствующих

ших им процессов (структурных превращений в материале и термонапряженных состояний) применительно к условиям упрочнения режущего инструмента; определение на этой основе пороговых значений технологических параметров, разграничивающих области эффективной и нерациональной организации технологических процессов;

г) для поверхностного монтажа электронных компонентов - разработка общих подходов к математическому моделированию теплофизических процессов при двух вариантах реализации данной технологии, а именно, с использованием комбинированного нагрева (резистивного и инфракрасного) и нагрева струей газа;

д) для сварки - разработка основных положений методики и исследование тепловых явлений применительно к классу сварных оболочечных конструкций, состоящих из двух произвольных конических оболочек вращения, включая их предельные формы (цилиндрические оболочки, круглые и кольцевые пластины);

е) для объемной закалки в жидких средах - установление закономерностей протекания процессов теплопереноса в условиях интенсификации теплообмена в области мартенситных превращений и при закалке в жидких средах под избыточным регулируемым давлением; определение охлаждающих свойств различных новых закалочных сред.

Достоверность полученных результатов определяется сопоставлением данных вычислительных и натуральных экспериментов, решением большого количества тестовых задач применительно к каждой из рассматриваемых технологий, проведением контрольных расчетов с использованием различных методов решения одной и той же задачи, индуктивными оценками сходимости и точности используемых математических методов, а также фактической высокой эффективностью применения в технологической практике предложенных в работе рекомендаций.

Научная новизна.

1. Предложен новый класс методов так называемых комбинированных итерационных методов (КИМ), адаптированных к решению комплекса теплофизических задач, которые характерны для рассматриваемых технологий. Разработана общая методика построения конкретных модификаций данных методов. Установлена область эффективного применения КИМ и их достоинства в сравнении с классическими разностными схемами.

2. Разработаны методические основы построения положений о региональном влиянии, открывающие возможности охвата основных проявлений эффектов регионального влияния для всех условий однозначности. Предложена общая методика использования эффектов регионального

влияния и на ее основе для групп рассматриваемых технологий выполнены исследования тепловых явлений в контексте проявления данных эффектов.

3. Для изучаемых технологических процессов выполнены следующие разработки:

а) созданы основы теплофизики технологического процесса автовакуумного плакирования; при этом получены новые результаты в части рациональной организации данной технологии путем применения простейших опосредованных способов термического воздействия на процесс формирования плакирующего слоя и управления этим процессом за счет реализации требуемого теплового состояния конструкции в целом;

б) разработан ряд новых положений теплофизики газотермического напыления покрытий; при этом в плане анализа термического взаимодействия одиночной частицы с основой впервые получено решение контактной задачи теплопереноса на базе гиперболического уравнения теплопроводности с учетом температурной зависимости времен релаксации и выполнена оценка релаксационных эффектов для различных широко используемых сочетаний материалов покрытия и основы; проведены также систематические количественные оценки температурных эффектов, обусловленных кристаллизацией расплавленной частицы, для всевозможных практически важных ситуаций напыления; в части развития подхода, касающегося изучения термического взаимодействия с основой интегральной совокупности частиц, получены оригинальные данные для условий напыления двух классов газотермических покрытий - композиционных покрытий, содержащих графит, и металлополимерных покрытий;

в) выполнено комплексное исследование тепловых явлений и сопутствующих им эффектов (таких как структурные превращения в материале, термонапряженное состояние и механические свойства зоны нагрева) при упрочнении режущего инструмента лучом лазера для широкого практического диапазона изменения геометрических, теплофизических и технологических параметров; сформулирована постановка задачи и найдено ее решение, касающееся определения пороговых значений технологических параметров применительно к возможным отрицательным критическим ситуациям;

г) разработаны основы математического моделирования теплофизических процессов для технологии поверхностного монтажа электронных компонентов применительно к различным способам ее реализации - при комбинированном нагреве (резистивном и инфракрасном) и нагреве

струей газа; при этом предложена инженерная методика регионального моделирования теплового состояния критических компонентов поверхностного монтажа; получены новые результаты о влиянии на температурные режимы печатных узлов всевозможных факторов - плотности монтажа, типов монтируемых компонентов монтажа, условий их прижима к печатной плате, различных схем нагрева струей газа и пр.;

д) предложен общий методический подход к расчету температурных режимов широкого класса сварных конструкций, включающих в себя пары элементов различной конфигурации - конические и цилиндрические оболочки, круговые и кольцевые пластины - при разном их сочетании; впервые проведен систематический сравнительный анализ теплового состояния конструкций данного класса и установлены области применимости различных моделей теплового контакта между свариваемыми деталями;

е) изучен ряд теплофизических аспектов технологии закалки деталей в жидких средах при интенсификации теплопереноса в области мартенситных превращений и регулировании давления закалочной жидкости; при этом установлены закономерности влияния на процесс теплопереноса различного рода нелинейностей; выполнен сравнительный анализ температурных режимов закаливаемых деталей разной формы, представляющих собой характерные элементы технических устройств; получены данные о закалочных свойствах перспективных охлаждающих сред - водных растворов солей и полимеров.

Практическая значимость. Выполненный комплекс исследований непосредственно ориентирован на широкое внедрение в технологическую практику. Рассматриваемая в работе проблематика и постановка соответствующих задач определялась, главным образом, прямыми заказами промышленных предприятий и научно-исследовательских организаций. На основе предложенных методических разработок, результатов теплофизических исследований и научно-технических решений внедрен ряд оригинальных базовых технологических процессов и соответствующего оборудования для их реализации. Результаты выполненных разработок нашли следующие внедрения: а) для автовакуумного плакирования - на ПО "Уралмаш"; б) для газотермического напыления - на Линском экскаватороремонтном заводе, Черниговском ПО "Химволокно", ПО "Киевтрактородеталь", Иванофранковском ПУ "Оргсинтез"; в) для упрочнения деталей лучом лазера - на ПО "Большевик", шахте "Самарская" ПО "Павлоградуголь", в Киевском политехническом институте; г) для поверхностного монтажа электронных компонентов - на НПО "Сатурн", заводе "Радиоизмеритель", в НИИ "Пульсар"; д) для сварки

- на ПО "Уралмаш", институте электросварки АН Украины им. Е. О. Патона; е) для закалки в жидких средах - на ПО "Ижорский завод", ПО "Атоммаш" и пр.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

международных конференциях - по высокотемпературным запыленным струям (Новосибирск, 1988 г.); по тепло- и массообмену в технологии и эксплуатации электронных и микросистем (Минск, 1989 г.); по плазменным струям в технологиях обработки материалов (Фрунзе, 1990 г.);

всесоюзных конференциях - по закалочным средам (Волгоград, 1982 г.); по теплофизике и гидродинамике процессов кипения и конденсации (Рига, 1982 г.); по применению лазеров в технологии и системах обработки информации (Ленинград, 1984 г.); по проблемам повышения износостойкости деталей, обрабатываемых концентрированными потоками энергии (Звенигород, 1985 г.); по лазерным технологиям в приборостроении (Рига, 1985 г.); по лазерному и оптическому приборостроению (Минск, 1985 г.); по газотермическому напылению и плазменной наплавке (Тула, 1989 г.); по дифференциальным уравнениям (Дрогобыч, 1989 г.); по математическим методам и САПР в сварочном производстве (Свердловск, 1990 г.); по газотермическому нанесению покрытий (Дмитров, 1992 г.);

республиканских конференциях - "Теплопроводность и диффузия в технологических процессах" (Рига, 1976 г.); по методам решения краевых задач (Рига, 1978 г.); по теплофизике термической обработки (Киев, 1979, 1981, 1983, 1986, 1987 г.г.); по динамике технологических процессов в энергетике (Киев, 1984, 1986, 1988 г.г.); по прикладным методам расчета физических полей (Казивели, 1984 г.); по применению лазеров в науке и технике (Омск, 1984 г.); по созданию и использованию лазерной техники и технологии (Киев, 1985 г.); по проблемам наплавки деталей в машиностроении (Свердловск, 1987 г.); по высокопроизводительному металлорежущему инструменту (Киев, 1987 г.); по применению методов математического моделирования в научных исследованиях (Донецк, 1988 г.); по динамической голографии и нелинейной оптике (Славское, 1988 г.); по лучевой обработке композиционных материалов (Тернополь, 1990 г.) и др.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 130 научных работ. Основное содержание диссертации изложено в 45 публикациях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 468 источников. Диссертация изложена на 323 страницах машинописного текста, содержит 187 рис и 34 табл.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации. Сформулированы цели и задачи работы, кратко изложены ее основные результаты, приводится информация о практической значимости и внедрении выполненных разработок.

Первая глава диссертации посвящена изложению основ построения развиваемого в настоящей работе специального класса сеточных методов - комбинированных итерационных методов. Основная идея методов состоит, с одной стороны, в объединении важнейших достоинств явных и неявных схем, с другой - в использовании физического эффекта регионального влияния, наблюдаемого в устойчивых процессах переноса, который отражен в приводимом ниже положении о пространственно-временном региональном влиянии местных значений обобщенных потенциалов. В качестве характерных особенностей данных методов отмечаются следующие: (1) комбинирование при построении методов элементов явных и неявных разностных схем; (2) применение процедур последовательного переопределения искомой функции по типу одношаговых итерационных схем; (3) наличие в разностных схемах только алгебраических уравнений, разрешаемых явно; (4) абсолютная устойчивость методов; (5) сходимость решения по завершении итерационного процесса к данным соответствующей классической неявной схемы.

Что касается указанного выше объединения в КИМ достоинств явных и неявных схем, то эти методы обладают алгоритмической простотой, свойственной явным схемам, и абсолютной устойчивостью, характерной для неявных схем. Алгоритмическая простота КИМ, выражающаяся в простоте записи разностных схем и легкости их программирования на ЭВМ, обусловлена тем обстоятельством, что они (КИМ) относятся к классу явных методов. Здесь отсутствует необходимость в решении систем алгебраических уравнений, свойственная неявным схемам. Важнейшая же характеристика схем - их безусловная устойчивость - достигается для КИМ, в конечном итоге, за счет итерационного процесса.

Относительно второго момента, лежащего в основе идеи построения КИМ, - положения о региональном влиянии местных значений обоб-

щенных потенциалов. то оно формулируется следующим образом. В устойчивых нестационарных процессах переноса, протекающих в сплошных средах, характер распределения и уровни местных значений обобщенных потенциалов U (где $U=U(\eta)$, $\eta \in \omega_1$ - подобласть, принадлежащая рассматриваемой области ω , $\omega_1 \in \omega$) по истечении достаточно малых интервалов времени Δt^* оказывают существенное влияние на протекание процесса лишь в некоторой ограниченной зоне, непосредственно прилегающей к подобласти ω_1 ; за пределами этой зоны их воздействие пренебрежимо мало. В плане сформулированного положения явным, неявным схемам и комбинированным итерационным методам может быть дана следующая интерпретация. Классическая явная схема может трактоваться как схема, базирующаяся на учете явления регионального влияния локальных значений искомой функции. Действительно, согласно основной идее построения явной схемы искомая функция U^* в i -той узловой точке последующего временного слоя непосредственно связывается с ее значением на предыдущем слое только в смежных с ней узловых точках, например, в случае одномерной задачи в i -том, $(i+1)$ -ом и $(i-1)$ -ом узлах. Однако такое нахождение величины U^* правомерно, как известно, лишь в тех ситуациях, когда временной шаг разбивки Δt достаточно мал, так что шаги пространственной сетки h_p не превышают размеров зоны регионального влияния значений искомой функции в i -той точке. Это требование формально выражается известными соотношениями, определяющими условия устойчивости разностных схем.

Что же касается неявной схемы, то эффекты регионального влияния здесь не учитываются; значения искомой функции во всех узловых точках последующего и предыдущего временных слоев являются в этой ситуации взаимосвязанными. Формально это выражается в необходимости решения системы алгебраических уравнений.

Очевидно, в определенных ситуациях ввиду эффектов регионального влияния классическая неявная схема отвечает избыточному увязыванию искомых функций предыдущего и последующего временных слоев. В комбинированных итерационных методах такая избыточная взаимосвязь отсутствует; здесь, благодаря итерационному процессу, реализуется лишь необходимая степень указанной взаимосвязи, которая диктуется эффектами региональности.

Сущность основных моментов реализации КИМ схематически может быть представлена следующим образом. На нулевой итерации расчеты проводятся с использованием любой из явных разностных схем. На всех последующих итерациях вычисления ведутся уже на основе тех

или иных неявных сеточных уравнений. Причем, что особенно важно подчеркнуть, последние решаются явным образом, поскольку значения искомой функции на последующем временном шаге являются известными в результате расчетов предшествующей итерации.

В целях иллюстрации специфики реализации КИМ рассмотрим особенности построения одной из модификаций данных методов, а именно: КИМ на основе шахматной схемы с шахматным переопределением без чередования "квазиявных" и "квази неявных" точек. Приведем в качестве примера сеточные уравнения для нестационарной нелинейной одномерной задачи теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = C_v \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

$$\theta|_{x=0} = \theta_1(\tau), \quad \theta|_{x=1} = \theta_2(\tau), \quad \theta|_{\tau=0} = 1. \quad (2)$$

Здесь $\theta = t/t_{\max}$.

Аппроксимация уравнения (1) на сетке

$$x_i = (i-1) \cdot h, \quad i=1, 2, 3, \dots, I; \quad (I-1) \cdot h=1;$$

$$\tau_m = (m-1) \cdot \Delta \tau, \quad m=1, 2, 3, \dots, M; \quad (M-1) \cdot \Delta \tau = \tau_{\text{кон}}$$

для нулевой итерации отвечает шахматной разностной схеме.

На каждой из последующих итераций реализация КИМ с шахматным переопределением искомой функции осуществляется в два этапа. Вначале переопределение производится для всех $i=2n$ или $2n+1$, т.е. на подмножестве узлов сетки, называемых "квазиявными", далее - для всех $i=2n+1$ или $2n$, что отвечает подмножеству узлов сетки, называемых "квази неявными". При этом аппроксимация оператора E , представляющего собой левую часть уравнения (1), осуществляется для первого этапа на предшествующей итерации, для второго - на последующей. Соответственно этому разностный аналог уравнения (1) представим в виде:

для подмножества "квазиявных" точек

$$\theta_{1,m+1}^k = A_1 \theta_{1,m}^k + A_2 \theta_{1,m+1}^{k-1} + A_3 \theta_{1+1,m+1}^{k-1} + A_4 \theta_{1-1,m+1}^{k-1}. \quad (3)$$

для подмножества "квази неявных" точек

$$\theta_{1,m+1}^k = B_1 \theta_{1,m}^k + B_2 \theta_{1+1,m+1}^k + B_3 \theta_{1-1,m+1}^k. \quad (4)$$

где $A_1=1$; $A_2 = -(\bar{F}_{O_{1+1,m+1}}^{k-1} + \bar{F}_{O_{1,m+1}}^{k-1})$; $A_3 = \bar{F}_{O_{1+1,m+1}}^{k-1}$; $A_4 = \bar{F}_{O_{1,m+1}}^{k-1}$;

$$\bar{F}_{O_{1,m+1}}^{k-1} = \frac{\Delta \tau \cdot (\Lambda_{1,m+1}^{k-1} + \Lambda_{1-1,m+1}^{k-1})}{C_{v_{1,m+1}}^{k-1} + C_{v_{1,m}}}, \quad \bar{F}_{O_{1+1,m+1}}^{k-1} = \frac{\Delta \tau \cdot (\Lambda_{1+1,m+1}^{k-1} + \Lambda_{1,m+1}^{k-1})}{C_{v_{1,m+1}}^{k-1} + C_{v_{1,m}}}$$

$$B_1 = \frac{1}{G}; B_2 = \frac{\bar{F}O_{1+1, m+1}^k}{G}; B_3 = \frac{\bar{F}O_{1, m+1}^k}{G}; G = 1 + \bar{F}O_{1+1, m+1}^k + \bar{F}O_{1, m+1}^k;$$

$$\bar{F}O_{1+1, m+1}^k = \frac{\Delta FO \cdot (\Lambda_{1+1, m+1}^k + \Lambda_{1, m+1}^k)}{C_v^k_{1, m+1} + C_v^k_{1, m}}; \bar{F}O_{1, m+1}^k = \frac{\Delta FO \cdot (\Lambda_{1, m+1}^k + \Lambda_{1-1, m+1}^k)}{C_v^k_{1, m+1} + C_v^k_{1, m}}$$

Здесь надстрочный индекс отвечает номеру итерации.

Большое внимание в работе уделяется исследованию особенностей КИМ и сопоставлению их с классическими разностными схемами. Анализ показал, что область наиболее эффективного использования КИМ занимает некоторое промежуточное положение по отношению к соответствующим областям для классической явной и неявной схемы. А именно, если применение классической явной схемы является целесообразным при исследовании высокоинтенсивных процессов, а классической неявной схемы - процессов малой интенсивности, то КИМ наиболее рационально использовать в промежуточной области, т.е. для процессов достаточно высокой, но не чрезмерной интенсивности. При этом в плане сравнения с неявными схемами эффективность КИМ существенно возрастает при решении нелинейных задач, поскольку в этом случае в отличие от неявных схем итерационный учет нелинейности фактически совпадает с собственно итерационным процессом решения задачи и ввиду этого не оказывается дополнительным элементом решения. К тому же одной из важнейших особенностей КИМ, как и чисто неявной схемы является их монотонность, что наряду с отмеченным выше обуславливает рациональность применения КИМ при реализации решения именно нелинейных задач.

В контексте сопоставления КИМ с другими разностными схемами приведем характерные результаты исследований, касающиеся индуктивных оценок точности различных схем - явной, чисто неявной, шахматной и КИМ на основе шахматной схемы с шахматным переопределением без чередования "квазиявных" и "квази-явных" точек (см. рис.1). Здесь в качестве иллюстративного примера представлены данные решения простейшей тестовой нестационарной линейной задачи теплопроводности для стержня длиной 1, с постоянной начальной температурой Θ_0 , на одной из границ которого задаются граничные условия II рода при неизменной во времени плотности подводимого теплового потока, другая является адиабатичной. Расчетная сетка для всех рассматриваемых схем принималась одинаковой. Как видно, наименьшие величины погрешностей численных решений $\Delta\Theta$ обеспечиваются в случае чисто

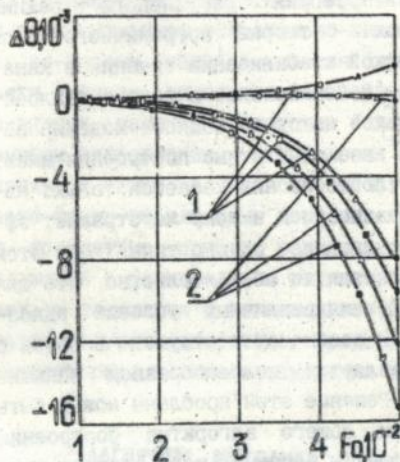


Рис. 1. Зависимость $\Delta\theta=f(Fo)$ в точках $x=1,0$ (линии 1) и $x=0,6$ (линии 2) при реализации различных разностных схем на одинаковых расчетных сетках, отвечающих $\Delta Fo=0,02$:
 —○— — чисто неявная схема;
 —×— — КИМ; —△— — шахматная схема; —□— — классическая явная схема.

неявной схемы и КИМ (данные, отвечающие этим схемам совпадают), заметно большие — при использовании шахматной схемы и наибольшие — для классической явной схемы ($\Delta\theta = (\theta_T - \theta_C) / \theta_{max}$, где θ_T, θ_{max} — безразмерные текущая и максимальная температуры, отвечающие точному решению тестовой задачи, θ_C — безразмерная текущая температура, соответствующая численному решению).

Во второй главе приводится материал, касающийся закономерностей проявления и использования эффектов регионального влияния условий однозначности (УО). Сущность явления регионального влияния (или локализации влияния) УО состоит в том, что влияние на процесс того или иного УО либо отдельных его особенностей в определенных условиях имеет тенденцию к асимптотическому убыванию по мере удаления от области задания данного УО и практически ограничивается некоторой зоной (регионом), так что за ее пределами этим влиянием можно пренебречь. Данное явление может наблюдаться во всевозможных устойчивых многомерных процессах переноса, протекающих в сплошных средах. Как показывает анализ, целый ряд теоретических построений базируется на отмеченном явлении регионального влияния. Характерными примерами таких построений могут служить: в теплофизике тех-

нологических процессов - принцип местного влияния источников теплоты Н. Н. Рыкалина, в теории теплопроводности - принцип стабильности теплового потока А. И. Вейника, теория регулярного режима Г. М. Кондратьева, в гидромеханике - теория пограничного слоя Л. Прандтля, понятие гидродинамической стабилизации течения в каналах, в теории упругости - принцип В. Сен-Венана, в теории теплообмена в радиоселективных устройствах - метод поэтапного моделирования Г. М. Дульнева и т. д. Однако, все отмеченные построения имеют лишь частный характер, поскольку любое из них касается только какого-либо одного из условий однозначности и к тому же отражает эффект регионального влияния лишь какого-либо одного типа. При этом существенным недостатком здесь является то обстоятельство, что для целого ряда типов регионального влияния различных условий однозначности соответствующие построения вообще отсутствуют. В связи с таким состоянием вопроса представляется целесообразной попытка устранения отмеченного пробела. Решение этой проблемы может быть реализовано посредством разработки общего алгоритма построения различных положений, отражающих эффекты регионального влияния применительно к любому из условий однозначности и к тому же для каждого из типов регионального влияния. Иначе говоря, общая идея здесь состоит в создании алгоритма, при помощи которого может быть сформулирована система положений, описывающих закономерности проявления эффектов регионального влияния во всевозможных физических ситуациях. Очевидно, в рамках этой системы в качестве ее частных положений могут рассматриваться различные известные в литературе принципы и утверждения, основывающиеся на эффектах регионального влияния. Сущность предлагаемого алгоритма может быть выражена следующим образом. На первом этапе для каждого условия однозначности анализируются различные принципиально возможные варианты ограниченности его области задания относительно всей исследуемой области. На втором этапе для каждого из вариантов ограниченности области задания условия однозначности проводится анализ возможных проявлений эффектов регионального влияния и соответственно составляется перечень различных типов регионального влияния. Третий, завершающий, этап состоит в том, что на основе проведенного анализа для каждого из указанных типов регионального влияния формулируется отдельное положение о региональном влиянии данного условия однозначности. Схема построения положения о региональном влиянии для многомерных процессов переноса представляет собой логическую конструкцию, содержащую информацию о необходимых и достаточных услови-

ях реализации конкретного типа регионального влияния данного условия однозначности и констатацию факта осуществления этого типа регионального влияния. Что касается необходимых и достаточных условий реализации конкретного эффекта регионального влияния, то они во всех ситуациях обязательно включают в себя следующие два момента: во-первых, наличие условия однозначности, ограниченного по области задания относительно всей рассматриваемой области E , и во-вторых, наличие достаточно большого размера области в соответствующем направлении. Эти условия классифицируются как основные. Наряду с ними в зависимости от конкретной ситуации могут иметь место также те или иные дополнительные условия. В работе приводятся конкретные примеры реализации описанного алгоритма построения положений о региональном влиянии. Кроме того показано, что для каждого положения о региональном влиянии может быть сформулировано соответствующее следствие, представляющее собой утверждение о возможности определенного замещения данного условия однозначности.

Особое внимание в работе уделено освещению общих положений методики использования эффектов регионального влияния при изучении процессов, характеризующихся наличием данных эффектов. Представление о важнейших элементах предлагаемой методики дает рис. 2. (Здесь E_{pv} - зона регионального влияния особенностей условия однозначности, пределами которой практически ограничивается влияние на процесс той или иной особенности условия однозначности; E_{ov} - зона отсутствия влияния особенностей условий однозначности, в которой воздействие на процесс этой особенности условия однозначности пренебрежимо мало; E_n - наиболее важная для целей данного исследования зона, выделя-

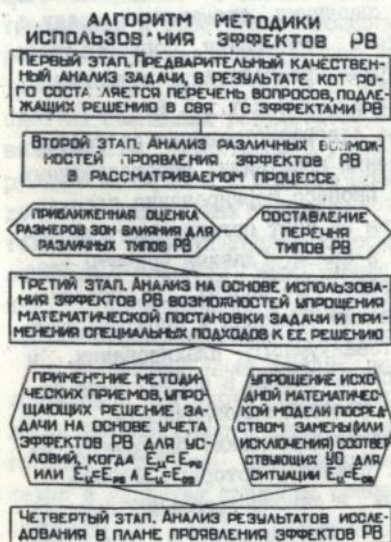


Рис. 2. Схематическое изображение алгоритма методики использования эффектов регионального влияния.

емая в пределах рассматриваемой области, $E_n = E_n' \cup E_n''$.) На рисунке прямоугольниками обозначены основные этапы методики, шестиугольниками - отдельные шаги в рамках каждого из этапов. Характеризуя предлагаемую методику в целом, в первую очередь отметим, что она касается различных стадий исследования рассматриваемого процесса, а именно, стадии постановки исследования, стадии собственно проведения исследования, а также завершающей стадии - анализа полученных результатов. Данная методика призвана существенно упростить, благодаря учету эффектов регионального влияния, исследование процессов теплопереноса, наблюдаемых при реализации изучаемых ресурсосберегающих технологий. В рамках данной главы освещаются общие моменты использования эффектов регионального влияния применительно к каждому из рассматриваемых технологических процессов.

Разработки, выполненные в части регионального влияния, наряду с предложенным классом комбинированных итерационных методов составили методическую основу настоящей диссертации в целом.

В третьей главе рассматриваются, главным образом, вопросы, касающиеся теплофизики прогрессивной ресурсосберегающей технологии автовакуумного плакирования антифрикционными сплавами. Наряду с этим анализируются также закономерности протекания сопутствующих тепловым явлениям, таких как структурные превращения в материалах, изменения термонапряженного состояния изделий и т.д. В прикладном плане данная глава посвящена проблеме совершенствования рассматриваемой технологии посредством применения простейших опосредованных способов термического воздействия на процесс формирования плакирующего слоя и управления этим процессом за счет организации требуемого теплового состояния конструкции в целом. Главные моменты теоретического аспекта данной главы связаны, во-первых, с созданием подходов к математическому моделированию тепловых и сопутствующих им явлений в условиях печного автовакуумного плакирования, и во-вторых, с анализом проявления и использования в исследуемой ситуации эффектов регионального влияния условий однозначности.

Рассматриваемый способ плакирования (наплавки) базируется на использовании автовакуумного эффекта, сущность которого заключается в поглощении газов поверхностями и самопроизвольной очистке последних от оксидных и нитридных пленок при нагреве в замкнутом пространстве герметичной полости. Практическая реализация данного способа плакирования осуществляется в газотермических печах общего назначения, где происходит нагрев собственно основы, технологической оснастки и плакирующего материала, в процессе которого послед-

ний расплавляется, заполняет герметичную наплавочную полость и затем при дальнейшем охлаждении образует диффузионное соединение с основой. Данная технология представляет собой один из наиболее эффективных и высокопроизводительных способов изготовления крупногабаритных биметаллических изделий (ее производительность, достигающая 125 кг/час примерно на порядок превышает таковую для электродуговой наплавки). Автовакуумное плакирование является относительно новой технологией и в литературе практически отсутствуют данные, посвященные рассмотрению ее теплофизических аспектов. В настоящей работе в результате проведенных исследований созданы основы теплофизики данной технологии. Показано, что принципиальная возможность получения надежных биметаллических соединений на основе автовакуумного плакирования может быть реализована только в условиях, когда имеет место рациональная организация технологического процесса в плане создания определенного теплового состояния конструкции в целом (стальная основа-плакирующий слой-оснастка), обеспечивающего эффективное протекание процесса формирования плакирующего материала. В связи с этим в работе сформулированы важнейшие требования к собственно процессу затвердевания наплавляемых слоев, регламентирующие механизм затвердевания и направленность движения фронтов кристаллизации. В плане выполнения указанных требований один из важнейших результатов исследования состоит в установлении возможности эффективного управления процессом формирования плакирующего материала с помощью простейших способов термического воздействия таких, как применение специальной теплоизоляции различной толщины с разными теплофизическими характеристиками, наносимой на отдельные участки поверхности конструкции (локальной теплоизоляции), и варьирование в допустимых пределах геометрических характеристик отдельных элементов технологической оснастки.

Приводимые ниже данные, подтверждающие эту возможность, были получены в контексте разработки и внедрения на ПО "Уралмаш" технологии автовакуумного плакирования крупногабаритных деталей тяжелого машиностроения антифрикционными сплавами типа бронз. В этой связи в качестве типичных примеров рассматривались теплофизические ситуации для изготавливаемых с использованием данной технологии наиболее характерных видов биметаллических деталей с рабочими поверхностями различной формы - скользящей опоры шагающего экскаватора с плоскими рабочими поверхностями, детали типа втулка с цилиндрическими рабочими поверхностями и подпятника конусных дробилок со сферическими рабочими поверхностями. При этом проводились

широкие параметрические исследования, базирующиеся на решении соответствующих нелинейных многомерных задач Стефанс для областей сложной конфигурации, характеризующихся физической неоднородностью сред.

В результате этих исследований для каждого из рассматриваемых типов деталей были предложены рациональные варианты местной теплоизоляции конструкции и соответствующие изменения геометрических характеристик технологической оснастки. На рис. 3 в качестве примера представлен предлагаемый вариант теплоизоляции с определенным видоизменением технологической оснастки для скользящей опоры шагающего экскаватора ЭШ. 65. 00. Рис. 4 иллюстрирует характерное температурное поле данной конструкции, отвечающее требуемым условиям затвердевания плакирующего материала.

В работе приводятся также результаты выполненных на ПО "Уралмаш" исследований, касающихся структуры и механических свойств биметаллических соединений, полученных при предложенной эффективной

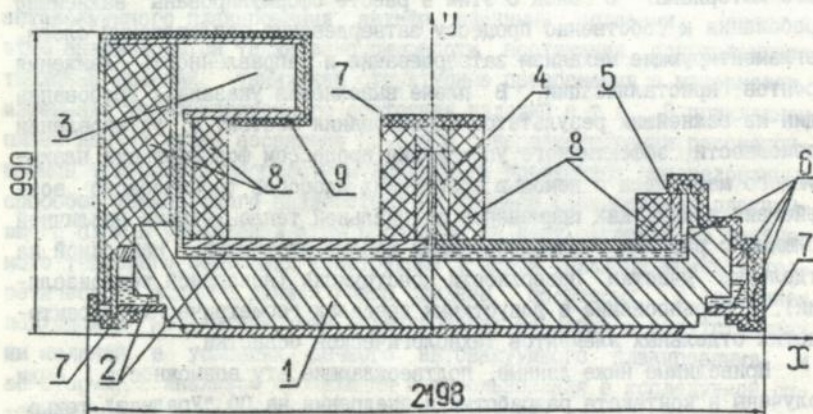


Рис. 3. Общий вид скользящей опоры шагающего экскаватора с предлагаемой технологической оснасткой под плакирование: 1 - стальная основа изделия; 2 - наплавочные полости; 3 - коробчатый бункер; 4 - промежуточный питатель; 5 - питатель-газосборник; 6 - контрдетали; 7 - шестислойная изоляция из асбокартона; 8 - изоляция из асбокрошки; 9 - изоляция из асбокартона.

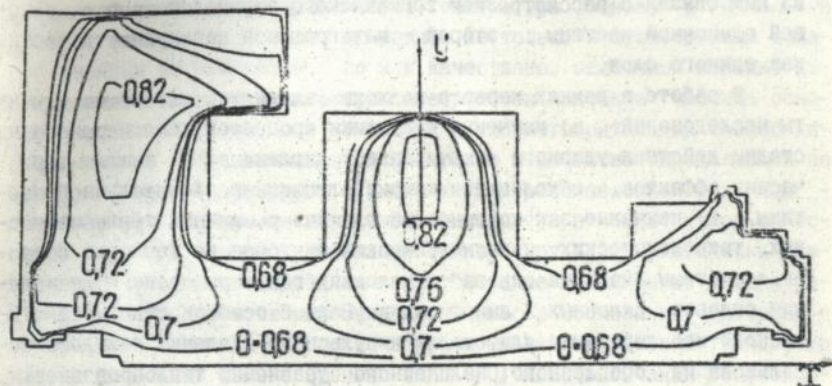


Рис. 4. Температурное поле скользящей опоры шагающего экскаватора в момент времени, отвечающий $Fo=0,438$ при наличии варианта теплоизоляции, предлагаемого для использования.

организации технологического процесса. Эти данные свидетельствуют, что образующееся в результате автовакуумного плакирования соединение бронзы со сталью носит диффузионный характер по всем сопрягаемым поверхностям. При исследовании прочности соединения бронзы со сталью разрыв всегда происходил по собственно бронзе. То есть прочность биметаллического соединения оказывалась выше прочности наиболее слабого элемента пары - бронзы БрОС8-12. Что касается предела прочности на разрыв для собственно наплавленной бронзы, то, как показали проведенные исследования, он оказался несколько выше, чем у бронзы в литом (исходном) состоянии. Так, если для литой бронзы он равен $16,2 \cdot 10^7$ Па, то есть для наплавленной составил $21,1 \cdot 10^7$ Па в случае лабораторных образцов и $18,1 \cdot 10^7$ Па в случае производственных биметаллических изделий.

Четвертая глава посвящена исследованию тепловых и сопутствующих им явлений при реализации технологии газотермического напыления. Главное внимание здесь уделяется изучению процессов теплопереноса, реализующихся в условиях формирования газотермических покрытий на основе. При этом проводимые исследования базировались на

различных подходах к анализу наблюдаемых тепловых явлений; первый из них связан с рассмотрением термического взаимодействия с основной одиночной частицы; второй - интегральной совокупности частиц как единого слоя.

В работе в рамках первого подхода выделялись следующие аспекты исследований: а) изучение специфики процессов теплопереноса на стадии действия ударного (импульсного) давления; б) анализ термических эффектов, обусловленных кристаллизацией расплавленной частицы; в) изучение закономерностей влияния различных теплофизических, технологических и геометрических факторов на тепловое состояние системы "частица-основа" в условиях газотермического напыления сплавов, склонных к аморфизации. Важной особенностью математического моделирования для стадии импульсного давления являлось использование обобщенного нелинейного уравнения теплопроводности, что связано с необходимостью учета на данной стадии ограниченности скорости распространения теплоты W и зависимости от температуры всех теплофизических характеристик материалов. Соответствующие исследования проводились на базе следующей математической модели процесса теплопереноса в системе "частица-основа"

$$c_{v_1}(t) \cdot \left[\frac{\partial t_1}{\partial \tau} + \tau_{p_1}(t) \cdot \frac{\partial^2 t_1}{\partial \tau^2} \right] = \frac{\partial}{\partial x_p} \left[\lambda_1(t) \cdot \frac{\partial t_1}{\partial x_p} \right], \quad (5)$$

$$i=1,2, \quad (0 < x_p < \delta_3),$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial x_p} \Big|_{x_p=0} = \frac{\partial t_2}{\partial x_p} \Big|_{x_p=\delta_3} = 0. \quad (6)$$

$$t_1 \Big|_{\tau=0} = t_{10}, \quad t_2 \Big|_{\tau=0} = t_{20}, \quad \frac{\partial t_1}{\partial \tau} \Big|_{\tau=0} = \frac{\partial t_2}{\partial \tau} \Big|_{\tau=0} = 0. \quad (7)$$

$$\left[\lambda_1(t) \cdot \frac{\partial t_1}{\partial x_p} + \tau_{p_1}(t) \cdot \frac{\partial q_1}{\partial \tau} \right]_{x_p=\delta_1} = \left[\lambda_2(t) \cdot \frac{\partial t_2}{\partial x_p} + \tau_{p_2}(t) \cdot \frac{\partial q_2}{\partial \tau} \right]_{x_p=\delta_1}, \quad (8)$$

$$t_1 \Big|_{x_p=\delta_1} = t_2 \Big|_{x_p=\delta_1}. \quad (9)$$

где τ_p - время релаксации; δ_1 и δ_2 - толщины частицы и основы; δ_3 - суммарная толщина частицы и основы; индексы "1" и "2" относят величины соответственно к частице и основе.

Проведенные исследования показали, во-первых, что обычно при-

меняемые в литературе способы линеаризации (когда в качестве определяющей температуры принимается температура основы в начальный момент времени t_{20}) могут приводить не только к существенным количественным погрешностям, но и к качественно ошибочной картине изменения во времени температуры поверхности контакта "частица-основа" t_k . И во-вторых, все же возможен удовлетворительный способ линеаризации, если ввести в рассмотрение в качестве определяющей не одну, а две температуры, а именно: для расплавленной частицы - температуру, равную ее начальной температуре в момент удара об основу t_{10} , для основы - начальную температуру t_{20} . Практически важным результатом исследования являются также выполненные оценки релаксационных эффектов для широкого класса сочетаний материалов частицы и основы. Согласно полученным данным разница температур Δt_k в начальный момент времени (при $t=0$) и по окончании релаксационных процессов на поверхности контакта "частица-основа", характеризующая величину релаксационного эффекта, может быть весьма существенной. (Например, для ситуации напыления ниобия на медную основу она достигает $1036,6^\circ\text{C}$, железа на основу из меди - $801,1^\circ\text{C}$, железа на основу из алюминия - $604,5^\circ\text{C}$.) Причем для большинства рассмотренных случаев величина Δt_k оказывалась положительной и тем большей, чем более теплопроводным являлся материал основы.

Определенное внимание уделено освещению теплофизических условий для двух характерных ситуаций, отвечающих образованию покрытий принципиально разного типа - с кристаллической и аморфной структурой.

Важным результатом выполненных исследований, полученным на базе широких вычислительных экспериментов, является также вывод о том, что вопреки принятым представлениям при математическом моделировании рассматриваемых практически важных ситуаций напыления необходим учет теплоты кристаллизации расплавленной частицы.

Специальные исследования были проведены в целях изучения закономерностей влияния на тепловое состояние системы "частица-основа" различных технологических, геометрических и теплофизических параметров в условиях напыления покрытий из материалов, склонных к аморфизации. Данные исследования выполнялись в контексте совместного рассмотрения температурных режимов и обусловливаемых ими фазовых превращений в покрытии. Проведенный анализ механических свойств газотермических аморфных покрытий из сплавов на основе железа, никеля, кобальта, содержащих бор, фосфор, углерод и легированных различными элементами (системы Fe-B, Fe-Ni-B, Fe-Ni-P-B,

Fe-Cr-P-C, Fe-Cr-Mo-B, Ni-P, Ni-Nb, Ni-Mo-Cr-B, Ni-Fe-Cr-B-Si-C и др.), позволил получить обширную информацию о наличии у этих покрытий сочетания повышенных эксплуатационных характеристик - прочности сцепления с основой, износостойкости, коррозионной стойкости и т.д.

В данной главе отдельно выделены результаты исследований, полученные в рамках второго из указанных выше подходов, который базируется на рассмотрении термического взаимодействия с основой не единичной частицы, а их интегральной совокупности, т.е. покрытия в целом как единого слоя, формирующегося в процессе напыления. Теплофизический анализ этой ситуации проводился на основе решения объемной нелинейной квазистационарной задачи теплопроводности для слоисто-неоднородной системы "многослойное покрытие-подслой-основа"

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\Lambda(y, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\Lambda(y, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\Lambda(y, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \text{Pe} \cdot C_v(y, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

$$0 < x < x_1, \quad -\infty < z < +\infty;$$

$$0 < y < y_1(n), \quad y_1(n) = \begin{cases} \delta_2 & \text{при } n=0, \\ \delta_3 & \text{при } n=1, \\ \dots & \dots \\ \delta_{n+2} & \text{при } n=N. \end{cases}$$

$$\Lambda(y, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (11); \quad \left[\Lambda(y, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + B1_{x_1} \cdot \theta \right]_{x=x_1} = 0, \quad (12)$$

$$\left[\Lambda_1(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} - B1_{y_0} \cdot \theta \right]_{y=0} = -\exp[-(x^2 + z^2)], \quad (13)$$

1=2 при n=0, 1=3 при n=1, 2, 3, ..., N;

$$\left[\Lambda_1(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} + B1_{y_1} \cdot \theta \right]_{y=y_1} = 0. \quad (14)$$

$$\left[\Lambda(y, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} - B1_{z_0} \cdot \theta \right]_{z=-\infty} = 0. \quad (15)$$

$$\left[\Lambda(y, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} + B1_{z_1} \cdot \theta \right]_{z=+\infty} = 0. \quad (16)$$

$$\Lambda(y, \theta) = \begin{cases} \Lambda_1 \text{ при } (y_1 - \delta_1) < y < y_1, \\ \Lambda_2 \text{ при } (y_1 - \delta_2) < y < (y_1 - \delta_1), \\ \Lambda_3 \text{ при } 0 < y < (y_1 - \delta_2). \end{cases}$$

$$C_v(y, \theta) = \begin{cases} C_{v_1} \text{ при } (y_1 - \delta_1) < y < y_1, \\ C_{v_2} \text{ при } (y_1 - \delta_2) < y < (y_1 - \delta_1), \\ C_{v_3} \text{ при } 0 < y < (y_1 - \delta_2). \end{cases}$$

где $\theta = \frac{(t - t_c) \cdot \lambda_0}{Q_{\max} \cdot r_0}$; Pe - число Пекле, $Pe = \frac{V \cdot r_0}{a_0}$; $B1_{x_1}$, $B1_{y_1}$,

$B1_{z_0}$, $B1_{z_1}$ - числа Био на соответствующих поверхностях; n - номер напыляемого слоя покрытия; N - общее количество напыляемых слоев покрытия; δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_{n+2} - безразмерные толщины соответственно основы, основы и предварительно нанесенного подслоя, основы с подслоем и одного слоя покрытия, основы с подслоем и N слоями покрытия; Q_{\max} - максимальное значение эпюры теплоподвода; t_c -

температура окружающей среды; r_0 - радиус пятна нагрева, используемый в качестве характерного размера; индексы "1", "2", "3" при Λ и C_v относят последние соответственно к основе, подслою и покрытию.

На базе этой математической модели был проведен комплекс исследований для двух классов газотермических покрытий - антифрикционных покрытий из композиционных порошков, содержащих твердые смазки, и металлополимерных покрытий. Данные исследования выполнялись в контексте определения условий, обеспечивающих эффективную организацию технологического процесса напыления. В этой связи для каждого из классов покрытий изучались закономерности влияния на температурные режимы рассматриваемых систем различных факторов: для антифрикционных покрытий - скорости движения плазмотрона, его мощности, дистанции напыления, разных плазмообразующих газов, предварительного нанесения подслоев, пористости покрытия, условий охлаждения свободных поверхностей покрытия и основы и т.д.; для металлополимерных покрытий - типа полимерной и металлической компоненты, конструкции покрытия (слоистое или наполненное), разных методов напыления (плазменодуговой и газопламенной) и пр.

Для рассматриваемых классов покрытий в процессе комплексных теоретических и экспериментальных исследований проводился совместный анализ тепловых, структурных и термонапряженных состояний систем "покрытие в целом-основа", а также их механических характеристик. В результате выполненных исследований разработаны, во-первых, покрытия типа "металл-графит", обладающие улучшенными антифрикционными характеристиками и весьма низким уровнем внутренних напряжений, и во-вторых, металлополимерные покрытия, характеризующиеся сочетанием высоких антикоррозионных свойств с повышенной износостойкостью. Например, скорость коррозии для металлополимерного покрытия, состоящего из сплава K60X30BC и полиэтилена низкой плотности, составляет $0,225 \cdot 10^{-7}$ кг/(м²·с) в 30% растворе HNO₃ и $6,86 \cdot 10^{-7}$ кг/(м²·с) в 50% растворе H₃PO₄, что соответственно примерно в 3 и 42 раза меньше, чем для покрытия из указанного нержавеющей сплава.

В пятой главе приводятся основные результаты теоретических и экспериментальных исследований закономерностей протекания процессов теплопереноса и важнейших обусловленных ими явлений, таких как структурные превращения в материалах, изменение термонапряженного состояния деталей и пр., которые наблюдаются при реализации техно-

логии лазерного упрочнения. Наряду с этим определенное внимание уделяется также экспериментальному изучению важнейших механических свойств материалов в зоне лазерного нагрева, в значительной мере определяющих эффективность окончательного технологического результата.

Основными объектами исследования здесь являлись разновидности режущего инструмента, упрочняемого непрерывным излучением CO_2 -лазера. Исследования проводились в контексте решения задачи проектирования рациональных технологических режимов упрочнения, при которых обеспечивается эффективное протекание требуемых структурных изменений в материале. В этой связи анализировались возможности использования различных способов воздействия на тепловое состояние упрочняемого инструмента таких, как скорость перемещения лазерного луча V , расстояние a° между режущей кромкой и центром луча, величина радиуса пятна нагрева r_0 и т. д. В процессе исследования важнейшим параметром, варьируемым в широком практически важном диапазоне изменения, являлся также угол заточки инструмента ϕ_1 . Математическое моделирование процесса теплопереноса в рассматриваемой физической обстановке осуществлялось на базе нелинейной объемной задачи теплопроводности при наличии в основном операторном уравнении конвективного члена, отражающего эффект движения источника нагрева - лазерного луча. В целях полноты анализа и оценки достоверности результатов математического моделирования проводились де-

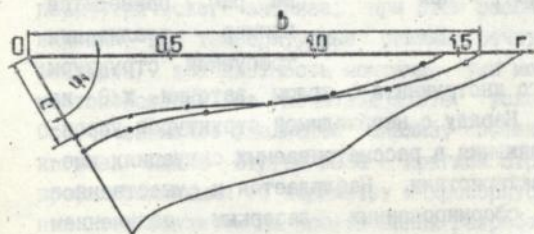


Рис. 5. Конфигурация упрочненной зоны при $\phi_1 = \pi/3$, $r_0 = a^\circ = 1,0$, $Re = 6,3$;
 —○— — данные натурального эксперимента;
 —*— — результаты численного решения.

тальные сопоставления данных вычислительных и натуральных экспериментов. Типичные результаты таких сопоставлений применительно к определению конфигурации упрочненной зоны представлены на рис. 5.

Особое внимание уделялось постановке и решению задачи об определении пороговых значений технологических парамет-

ров, разграничивающих области их допустимых и недопустимых величин. Применительно к практике закалки режущего инструмента эта задача связана с необходимостью нахождения условий возникновения следующих трех отрицательных ситуаций: 1) проплавления собственно режущей кромки; 2) проплавления некоторой зоны, прилегающей к обрабатываемой поверхности и расположенной на удалении от кромки; 3) отрыва упрочненной зоны от режущей кромки. Рис. 6 иллюстрирует результаты решения данной задачи, полученные на базе математического моделирования для типичной ситуации упрочнения. При окончательном определении качества инструмента, упрочненного лучом лазера, анализу подлежали такие характеристики, как микроструктура и фазовый состав зоны нагрева, микротвердость, напряженное состояние и износостойкость получаемых структур. На рис. 7 приводится пример реализации требуемой структуры

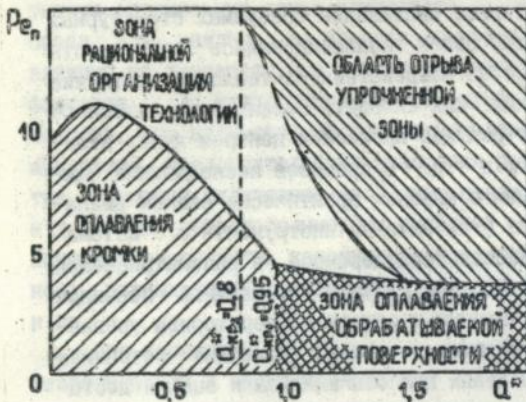


Рис. 6. Зависимость $Pe_n = f(a^*)$ при $\Gamma_0 = 1$, $\Phi_1 = \pi/3$.

требуемой структуры

в случае упрочнения режущего инструмента с углом заточки $\pi/3$ из быстрорежущей стали Р6М5. Наряду с необходимой структурой упрочненной зоны остаточные напряжения в рассматриваемых ситуациях имеют также благоприятные характеристики. Наблюдается и существенное повышение износостойкости сформированных лазерным облучением структур по сравнению с таковой для объемной закалки. Так, для стали У8 оно составляет 1,6+2 раза, для стали Р6М5 - 2,1+3 раза.

Шестая глава посвящена в основном освещению результатов исследований теплофизического аспекта проблемы проектирования эффективных технологий монтажа электронных компонентов на поверхность печатных плат. При этом наряду с изучением тепловых явлений определенное внимание уделяется также анализу термонапряженного состояния узлов на печатных платах. Рассматриваются теплофизические си-



Рис. 7. Микроструктура упрочненного слоя после лазерной закалки стали Р6М5: $P=800$ Вт; $r_0=2,5 \cdot 10^{-3}$ м; $V=0,0133$ м/с; $a_p=7 \cdot 10^{-3}$ м; $\phi_1=\pi/3$.

металлокерамических и пластмассовых микрокорпусах на поверхность низко- и высокотеплопроводных плат. Освещаются данные выполненного параметрического анализа: при этом рассматриваются закономерности влияния на температурные режимы печатных узлов при пайке таких факторов, как плотность монтажа, тип монтируемых компонентов, их местоположение на печатной плате, условия прижима к плате и пр. Особое внимание уделяется анализу эффективности различных схем нагрева пайки струей газа - круглой струей или плоскими струями, профилированными по периметру микрокорпуса. В результате проведенных теплофизических исследований разработаны рекомендации по созданию базовых технологий комбинированной резистивной и ИК-пайки, а также пайки струей нагретого газа, обеспечивающих формирование надежных паяных соединений микрокорпусов с платой.

В седьмой главе приводятся данные математического моделирования температурных режимов деталей при сварке. При этом основное внимание уделяется рассмотрению широкого класса сварных оболочечных конструкций, состоящих из двух произвольных конических оболочек вращения, включая их предельные формы - цилиндрические оболочки, круглые и кольцевые пластины (см. рис. 8). Одной из наиболее

туации, отвечающие различным способам пайки - комбинированной пайке (резистивной и инфракрасной) и пайке струей нагретого газа. Применительно к данным способам пайки сформулированы соответствующие математические модели процессов теплопереноса. Излагаются основные положения разработанной методики регионального моделирования теплового состояния компонентов поверхностного монтажа, которая базируется на учете наблюдаемых в рассматриваемых условиях эффектов регионального влияния. Приводятся характерные результаты натуральных экспериментов и математического моделирования процессов теплопереноса для типичных ситуации пайки БИС и СГИС в металлокерамических и пластмассовых микрокорпусах на поверхность низко- и высокотеплопроводных плат.

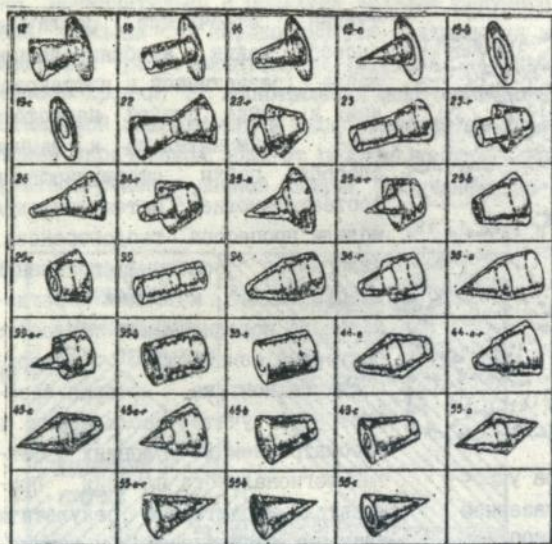


Рис. 8. Варианты конфигураций сварных оболочечных конструкций.

т. д. Учет таких эффектов лежит также в основе обобщений, полученных в результате анализа данных выполненного комплекса вычислительных экспериментов. В рамках этого анализа проведено сопоставление температурных режимов различных групп конструкций из данного класса. Показана возможность приближенной оценки температурного режима целой группы конструкций, исходя из анализа теплового состояния некоторых характерных конструкций, входящих в данную группу.

В контексте рассмотрения эффектов регионального влияния условий теплового контакта между свариваемыми деталями особое внимание уделено сопоставлению различных математических моделей, соответствующих заданию разным условиям теплового взаимодействия между составными элементами конструкции: (1) - модели переменного контакта, изменяющегося во времени вдоль поверхности сопряжения деталей в соответствии с движением источника сварочного нагрева; (2) - модели отсутствия теплового контакта; (3) - модели постоянного термического контакта по всей поверхности сопряжения деталей.

Разработанное программное обеспечение было включено в пакет

характерных особенностей исследования является то обстоятельство, что его различные аспекты освещаются в контексте учета эффектов регионального влияния. Так, на использовании этих эффектов базируются различные элементы предлагаемой специализированной методики численного решения задач рассматриваемого класса, такие как схема сдвига, расчетная пассивная граница области и

прикладных программ Института электросварки АН Украины и внедрено в технологическую практику ведущих машиностроительных заводов.

Восьмая глава посвящена в основном исследованию процессов теплопереноса при объемной закалке деталей в жидких средах. При анализе температурных режимов упрочняемых деталей особое внимание уделялось рассмотрению следующих эффективных условий реализации рассматриваемой технологии: во-первых, закалке под избыточным регулируемым давлением и, во-вторых, упрочнению при интенсификации теплообмена в области мартенситных превращений.

Применительно к данным условиям реализации технологии закалки на базе математического моделирования проведен комплекс исследований температурных режимов деталей различной формы, представляющих собой характерные элементы всевозможных технических устройств; а именно, деталей канонической формы (пластины, цилиндра, шара) и толстостенных пластин при различной геометрии среза кромок. При этом в плане анализа возможностей управления фазовыми превращениями в материале при закалке большое внимание уделялось изучению особенностей теплопереноса на стадии пузырькового кипения и, в первую очередь, установлению закономерностей влияния на величину продолжительности данной стадии различных факторов - размеров детали, давления закалочной жидкости, интенсивности теплопереноса на стадии конвективного теплообмена и т.д. Для указанных толстостенных пластин решена актуальная прикладная задача о выборе рациональной последовательности технологических операций их обработки в части обеспечения минимального уровня интенсивностей напряжений, возникающих в закаливаемых деталях.

Специальные исследования проведены также с целью выявления роли нелинейности I и II рода в процессах теплопереноса при закалке.

В контексте эффективного управления процессом закалки посредством использования тех или иных закалочных жидкостей выполнен комплекс исследований по определению охлаждающих свойств ряда относительно новых закалочных сред, представляющих собой водные растворы солей и полимеров (типа бишофита и полимера ПК-2).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для ряда прогрессивных ресурсосберегающих технологий обработки материалов (типа автовакуумного плакирования, газотермического напыления покрытий, упрочнения деталей лучом лазера, поверх-

монтажа электронных компонентов и пр.) выполнен анализ тепловых и сопутствующих им явлений в контексте обеспечения их рациональной организации и получения эффективного окончательного технологического результата.

2. Разработан специальный класс сеточных методов - комбинированных итерационных методов, ориентированный на математическое моделирование процессов теплопереноса, наблюдаемых при реализации рассматриваемых технологий. Основная идея методов состоит, с одной стороны, в объединении важнейших достоинств явных и неявных схем, с другой - в использовании эффекта регионального влияния, характерного для исследуемых физических ситуаций. Показано, что использование данного класса методов наиболее целесообразно в той области, где применение классических явных и неявных схем наименее эффективно.

3. Установлены общие физические закономерности протекания многомерных процессов теплопереноса, связанные с проявлением эффектов регионального влияния условий однозначности, применительно к реализации исследуемых ресурсосберегающих технологий. Сформулированы основы построения положений о региональном влиянии, позволяющие охватить важнейшие проявления эффектов регионального влияния для всех условий однозначности. Предложена специальная методика использования эффектов регионального влияния, открывающая возможность существенного упрощения исследований на различных стадиях, а именно, на стадии постановки задачи, в процессе ее решения, а также на завершающей стадии - анализа получаемых результатов.

4. Разработаны основы теплофизики технологического процесса автовакуумного плакирования крупногабаритных деталей тяжелого машиностроения. На базе математического моделирования и натуральных экспериментов даны методические рекомендации по совершенствованию рассматриваемой технологии посредством применения простейших опосредованных способов термического воздействия на процесс формирования плакирующего слоя и управления этим процессом за счет организации требуемого теплового состояния конструкции в целом. Эффективность предлагаемых мероприятий подтверждается результатами исследований структуры и механических свойств биметаллических соединений, полученных при разработанной рациональной организации технологического процесса.

5. В контексте проектирования эффективных технологических режимов газотермического напыления разработан ряд новых положений

теплофизики данной технологии, полученных на базе совместного анализа процессов теплопереноса и обусловливаемых ими структурных превращений и термонапряженных состояний покрытия и основы. Для ряда специальных ситуаций установлены особенности термического взаимодействия с основой одиночной частицы и интегральной совокупности частиц (покрытия в целом). При этом применительно к условиям взаимодействия одиночной частицы с основой методами математического моделирования изучены закономерности теплопереноса на стадии импульсного (ударного) давления и дана оценка величины релаксационных эффектов для широко используемых сочетаний материалов покрытия и основы; для ситуации напыления сплавов, склонных к аморфизации, выполнен совместный анализ температурных режимов, связанных с ними фазовых превращений в покрытии, и комплекса механических свойств получаемых аморфизированных слоев. В рамках изучения термического взаимодействия с основой интегральной совокупности частиц для двух классов газотермических покрытий - композиционных покрытий, содержащих графит, и металлополимерных покрытий на базе решения объемной задачи теплопереноса установлены закономерности влияния на тепловое состояние рассматриваемых систем различных факторов. Получены данные о механических характеристиках, структурных и термонапряженных состояниях, подтверждающие эффективность разработанных технологических рекомендаций для указанных классов покрытий.

6. Выполнен комплексный анализ тепловых и сопутствующих им явлений в условиях реализации технологии упрочнения непрерывным излучением CO_2 -лазера разновидностей режущего инструмента. В целях проектирования рациональных технологических режимов упрочнения, методами математического моделирования изучены возможности использования различных способов воздействия на тепловое состояние закаливаемого инструмента, таких как скорость перемещения лазерного луча, расстояние между режущей кромкой и центром луча, величина пятна нагрева и т. д. Сформулирована постановка задачи об определении пороговых значений технологических параметров и получено ее решение для рассматриваемой ситуации упрочнения. На базе совместных теоретических и экспериментальных исследований теплового состояния режущего инструмента и различных характеристик образующихся в результате лазерного воздействия структур разработаны рекомендации по проектированию рациональных технологических режимов лазерной закалки.

7. Разработаны основы математического моделирования теплового

и термонапряженного состояния печатных узлов при реализации технологии монтажа электронных компонентов - БИС и СБИС в металлокерамических и пластмассовых микрокорпусах - на поверхность низко- и высокотеплопроводных плат. Предложена методика регионального моделирования температурных режимов критических компонентов монтажа. Установлены закономерности процессов теплопереноса в печатных узлах для различных способов пайки - резистивной и ИК-пайки, а также пайки струей нагретого газа. На основе проведенных исследований теплового и термонапряженного состояния печатных узлов разработаны базовые технологические процессы резистивной и ИК-пайки, а также пайки струей нагретого газа, обеспечивающие получение надежных паяных соединений и отсутствие перегрева полупроводниковых кристаллов.

8. Предложен общий методический подход к математическому моделированию процессов теплопереноса при сварке применительно к широкому классу оболочечных конструкций, состоящих из двух произвольных конических оболочек вращения, включая их предельные формы - цилиндрические оболочки, круглые и кольцевые пластины. Выполнен сравнительный анализ температурных режимов указанного класса оболочек вращения и на его основе показана возможность оценки теплового состояния целой группы конструкций, исходя из данных о температурных полях некоторых характерных конструкций, входящих в эту группу.

9. Для конкретных условий закалки деталей в жидких средах - при интенсификации теплообмена в области мартенситных превращений и регулировании давления закалочной жидкости - на базе математического моделирования и натуральных экспериментов выполнен анализ теплофизических аспектов данной технологии. Применительно к этим условиям изучены закономерности изменения температурных режимов закаливаемых деталей различной конфигурации; в результате совместного рассмотрения теплового и термонапряженного состояния изделий получено решение актуальной прикладной задачи о выборе рациональной последовательности технологических операций - размерной обработки и объемной закалки. В плане анализа возможностей управления фазовыми превращениями в материале при закалке получены данные об охлаждающих свойствах ряда перспективных закалочных сред, представляющих собой водные растворы солей и полимеров.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. Фялко Н.М. Особенности решения задачи теплопроводности с подвижными концентрированными источниками тепла// Теплопроводность и диффузия в технологических процессах. - Рига, 1977. - С. 189-191.

2. Фялко Н.М., Меранова Н.О. Исследование продолжительности пузырькового кипения в процессе прерывистой закалки// Прикладные вопросы теплообмена и гидродинамики. - Киев: Наук. думка, 1982. - С. 83-88.

3. Фялко Н.М., Гомжина Л.Д., Юрчук В.Л. Температурный режим сварной конструкции труба-пластина// Пром. теплотехника. - 1983. - №3. - С. 45-50.

4. Фялко Н.М., Лущик Л.В. Численное исследование влияния формы образца на продолжительность пузырькового кипения в процессе закалки// Теплопередача и прикладная гидродинамика. - Киев: Наук. думка, 1983. - С. 94-98.

5. Фялко Н.М., Гомжина Л.Д., Юрчук В.Л. Приближенный анализ теплового состояния сварной конструкции труба-пластина// Пром. теплотехника. - 1984. - №1. - С. 14-17.

6. Фялко Н.М., Лущик Л.В. Особенности численного решения задачи теплопроводности при закалке// Теплообмен и теплофизические свойства веществ. - Киев: Наук. думка, 1984. - С. 31-35.

7. Kobasko N.I., Fialko N.M., Meranova N.O. Numerical Determination of the Nucleate-Boiling Phase in the Course of Steel-Plate Hardening// Heat Transfer Soviet Research. - 1984. - №2 - P. 130-135.

8. Фялко Н.М., Меранова Н.О., Шеренковская Г.П. Приближенный метод решения задач теплопереноса при упрочнении материалов концентрированными источниками энергии// Конвективный теплообмен и гидродинамика. - Киев: Наук. думка, 1985. - С. 8-12.

9. Кобаско Н.И., Швец Ю.И., Фялко Н.М., Меранова Н.О., Николаев Е.Д. Охлаждающая способность водного раствора полимера ПК-2 при различных температурах// Металловедение и термическая обработка материалов. - 1985. - №9. - С. 2-5.

10. Кобаско М.И., Фялко Н.М., Лущик Л.В. Тривалість процесу бульбашкового кипіння при гартуванні деталей різної форми// Вісник АН УРСР. - 1986. - №1. - С. 79-84.

11. Швец Ю.И., Фялко Н.М., Головки Л.Ф. Оценка теплового состояния изделий при упрочнении материала подвижным концентриро-

ваным источником энергии// Пром. теплотехника. - 1986. - №. - С. 60-63.

12. Швец Ю.И., Фялко Н.М., Шеренковская Г.П. и др. Основные направления исследований нелинейных процессов теплопереноса при воздействии концентрированных потоков энергии на материалы// Физико-химическая механика материалов. - 1986. - №. - С. 34-38.

13. Швец Ю.И., Фялко Н.М., Чебанова В.Н. и др. Исследование теплового состояния тонких металлических пленок при импульсном нагреве// Электронная обработка материалов. - 1987. - №1. - С. 42-46.

14. Прокопов В.Г., Швец Ю.И., Фялко Н.М. и др. Тепловое состояние биметаллических деталей пар трения при печной автовакуумной наплавке// Сварочное производство. - 1988. - №3. - С. 33-34.

15. Прокопов В.Г., Швец Ю.И., Фялко Н.М. и др. Особенности процессов теплопереноса при плакировании крупногабаритных стальных деталей антифрикционными сплавами// Физ. и химия обраб. материалов. - 1988. - №5. - С. 29-33.

16. Borisov Yu.S., Korgik V.N., Fialko N.M. etc. Thermal and physico-chemical conditions for formation of thermal sprayed coatings with metastable structure// High Temperature Dust-Laden Jets in Plasma Technology: Proceedings of the International Workshop, 6-8 September 1988, Novosibirsk, USSR/ eds. O.P.Solonenko and A.I.Fedorchenko. - Leist: VSP-III, Utrecht, The Netherlands Tokyo, Japan. - P.315-328.

17. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Саригло В.Г., Грачев А.А. Математическое моделирование процессов теплопереноса в печатных платах применительно к технологии поверхностного монтажа электронных узлов с использованием ИК-пайки// Тепло- и массообмен в технологии и эксплуатации электронных и микросистем: Материалы Международной шк.-семинара, г. Минск, 19-24 сент. 1989 г. - Минск, 1990. - ч. 2. - С. 30-39.

18. Fialko N.M., Prokopov V.G., Meranova N.O., Borisov Yu.S., Korzhyk V.N. Mathematic simulation of Heat-transfer processes under the coating formation conditions in thermal sprayig of alloys susceptible to amorfous transformation// Plasma Jets in the Development of New Materials Technology: Proceedings of the International Workshop, 3-9 Sept. 1990, Frunce, USSR/ eds. O.P.Solonenko, A.J.Fedorchenko. - Leist: VSP-III, Utrecht, The Netherlands Tokyo, Japan. - P. 383-391.

19. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Саригло В.Г. та ін. Дослідження процесів теплопереносу при поверхневому монтажі мікро-

корпусів інтегральних схем// Доповіді АН УРСР.- 1991.- №1.- С.59-64.

20. Долинский А.А., Швец Ю.И., Фялко Н.М. и др. Влияние размера затвердевающего слоя на тепловое состояние системы "покрытие-основа" в условиях газотермического напыления// Автомат. сварка.- 1991.- №2.- С.43-45.

21. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Саригло В.Г. та ін. Математичне моделювання теплового стану печатних вузлів стосовно до технології поверхневого монтажу електронних компонентів// Доповіді АН УРСР.- 1991.- №5.- С.86-91.

22. Прокопов В.Г., Фялко Н.М., Саригло В.Г., Грачев А.А. Математическое моделирование процессов теплопереноса при монтаже электронных компонентов на поверхность печатных плат// Инж.-физический журнал.- 1991.- 61, №2.- С.204-210.

23. Прокопов В.Г., Фялко Н.М., Саригло В.Г. и др. Особенности процессов теплопереноса при пайке изделий электронной техники с планарными выводами// Известия ВУзов СССР. Приборостроение.- 1991.- №7.- С.94-101.

24. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В. и др. Особенности процессов теплопереноса в условиях формирования газотермических покрытий из композиционных порошков// Докл. АН УССР.- 1991.- №10.- С.87-91.

25. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Саригло В.Г., Грачев А.А., Рывкин Е.М. Исследование теплового состояния печатных узлов в условиях технологии газовой пайки// Докл. АН УССР.- 1991.- №12.- С.50-56.

26. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В. и др. Влияние скорости движения плазмотрона на температурный режим системы покрытие-подслой-основа в условиях газотермического напыления// Физика и химия обраб. материалов.- 1992.- №2.- С.77-82.

27. Прокопов В.Г., Фялко Н.М., Шеренковская Г.П. и др. Влияние пористости покрытия на процессы теплопереноса при газотермическом напылении// Порошковая металлургия.- 1992.- №12.- С.47-51.

28. Фялко Н.М., Саригло В.Г., Чебанова В.Н. и др. Тепловое состояние монолитного танталового конденсатора в условиях пайки инфракрасным излучением// Автомат. сварка.- 1992.- №3.- С.26-30.

29. Прокопов В.Г., Фялко Н.М., Саригло В.Г. и др. Анализ схем струйного нагрева при пайке корпусов ИС// Технология и конструирование в электронной аппаратуре.- №4,1992.-№1,1993.- С.43-44.

30. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Меранова Н.О. и др. Теплофи-

зика процессов формирования газотермических покрытий. Состояние исследований// Физ и химия обраб. материалов.- 1993.- №.- С.83-93.

31. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Меранова Н.О. и др. Термическое взаимодействие одиночной частицы с основой при получении газотермических покрытий// Физ. и химия обраб. материалов.- 1994.- №1.- С.70-78.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

θ - безразмерная температура; Fo - число Фурье, $Fo = a_0 \cdot \tau / l^2$; Bi - число Био, $Bi = \alpha \cdot l / \lambda_0$; Λ , C_v - безразмерный коэффициент теплопроводности и удельная объемная теплоемкость, $\Lambda = \lambda / \lambda_0$, $C_v = c_v / c_{v0}$; x , y , z - безразмерные координаты декартовой системы координат, $x = x_p / l$, $y = y_p / l$, $z = z_p / l$; t - текущая температура; τ - время; q - плотность теплового потока; α - коэффициент теплоотдачи; λ , c_v - коэффициент теплопроводности и удельная объемная теплоемкость; a - коэффициент температуропроводности; V - скорость движения; x_p , y_p , z_p - размерные пространственные координаты; l - характерный размер; индекс "0" при λ , c_v и a отвечает характерным значениям данных теплофизических характеристик; индекс "max" соответствует максимальному значению величины; ИК-пайка - инфракрасная пайка; БИС и СБИС - большая и сверхбольшая интегральная схема; РВ - региональное влияние.

Подписано к печати 12.05.1994г. Формат 60x84/16

Бумага офсетная Усл.-печ.лист.20Уч.-изд.лист 2,0.

Тираж 100. Заказ 250. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

45748

AB 30.179

AB 30.179