

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

На правах рукописи

МЕРАНОСА Наталья Олеговна

Мерз -

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ
ПОЛУЧЕНИИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ И ЗАКАЛКЕ В ЖИДКИХ СРЕДАХ**

Специальность: 05.14.05 "Теоретическая теплотехника"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1996



є рукопись

00740207 (К)

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики
Національної Академії Наук України.

Научні керівники: доктор технічних наук
Н. М. Фіалко,
кандидат технічних наук
В. Р. Прископов

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Н. І. Никитенко
кандидат технічних наук
Е. А. Астахов

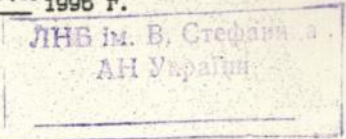
Ведущая організація: Інститут проблем матеріалознавства
НАН України

Захист дисертації состоится "2" апріля 1996 г. в 13³⁰ часов
на засіданні спеціалізованого ученого совету К 50.04.03
в Інституті технічної теплофізики НАН України по адресу:
252057, г. Киев-57, ул. Желябова, 2а.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інститута
технічної теплофізики НАН України

Автореферат розослан "1" марта 1996 г.

Учений секретарь
спеціалізованого ученого совету,
доктор технічних наук



Г. Р. Кудрицкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Решение задач повышения качества, надежности и долговечности деталей различных машин и оборудования неразрывно связано с проблемой придания материалам требуемого комплекса служебных свойств. При этом во многих практически важных ситуациях оказывается необходимым обеспечение определенных свойств лишь в весьма тонких слоях деталей, непосредственно прилежащих к их рабочим поверхностям. Среди различных технологий, ориентированных на решение данной проблемы, по широте применимости и технологической эффективности особо выделяются технологии получения плазменных покрытий и прогрессивные технологии закалки в жидких средах.

Для указанных технологий процессы теплопереноса определяют как характер сопутствующих явлений, так и в целом окончательный технологический результат. Это обстоятельство обуславливает актуальность углубленных исследований температурных режимов деталей при плазменном нанесении покрытий и закалке в жидких средах.

В условиях реализации рассматриваемых технологий прилежащая к рабочей поверхности подобласть, исследование теплового состояния которой представляет наибольший интерес, характеризуется весьма малыми размерами по толщине (от нескольких миллиметров до их сотых долей). Наличие наряду с этим таких усложняющих факторов, как большие значения градиентов температуры и скорости ее изменения, практическая недоступность отдельных участков исследуемых деталей при их сложной конфигурации и пр. определяет особую целесообразность использования для исследования теплофизических аспектов рассматриваемых технологий методов математического моделирования.

Следует также подчеркнуть, что ввиду характерной для последнего периода тенденции к усложнению математических моделей изучаемых тепловых процессов важной является разработка специальных численных методов, методических приемов и алгоритмов, адаптированных к решению соответствующих тепловых задач.

Характеризуя в целом состояние исследований в части математического моделирования тепловых явлений, наблюдаемых при реализации изучаемых технологий, необходимо отметить следующее. Хотя теплофизические основы данных технологий и можно считать в большой мере разработанными, однако имеющиеся исследования далеко не исчерпывают как потребности технологической практики, так и различные актуальные вопросы теории.

Цель работы. Исследование температурных режимов деталей при реализации технологий получения плазменных покрытий и закалки в жидких средах, ориентированных на придание требуемых служебных свойств прилегающим к рабочим поверхностям тонким слоям материала, и разработка на этой основе рекомендаций по эффективной организации рассматриваемых технологических процессов.

Задачи исследования.

В методическом плане первоочередной задачей является разработка специализированных методов, подходов и алгоритмов, адаптированных к особенностям рассматриваемых физических ситуаций.

В части изучения процессов теплопереноса при нанесении плазменных покрытий могут быть выделены следующие актуальные направления исследований:

- анализ основных особенностей теплового состояния систем "частица-основа" в условиях напыления сплавов, склонных к аморфизации, и установление на этой базе важнейших технологических факторов, ответственных за эффективность протекания процессов аморфизации;

- изучение эффектов влияния теплоты кристаллизации напыляемых частиц для широкого круга сочетаний материалов покрытия и основы;

- выявление основных закономерностей процессов теплопереноса на стадии действия импульсного давления.

Для условий закалки деталей в жидких средах особую важность представляют такие теплофизические исследования :

- анализ закономерностей изменения температурных режимов закаливаемых деталей для условий, отвечающих практическому отсутствию стадии пленочного кипения;

- выявление влияния на тепловое состояние закаливаемых деталей различного рода нелинейностей, типичных для исследуемых процессов теплопереноса;

- изучение температурных режимов упрочняемых деталей сложной конфигурации;

- определение охлаждающих свойств ряда новых специальных закалочных сред.

Научная новизна.

1. Развита эффективная модификация комбинированных итерационных методов (КИМ) - КИМ с шахматным перераспределением на основе шахматной схемы.

2. Изучены закономерности тепловых и обусловленных ими явлений, наблюдаемых при реализации технологии получения плазменных покрытий. При этом для случая нанесения аморфных покрытий

выполнен комплекс теплофизических исследований, ориентированных на установление требуемых закономерностей изменения основных технологических факторов, которые определяют эффективность протекания процесса аморфизации. Выявлены важнейшие особенности теплопереноса в системе "напыляемая частица-основа" для периода высокоинтенсивного теплообмена (стадии импульсного давления). Выполнен анализ влияния на температурные режимы изучаемых объектов нелинейности, обусловленной наличием фазовых переходов в наносимых покрытиях.

3. Выполнен комплекс исследований, связанных с определением тепловых состояний деталей при их упрочнении в жидких средах, применительно к ситуациям, когда стадия пленочного кипения практически отсутствует. Изучены возможности линеаризации рассматриваемых математических моделей процесса теплопереноса относительно нелинейности I и II рода. Проведены исследования по определению охлаждающих свойств ряда специальных закалочных жидкостей.

Предмет и методы исследования. Предметом исследования настоящей работы являлись тепловые явления, наблюдаемые в технологических процессах нанесения плазменных покрытий и закалки в жидких средах. В качестве основных методов исследования использовались методы математического моделирования.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

Результаты исследований использованы при разработке рекомендаций и методик по выбору рациональных технологических режимов нанесения плазменных покрытий и закалки в жидких средах. Эти разработки нашли внедрение: для плазменного нанесения покрытий - на ПО "Киевтрактородеталь", Пинском экскаватороремонтном заводе, ПО "Химволокно" (г.Чернигов), для закалки в жидких средах - на ПО "Ижорский завод", ПО "Атоммаш" и др.

Обоснованность и достоверность результатов проведенных исследований подтверждена посредством сопоставления численных и экспериментальных данных, удовлетворительным совпадением результатов решения рассматриваемых задач, найденных разными методами, эффективностью практического применения полученных результатов.

Апробация работы.

Содержавшийся в диссертационной работе материал докладывался и обсуждался на международной конференции по плазменным струям в технологиях обработки материалов (Фрунзе, 1990 г.); на всесоюзных конференциях: по теплофизике процессов кипения (Рига, 1982 г.), по дифференциальным уравнениям (Дрогобыч, 1989 г.), по газотермическом напылении (Тула, 1989 г.); на республиканских конференциях: по теплофизике термической обработки (Киев, 1981, 1983.

1986, 1987 г.г.), по вопросам тепловой работы металлургических печей (Днепропетровск, 1981 г.), по охлаждающим свойствам закалочных сред (Волгоград, 1982 г.), по лучевой обработке композиционных материалов (Тернополь, 1990 г.) и др.

Личное участие автора состоит в развитии эффективной модификации КИМ - КИМ с шахматным переопределением на основе шахматной схемы, разработке на базе данной модификации программного обеспечения для решения задач теплопереноса в условиях плазменного напыления и закалки в жидких средах, проведении комплекса численных исследований по изучению тепловых явлений, наблюдаемых при реализации данных технологий. При непосредственном участии автора сформулирована постановка задач исследования и выполнен анализ полученных результатов.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 36 научных работ.

Структура и объем. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы.

Диссертация изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 24 таблицы и 46 рисунков. Список литературы включает 133 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформулирована цель работы, приведено ее краткое содержание и сведения о внедрении результатов выполненных исследований.

В первой главе диссертационной работы выполнен анализ состояния исследований, касающихся теплофизики технологических процессов нанесения плазменных покрытий и закалки в жидких средах. При этом детально рассматриваются вопросы термического взаимодействия одиночных напыляемых частиц с основой в условиях получения плазменных покрытий. Анализируются работы, в которых исследуются температурные режимы упрочняемых деталей при различных условиях реализации закалки. Затрагиваются вопросы, связанные с определением охлаждающих свойств закалочных сред. Рассматривается также состояние исследований в части используемых методов математического моделирования процессов теплопереноса при реализации изучаемых технологий.

Во второй главе освещаются результаты выполненных методических разработок. Приводится материал, касающийся развития одной из эффективных модификаций комбинированных итерационных методов - КИМ на основе шахматной схемы с шахматным переопределением искомой функции. Данная модификация характеризуется

достоинствами, присущими в целом классу КИМ, а именно: простотой вычислительных алгоритмов, типичной для явных схем, и абсолютной устойчивостью, свойственной неявным схемам. Кроме того, она (эта модификация) обладает также и другими известными особенностями указанного класса методов, такими как наличие определенных итерационных процедур по типу двухслойных итерационных методов, использование в редуцированной математической постановке - разрешающих явное разрешение, сходимость к решению, найденному на основе чисто неявной схемы, и пр.

Основные особенности схемы реализации развиваемой модификации КИМ заключаются в следующем. В начале (на первой итерации) вычисления осуществляются на базе явной шахматной схемы. Далее итерационный процесс основывается на использовании неявных разностных уравнений по типу шахматного перераспределения искомой функции, разрешаемых явно. При этом собственно шахматное перераспределение допускает два варианта реализации - А и В.

Для конкретизации приведем пример аппроксимации дифференциального оператора D в левой части одномерного нелинейного уравнения теплопроводности, $D = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)$, при использовании шахматного перераспределения. (Заметим, что различные типы перераспределения искомой функции в КИМ отличаются, как известно, главным образом, разностью аппроксимацией именно этого оператора). Указанное перераспределение проводится в два этапа. На первом из них вычисления выполняются для всех четных (или нечетных) углов сетки. При этом аппроксимация оператора D осуществляется следующим образом:

- для варианта перераспределения А - с использованием значений искомой функции как на предшествующей, так и на последующей итерации

$$\frac{1}{h} \left\{ b_{i+1,1+1}^k \frac{\theta_{i+1,1+1}^{k+1} - \theta_{i,1+1}^{k+1}}{h} - b_{i,1+1}^k \frac{\theta_{i,1+1}^{k+1} - \theta_{i-1,1+1}^{k+1}}{h} \right\}, \quad (1)$$

- для варианта перераспределения В - на предшествующей итерации

$$\frac{1}{h} \left\{ b_{i+1,1+1}^k \frac{\theta_{i+1,1+1}^k - \theta_{i,1+1}^k}{h} - b_{i,1+1}^k \frac{\theta_{i,1+1}^k - \theta_{i-1,1+1}^k}{h} \right\}, \quad (2)$$

где $b_{i+1,1+1}^k = 0,5 \cdot (\Lambda_{i+1,1+1}^k + \Lambda_{i,1+1}^k)$; $b_{i,1+1}^k = 0,5 \cdot (\Lambda_{i,1+1}^k + \Lambda_{i-1,1+1}^k)$; индексы k , l и i относят величины соответственно к номеру итерации, временного шага и угла пространственной сетки, h - шаг пространственной разбивки.

На втором этапе расчеты ведутся для всех нечетных (или соответственно четных) узлов сетки, оператор же D аппроксимируется на последующей итерации одинаковым образом для вариантов А и В:

$$\frac{1}{h} \left\{ b_{i+1,1+1}^{k+1} \frac{\theta_{i+1,1+1}^{k+1} - \theta_{i,1+1}^{k+1}}{h} - b_{i,1+1}^{k+1} \frac{\theta_{i,1+1}^{k+1} - \theta_{i-1,1+1}^{k+1}}{h} \right\}. \quad (3)$$

Выполнен сравнительный анализ эффективности рассматриваемых вариантов переопределения искомой функции. Показано, что вариант А, характеризующийся аппроксимацией пространственного оператора с использованием на первом этапе переопределения значений искомой функции как на предшествующей, так и на последующей итерации, оказывается более предпочтительным в плане точности и скорости сходимости решения. Проведено сопоставление рассматриваемой модификации КИМ с различными разностными схемами.

На рис.1 в качестве примера представлены результаты решения тестовой задачи, полученные на основе чисто неявной схемы и КИМ с шахматным переопределением для условий, которые отвечают одинаковому количеству арифметических операций при реализации указанных схем. (Здесь $\Delta\theta = (\theta_T - \theta_C) / \theta_T^{\max}$, где подстрочные индексы "т" и "ч" относят значения θ соответственно к точному и численному решениям, а надстрочный индекс "max" - к наибольшей величине θ). Согласно приведенным данным в случае КИМ с шахматным переопределением погрешности численного решения $\Delta\theta$ оказываются существенно меньше, чем для чисто неявной схемы.

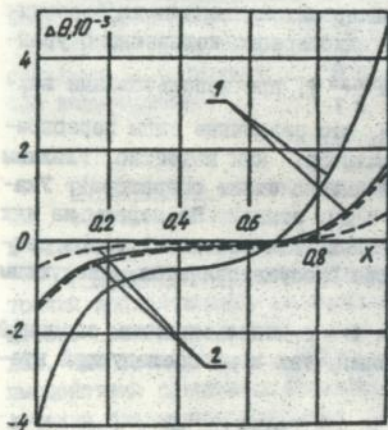


Рис.1. Зависимость $\Delta\theta = f(x)$ для КИМ с шахматным переопределением (---) и неявной схемы (—) при различных F_0 :
1 - $F_0 = 5 \cdot 10^{-2}$; 2 - $4 \cdot 10^{-2}$.

Описан используемый в рамках данной работы методический прием решения задач на последовательности усеченных во времени сеток.

Определенное внимание уделено оценке достоверности получаемых численных решений. С этой целью проводилось сопоставление

данных натуральных и вычислительных экспериментов, сравнение решений, найденных на основе различных численных методов и разностных схем, проводилось тщательное тестирование разрабатываемых программных продуктов и пр.

Третья глава посвящена исследованию процессов теплопереноса в условиях нанесения плазменных покрытий. Важная роль здесь отводилась анализу особенностей термического взаимодействия одиночных частиц с основой. Это обусловлено тем обстоятельством, что характер протекания элементарных актов взаимодействия каждой одиночной частицы с основой, как известно, в большой мере определяет окончательный технологический результат процесса нанесения плазменных покрытий. В данном плане рассматривались следующие вопросы: анализ температурных режимов систем "одиночная напыляемая частица-основа" на стадии действия импульсного давления; изучение эффектов влияния теплоты фазовых переходов в напыляемой частице; исследование процессов теплопереноса при получении аморфизированных покрытий.

Что касается стадии импульсного давления, то здесь математическое моделирование рассматриваемой физической ситуации базировалось на использовании нелинейного гиперболического уравнения теплопроводности. Это связано с необходимостью учета на данной стадии ввиду высокой интенсивности процесса фактической конечной скорости распространения теплоты W и зависимости от температуры всех теплофизических характеристик материала, включая время релаксации τ_p . Математическая постановка соответствующей задачи представлена в виде

$$c_{v1}(t) \left[\frac{\partial t_1}{\partial t} + \tau_{p1}(t) \frac{\partial^2 t_1}{\partial t^2} \right] = \frac{\partial}{\partial x_p} \left(\lambda_1(t) \frac{\partial t_1}{\partial x_p} \right), \quad (4)$$

$$c_{v2}(t) \left[\frac{\partial t_2}{\partial t} + \tau_{p2}(t) \frac{\partial^2 t_2}{\partial t^2} \right] = \frac{\partial}{\partial x_p} \left(\lambda_2(t) \frac{\partial t_2}{\partial x_p} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial x_p} \Big|_{x_p=0} = 0; \quad (6) \quad \frac{\partial t_2}{\partial x_p} \Big|_{x_p=\delta_2} = 0; \quad (7)$$

$$t_1 \Big|_{\tau=0} = t_{01}. \quad (8) \quad t_2 \Big|_{\tau=0} = t_{02}. \quad (9)$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial t} \Big|_{\tau=0} = \frac{\partial t_2}{\partial t} \Big|_{\tau=0} = 0. \quad (10)$$

$$t_1 \Big|_{x_p=\delta_1} = t_2 \Big|_{x_p=\delta_1} \quad (11)$$

$$\left[\lambda_1(t) \frac{\partial t_1}{\partial x_p} + \tau_{p1}(t) \frac{\partial^2 q_1}{\partial t^2} \right] \Big|_{x_p = \delta_1} =$$

$$\left[\lambda_2(t) \frac{\partial t_2}{\partial x_p} + \tau_{p2}(t) \frac{\partial^2 q_2}{\partial t^2} \right] \Big|_{x_p = \delta_1} \quad (12)$$

где δ_p - толщина двухслойной системы, $\delta_p = \delta_1 + \delta_2$; индексы 1 и 2 относят величины, соответственно, к частице и основе.

Результаты вычислительных экспериментов, проведенных на основе данной математической постановки, свидетельствуют о том, что в анализируемой физической обстановке эффекты влияния конечности скорости распространения теплоты W весьма существенны для целого ряда широко используемых пар материалов. Так, максимальная разница температур, отвечающих наличию и отсутствию учета при математическом моделировании конечности величины W , для пары бериллий (покрытие) - медь (основа) составляет примерно 610°C , для пары ниобий-алюминий - 690°C .

Выполненные исследования позволили также рассмотреть возможность рационального выбора определяющей температуры при линеаризации данной нелинейной задачи. Причем, как показали вычислительные эксперименты, традиционно используемые способы линеаризации могут привести не только к ошибочным количественным результатам, но и к неправильному качественному описанию процесса. Например, для пары железо-железо на стадии действия релаксационных эффектов температура контакта согласно традиционно линеаризованному решению оказывается постоянной, а температура нелинейного решения монотонно падает во времени, причем это падение составляет 431°C .

Получены данные о возможности существенного влияния теплоты кристаллизации напыляемых частиц на температурные режимы систем "частица-основа". Так, для ситуации нанесения танталового покрытия на железную основу отличие температур, отвечающих соответственно наличию и отсутствию учета теплоты кристаллизации, составляет примерно 270°C .

Большое внимание в работе уделено исследованию закономерностей термического взаимодействия напыляемых частиц с основой при получении аморфизированных покрытий ввиду их перспективных технологических свойств. Для этой ситуации на базе математического моделирования был проведен широкий параметрический анализ рассматриваемых процессов теплопереноса. Полученные данные служили основой для взаимосвязанного рассмотрения температурных режимов покрытий и термодинамических диаграмм "температура-время-превращение" (ТЭП-диаграмм), полученных на основе теории фа-

зовых превращений (см., например, рис.2.). В результате такого

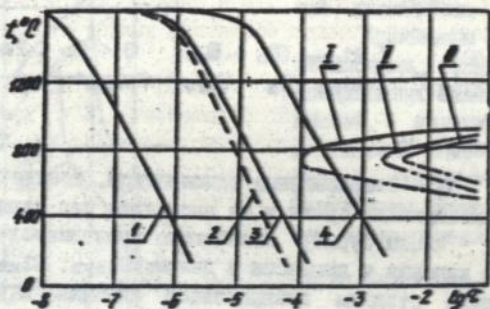


Рис. 2. Изменение температуры на свободной поверхности напыленных частиц из сплава $Fe_{83}B_{17}$ (1-4) толщиной $1 \cdot 10^{-6}$ м (линия 1), $1 \cdot 10^{-6}$ м (линии 2,3), $4 \cdot 10^{-6}$ м (линия 4) и ТП- диаграммы, соответствующие объемной доле кристаллической фазы $z > 0,0001\%$ (I), 10% (II), 100% (III); 1,3,4 - затвердевание на основе из стали 45; 2 - на медной основе.

анализа в целях прогнозирования свойств аморфизированных покрытий решалась задача об определении объемного содержания аморфной и кристаллической фазы. Выполненные исследования позволили также ранжировать основные технологические параметры, определяющие эффективность процесса аморфизации покрытий при плазменном напылении.

В работе приведены данные экспериментальных исследований различных характеристик получаемых аморфизированных покрытий, таких как прочность сцепления с основой, износостойкость, коррозионная стойкость, магнитная проницаемость, температура Кюри и пр.

В четвертой главе представлен материал, касающийся технологии закалки в жидких средах. Причем, здесь рассматривается круг таких технологических ситуаций, когда пренебрежимо малой является продолжительность первой стадии охлаждения при закалке - стадии пленочного кипения. Рассмотрение именно этих ситуаций определяется тем, что в данных условиях, как известно, могут быть реализованы достаточно благоприятные условия закалки в плане уменьшения вероятности образования закалочных трещин и, соответственно, возрастания прочностных свойств материала. Для такой физической обстановки выполнены численные исследования по определению теплового состояния упрочняемых деталей на базе следующей математической модели:

$$Cv(\theta, Fo) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \text{div} [\Lambda(\theta, Fo) \text{ grad } \theta] , \quad (13)$$

$$\Lambda(\theta, Fo) \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{\Pi} = \begin{cases} V_{1\text{пуз}} (\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{ж}}), & 0 < Fo < Fo_{\text{пуз}}, \\ V_{1\text{кв}} (\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{ж}}), & Fo_{\text{пуз}} < Fo < Fo_{\text{к}} \end{cases} , \quad (14)$$

$$\theta|_{Fo=0} = \theta_0. \quad (15)$$

где $\theta_{\text{п}}$, $\theta_{\text{ж}}$, θ_0 - безразмерные температуры, соответственно, поверхности, охлаждающей среды и ее насыщения при данном давлении; $Fo_{\text{пуз}}$, $Fo_{\text{к}}$ - числа Фурье, отвечающие продолжительности стадии пузырькового кипения и процесса в целом; $V_{1\text{пуз}}$, $V_{1\text{кв}}$ - числа Био, соответствующие стадиям пузырькового кипения и конвективного теплообмена, n - нормаль к поверхности; Π - ограничивающая поверхность закалываемой детали.

Изучены возможности как полной, так и частичной линеаризации данной нелинейной математической модели относительно всех содержащихся в ней нелинейностей.

В контексте реализации необходимых структурных превращений в материале анализировались температурные режимы закалываемых деталей, отвечающие стадии пузырькового кипения. Исследования в этой части выполнены для широкого практического диапазона изменения технологических и геометрических параметров. (Характерные данные таких исследований приведены на рис. 3.). Применительно к ситуации закалки и размерной обработки толстостенных пластин выполнено исследование по проектированию рациональной организации технологического процесса в целом. На основе проведенного анализа теплового и термонапряженного состояния указанных пластин показано, что окончательную размерную обработку (образование кромок) в целях уменьшения вероятности по-

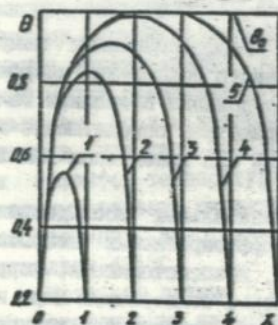


Рис. 3. Распределение температуры θ по толщине пластины δ при $Fo = Fo_{\text{пуз}}$:

- 1 - $\delta = 1$, $Fo_{\text{пуз}} = 0,0938$;
- 2 - $\delta = 2$, $Fo_{\text{пуз}} = 0,158$;
- 3 - $\delta = 3$, $Fo_{\text{пуз}} = 0,1838$;
- 4 - $\delta = 4$, $Fo_{\text{пуз}} = 0,164$;
- 5 - $\delta = 5$, $Fo_{\text{пуз}} = 0,164$.

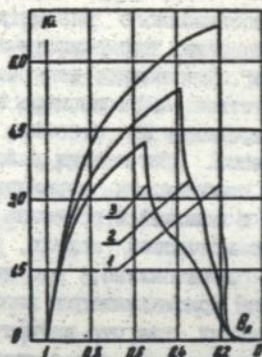


Рис. 4. Зависимость $K_1=f(\theta_{\text{л}})$ для водного раствора бисфенола при различных значениях температуры θ_0 : 1- $\theta_0=0,026$; 2 - $0,047$; 3 - $0,094$.

явления закалочных трещин рационально осуществлять после упрочнения материала.

Проведены исследования закалочных свойств некоторых специальных охлаждающих жидкостей, являющихся водными растворами солей и полимеров. Рис. 4. иллюстрирует типичные результаты данного направления исследований. (Здесь $K_1 = \frac{q \cdot l_0}{\lambda_0 \cdot t_0}$).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

По существу проведенных исследований и изложенного в диссертации материала необходимо отметить следующее:

1. Выполнен комплекс исследований по установлению закономерностей протекания процессов теплопереноса для ряда специальных условий реализации технологических процессов, направленных на придание требуемых свойств поверхностным слоям деталей - технологий получения плазменных покрытий и закалки в жидких средах.
2. Развита эффективная модификация комбинированного итерационного метода - КИМ с шахматным перераспределением на основе шахматной схемы. Выполнено сопоставление эффективности различных вариантов данной модификации. Показано, что вариант, характеризующийся аппроксимацией пространственного оператора с использованием на первом этапе перераспределения значений искомого функции как на предшествующей, так и на последующей итерации, обладает преимуществами в плане точности и скорости сходимости решения.
3. Для ситуации плазменного нанесения покрытий изучены особенности термического взаимодействия напыляемой частицы с основой применительно к различным условиям и стадиям напыления. Выполнен анализ особенностей теплового состояния систем "растекшаяся частица-основа" в условиях напыления сплавов, склонных к аморфизации. Получено решение задачи о прогнозировании свойств

аморфизированных покрытий на базе взаимосвязанного рассмотрения теплового состояния покрытий и соответствующих термокинетических диаграмм "температура-время-превращение". Дан анализ влияния основных технологических факторов, ответственных за процесс аморфизации покрытий, и выполнено их ранжирование по степени воздействия на эффективность данного процесса. Для стадии действия ударного давления изучены физические особенности термического взаимодействия расплавленной частицы с основой и показана возможность определенной линеаризации математической модели, отвечающей данному процессу теплопереноса. Установлено, что термические эффекты, обусловленные процессом кристаллизации напыляемых частиц, могут быть весьма существенными, так что учет теплоты фазового перехода в покрытии может приводить к недопустимым погрешностям при проведении вычислительных экспериментов.

4. Применительно к различным условиям реализации технологии закалки в жидких средах, характеризующихся пренебрежимо малой продолжительностью периода пленочного кипения, выполнен анализ особенностей процессов теплопереноса. В контексте обеспечения требуемых структурных изменений в материале изучена динамика температурных режимов закалываемых деталей во временном интервале, отвечающем пузырьковому кипению. Выполнен сравнительный анализ теплового и термонапряженного состояния пластин различной конфигурации с целью назначения эффективных технологических режимов их обработки. Установлены закономерности влияния различных нелинейностей, имеющих место в рассматриваемой физической ситуации. Определены охлаждающие способности различных нетрадиционных закалочных жидкостей.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Сизяко 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.

2. Кобаско Н.И., Сизяко Н.М., Меранова Н.О. Исследование влияния нелинейностей на процесс теплопереноса при закалке// Пром. теплотехника. - 1982. - №. - С. 46-51.

3. Морганюк В.С., Сизяко Н.М., Меранова Н.О. Численное решение задачи о термонапряженном состоянии пластин в процессе закалки// Теплоотдача и прикладная гидродинамика. - Киев: Наук. думка, 1983. - С. 41-43.

4. 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.- N2.- P.130-135.

5. Кобаско Н.И., Фялко Н.М., Меранова Н.О. Исследование закалочных свойств водных растворов солей// Пром. теплотехника.- 1986.- N5.- С.31-34.

6. 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 spray of alloys susceptible to amorphous transformation// Plasma Jets in the Development of New Materials technology: Proceedings of the International Workshop, 3-9 Sept. 1990, France, USSR/ eds. O.P.Solonenko, A.J.Fedorchenko.- Leist: VSP-III, Vtrecht, the Netherlands Tokyo, Japan.- P.383-391.

7. Меранова Н.О., Прокопов В.Г., Саригло В.Г. и др. Применение комбинированных итерационных методов для решения задач теплофизики технологических процессов // Новые подходы к решению дифференциальных уравнений: Тез. докл. Второй всесоюз. конф., Дрогобыч, май-июнь 1989. - М., 1989. - С. 112.

8. Кобаско Н.И., Фялко Н.М., Меранова Н.О. Численное решение задачи об определении продолжительности процесса пузырькового кипения при закалке // Пром. теплотехника. - 1984. - N 4. - С. 29-32.

9. Прокопов В.Г., Швец Ю.И. Фялко Н.М., Меранова Н.О. и др. Исследование теплового состояния системы покрытие-основа в условиях газотермического напыления// Физ. и химия обраб. материалов.- 1989.- N 6.- С.42-45.

10. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Меранова Н.О. и др. Теплофизика процессов формирования газотермических покрытий. Состояние исследований// Физ. и химия обраб. материалов.- 1993.- N 4.- С.83-93.

11. 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.- N1.- С.70-78.

12. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Меранова Н.О. и др. Температурные режимы систем частица-основа при газотермическом напылении// Физ. и химия обраб. материалов.- 1994.- N2.- С.59-67.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

θ - безразмерная температура, $\theta = t/t_0$; Fo - число Фурье, $Fo = a_0 \cdot \tau / l^2$; A, C_V - безразмерные коэффициент теплопроводности и удельная объемная теплоемкость, $A = \lambda / \lambda_0$, $C_V = C_V / C_{V0}$; x - безраз-

мерная пространственная координата, $x=x_p/l$; Bi - число Био, $Bi = \alpha \cdot l / \lambda_0$; t - температура; q - плотность теплового потока; τ - время; l - характерный размер; α - коэффициент температуропроводности; λ - коэффициент теплопроводности; ρ_v - удельная объемная теплоемкость; α - коэффициент теплоотдачи; индекс "с" отвечает характерному или начальному значению параметра; КИМ - комбинированные итерационные методы.

SUMMARY

Research complex of heat transfer processes for the plasma sprayed coating technologies and quenching at the liquids medium, directed at the ensuring of functional qualities of detail surface layers, which are demanded, has been performed. Effective modification of combined iterative method (CIM) with over-definition in chess-board order on the chess-board scheme base has been developed. Heat state of the "particle-base" system analis has been performed for the condition of plasma coating of alloys, which have tendency to amorphization. The main technological factors, which have an influence on amorphization process, have been examined. Thermal interaction peculiarities of particles with the base have been studied at the impuls pressure stage. Thermal effects, caused by the particles cristallization process, have been analysed. Temperature regimes of the details investigation have been performed for that conditions quenching process, where duration of the film boiling stage was ignorable small. Comparative analysis of the thermal and strianed state of the plates has been performed. Regularities of inflience of various unlinearities, which take place at the considered physical situation have been definded. The datas about cooling qualities of a number of nontraditional quenching medium have been received.

АННОТАЦИЯ

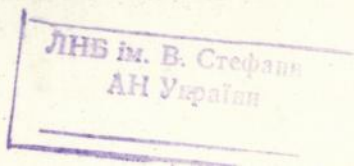
Выполнен комплекс исследований процессов теплопереноса при реализации технологий получения плазменных покрытий и закалки в жидких средах, ориентированных на придание требуемых служебных свойств поверхностным слоям деталей. Развита эффективная модификация комбинированных итерационных методов (КИМ) - КИМ на основе шахматной схемы с шахматным перераспределением искомого функции. Для ситуации плазменности нанесения покрытий выполнен анализ температурных режимов систем "частица-основа" на стадии действия

импульсного давления, показано, что роль релаксационных эффектов может быть весьма существенной. Изучены закономерности влияния теплоты кристаллизации напыляемых частиц. Приведены результаты исследований особенностей теплопереноса при получении аморфизированных покрытий. Рассмотрены основные технологические факторы, ответственные за процесс аморфизации. Применительно к закалке в жидких средах выполнены исследования температурных режимов деталей для условий реализации данной технологии, при которых продолжительность стадии пленочного кипения пренебрежимо мала. Выявлены закономерности влияния нелинейностей I и II рода на процессы теплопереноса при закалке. Проведен сравнительный анализ теплового и термонапряженного состояний толстостенных пластин с целью выбора рационального технологического режима их обработки. Приведены результаты исследований по определению охлаждающих свойств нетрадиционных закалочных сред.

Ключові слова: процеси теплопереносу, математичне моделювання, модифікація комбінованих ітераційних методів, плазмове нанесення покриттів, релаксаційні ефекти, теплота кристалізації, гартування в рідких середовищах, охолоджувача спроможність загартовувачих середовищ.

Подписано к печати /6.02.96г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл.-печ.лист.10. Уч.-изд.лист 10.
Тираж 100. Заказ 70.

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



443892

AB 34.196