На правах рукописи

Губарьков Дмитрий Владимирович

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОПЛАВЛЕНИЯ НАПЫЛЁННЫХ ПОКРЫТИЙ И ПАЙКИ СВЕРХТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Специальность 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Томск - 2003

Работа выполнена в Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН и Томском политехническом университете

Научный руководитель:	доктор технических наук				
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук,				
	профессор и.м. васенин				
	кандидат физико-математических наук				
	доцент Б.С. Зенин				
Ведущая организация:	Институт теоретической и прикладной				
	механики СО РАН (г. Новосибирск)				

Защита состоится «<u>29</u>» <u>декабря</u> 2003 г. в <u>14</u> часов <u>30</u> минут в 228 аудитории 10 корпуса на заседании диссертационного Совета ДС 212.025.01 при Томском политехническом университете. Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «<u>28</u>» ноября 2003 г.

Учёный секретарь диссертационного совета, д.т.н., профессор

А.А. Орлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним наиболее эффективных ИЗ путей получения упрочнённых деталей ответственного оборудования И высокоресурсного режущего инструмента является применение электроннолучевой обработки в вакууме. Это связано с тем, что практически только с помощью высокоэнергетического воздействия электронного луча удаётся реализовать высокие скорости нагрева различных сплавов и керамики, избирательно осуществлять слоёв оплавление компонент или композиционных материалов и благодаря осуществлению процесса в вакууме добиваться консолидации, даже трудно свариваемых или спаиваемых материалов. Применение такой обработки сдерживается недостаточной ИЗУЧЕННОСТЬЮ процессов тепло- и массопереноса, ответственных за формирование структуры обрабатываемых материалов и прочностных, в том числе адгезионных, свойств композиций материалов. В большей степени это относится К процессам, происходящим В реальных технологических устройствах, в которых осуществляется, например, оплавление износостойких и коррозионностойких газотермических покрытий или пайка сверхтвёрдых материалов (СТМ) типа металлокерамики или поликристаллических алмазов на металлическую основу.

Анализ промышленного применения электронно-лучевых процессов показывает, что эффективность их использования связана с правильностью выбора значений технологических параметров И автоматизацией технологического процесса в целом. Выбор значений технологических параметров влияет на процессы тепло- и массопереноса в обрабатываемом материале, от него зависит структура и прочностные свойства материала после обработки. В СВЯЗИ С что экспериментальный подбор тем, рациональных значений технологических параметров является достаточно трудоёмким и энергоёмким процессом, в настоящее время развивается компьютерное моделирование процессов электронно-лучевой обработки материалов в комплексе с разработкой методик определения оптимальных значений основных технологических параметров. Создаваемые при этом программные средства позволяют прогнозировать структуру и физико-

механические свойства материалов, значительно снижать материальные затраты и трудоёмкость этапов технологической подготовки при использовании промышленных электронно-лучевых установок.

<u>Целью работы</u> является разработка математических моделей процессов электронно-лучевого оплавления композиции «газотермическое покрытиеоснова» и электронно-лучевой пайки композиции «сверхтвёрдый материалприпой-основа» и определение на их основе оптимальных значений основных технологических параметров, которые позволяют достигать высоких прочностных свойств данных композиций.

<u>Научная новизна</u>. В работе впервые получены следующие научные результаты:

- 1. Разработана трёхмерная нестационарная математическая модель теплофизических процессов при оплавлении композиции «газотермическое покрытие-основа» движущимся электронным лучом, сканирующим по гармоническому закону в направлении перпендикулярном его поступательному перемещению, которая позволяет определять рациональные условия оплавления покрытия из сплава класса NiCrBSi на стальной основе в технологическом диапазоне значений плотности поглощённой мощности электронного луча (до 10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup>) и скорости поступательного перемещения электронного луча (2-5)мм/с). обеспечивающие проплавление покрытия до границы раздела с основой при максимальной скорости охлаждения расплава.
- Разработан способ расчёта и определены оптимальные соотношения времени и температуры пайки композиции «кубический нитрид бора (КНБ)сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co» для достижения задаваемой толщины диффузионной зоны титана в КНБ при ограниченной величине остаточных диффузионных напряжений в КНБ.
- 3. Разработан способ расчёта и определены значения коэффициента диффузии титана в КНБ, сплаве класса AgCuInTi и твердом сплаве на основе W и Co по экспериментальным данным о распределении титана в композиции «КНБ-сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co» после завершения процесса пайки.

<u>Практическая ценность</u>. Результаты диссертационной работы использовались в Лаборатории газотермических покрытий ИФПМ СО РАН (г. Томск) на этапах отработки технологических режимов оплавления газотермических покрытий ответственных деталей, а также были переданы в Физико-технический институт НАНБ (г. Минск) для отработки технологических режимов пайки сверхтвёрдых элементов на режущий инструмент.

Разработанные программные средства могут быть использованы в инженерной деятельности на стадиях технологической подготовки электронно-лучевых установок как отдельно, так И В составе автоматизированных технологических систем оплавления и пайки композиций материалов.

Положения, выносимые на защиту:

- 1. Трёхмерная нестационарная математическая модель теплофизических процессов при оплавлении композиции «газотермическое покрытиеоснова» движущимся электронным лучом, сканирующим ПО гармоническому закону в направлении перпендикулярном его поступательному перемещению, которая позволяет определять рациональные условия оплавления покрытия из сплава класса NiCrBSi на стальной основе в технологическом диапазоне значений плотности поглощённой мощности электронного луча (до 10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup>) и скорости поступательного перемещения электронного луча (2-5)мм/с). обеспечивающие проплавление покрытия до границы раздела с основой при максимальной скорости охлаждения расплава.
- Результаты расчёта термических циклов и скоростей охлаждения расплава при оплавлении покрытия из сплава класса NiCrBSi на стальной основе, а также выявленные рациональные значения плотности поглощённой мощности и скорости поступательного перемещения электронного луча, сопоставленные с экспериментальными данными.
- Одномерная нестационарная математическая модель теплофизических процессов и диффузии при электронно-лучевой пайке композиции «КНБсплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co», учитывающая температурную зависимость коэффициента диффузии титана.

- Результаты сравнения распределений концентрации титана, полученных с использованием изотермической и разработанной неизотермической моделей процессов пайки композиции «КНБ-сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co».
- 5. Способ расчёта и результаты расчёта значений коэффициента диффузии титана в КНБ, сплаве класса AgCuInTi и твердом сплаве на основе W и Co по экспериментальным данным о распределении титана в композиции «КНБ-сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co» после завершения процесса пайки.
- Способ расчёта и результаты расчёта оптимальных соотношений времени и температуры пайки композиции «КНБ-сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co» для достижения задаваемой толщины диффузионной зоны титана в КНБ при ограниченной величине остаточных диффузионных напряжений в КНБ.

<u>Апробация работы</u>. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на 5 научных конференциях, в том числе на 2 международных: 7-я Всероссийская научно-техническая конференция «Mexaника летательных аппаратов и современные материалы» (Томск, 2000), 6-th International conference «Computer-Aided Design of Advanced Materials and Technologies» (Tomsk, Russia, 2001), 6-th Sino-Russian International Symposium «New Materials and Technologies» (Beijing, China, 2001), 2-я Всероссийская конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2001), 4-я Всероссийская конференция молодых учёных «Физическая мезомеханика материалов» (Томск, 2001).

<u>Структура и объём работы</u>. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 121 странице, содержит 26 рисунков, 8 таблиц, список литературы состоит из 106 наименований.

<u>Публикации</u>. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ: статей - 3, докладов на конференциях - 2, тезисов докладов на конференциях - 3.

<u>Личный вклад автора</u> состоит в постановке задач, формулировке физических и математических моделей, выборе метода решения, разработке

алгоритмов и программ, проведении расчётов, оценке и интерпретации их результатов. Автором проведён анализ экспериментальных данных о структуре и свойствах композиций исследуемых материалов, сделаны выводы о работоспособности моделей, даны рекомендации по оптимизации технологических режимов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, практическая ценность, а также положения, выносимые на защиту. Излагается краткое содержание работы.

Первая глава посвящена обзору состояния работ по исследуемой проблематике. В ней также рассматриваются физические особенности электронно-лучевого воздействия на металлические материалы, приводятся оценки необходимости учёта В математических моделях различных теплофизических и гидродинамических процессов, электронно-лучевой тепловой источник сравнивается по концентрации энергии с другими тепловыми источниками, используемыми при термообработке материалов. Кроме этого. приводятся результаты расчёта критической плотности теплового потока для достижения на поверхности полубесконечного тела в центре пятна нагрева перемещающегося теплового источника температур плавления и кипения в установившемся режиме. На основе анализа литературных данных рассмотрены особенности математического моделирования электронно-лучевого теплового источника, приведена простейшая линейная одномерная задача нагрева неподвижным тепловым источником двухслойной композиции материалов С различными теплофизическими свойствами.

Во второй главе проводится математическое моделирование теплофизических процессов при электронно-лучевом оплавлении газотермического покрытия из сплава класса NiCrBSi на стальной основе. Дифференциальное уравнение теплопроводности записывается в следующем виде:

$$\rho \left[ c + L\delta \left( T - T^* \right) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = div (\lambda gradT),$$

где: T = T(x, y, z, t) - температура;  $\rho = \rho(x, y, z, T)$  - плотность; c = c(x, y, z, T) - удельная теплоёмкость;  $\lambda = \lambda(x, y, z, T)$  - коэффициент теплопроводности; L - удельная теплота фазового перехода;  $\delta(T - T^*)$  - дельта-функция Дирака;  $T^*$  - средняя температура фазового перехода. Исходная температура композиции задаётся начальным условием. На всей границе, кроме текущей области действия теплового источника, тепловой поток считается равным нулю. Полученная задача решается численно с использованием явной разностной схемы расчёта. После выполнения серии расчётов с изменением значений параметров оплавления — плотности мощности теплового источника q и скорости поступательного перемещения электронного луча  $V_x$ , получены изолинии оплавления композиции (рис. 1) и распределения средней скорости охлаждения по толщине покрытия (рис. 2).



Рис. 1. Расчётные изолинии оплавления композиции по ширине дорожки сканирования для различных режимов оплавления: *a* – 5 мм/с, 1,53·10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup>; *б* - 2 мм/с, 0,76·10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup>; *в* - 2 мм/с, 1,02·10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup>; *е* - 2 мм/с, 1,27·10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Толщина покрытия 1мм.



Рис. 2. Расчётные распределения средней скорости охлаждения по толщине покрытия для различных режимов оплавления: *а1* - 5 мм/с, 0.76·10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup>: *б1* - 5 мм/с, 1.02·10<sup>5</sup>

BT/cm<sup>2</sup>; e1 - 5 mm/c,  $1,27 \cdot 10^5$  BT/cm<sup>2</sup>; e1 - 5mm/c,  $1,53 \cdot 10^5$  BT/cm<sup>2</sup>; a2 - 2 mm/c,  $0,76 \cdot 10^5$ BT/cm<sup>2</sup>; 62 - 2 mm/c,  $1,02 \cdot 10^5$  BT/cm<sup>2</sup>; e2 - 2mm/c,  $1,27 \cdot 10^5$  BT/cm<sup>2</sup>; e2 - 2 mm/c,  $1,53 \cdot 10^5$ BT/cm<sup>2</sup>.

Изолиния *a*, показанная на рис. 1, соответствует такому режиму, при котором не происходит оплавление покрытия по всей толщине. Изолиния б

соответствует режиму полного оплавления покрытия без плавления основы. При этом чётко выделяется граница раздела «основа-покрытие». Такой характер изолинии связан с различием температуры плавления основы и покрытия (разница порядка 300<sup>0</sup>К). Изолинии *в, е* соответствуют режимам полного оплавления покрытия с плавлением основы.

Анализ рис. 2 показал, что наибольшая интенсивность охлаждения слоёв покрытия, близких к рабочей поверхности композиции, по сравнению со слоями, близкими к границе раздела «основа-покрытие», наблюдается в случае оплавления наименьшей из выбранных плотностей мощности электронного луча и высокой скорости его поступательного перемещения (рис. 2 кривая а1). С увеличением плотности мощности при сохранении скорости поступательного перемещения источника происходит уменьшение величин и выравнивание по толщине покрытия скорости охлаждения в рассматриваемых точках (рис. 2 кривые 61, 61, 21). Снижение скорости поступательного перемещения источника с увеличением плотности мощности ведёт к дальнейшему уменьшению величин и выравниванию по толщине покрытия скорости охлаждения в рассматриваемых точках (рис. 2 кривые а2, 62, в2, г2). Распределения скорости охлаждения, показанные на рис. 2 (кривые 62, 62, 22), соответствуют режимам с перегревом расплава, когда за счёт теплоотвода в основу не обеспечивается более интенсивное охлаждение поверхностных слоёв покрытия по сравнению со слоями, близкими к границе раздела «основа-покрытие».

Таким образом, результаты расчётов показали, что режим с  $V_x = 2$  мм/с,  $q = 0,76 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> позволяет рационально оплавить покрытие из сплава класса NiCrBSi на стальной основе. В таком режиме обеспечивается проплавление покрытия до границы раздела с основой при максимальной скорости охлаждения расплава.

Для проверки корректности полученных результатов и адаптации математической модели к эксперименту проведено оплавление электронным лучом промышленного порошкового материала класса NiCrBSi. Порошок напылялся азотно-аргоновой плазмой на стальную подложку на воздухе, оплавление покрытия проводилось в вакуумной камере, оснащенной электронной пушкой с плазменным катодом. Режимы оплавления

соответствовали принятым в расчетах. Металлографические исследования проводились по стандартной методике с применением оптических микроскопов Неофот и МИМ-9. Микротвердость структурных составляющих определялась на приборе ПМТ-3.

По выявлено. при результатам эксперимента что скорости поступательного перемещения V, =5 мм/с оплавления покрытия на всю глубину не происходит. Граница раздела «покрытие-основа» и нижние слои покрытия не претерпевают изменений (рис. 3). Вблизи рабочей поверхности покрытия структура материала мелкодендритная, а микротвердость имеет среднее значение 6900±280 МПа. В покрытии, вблизи границы раздела «покрытие-основа», сохраняется исходная структура напыленного материала и значение средней микротвердости увеличивается до 7800±640 МПа. В основе, вблизи границы раздела «покрытие-основа», микротвердость плавно вследствие частичного диффузионного отжига, увеличивается HO не достигает значений микротвердости покрытия. В целом, скачок свойств на границе типичен для напыленных покрытий.

При скорости поступательного перемещения V<sub>x</sub>=2 мм/с и плотности мощности электронного луча от 10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup> и выше формируется структура близкая к структуре покрытия оплавленного плазмой. В поперечном сечении покрытия на границе раздела «покрытие-основа» образуется тонкий слой твёрдого раствора железа в никеле, на котором вырастают столбчатые кристаллы основной фазы с прослойками эвтектики (рис. 4). Значение микротвёрдости в этой зоне покрытия составляет около 3300±170 МПа. Структура в глубине покрытия представляет дендриты и зёрна твёрдого раствора Ni, пространство между которыми занимает мелкодисперсный твёрдый раствор Ni, а также эвтектика твердого раствора Ni и Ni<sub>3</sub>B. Крупных выделений упрочняющих фаз не наблюдается. Микротвердость покрытия от «покрытие-основа» монотонно возрастает, достигая границы раздела значений 5700±280 МПа на расстоянии 0,25 мм от границы раздела. Резкого скачка свойств на границе раздела «основа-покрытие», типичного для напыленных покрытий, не наблюдается.







Рис. 4. Структура покрытия, полученная в режиме оплавления с перегревом, ×500.

Рис. 5. Структура покрытия, полученная в режиме оплавления без перегрева, ×500.

Рис. 3. Структура покрытия, полученная в режиме неполного оплавления, ×250.

При плотности мощности менее  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> и скорости поступательного перемещения электронного луча  $V_x$  =2 мм/с формируется дисперсная зёренная структура, особенно мелкая на границе раздела «основа-покрытие», со средней микротвёрдостью 5500±280 МПа (рис. 5). В верхних слоях покрытия средняя микротвердость увеличивается до значений 6600±300 МПа за счет увеличения доли карбидных и боридных включений. Более высокая дисперсность основной и вторых фаз обеспечивает более высокие значения средней микротвердости при малой дисперсии. Резкого скачка свойств на границе раздела «основа-покрытие» не наблюдается. Таким образом, экспериментально подтверждено, что режим с  $V_x$  =2 мм/с, q =0,76·10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup> позволяет рационально оплавить покрытие из сплава класса NiCrBSi на стальной основе. В связи с этим можно сделать вывод о хорошем согласовании расчётных и экспериментальных данных.

<u>В третьей главе</u> проводится математическое моделирование теплофизических процессов и диффузии при электронно-лучевой пайке композиции «КНБ-сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co». Дифференциальные уравнения теплопроводности и диффузии для каждого слоя композиции (СТМ - *i* = 1, припой - *i* = 2, основа - *i* = 3) записываются в следующем виде:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где  $T_i = T_i(x,t)$  - температура,  $c_i$  - удельная теплоёмкость,  $\rho_i$  - плотность,  $\lambda_i$  - коэффициент теплопроводности,

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_i \frac{\partial C_i}{\partial x}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где  $C_i = C_i(x,t)$  - концентрация диффундирующего элемента,  $D_i = D_i(T)$  коэффициент диффузии, зависящий от температуры по закону Аррениуса

$$D_i = D_{i0} \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right),$$

где *E<sub>i</sub>* - энергия активации диффузии, *D<sub>i0</sub>* - предэкспонент, *R* - универсальная газовая постоянная. Исходная температура композиции и концентрация диффундирующего элемента задаётся начальным условием. На внешних границах композиции диффузионный поток считается равным нулю, а теплообмен задаётся по закону Ньютона. Задача решается численно с использованием явной разностной схемы расчёта. Диффундирующим элементом является титан. Начальная концентрация титана в припое 5%, в СТМ и основе – 0%. Толщина слоя припоя 200 мкм. Полученные распределения концентрации титана в диффузионной зоне при различных временах охлаждения показаны на рис. 6.



Рис. 6. Распределение концентрации титана в диффузионной зоне при различных временах охлаждения: 1 – изотермическая задача,  $t_s = t_e = 60$  с; 2 –  $t_s = 60$  с,  $t_e = 65$  с; 3 –  $t_s = 60$  с,  $t_e = 70$  с; 4 –  $t_s = 60$ ,  $t_e = 80$  с. Температура пайки  $T_s = 1100$  °C. Здесь  $t_s$  - время выдержки композиции при температуре  $T_s$ ,  $t_e$  - время выдержки и охлаждения композиции.

В результате анализа рис. 6 отмечено, что с увеличением времени охлаждения композиции распределение концентрации титана стремится к некоторому конечному, остающемуся в образце после пайки. От условий охлаждения композиции (задаваемых в модели коэффициентом теплоотдачи с внешних границ) зависит время охлаждения до температур существенного замедления процесса диффузии. Для используемого набора параметров это ~850°C. Дальнейшее снижение температуры практически не сказывается на характеристиках диффузионной зоны.

Для выполнения представленных расчётов с использованием разработанной математической модели и решения задачи определения оптимальных соотношений времени и температуры пайки композиции предложен способ расчёта и получены оценки значений коэффициента диффузии титана в КНБ, сплаве класса AgCuInTi и твердом сплаве на основе W и Co. При этом использовались экспериментальные данные по распределению титана в композиции «КНБ-сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co» после завершения процесса пайки, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Экспериментально полученное распределение титана в композиции «КНБсплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co» после пайки в течение 120 с, толщина слоя припоя 10 мкм (граница «КНБ-припой» имеет координату *x* =0)

Контрольные	-7	_2	0	1	5	ß	1	13	21
точки, $x$ , мкм	-7	-2	0	I	5	0	1	15	21
Содержание, масс. %	0	8	26	33	15	11	8	3	0

Расчёт значений коэффициента диффузии титана основан на использование процедуры поиска минимума функционала, записанного в следующем виде:

$$J = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \sum_{j=1}^{m} \left[ C_i^j - \overline{C}_i^j \right]^2,$$

где  $C_i^j$  - содержание титана в контрольных точках, рассчитанное с применением точного аналитического решения изотермической задачи пайки;  $\overline{C}_i^j$  - экспериментальные значения содержания титана в контрольных точках, которые представлены в таблице 1; n,m - число расчётных областей и контрольных точек соответственно;  $\alpha_i$  - весовые коэффициенты. Значение функционала J зависит от выбора значений коэффициента диффузии титана в КНБ, сплаве класса AgCuInTi и твердом сплаве на основе W и Co –  $D_1, D_2 D_3$ , соответственно. Процедура поиска минимума функционала J основана на методе координатного спуска. В результате расчёта получены следующие значения коэффициента диффузии:  $D_1=1,4\cdot10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с,  $D_2=1,28\cdot10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с,  $D_3=4,1\cdot10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с.

Расчёт оптимальных соотношений времени и температуры пайки композиции «КНБ-сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co» основан на использование процедуры поиска минимума функционала, записанного в следующем виде:

$$I = \gamma_1 \left( \xi_s - \overline{\xi}_s \right)^2 + \gamma_2 \left( C_s - \overline{C}_s \right)^2 + \gamma_3 \left( \sigma - \overline{\sigma} \right)^2,$$

где  $\xi_s$  и  $\overline{\xi}_s$  - расчетное и заданное значения толщины диффузионной зоны титана в КНБ;  $C_s$  и  $\overline{C}_s$  - расчетное и заданное значения концентрации титана в КНБ на расстоянии толщины диффузионной зоны от границы «КНБ-припой»,  $\sigma$  и  $\overline{\sigma}$  - расчетное и заданное максимальное по модулю значение остаточных диффузионных напряжений в диффузионной зоне титана,  $\gamma_i$  - весовые коэффициенты. За толщину диффузионной зоны титана в КНБ принято расстояние, на котором концентрация титана уменьшается в *е* раз по сравнению с её значением на исходной границе раздела «КНБ-припой». Значение функционала *I* зависит от выбора соотношения времени и температуры пайки. Процедура поиска минимума функционала *I* основана на методе координатного спуска. Распределение концентрации титана находится с использованием точного аналитического решения изотермической задачи пайки. Поле напряжений находится с использованием аналитического с

решения, полученного на основе простейшего одномерного приближения, для условий, когда боковые и торцевые поверхности трёхслойной композиции свободны от действия внешних сил. Результаты расчёта оптимальных соотношений времени и температуры пайки показаны на рис. 7. Полученные кривые связывают оптимальные значения температуры пайки  $T_s$  и времени выдержки  $t_s$ , которые необходимо выдержать для достижения заданной величины диффузионной зоны  $\xi_s$ . Характерно, что одна и та же величина  $T_s$  с одновременным уменьшением времени выдержки  $t_s$ .

На рис. 8 показаны расчётные зависимости максимальных по модулю величин остаточных диффузионных напряжений в слоях композиции «КНБсплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co» от толщины диффузионной зоны титана в КНБ.



Рис. 7. Оптимизационные кривые, связывающие температуру и время выдержки для различных диффузионных зон титана в КНБ ξ<sub>s</sub>: 1 – 10 мкм, 2 – 30 мкм, 3 – 50 мкм, 4 – 70 мкм, 5 – 100 мкм, 6 – 200 мкм, 7 – 300 мкм.



Рис. 8. Зависимости максимальных по модулю величин остаточных диффузионных напряжений в слоях композиции «КНБ-сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co» от толщины диффузионной зоны титана в КНБ: 1 – КНБ, 2 – сплав класса AgCuInTi (припой), 3 – сплав на основе W и Co (основа).

Анализируя рис. 8 можно отметить, что с ростом толщины диффузионной зоны титана в КНБ происходит уменьшение максимальных по

модулю величин остаточных диффузионных напряжений в КНБ и основе, что связано с уменьшением градиентов концентрации титана.

Таким образом, полученные зависимости, изображенные на рис. 7 и рис. 8 позволяют выбирать оптимальные соотношения значений основных параметров пайки – времени и температуры пайки композиции «КНБ-сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co» для достижения задаваемой толщины диффузионной зоны титана в КНБ при ограниченной величине остаточных диффузионных напряжений в КНБ.

<u>В заключении</u> сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1. Разработана трёхмерная нестационарная математическая модель теплофизических процессов при оплавлении композиции «газотермическое покрытие-основа» движущимся электронным лучом, определять рациональные условия оплавления которая позволяет покрытия из сплава класса NiCrBSi на стальной основе в технологическом диапазоне значений плотности поглощённой мощности электронного луча (до 10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup>) и скорости поступательного перемещения электронного луча (2-5 мм/с), обеспечивающие проплавление покрытия до границы раздела с основой при максимальной скорости охлаждения расплава. Показано, что полученные с использованием разработанной модели рациональные значения технологических параметров хорошо согласуются с экспериментальными данными по структуре и твердости оплавленной в соответствующем режиме композиции. Это даёт возможность исследования, анализа и оптимизации конкретных процессов электроннолучевого оплавления газотермических покрытий при минимальном использовании дорогостоящего оборудования и проведении трудоёмких структурных исследований.
- Разработана одномерная нестационарная математическая модель теплофизических процессов и диффузии при электронно-лучевой пайке композиции «КНБ-сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co»,

учитывающая температурную зависимость коэффициента диффузии титана. Показано, что полученные с использованием разработанной модели результаты расчёта изотермической стадии пайки хорошо согласуются с результатами точного аналитического решения соответствующей изотермической задачи пайки.

- 3. Показано, что в условиях принудительного охлаждения неизотермической стадией пайки композиции «КНБ-сплав класса AgCuInTi-сплав на основе W и Co» можно пренебречь, а в условиях естественного охлаждения неизотермическую стадию пайки можно учесть как добавочное время выдержки в изотермической модели.
- 4. Разработан способ расчёта значений коэффициента диффузии титана в КНБ, сплаве класса AgCuInTi и твердом сплаве на основе W и Co, основанный на использовании процедуры поиска минимума функционала, учитывающего расхождение экспериментальных и расчётных значений концентрации титана в контрольных точках композиции. Получены оценки значений коэффициентов диффузии титана в КНБ, сплаве класса AgCuInTi и твердом сплаве на основе W и Co.
- 5. Разработан способ расчёта оптимальных соотношений времени И температуры пайки композиции «КНБ-сплав класса AqCuInTi-сплав на основе W и Co», основанный на использовании процедуры поиска минимума функционала, учитывающего отклонение расчётных значений толшины диффузионной зоны И диффузионных напряжений ОТ задаваемых величин. Показано, что применение разработанного способа расчёта позволяет определять оптимальные соотношения времени и температуры пайки для достижения задаваемой толщины диффузионной зоны титана в КНБ при ограниченной величине остаточных диффузионных напряжений в КНБ.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

 Бутов В.Г., Губарьков Д.В., Князева А.Г. Распределение концентрации диффундирующего элемента в трёхслойной системе и оценка коэффициента диффузии на основе решения обратной задачи // Физ. мезомех. – 2000. – Т.3. – №6. – С. 105-112.

 Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г., Ерошенко А.Ю., Губарьков Д.В. Исследование теплового воздействия электронного пучка на композицию покрытие-основа // Сварочное производство. – 2002. – №6. – С. 20-23.
V.A. Klimenov, Zh.G. Kovalevskaya, A.Yu. Eroshenko and D.V. Gubar'kov Examination of the thermal effect of an electron beam on a coating-substrate

composite // Welding International. – 2002. – №16 (11). – P. 899-902.

- Бутов В.Г., Губарьков Д.В., Князева А.Г., Поболь И.Л. Об оптимизации процесса пайки на основе теоретического исследования диффузионной зоны // Физ. мезомех. – 2002. – Т.5. – №1. – С. 89-93.
- Губарьков Д.В. Расчёт скорости охлаждения при электронно-лучевом оплавлении газотермического покрытия // Механика летательных аппаратов и современные материалы: Сборник избранных докладов VII Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТГУ, 2000. – Вып.3. – С. 100-102.
- Губарьков Д.В. Численное исследование неизотермической диффузии при электронно-лучевой пайке // Исследования по баллистике и смежным вопросам механики. Сб. статей. – Томск: Изд-во ТГУ, 2002. – Вып.5. – С.75-76.
- Butov V.G., Gubar'kov D.V., Knyazeva A.G. Anisothermic diffusion during electron-beam soldering // Abstr. of the VI Int. Conf. «Computer-Aided Design of Advanced Materials and Technologies» (CADAMT'2001), March 29-31, 2001. – Tomsk: ISPMS, 2001. – P. 116-117.

Бутов В.Г., Губарьков Д.В., Князева А.Г. Неизотермическая диффузия при электронно-лучевой пайке // Тезисы докладов VI Международной конференции «Computer-Aided Design of Advanced Materials and Technologies» (CADAMT'2001), 29-31 марта, 2001. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2001. – С. 116-117.

 Klimenov V.A., Eroshenko A.Yu., Gubar'kov D.V., Kovalevskaja Zh.G. Research of electron beam thermal influence on the composition «coatingbasis» // New Materials and Technologies in 21<sup>st</sup> Century. Proceeding of VI Sino-Russian International Symposium on New Materials and Technologies. – Beijing, China, 2001. – P. 356.

Клименов В.А., Ерошенко А.Ю., Губарьков Д.В., Ковалевская Ж.Г. Исследование влияния электронно-лучевого термического воздействия на композицию «покрытие-основа» // Новые материалы и технологии в 21 веке. Материалы VI Китайско-Российского международного симпозиума по новым материалам и технологиям. – Пекин, Китай, 2001. – С.356.

 Губарьков Д.В., Ерошенко А.Ю. Расчёт теплового процесса при электронно-лучевой обработке стали 45 // Тезисы докладов IV Всероссийской конференции молодых учёных «Физическая мезомеханика материалов». – Томск: ИФПМ СО РАН, 2001. – С. 123-124.