

На правах рукописи

ХАРИЧЕВА Дина Леонидовна

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКОЕ
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПАЙКИ
МЕТАЛЛА С КЕРАМИКОЙ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**



Благовещенск – 2006

1.1.3.3

Работа выполнена в Амурском государственном университете и
Московском государственном техническом университете имени
Н.Э. Баумана

Научные консультанты:

доктор технических наук,
профессор Б.А. Виноградов
доктор технических наук,
профессор А.Г. Григорьянц

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических
наук, профессор М.М. Михайлов

доктор технических наук,
профессор А.И. Попов

доктор технических наук,
профессор В.А. Ким

У1776545
Харичева Д.Л.
Физические основы и
практическое применение
лазерной пайки металла с

У1776545

оведени
ого цен

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1776545

Харичева Д. Л. Физические о

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

ов на заседании
2 при Амурском
Благовещенск,

отеке Амурского

0_ г.

Е. Еремин

Актуальность проблемы. Лазерная технология, благодаря своим широким возможностям, с успехом применяется в различных отраслях промышленности, в том числе и в машиностроении при обработке как металлов, так и неметаллов. Среди многообразия используемых материалов особое место занимают вакуум-плотные керамические материалы, обладающие высокими электроизоляционными свойствами в широком интервале температур, большой механической прочностью и устойчивостью к действию агрессивных сред. Важной особенностью керамических материалов является способность образовывать вакуум-плотные высокотемпературные соединения с металлами.

Получение металлокерамических соединений наиболее известными технологиями затруднено сложностью обработки керамики, ее неустойчивостью к тепловым ударам и механическим напряжениям. В процессе пайки или сварки существует необходимость использовать инертную среду или вакуумные камеры. Технологические возможности лазерных источников нагрева позволяют упрощать технологический процесс и получать металлокерамические соединения в атмосфере воздуха. Однако накоплен лишь незначительный опыт применения лазерной пайки при соединении керамики с металлом, и все технические решения находятся в стадии исследований.

Целью диссертационной работы является доказательство применимости непрерывного лазерного излучения для получения качественных спаев металла с керамикой путем разработки перспективных технологических решений получения внешних и внутренних металлокерамических соединений, а также создание общих физико-математических положений, на основании которых возможно формирование контакта керамика–металл и модели, позволяющей определять оптимальные режимы технологического процесса.

Достижение указанной цели реализовано путем решения следующих научно-практических задач:

определение оптических характеристик материалов в видимой и ближней ИК-области;

проведение комплексного изучения переходной зоны полученных металлокерамических соединений методами микрорентгеноспектрального анализа, растровой электронной микроскопии, рентгеновского микроанализа

и другими для определения механизмов формирования контакта;

построение физико-химической модели формирования контакта высокоглиноземистая керамика – металл для прогнозирования свойств и качества спая;

построение физико-математической модели лазерной пайки МКС с нелинейными граничными условиями 3-го и 4-го рода для многослойных плоских и конусных образцов;

создание методик и программного обеспечения для расчетов основных параметров лазерного воздействия на соединяемые материалы при пайке;

исследование формирования фронтов и границ плавления в соединяемых материалах при лазерном воздействии;

разработка метода оценки тепловых быстропротекающих процессов при лазерной пайке металла с керамикой;

создание экспериментальных стендов и разработка технологических рекомендаций по производству соединений металла с керамикой для применения в промышленности;

получение металлокерамических соединений с использованием лазерного излучения различными методами;

определение качества получаемых металлокерамических соединений на механическую прочность и вакуум-плотность.

Научная новизна работы состоит в следующем:

экспериментально и теоретически подтверждена возможность производства металлокерамических соединений при помощи лазерного излучения в виде предложенных технологий получения внешних и внутренних МКС различного назначения:

а) при помощи активных металлов;

б) при помощи оловянно-свинцовых припоев;

в) с керамикой, прозрачной для лазерного излучения /Патент на изобретение № 2099312. Опубликовано в ГРИ Роспатент 20.12.97 г.;

определены коэффициенты отражения промышленных типов керамических материалов в видимой и ближней ИК-области, построены их зависимости от температуры и шероховатости поверхности;

разработан метод скоростной тепловизионной съемки, позволяющий проводить оценки тепловых быстропротекающих процессов при лазерной пайке металла с керамикой;

разработана общая физико-технологическая модель лазерной пайки керамики с металлом для плоских и конусных соединений;

решена задача формирования фронтов плавления (многофронтная задача Стефана) при лазерной пайке движущимся точечным высококонцентрированным источником нагрева, созданы алгоритмы ее решения, разработан пакет прикладных программ, дающий возможность устанавливать положение границ плавления в соединяемых материалах для определения технологических режимов пайки;

теоретически определены термодинамические параметры образующихся фаз в зоне контакта, установлены физико-химические закономерности протекающих процессов, предложена физико-химическая модель контакта высокоглиноземистой керамики с металлом, на основании которой сформулированы технологические требования к металлу и керамике.

Защищаемые положения. На защиту выносятся разработанные теоретические и методические основы формирования контакта высокоглиноземистая керамика – металл при лазерной пайке в виде:

1) установленных закономерностей изменения оптических характеристик промышленных типов керамических материалов в видимой и ближней ИК-области при внешнем тепловом воздействии;

2) установленных физико-химических особенностей протекающих процессов с образованием соединения Al_2TiO_5 и полученных термодинамических параметров образующихся фаз в зоне контакта;

3) разработанных теплофизических моделей лазерной пайки плоских и конусных систем металл-диэлектрик с образованием нескольких фазовых фронтов;

4) разработанной методики решения многофронтной задачи Стефана при воздействии движущегося точечного высококонцентрированного источника нагрева и ее программной реализации, позволяющей определять мгновенное значение положения границ плавления в соединяемых материалах;

5) методики скоростной тепловизионной съемки и ее программной реализации;

6) теоретических и методических основ лазерных технологий получения внешних и внутренних металлокерамических соединений различного назначения для активной пайки, пайки низкотемпературными припоями и пайки металлов с керамикой, прозрачной для лазерного излучения;

7) диапазонов посадок охватывающих металлокерамических соединений промышленного типа ИПН-200, ИП-500, проверенных экспериментально.

Практическая ценность и реализация результатов. Разработаны и

созданы экспериментальные стенды, техническая документация по производству металлокерамических соединений для применения в промышленности.

Результаты экспериментальных исследований переходной зоны металлокерамических соединений, полученные по технологии лазерной активной пайки металла с керамикой, легли в основу конкретных рекомендаций по производству проходных изоляторов типа ИПН-200, использованных в НИР и ОКР по тематике «Разработка герметичных кабельных вводов для АЭС» Амурского комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН (Благовещенск). По результатам совместных разработок получен патент на способ изготовления герметичных вводов для контрольных кабелей АЭС. Разработанная технология соединения керамики с металлом с применением лазерного излучения дает устойчивое воспроизведение результатов и может быть рекомендована для промышленного внедрения.

Результаты исследований по оценке реальных температур, являющихся основой методики измерения и контроля быстропротекающих тепловых процессов при лазерной пайке металла с керамикой, были использованы при чтении дисциплины «Технология лазерной обработки материалов», а также при подготовке курсовых и дипломных работ студентов инженерно-физических специальностей в МГТУ им. Н.Э. Баумана и в Амурском государственном университете.

Экспериментальные и теоретические методики определения кинетики окисления материалов при лазерном воздействии, а также методы, основанные на базовых положениях теории математического моделирования, расчета и анализа на ЭВМ тепловых процессов при лазерной пайке, были разработаны в рамках научного гранта (№ 02-02-17812) РФФИ «Физико-химические процессы, протекающие в металлокерамическом соединении при воздействии лазерного излучения»; методики исследования переходной зоны металлокерамического соединения и различные способы лазерной пайки металла с керамикой реализованы в рамках НИР Министерства образования РФ «Развитие научной школы в области обработки материалов высококонцентрированными источниками энергии в Амурском государственном университете».

В 1999 г. работа была удостоена первой премии открытого акционерного общества «Газпром» и международного гуманитарного фонда «Знание» в области механики и машиностроения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на региональных научно-технических конференциях молодых ученых Приамурья (1994-1996гг., Благовещенск, АмГУ), международной научно-технической конференции по лазерной обработке поверхности "Амур - 94", IV международной школе-симпозиуме "Физика и химия твердого тела" (1994 г., Благовещенск), российской научно-технической конференции "Перспективные технологические процессы обработки материалов" (1995 г., Санкт-Петербург), российской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии" (1995 г., Москва), международной научно-технической конференции «Лазерная технология и средства ее реализации – 97» (1997 г., Санкт-Петербург), а также ежегодном межнациональном совещании «Радиационная физика твердого тела», (1997-1999 г.г., Севастополь), региональной научной конференции молодых ученых по физике (2000-2005 гг., Владивосток), на международной научно-технической конференции "Лазерная техника и технологии" (2001 г., Санкт-Петербург), на международной научной конференции "Математические методы в технике и технологиях", (2001-2002 гг., Смоленск) и др.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 57 работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с выводами, общих выводов, списка использованных источников (232 наименования) и приложений.

Работа выполнена на 320 страницах, содержит 22 таблицы, 92 рисунка в основном тексте и 50 – в приложении.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности работы, цель, задачи и методы исследования, характеристику новизны и практической значимости работы.

Первая глава посвящена анализу теоретических и экспериментальных исследований по вопросу соединения керамики с металлом. Рассмотрены основные способы получения металлокерамических узлов и физико-химические процессы, протекающие в зоне керамика-металл. Показано преимущество использования высококонцентрированных источников нагрева. Установлено, что в условиях массового производства широко

разработаны и внедрены способы соединения, как с использованием предварительной металлизации керамики, так и без металлизации. Данные технологии получения металлокерамических соединений многоступенчаты, энергоемки, вызывают необходимость в применении вакуумных камер и защитных сред. В процессе изготовления изделия могут подвергаться неоднократному высокотемпературному нагреву, в результате выход металлокерамических соединений, удовлетворяющих технологическим требованиям, значительно сокращается.

При получении спаев керамика-металл существующими способами необходимо жестко контролировать состояние атмосферы, в которой ведется процесс соединения, так как активные металлы (например, титан), взаимодействуя с компонентами среды, образуют химические соединения, влияющие на качество спая.

Возможно применение высококонцентрированных источников нагрева, однако технологический процесс соединения керамики с металлом при помощи электронного луча реализуется только в вакууме. Несмотря на то, что для получения металлокерамических соединений методом лазерной пайки нет необходимости использовать вакуумные камеры и защитные среды, все технические разработки сейчас находятся в стадии научных исследований.

Проводится анализ физико-химических процессов, протекающих в зоне контакта керамики с металлом на основании существующих теорий, с выводами о возможных механизмах взаимодействия компонентов соединяемых материалов.

Во второй главе приведены результаты комплексных исследований зависимостей коэффициента отражения керамических материалов от длины волны, шероховатости поверхности и температуры образца.

Для определения коэффициентов отражения высокоглиноземистых керамических материалов МК, ГБ-7, УФ-46, группа-120 была разработана методика, использующая рентгеновский дифрактометр "Дрон-3М", лазерный измерительно-технологический комплекс, созданный на базе установки ЛТН-103, интегральный шаровой фотометр отражения ФО-1 и профилометр 253 модели.

На первом этапе измерялся параметр шероховатости R_a . Затем образец помещался в интегральный шаровой фотометр отражения для определения коэффициента отражения на различных длинах волн. После этого керамику подвергали лазерному облучению на стенде для выявления

минимальной плотности мощности лазерного излучения, начиная с которой в структуре керамики происходят изменения. Для того чтобы это зафиксировать, производили съемку каждого образца на дифрактометре "Дрон-3М" как до, так и после лазерного облучения.

В результате проведенных исследований получены зависимости коэффициента отражения лазерного излучения от шероховатости поверхности образца, а также зависимости коэффициентов отражения высокоглиноземистых (ГБ-7, микролит, УФ-46), стеатитовых (СК, СНБ) керамических материалов от длины волны.

Было определено, что характер изменения коэффициента отражения в видимом и ближнем ИК-диапазонах длин волн у материалов микролит, ГБ-7 и УФ-46 одинаков, однако коэффициент отражения керамики УФ-46 на 10% ниже, чем у микролита. Это объясняется большим содержанием в этих материалах оксида алюминия (примеси и добавки составляют до 2%).

Значительное влияние на коэффициент отражения имеют добавки, находящиеся в составе керамики УФ-46, способные полностью определять процессы поглощения лазерного излучения в этих материалах.

Разработана методика определения дозы воздействия лазерного излучения на керамические материалы, при которых происходят микроструктурные изменения. Установлено, что в процессе облучения керамики лазерным излучением коэффициент отражения снижается на 7–10%. Зафиксировано незначительное смещение основных дифракционных максимумов в получаемых дифрактограммах, что свидетельствует о микроструктурных изменениях, происходящих в материале.

Лазерная пайка керамики с металлом является высокотемпературным процессом, в ходе которого обе детали подвергаются тепловому воздействию. Поэтому были проведены оценочные измерения коэффициента отражения керамических материалов на длине волны 1,06 мкм в условиях нагрева образцов. С этой целью изготовлена электропечь с термопарой хромель-алюмель, позволяющей измерять температуру внутри объема печи до 1023 К. Образец устанавливался внутри печи, которая размещалась на лазерном измерительном стенде, и разогревался до определенной температуры. Чтобы исключить погрешность в измерениях коэффициента отражения керамических материалов в процессе нагрева, снимали характеристику фона печи. Полученная зависимость коэффициента отражения керамических материалов от температуры на длине волны 1.06 мкм представлена на рис. 1.

Установлено, что целесообразнее получать металлокерамические

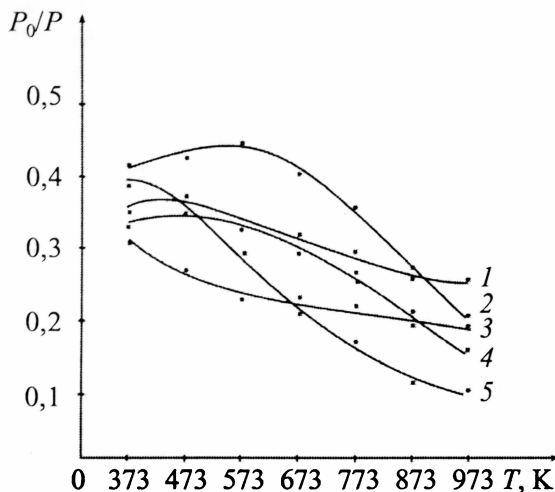


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения керамических материалов от температуры: 1 – ПК-2; 2 – ГБ-7; 3 – УФ-46; 4 – СК; 5 – группа 120.

соединения путем нагрева лазерным излучением металлической детали, так как при плотности мощности около 180 Вт/см^2 в керамике наблюдаются изменения, связанные с микроскопическими изменениями ее кристаллофазы.

Известно, что при лазерном нагреве в воздушной атмосфере на поверхности металлов образуются оксидные пленки, приводящие к увеличению поглощательной способности металла.

Сравнение ширины зоны термического влияния лазерного воздействия осуществлялось на образцах 12Х18Н10Т и титана как нешлифованных, так и обработанных в последовательности 60...40, 20...25, 14, 5...7, 4, 1...0, 0,5...0 мкм алмазной абразивной пастой ТУ 2-037-506-85.

На основании полученных экспериментальных данных проведена теоретическая оценка процесса окисления поверхности металлов при действии лазерного излучения (рис. 2). Значения коэффициента сосредоточенности лазерного источника и скорости роста оксидной пленки использовались для построения теплофизической модели.

В третьей главе приведены физико-математические модели лазерной пайки плоских и конусных соединений, основные аналитические и численные методы решений, сформулированы начальные и граничные условия, учитывающие многослойность объекта.

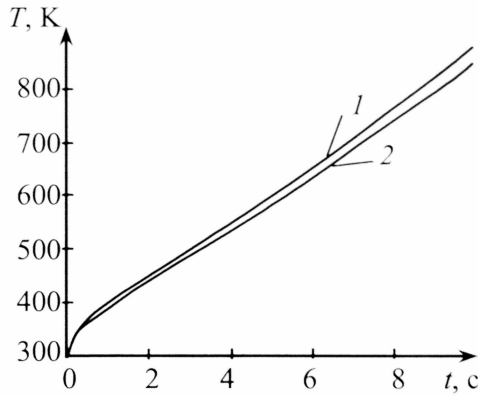


Рис. 2. Зависимость температур поверхности окисла (кривая 1) и границы раздела окисел-металл (кривая 2) от времени.

Предложены теплофизические модели для плоских:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_i \nabla^2 T, \quad T = T(x, y, z, t), \quad t \geq 0, \quad i = 1, 2, 3, 4;$$

$$x \in [0, L], \quad y \in [0, M], \quad z \in [0, H], \quad H = \sum_{i=1}^n h_i,$$

$$\left(-\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} - \sigma \varepsilon_1 (T^4 - T_0^4) - \alpha_1 (T - T_0) \right) \Big|_{z=0} = q(x, y, t),$$

$$-\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h_i-0} + \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h_i+0} = 0, \quad (1)$$

$$\left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} + \sigma \varepsilon_i (T_i^4 - T_{i+1}^4) + R_{i,i+1}^{-1} (T_i - T_{i+1}) \right) \Big|_{z=h_i} = 0,$$

$$\left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} + \sigma \varepsilon_n (T^4 - T_0^4) + \alpha_n (T - T_0) \right) \Big|_{z=H} = 0,$$

$$\left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} - \sigma \varepsilon_i (T^4 - T_0^4) + \alpha_i (T - T_0) \right) \Big|_{x=L, x=0, y=0, y=M} = 0,$$

и конусных образцов:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_i (T) \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

$$T = T(x, y, r, t), \quad t \geq 0, \quad i = 1, 2, 3, 4,$$

$$r \in [0, H], \quad H = \sum_{i=1}^4 h_i,$$

$$\begin{aligned} & \left(-\lambda_1(T) \frac{\partial T}{\partial r} + \sigma \varepsilon_1 (T^4 - T_0^4) - \alpha_1 \Delta T \right) \Big|_{r=H} = q(x, y, t), \\ & -\lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=h_i-0} + \lambda_{i+1}(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=h_i+0} = 0, \\ & \left(\lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial r} + \sigma \varepsilon_i (T_i^4 - T_{i+1}^4) + R_{i,i+1}^{-1} (T_i - T_{i+1}) = 0 \right) \Big|_{r=h_i} \\ & \left(\lambda_4(T) \frac{\partial T}{\partial r} - \sigma \varepsilon_4 (T^4 - T_0^4) + \alpha_4 \Delta T \right) \Big|_{r=h_0} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где $T(x, y, z, t)$ – температура; q_0 – тепловой поток на поверхности; c_i – объемная теплоемкость i -го слоя; λ_i – теплопроводность; σ – постоянная Стефана-Больцмана; ε – излучательная способность поверхностей; ρ_i – плотность i -го слоя; α_i – коэффициент конвективных теплопотерь; $R_{i,i+1}$ – тепловое сопротивление; h_i – толщина i -го слоя; h_i – толщина i -го слоя; h_0 – диаметр внутреннего отверстия n – количество слоев.

Были приняты следующие допущения: нормальное распределение плотности мощности излучения по сечению пятна, диаметр пятна $d_n = 1...2$ мм, плотность мощности $P = 15...20$ Вт/мм², $\lambda = 1,06$ мкм, температура на поверхности ковара не должна превышать линии солидуса (1750°K), на границе титан-медь – быть меньше температуры плавления титана (1933°K) и на границе медь-ковар – достигать температуры плавления меди (1350...1370°K).

Системы дифференциальных уравнений решали методом прогонки по схеме центральных разностей.

В качестве примера на рис. 3, 4 приведены результаты расчета распределения температур при следующих исходных данных для плоского образца: толщина пластины ковара – 0,5 мм, медного припоя – 0,3 мм, титанового покрытия – 0,002 мм и высокоглиноземистой керамики ГБ-7 – 2,4 мм.

Титан на рис. 3 не виден, так как это тонкая пленка со своим тепловым

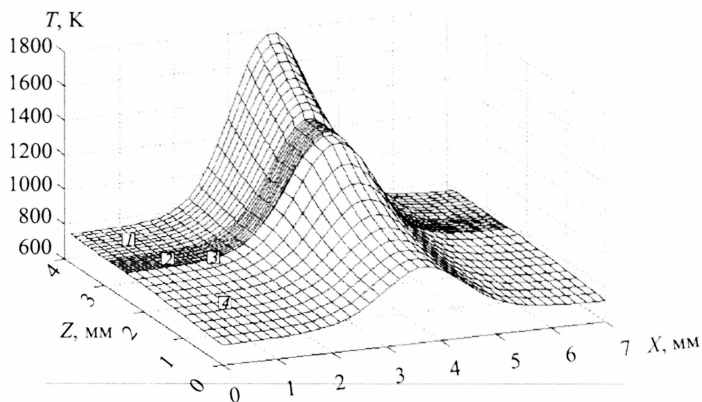


Рис. 3. Распределение температуры по толщине образца:
1 – ковар; 2 – медь; 3 – титан; 4 – керамика.

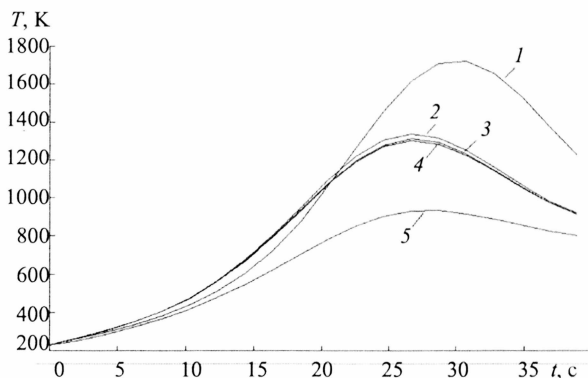


Рис. 4. Распределение температуры по времени в фиксированной по X , Y точке на границах слоев: 1 – на поверхности ковара; 2 – на границе между коваром и медью; 3 – между медью и титаном; 4 – между титаном и керамикой; 5 – на нижней поверхности керамики тепла в глубину образца.

сопротивлением. Образец нагревался в течение 40 секунд, шаг по времени $t = 0,1$ с. Лазерный луч двигался вдоль оси OX со скоростью $0,1$ мм/с.

Для примера рис. 3 установлено, что для плоских металлокерамических

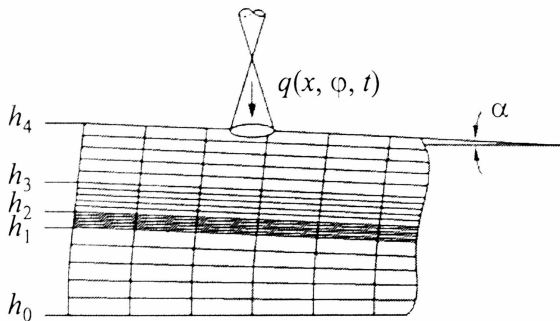


Рис. 5. Разностная сетка по толщине металлокерамического образца.

узлов максимальные скорости изменения температур на поверхности ковара составили около 205 K/c, на поверхности керамики — около 90 K/c при толщине ковара 0,5 мм. Оптимальные режимы лазерной пайки обеспечиваются при скорости движения лазерного луча $v = 0,6...0,7$ при плотности мощности $q = 16...17$ Вт/мм².

С учетом того, что в условиях неидеального контакта между соединяемыми материалами термическое сопротивление играет роль барьера, задерживая распространение тепла в глубину образца, с течением времени происходит выравнивание градиентов температур внутри слоев при сохранении скачков на границах между ними.

При увеличении толщины ковара с 0,5 до 1 мм время процесса пайки увеличивается вследствие того, что разность температур между поверхностью ковара и медным слоем составила около 700...800 K, в то время как поверхность припоя не успевала достичь своей температуры плавления.

Установлено, что при скорости около 5,8 мм/с и плотности мощности лазерного излучения около 16 Вт/мм² толщина ковара не должна превышать 0,6...0,7 мм.

Теплофизическая модель процесса лазерной пайки конусных образцов максимально приближена к условиям эксперимента и способствует получению более точных результатов.

Для учета угла конусности образца и разной толщины слоев строилась неравномерная сетка, шаг по координатам которой для каждого узла вычислялся исходя из геометрии образца (рис. 5).

При сравнении путей движения лазерного луча по образующей и по спирали с коэффициентом перекрытия до 0,5 ($v = 2...4$ мм/с, $q = 3...6$

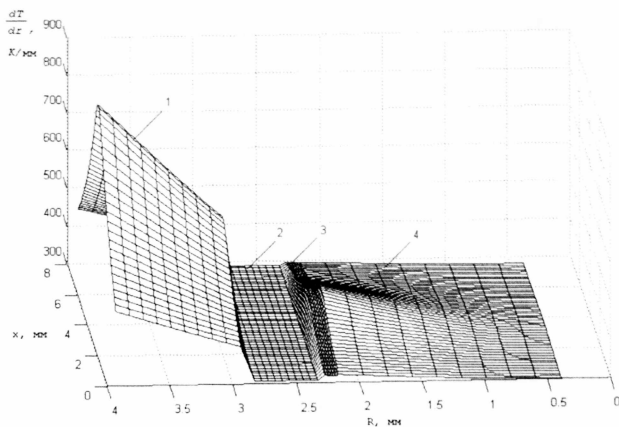


Рис. 6. Частная производная температуры по толщине образца: 1 – ковар; 2 – медь; 3 – титан; 4 – керамика.

Вт/мм²) выявлено отсутствие разницы между траекториями движения лазерного источника для нагрева материалов металлокерамического соединения.

Установлено, что при $v < 5$ мм/с и $q = 2 \cdot 10^7$ Вт/м² на поверхности достигается температура испарения ковара. Следовательно, скорость движения v лазерного источника в этом случае должна составлять 6...10 мм/с, при уменьшении плотности мощности лазерного излучения до $(3...6) \cdot 10^6$ Вт/м² $v = 0,5...2,5$ мм/с. Распределение теплоты внутри медного припоя происходит значительно быстрее, чем в остальных материалах (рис. 6), благодаря чему медный припой являясь вторичным источником теплоты для соседних слоев, увеличивает ширину линии распределения температуры.

Резким переходам на границах с медью соответствуют периоды разностной сетки, отражающие термическое сопротивление между слоями. Интенсивность лазерного воздействия концентрируется вдоль образующей в направлении малых углов φ и малых радиусов R за счет кривизны поверхности.

При больших R ($R \gg 50$ мм) и малых диаметрах пятна ($d = 0,5...2$ мм) распределение теплового потока на поверхности соединения можно рассматривать в рамках плоской модели.

Внесение условия Стефана в системы дифференциальных уравнений приводит их к нелинейному виду, и решение которых в точной

аналитической форме получить невозможно. Это связано со сложностью согласования решения уравнения теплопроводности и закона движения фазового фронта как функции времени.

Для исследования зарождения фронтов плавления в соединяемых материалах с учетом процессов окисления, излучения, конвекции и теплового сопротивления между слоями в системы дифференциальных уравнений (1) и (2) вводилось условие Стефана:

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=r(t)} = \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=r(t)} - L_i \rho_i \frac{dr}{dt}, \quad (3)$$

где ρ_i – плотность i -го слоя при температуре плавления; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности жидкой (1) и твердой (2) фазы соответственно; L_i – удельная теплота плавления материалов; dr – вектор нормали к поверхности плавления.

Термическое сопротивление между слоями, возникающее из-за неидеальности контакта, рассчитывалось как величина, состоящая из излучательной и кондуктивной частей с учетом параметра шероховатости R_a .

На границах материалов накладывалось условие равенства входящего и выходящего тепловых потоков (4) и температурный скачок при контакте двух сред (5):

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x_1} = \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x_2} \quad (4)$$

$$\left(-\lambda_{i+1}(T) \frac{\partial T}{\partial x} + \sigma \varepsilon_i (T_i^4 - T_{i+1}^4) + R_{i,i+1}^{-1} (T_i - T_{i+1}) \right) \Big|_{z=h_i} = 0, \quad (5)$$

где индексы "1", "2" – последняя и предпоследняя точки первого слоя.

Зарождение фронтов плавления (затвердевания) в многомерной задаче Стефана рассчитывалось одновременно по всем координатам по схеме расщепления с погрешностью h . Допустимая погрешность по температуре не превосходила 1 К, погрешность по координате – 10^{-8} мм.

При нахождении решения многофронтной задачи Стефана поиск реализовывался следующим образом: точка зарождения первого фазового фронта рассчитывалась по температуре плавления с последующим циклом оптимизации существующих точек. При выполнении условия $T_{\text{оптим}} > T_{\text{пл}}$ осуществлялся поиск следующего фазового фронта, максимальное отклонение $\delta_\tau = T_{\text{фронта}} - T_{\text{пл}}$. Очередная оптимизация фронта проводилась из предыдущего шага, затем вычислялось новое местоположение координаты

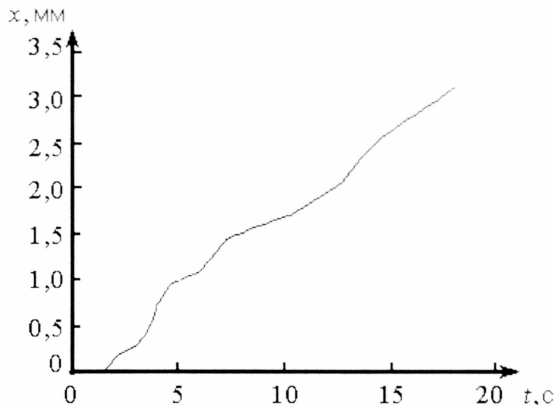


Рис. 7. Скорость продвижения фазового фронта в меди.

плавления. При выполнении условия $T_{пл} < T^*$ (T^* – вычисленная температура фронта плавления) дальнейший поиск осуществлялся с переменным шагом в зависимости от положения источника теплоты превосходила 1 К, погрешность по координате – 10^{-8} мм.

Цикл оптимизации проводился при вырождении фронтов, а также при встрече двух или нескольких фронтов плавления до приращения $\delta_r/2$. В этом случае координата точки поиска исключалась, так как по заданным условиям в окрестности этой точки в зависимости от полученной температуры должна находится однородная либо жидкая, либо твердая фаза.

На рис. 7...9 представлены результаты расчета скорости образования фазового фронта при лазерной пайке медью керамики микролит с коваром и зависимости распределений температуры в соединяемых материалах. Технологические режимы рассчитывались в соответствии с полученными экспериментальными данными [24].

Изотерма плавления меди (рис. 9) показывает границы и объем расплава в металлокерамическом соединении. Следовательно, при оценке и подборе режимов пайки различных конструкций металлокерамических узлов необходимо четко контролировать ее положение, не допуская растворения тонкой титановой пленки в припое.

Установлено, что оптимальные режимы пайки достигаются при плотности мощности воздействия лазерного излучения $(5...8) \cdot 10^6$ Вт/м² и скорости движения теплового источника 1...3 мм/с.

ИИТУ
ИИПЭИ
Б.Е.С.К

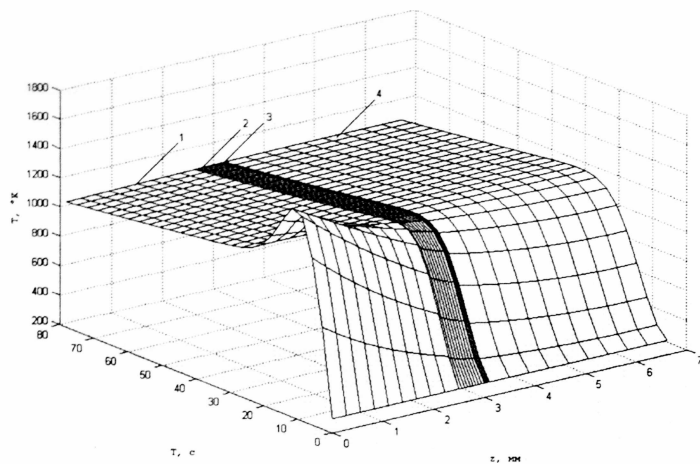


Рис. 8. Распределение температуры в МКС: 1 — ковар; 2 — медь; 3 — титан; 4 — керамика.

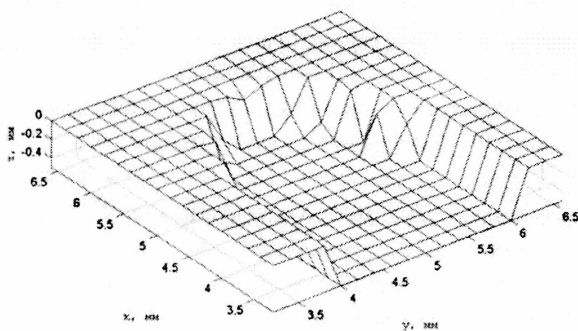


Рис. 9. Образование фронта плавления в меди.

Время нахождения припоя в расплавленном состоянии не должно превышать 2 сек. Значительный перегрев припоя, как показал эксперимент, ведет к его вытеканию из зоны контакта керамики с металлом и снижает прочностные показатели МКС.

Полученные теоретические распределения температур при лазерной пайке металла с высокоглиноземистой керамикой показали хорошее согласование с экспериментальными исследованиями тепловых полей методом скоростной тепловизионной съемки, представленными в 4 главе.

Для достижения заданных требований при условии оптимизации однопроходной лазерной пайки по скорости для плоских и конусных образцов разработан пакет прикладных программ, позволяющий определять требуемую мощность лазерного источника и мгновенное положение фазовых фронтов в материалах.

В четвертой главе проведено экспериментальное исследование распределения температурного поля в конусном МКС, которое регистрировалось ТВ камерой технического зрения модели OS-66D фирмы "MINTRON" (спектральный диапазон – 0,85...1,1 мкм; температурное разрешение – ± 8 К на уровне 1273 К; диапазон измеряемых температур – 673 ... 1773 К; разрядность преобразования – 16 бит; минимальное расстояние до объекта – 150 мм) с трансфокальным объективом марки 5V40 фирмы "ERNITEC" и оптическим фильтром ИКС-3.

Телевизионный сигнал, полученный от камеры, через TV-тюнер выводился на монитор компьютера IBM PC/AT. Измерялась температура по принципу одночастотного энергетического пирометра, работающего в диапазоне длин волн $\lambda = 0,8...1,1$ мкм. Коротковолновая граница определялась характеристиками фильтра ИКС-3, длинноволновая — кривой чувствительности приемных элементов камеры. Интенсивность свечения нагретого образца фиксировалась и записывалась в AVI-формате в реальном времени для дальнейшей обработки изображений в среде MATLAB. Скорость движения лазерного источника задавалась исходя из рассчитанных режимов модели.

В ходе проведенных исследований получена классификация экспериментально зафиксированных тепловых зон МКС при остывании (рис. 10):

зона 1 лазерного воздействия — тепловой след на поверхности соответствует температурам свыше 1873 К. Фиксировать температуру непосредственно в этой зоне не позволила чувствительность ТВ-камеры. Ширина тепловой зоны сравнима с диаметром лазерного пятна, падающего на поверхность образца;

зона 2 сильного термического влияния — получена за счет близкого расположения к лазерному источнику, а также из-за теплопередачи и

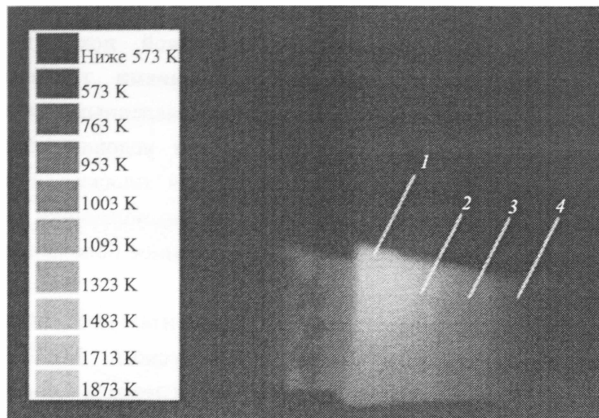


Рис. 10. Тепловые поля, полученные скоростной тепловизионной съемкой на поверхности МКС во время лазерной пайки: 1 — зона 1873 К и выше; 2 — зона 1653...1873 К; 3 — зона 1073...1653 К; 4 — зона до 1073 К.

перекрывания тепловых полей от предыдущего воздействия. Температуры в этой зоне на поверхности составляют 1653...1873 К.

Тепловой след на поверхности МКУ (зона 2) от движущегося лазерного источника вблизи зоны нагрева соответствует 1800 ± 25 К.

Посекундное сравнение тепловых изображений нагретого образца показало, что при лазерном источнике ($q \approx 10^6$ Вт/мм²), движущемся со скоростью $v = 4...6$ мм/с, слой кобальта полностью прогревается до температуры 1733 ± 15 К. Медный припой успевает достичь температуры плавления (слева от зоны 1, температура 1383 ± 15 К) и в силу своей высокой теплопроводности передать часть энергии керамике;

зона 3 слабого термического влияния образована за счет теплопередачи и характеризуется температурами на поверхности 1073...1753 К. Диапазон температур этой зоны ниже температуры плавления кобальта, следовательно, для технологического процесса пайки более значимы зоны 1 и 2.

зона 4 остывания, температура может достигать 1073 К, характеризуется удаленностью от лазерного источника и отсутствием влияния на технологический процесс.

Необходимо отметить, что размеры показанных тепловых зон условны, плавно переходят одна в другую и не имеют четких границ. Их протяженность существенно зависит от скорости пайки и плотности

мощности лазерного источника. Вследствие пропорциональности излучения с поверхности нагретого образца температурам T^4 погрешность измерения тепловых полей в каждой зоне подчиняется нелинейной зависимости от температуры и составляет для зоны 1 около 20%, а для 2, 3 и 4 — 16, 11 и 8 соответственно.

Пятая глава посвящена получению металлокерамических соединений различными способами при помощи лазерного излучения, а также исследованию физико-химических процессов, происходящих в зоне контакта керамика - металл. Приведены результаты исследований при разработке технологий соединения металлокерамических соединений с использованием активных металлов, оловянно-свинцовых припоев и керамики, прозрачной для лазерного излучения.

Для получения металлокерамических соединений были разработаны лазерный технологический комплекс на базе лазерной установки ЛТН-103, приспособление, позволяющее вращать, перемещать и подпрессовывать деталь во время пайки, а также блок автоматического управления лазерной заслонкой и одновременным вращением и перемещением шаговых двигателей группового привода (скорость под лучом на максимальном диаметре детали – 2...32 мм/с; шаг винтового следа луча на детали – 0,1...2,5 мм; стабильность поддержания частоты вращения – не меньше $\pm 0,5\%$; штатная длина рабочего участка – 5 мм; диапазон регулировки конца первого рабочего участка – $-0,4...+0,5$ мм).

Соединение металла с керамикой (белая деталь, рис. 11 а) осуществлялось по системе основного вала: под керамическую деталь изготавливалась металлическая арматура по оптимальной посадке. Основные технологические этапы лазерной активной пайки и конструкция МКС типа ИПН – 200 представлены на рис. 11.

Перед металлизацией керамические образцы подвергали очистке в горячей воде (333...343 К). Металлизация керамики титаном ВТ-5С для сравнения проводилась несколькими способами: механическое нанесение (3...4 мин. на воздухе), вакуумное напыление в установке ВУП - 5 (2...3 мин., вакуум 10^{-5} мм рт. ст.) и магнитронное распыление в установке УМР (7...10 мин., вакуум 10^{-4} мм рт. ст., среда — аргон, $T_{\text{раб}} = 573$ К, $U_{\text{Ti}} = 700 \pm 30$ В, $U_{\text{Cu}} = 800 \pm 20$ В, $U_{\text{холост. хода}} = 1,5$ кВ). Нанесение медного покрытия проводилось гальванически. Керамические образцы с нанесенным припоем промывали в дистиллированной воде.

Предварительно на механотронном профилометре ПМ-283 измерялся

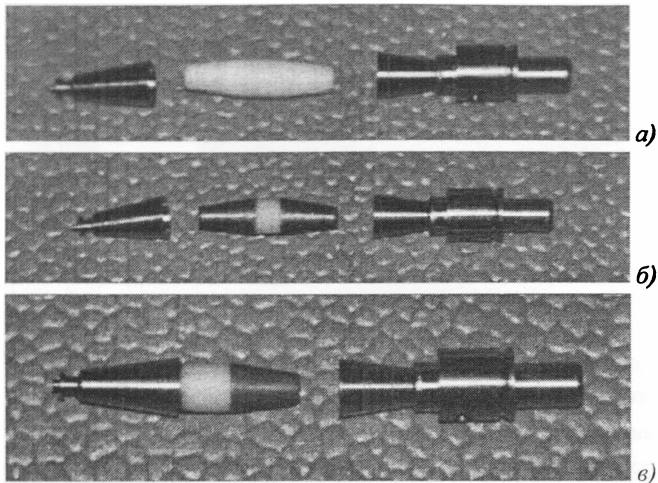


Рис. 11. Основные технологические этапы лазерной пайки МКС: а) нанесение на керамическую деталь активного металла (титана); б) нанесение на титановое покрытие медного припоя; в) сборка узла для дальнейшей лазерной пайки.

показатель шероховатости R_a подготовленных к сборке деталей МКС. Для внутренней поверхности металлических втулок R_a составил 0,3...0,5 мкм, для медного покрытия керамических валов — 0,7...0,9 мкм.

Установлено, что сборка МКУ должна обеспечивать посадку с гарантированным минимальным натягом. Максимальный и минимальный натяги для МКС типа ИПН-200 должны составлять 35 и 10 мкм соответственно, что отвечает посадке $\varnothing 4,8h6S6$, усилие запрессовки при сборке узлов — 15,2...37,2 Н. В противном случае при последующей высокотемпературной пайке возможны появление микротрещин в металлической арматуре, нарушение герметичности спая.

Изучение зоны контакта методами растровой и просвечивающей микроскопии показало, что при механическом нанесении титана наблюдаются разрывы сплошности как адгезионной, так и когезионной природы. Растрескивание слоя титана связано с частичным его окислением в процессе втирания, что с неизбежностью приводит к образованию оксидов TiO_2 и Ti_2O_3 . Керамика в месте контакта разогревается до температуры, достаточной для окисления титана, что вызывает появление соединения TiO_2 :

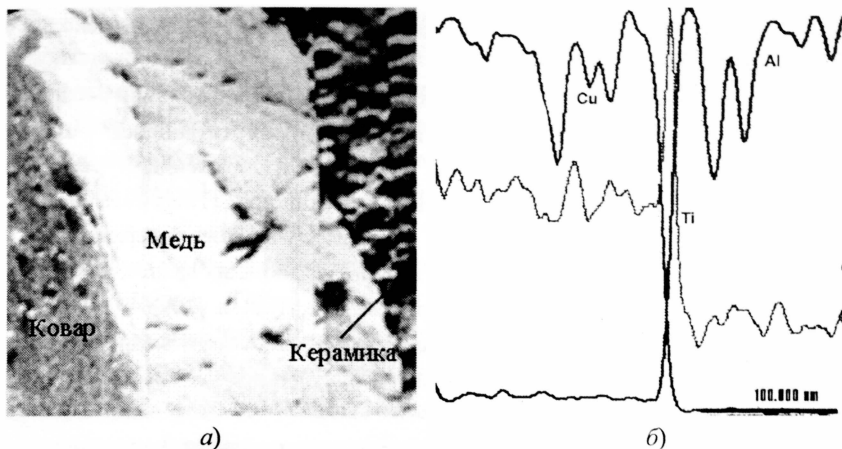
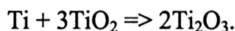


Рис. 12. Переходная зона МКС: а) фотография, полученная на растровом электронном микроскопе; б) распределение элементов в переходной зоне МКС алюминия, титана, меди на границе керамика—припой.



Свободная энергия этой реакции равна $\Delta G = -108$ ккал. Вследствие окисления титана реакция сопровождается значительным увеличением вещества в объеме, что приводит к растрескиванию титанового покрытия.

Полученные при помощи растрового электронного микроскопа AN 10000 "Link Analytical" с энергодисперсионным спектрометром S-570 фирмы "Hitachi" фотографии и рентгеновские профили распределения основных элементов в переходной зоне (рис.12), полученные на установке "Cameca" с рентгеновским микроанализатором MS - 46, свидетельствуют о том, что при лазерной активной пайке титан концентрируется на границе раздела керамика – припой (рис. 12 б).

На границе медь – никель выявлены нарушения однородности слоев, обусловленные частичным окислением поверхности меди после гальванического нанесения покрытия и последующим разложением оксидов меди при высокотемпературном формировании всего узла, что сопровождается значительным газовыделением. Для устранения этого недостатка соединяемые поверхности непосредственно перед пайкой подвергали химическому травлению и очистке.

Изучение переходной зоны методом электронно-зондового микроанализа выявило, что при лазерной активной пайке благодаря малому

времени воздействия, большим скоростям нагрева и охлаждения происходит лишь частичное окисление металла.

Исследованием на просвечивающем электронном микроскопе JEM-1200 EX структуры поверхностной пленки титанового слоя, нанесенного на керамический образец, в режиме изображения и режиме микродифракции установлено, что микродифракционные картины, полученные от экстрагированных угольной репликой участков поверхностной пленки, состоят, как правило, из четких поликристаллических колец с межплоскостными расстояниями d_{hkl} , равными 3,51 Å и 2,09 Å. Причем наблюдается непостоянство интенсивностей колец относительно друг друга, а также непостоянство интенсивностей колец на разных микродифракционных изображениях.

Наблюдаемые линии являются самыми интенсивными отражениями двух фаз: TiO_2 в форме анатаза (3,51 Å) и кубической TiO (2,03 Å). В некоторых случаях на микродифракционных картинах, наряду с указанными линиями, появляются кольца с межплоскостными расстояниями, равными 1,80, 1,23 и 1,15 Å, которые также можно соотнести со слабыми отражениями указанных фаз. Переменная интенсивность сильных линий на разных микродифракционных картинах свидетельствует о неравномерном распределении TiO_2 , Ti_3O_5 , Ti_2O_3 и TiO в пределах пленки.

Поскольку наблюдаются только самые сильные дифракционные отражения, можно говорить о появлении мелкодисперсной, плохо сформированной кристаллической структуры, что имеет место при механическом нанесении титана на керамику. Получаемые оксиды в процессе механической металлизации керамики на воздухе, негативно влияют на дальнейший процесс гальванического осаждения меди.

При металлизации керамики методом конденсации титана в вакууме разрыв металлокерамического соединения происходил по керамике. В этом случае на микродифракционных картинах фиксировались линии Al_2O_3 и алюмомагнезиевая шпинель $MgAl_2O_4$, входящие в состав высокоглиноземистой керамики типа УФ-46.

Проведенный термодинамический анализ показал, что среди физико-химических процессов в переходной зоне наиболее вероятно протекание некоторых химических реакций с образованием оксидов Al_2TiO_5 , TiO_2 , Ti_2O_3 , Si_2O и карбида титана TiC .

При конденсации титана в вакууме на поверхности керамической подложки реакционная зона вблизи поверхности разогревается до достаточно

высокой температуры. Скорость осаждения, соответствующая парциальному давлению титана 0,1-1 мм рт.ст., и теплопроводности керамики УФ-46 оценивались для температуры зоны конденсации близко к 2000 К. Поэтому расчеты свободной энергии взаимодействия титана с Al_2O_3 производились для этих параметров: $T=2000\text{ К}$, $P_{\text{Ti}}=1\text{ мм рт.ст.}$

Свободная энергия реакции: $2\text{Ti(газ)} + \text{Al}_2\text{O}_3(\text{тв.}) \Rightarrow \text{Ti}_2\text{O}_3(\text{тв.}) + 2\text{Al(газ)}$ равна $\Delta G = -16$ ккал. Это означает, что такая реакция вполне возможна и имеет слабую температурную зависимость.

Для реакции: $\text{Ti(газ)} + \text{Al}_2\text{O}_3(\text{тв.}) \Rightarrow \text{Al}_2\text{O(газ)} + \text{TiO}_2(\text{тв.})$ свободная энергия составляет $\Delta G = -8$ ккал, поэтому она также возможна при $T=2000\text{ К}$. Однако уже при 1600 К свободная энергия этой реакции становится равной нулю, а ниже 1600 К – больше нуля, ее протекание в данных условиях невозможно. Реакции с другими оксидами титана не рассматривались вследствие низкой величины энтальпии.

Следовательно, из рассмотренных реакций наиболее вероятно протекание реакций с образованием $\text{Ti}_2\text{O}_3(\text{тв.})$ и $\text{TiO}_2(\text{тв.})$. Появление полутормного оксида титана на границе титан- Al_2O_3 должно оказывать положительное действие при образовании адгезионного контакта.

Известно, что Ti_2O_3 имеет ту же структуру типа корунда, что и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, это способствует как растворению (топотаксии) Ti_2O_3 в Al_2O_3 , так и поверхностному когерентному наращиванию (эпитаксии) Ti_2O_3 на Al_2O_3 . Оба случая должны в результате давать хороший адгезионный контакт.

Чувствительность применяемых методов не позволяет обнаружить слои, содержащие химические соединения Al_2TiO_5 , TiO_2 , Ti_2O_3 , Cu_2O и TiC .

Металлокерамические соединения, полученные при нанесении титана в вакууме, характеризуются механической прочностью 75 ± 5 МПа, а также плотным прилеганием слоев, без разрывов и трещин.

В этой же главе предложен метод получения металлокерамических соединений с использованием серебряных паст и оловянно-свинцовых припоев.

В качестве материалов были выбраны высокоглиноземистая керамика ГБ-7, керамика УФ-46, припой ПОС-60 и металлическая деталь из ковара. Соединялась керамика с металлом при помощи непрерывного лазерного излучения по следующей технологической схеме:

очистка контактируемых поверхностей керамики и металла по стандартной методике;

нанесение серебряной пасты на керамику;

сжигание лазерным излучением серебряной пасты в поверхность керамического образца;

нанесение оловянно-свинцового припоя на металлизированную керамику;

сборка МКУ;

лазерная пайка.

Лазерное излучение использовалось на нескольких этапах, вследствие чего технологический процесс получения МКС значительно упростился и сократился во времени.

Необходимое условие лазерной пайки керамики с металлом – наличие между ними хорошего контакта. Зазор 0,1 мм между спаиваемыми деталями уже не позволяет получить качественное соединение. Наиболее удачным решением этого вопроса являются конструкции конусных охватывающих соединений ИПН-200 и ИП-500, которые позволяют увеличить механический контакт с помощью подпрессовывания.

Установлено, что при пайке оловянно-свинцовыми припоями необходимо фокусировать лазерное излучение на металлическую деталь. Время воздействия не должно превышать 1,5...2 мин. при плотности мощности $2 \cdot 10^3$ Вт/см². В противном случае происходит интенсивное испарение припоя и сползание его с контактируемых поверхностей. Обеспечение соосности закрепленных деталей МКС исключает нежелательные перекосы деталей относительно друг друга и снижает количество бракованных узлов

Процессы, происходящие в зоне контакта керамика-металл, анализировались на аншлифах, изготовленных по стандартной методике. Исследования переходной зоны полученных МКС методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа (рис. 13) выявили, что серебряное покрытие при длительном лазерном воздействии может растворяться в оловянно-свинцовом припое.

Структура переходной зоны неоднородна, что характерно для пайки лазерным излучением. Общее время пайки не превышает 3 мин. При небольших скоростях движения лазерного источника (2...4 мм/с) мощности излучения 75...80 Вт достаточно, чтобы достичь равномерного прогрева всей металлической детали.

При длительном воздействии лазерного излучения (свыше 5 мин.) в процессе соединения металлы, входящие в состав МКС (Pb, Fe и др.), интенсивно окисляются. Образование оксидной пленки на коваре и припое

негативно влияет на получение спаев.

Расплавленный припой частично вытекает из зазора между керамикой и металлом и растекается по поверхности ковара, концентрируясь в зоне лазерного воздействия. Для устранения этого недостатка в зазор между припоем и металлической арматурой помещали флюс, применение которого позволило повысить прочность МКУ на 3...7 МПа.

Визуальный осмотр изготовленных соединений показал отсутствие трещин по спаю. При лазерной пайке не достигаются температуры плавления соединяемых материалов. При температурах пайки не сказывается различие ТКЛР ковара и высокоглиноземистой керамики, поэтому режимы получения соединений при помощи мягких припоев являются более щадящими по сравнению с режимами пайки твердыми припоями.

Использование в качестве промежуточного материала оловянно-свинцового сплава предпочтительно в силу его пластичных свойств и позволяет снижать термонапряжения, возникающие в процессе пайки.

В этой же главе представлен разработанный метод изготовления герметичных металлокерамических узлов на основе керамики, прозрачной для лазерного излучения. Он применим для получения внутренних спаев и состоит в следующем: МКУ включает керамическую деталь с кольцевым пазом, внутренняя стенка которого имеет конусность 5...10° и металлическую деталь с той же конусностью внешней поверхности. Внутри металлической детали по краю паза в керамике размещались припой и защитный флюс. Нагревалась металлическая арматура лучом лазера с длиной волны, для которой керамика является прозрачной.

Для керамических материалов МК (микролит), УФ-46, ВК94-1 (22ХС) может использоваться лазерная технологическая установка "Квант-15": длина волны лазерного излучения – 1,06 мкм, длительность импульсов – 4 мкс, энергия импульсов – 10 Дж, частота следования импульсов – до 35 Гц.

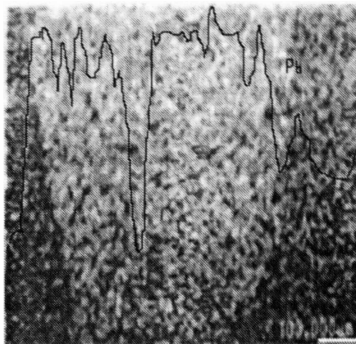


Рис.13. Распределение свинца в рентгеновских лучах свинца с совмещением концентрационного распределения, $\times 300$.

На длине волны 1,06 мкм у перечисленных материалов нет полос поглощения излучения, они будут прозрачными и нагрев должен происходить за счет поглощения в металлической арматуре. Наличие флюса защищает арматуру и припой от быстрого окисления, позволяет производить нагрев и охлаждение при скоростях, меньших 50 К/с, что важно для керамических деталей, склонных к растрескиванию при тепловых ударах.

Керамическую и металлическую детали с применением порошка карбида бора шлифуют друг к другу по контактными поверхностям, очищают от загрязнений известными способами и контактную поверхность керамического паза металлизуют, например, титаном. Металлическую деталь покрывают гальваническим никелем толщиной 1 мкм. Детали собирают соосно. Внутри металлической арматуры закладывают твердый припой на основе меди или серебра в форме кольца проволоки или манжеты, защищают флюсом и собирают в приспособление, позволяющее вращать деталь и воздействовать на место спаивания лазерным излучением. Зажимное приспособление должно обеспечивать равномерную соосную нагрузку на спаиваемые детали при давлении 0,3...0,5 МПа.

Использование предлагаемого способа обеспечивает по сравнению с существующими способами следующие преимущества:

- пайка производится на воздухе и не требует дорогих и энергоемких вакуумных камер или печей с защитной атмосферой;

- при пайке возможен визуальный контроль технологического процесса;

- возможен нагрев только металлической детали, что приводит к плотной посадке металлической детали на керамическую за счет сжимающих охватывающих напряжений в спае, увеличивающих его надежность и прочность.

По результатам проведенных исследований МКС ИПН-200 определены зависимости механической прочности и вакуум-плотности от усилия запрессовки (посадки), а также характер его разрушения (рис. 14, 15).

Представленные экспериментальные результаты доказывают, что разработанные способы предварительной металлизации спаиваемой поверхности высокоглиноземистой керамики титаном с последующим электрохимическим осаждением меди могут широко применяться при производстве проходных изоляторов, герметичных вакуум-плотных спаев методом лазерной пайки.

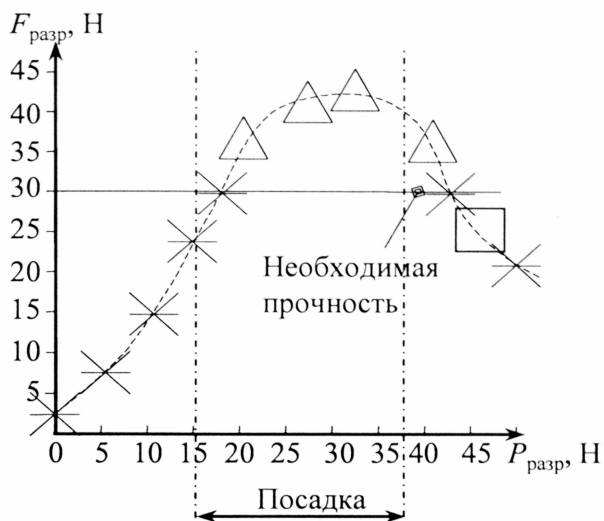


Рис. 14. Зависимость механической прочности МКС от посадки.

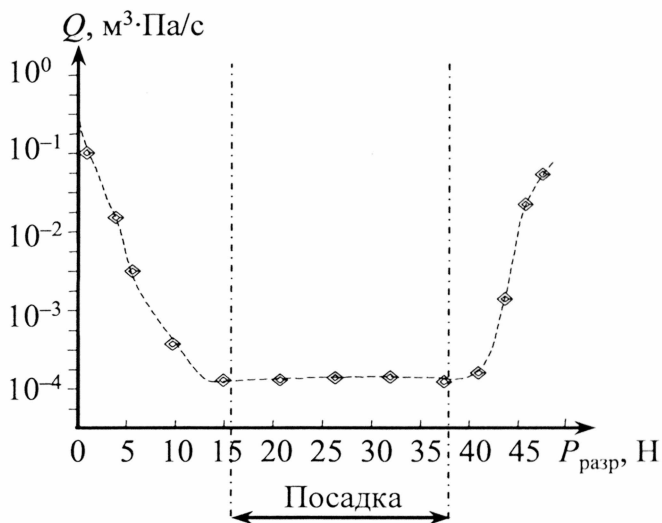


Рис. 15. Зависимость вакуум-плотности МКС от посадки.

1. Впервые предложено комплексное решение проблемы получения внешних и внутренних металлокерамических соединений с помощью непрерывного лазерного излучения и получено его экспериментальное подтверждение.

2. Разработаны основы общей физико-технологической модели лазерной пайки металлов с керамикой, в рамках которой исследована динамика зарождения и вырождения фазовых фронтов в слоях соединяемых материалов, оценены вклады процессов окисления и излучения на поверхности образца, а также учтено термическое сопротивление между слоями, определены основные механизмы формирования контакта керамика-металл при воздействии лазерного излучения, предложены тепловые модели пайки лазерным излучением плоских металлокерамических образцов и конусного охватывающего соединения типа ИПН-200 с нелинейными граничными условиями 3-го 4-го рода, разработаны алгоритмы решения многофронтной задачи Стефана и пакет прикладных программ, позволяющий определять мгновенное положение границ плавления в соединяемых материалах при лазерном воздействии.

Сложность и оригинальность рассматриваемых математических задач состоит в решении систем дифференциальных уравнений с нелинейными граничными условиями, с выделением подвижных границ фронтов при неравномерном высокочастотном тепловом нагружении систем металл-припой-диэлектрик.

3. Созданы методики и программное обеспечение для расчетов основных параметров лазерного воздействия на соединяемые материалы при пайке.

4. Экспериментально определены коэффициенты отражения промышленных типов керамических материалов в видимой и ближней ИК-области при внешнем тепловом воздействии.

5. С использованием современных методов экспериментальных исследований (микрорентгеноспектрального анализа, растровой электронной микроскопии, рентгеновского микроанализа и др.) проведено комплексное изучение переходной зоны полученных металлокерамических соединений и установлены физико-химические закономерности протекающих процессов, определены термодинамические параметры образующихся фаз в зоне контакта, предложена физико-химическая модель контакта

высокоглиноземистой керамики с металлом, на основании которой сформулированы технологические требования к металлу и керамике.

6. Разработана методика скоростной съемки тепловых полей в процессе пайки металлокерамических соединений.

7. Созданы экспериментальные стенды, техническая документация по производству соединений металла с керамикой для применения в промышленности.

8. Определены технологические режимы получения металлокерамических соединений методом лазерной активной пайки при помощи непрерывного излучения, проведен анализ и комплексные исследования факторов, влияющих на качество получаемых методом лазерной пайки металлокерамических соединений, разработан способ изготовления герметичных металлокерамических узлов путем активной пайки в воздушной среде лазерным излучением с использованием керамики, прозрачной для лазерного излучения.

Разработанные технологии соединения керамики с металлом дают устойчивое воспроизведение результатов и могут быть рекомендованы для промышленного внедрения, в частности для производства проходных изоляторов типа ИПН-200, используемых в атомной энергетике.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ:

1. Vinogradov B.A., Kcharicheva D.L. Method of laser solder of metal-ceramics combinations. //Advanced Materials and Processes. Fourth Sino-Russian Symposium Beijing, China. 1997. P. 220.

2. Виноградов Б.А., Харичева Д.Л. Исследование переходной зоны металлокерамических соединений методами микрорентгеноспектрального и микрофракционного анализа. //Вестник Амурского государственного университета. Вып.1. 1997. С. 35-38.

3. Харичева Д.Л. и др. Способ изготовления герметичных металлокерамических узлов. //Патент на изобретение № 2099312. Опубликовано в ГРИ Роспатент 20.12.97 г.

4. Харичева Д.Л., Виноградов Б.А., Костиков. Влияние способа металлизации поверхности керамики на структуру переходной зоны металлокерамического соединения. //Проблемы машиностроения и надежности машин. 1998. № 2. С. 77–80.

5. Виноградов Б.А., Харичева Д.Л. Особенности получения металлокерамических соединений методом лазерной пайки. //Вестник Дальневосточного отделения РАН. 1998. № 3. С. 56 – 62.
6. Vinogradov B.A., Kharicheva D.L., Kostikov Yu.P. Effect of the method for metallizing the ceramics on the structure of the cermet joint transition zone. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 1998. № 2. P. 62 – 65.
7. Харичева Д.Л. Теория вероятностей. (Учебное пособие). Благовещенск: Изд-во АмГУ, 1999.
8. Харичева Д.Л., Виноградов Б.А. Получение металлокерамических спаев на основе лазерного воздействия. //Материалы IX межнационального совещания «Радиационная физика твердого тела». Севастополь, 1999. С. 924 - 929.
9. Виноградов Б.А., Харичева Д.Л. Перспективы использования лазерного излучения для получения металлокерамических соединений. //Вестник Амурского государственного университета. 1999. № 6. С. 20-23.
10. Харичева Д.Л., Губин Д.В., Швайка Д.С. Расчет тепловых полей в металлокерамическом соединении при лазерной пайке. //Вестник Амурского государственного университета. 2000. № 11. С. 55-57.
11. Харичева Д.Л., Швайка Д.С. Теплофизические процессы при лазерной пайке керамики с металлом. /Под общей ред. А.Г. Григорьянца. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2000.
12. Виноградов Б.А., Харичева Д.Л., Швайка Д.С. Формирование металло-керамического соединения при лазерной пайке. //Перспективные материалы. 2001. №3. С. 63-67.
13. Харичева Д.Л., Швайка Д.С. Влияние контактного термического сопротивления на процесс лазерной пайки керамики с металлом. //Труды международной научной конференции "Математические методы в технике и технологиях". Т. 3. Секция 3. Смоленск, 2001. С.136-138.
14. Харичева Д.Л., Швайка Д.С. Применение численных методов для расчета режимов лазерной пайки керамики с металлом. //Труды международной научно-технической конференции "Лазерная техника и технологии". СПб. 2001 Т.2. С. 54-56.
15. Виноградов Б.А., Харичева Д.Л., Швайка Д.С. Моделирование тепловых процессов при лазерной пайке керамики с металлом. //Проблемы машиностроения и надежности машин. 2001. № 4. С. 71-75.
16. Vinogradov B.A., Kharicheva D.L., Shvaika D.S. The creation of reliable metal-ceramic connection with the laser soldering method Advanced Materials and

Processes. Sixth Sino-Russian Symposium Beijing. China, 2001. P. 513.

17. Vinogradov B.A., Shvaika D.S Modeling of thermal processes at the laser soldering of ceramics with metal. //Journal of Machinery Manufacture and reliability. 2001. № 4. P. 83-87.

18. Харичева Д. Л., Петраченко Ю. А., Ершов И. А. Разработка метода скоростной тепловизионной съемки. //Вестник Амурского государственного университета. 2002. № 19. С. 39-41.

19. Харичева Д.Л., Петраченко Ю.А., Ершов И.А. Разработка метода скоростной тепловизионной съемки. //Вестник Амурского государственного университета. Вып. «Межвузовское сотрудничество». 2002. С. 20-22.

20. Харичева Д.Л. Петраченко Ю.А. Тепловизионная съемка лазерной пайки металла с керамикой. //Вестник Амурского государственного университета. 2003. № 23. С. 18-20.

21. Харичева Д. Л., Петраченко Ю.А. Математическое моделирование пайки прозрачной керамики с металлом. //Вестник Амурского государственного университета. 2004. № 25. С. 17-19.

22. Виноградов Б.А., Харичева Д. Л., Петраченко Ю.А. Лазерная пайка металла с прозрачной керамикой. //Международная научная конференция «XII Туполевские чтения». Казань, Т.1. 2004. С. 120.

23. Виноградов Б.А. Харичева Д.Л., Степочкин В.А., Петраченко Ю.А. Определение характерных тепловых зон при лазерной пайке керамики с металлом. Ч. 1 //Сварочное производство. 2004. № 8. С. 23-26.

24. Виноградов Б.А., Костюков Н.С., Харичева Д.Л. Герметичные металлокерамические соединения: Диэлектрики и радиация в 6 кн. / Кн. 6/. М.: Наука, 2004.

25. Vinogradov. B.A., Kharicheva D.L., Stepochkin V.A., Petrachenko Y.A. Determination of characteristic thermal zones in laser brazing metal to ceramics. //Welding International. 2005. V. 19. № 1. P. 65-67.

27. Харичева Д.Л. Исследование лазерного воздействия на металлы при пайке с керамикой. //Международный симпозиум «Образование через науку». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С. 252.

28. Харичева Д.Л. Комплексное исследование коэффициента отражения керамических материалов при лазерном воздействии. //Огнеупоры и техническая керамика, 2005. №10. С. 27-31.

29. Харичева Д.Л. Исследование физико-химических процессов в зоне контакта керамика - металл при лазерной активной пайке. //Огнеупоры и техническая керамика. 2005. № 12.

Харичева Дина Леонидовна

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ
ЛАЗЕРНОЙ ПАЙКИ МЕТАЛЛА С КЕРАМИКОЙ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Издательство АмГУ, г. Благовещенск, ул. Мухина. 150.

Подписано к печати 20.10.05. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100. *Заказ № 332.*