

УДК 621.9.048.7  
На правах рукописи

Кудрявцев Алексей Олегович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ ПАЙКИ  
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ИПН 200**

Специальность:

05.03.06 – Технологии и машины сварочного производства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2009

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

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор  
**Виноградов Борис Алексеевич**

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор  
**Неровный Вячеслав Михайлович**

Кандидат технических наук  
**Кваша Юрий Николаевич**

Ведущая организация: Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН (**ИПЛИТ РАН**)

Защита состоится «\_17» декабря 2009 года в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Телефон для справок: (499) 267 - 09 - 63

Автореферат разослан «\_02\_» ноября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент

Коновалов А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. За последние годы металлокерамические узлы (МКУ) нашли широкое применение в технике, что связано с их высокой механической прочностью, способностью выдерживать значительные ударные и вибрационные нагрузки, радиационной и термической стойкостью, сравнительно малым весом и целым рядом других уникальных характеристик.

В авиационно-космической и ракетной технике такие узлы применяются в качестве вакуумно-плотных вводов для датчиков, расположенных вне корпуса корабля, а также в приборах и аппаратах, обеспечивающих нормальное функционирование аппаратуры жизнеобеспечения корабля и аппаратуры автоматического управления полетом. Применение МКУ промышленностью, выпускающей вакуумное и вакуумно-термическое оборудование, значительно упрощает конструкцию, повышает рабочие характеристики и надежность агрегатов. Ядерная энергетика использует значительное количество керамических материалов и металлокерамических узлов в качестве оболочек, тепловыделяющих элементов и различных герметичных кабельных вводов.

Существует множество конструкторских разработок герметичных кабельных вводов. В настоящей работе подробно рассмотрены вопросы соединения проходных изоляторов типа ИПН-200-2.6 ТУ 16-528.178-79 и герметичных проходок типа ВГКК-194-1-144-4.0-1500-04, где концевую заделку производят изолятором с использованием высокоглиноземистой керамики со значительным содержанием  $Al_2O_3$ . Такая керамика имеет высокие вакуумные, прочностные и диэлектрические качества, но при этом обладает и рядом недостатков: плохая смачиваемость припоями и неустойчивость к тепловым ударам.

При разработке и изготовлении металлокерамических узлов необходимо решить задачу надежного соединения металлической и керамической деталей. При этом в понятие «надежности» включена не только механическая прочность соединения, но и другие специфические для каждой области применения узла параметры. Для разработки технических условий и технологических рекомендаций по применению лазерной пайки металлокерамических узлов в промышленных условиях требуется решение задачи оптимизации технологических режимов лазерной пайки металла с керамикой.

Проведение комплексных исследований с оптимизацией технологических режимов лазерной пайки изоляторов и их испытаниями на герметичность и механическую стойкость представляет собой важную научно-исследовательскую и конструкторско-технологическую задачу, фактически завершающую цикл исследований, выполненных по данному

направлению. Кроме того, новым перспективным и практически не исследованным направлением получения металлокерамических соединений является лазерная пайка через прозрачную керамику, которая используется как оптический элемент узла.

### Цель работы

Целью работы является обеспечение прочности и высокой вакуумной плотности металлокерамических узлов ИПН 200 при лазерной активной пайке.

### Задачи исследования

Для достижения цели работы требуется решить следующие задачи:

1. На базе математической модели, учитывающей реальную технологию многопроходной лазерной пайки, решить теплофизическую задачу лазерной пайки многослойного металлокерамического узла, с введением эмпирических зависимостей для параметров модели;
2. Определить взаимосвязи между технологическими параметрами и вакуумной плотностью получаемых соединений; провести исследования микроструктуры металлокерамических соединений;
3. Провести комплексные экспериментальные исследования и определить оптимальные параметры технологии многопроходной лазерной пайки для рекомендации их промышленности;
4. Определить пороги и характер разрушения при воздействии лазерного излучения на металлизированные оптически прозрачные керамические материалы и исследовать возможность получения качественных металлокерамических соединений лазерной пайкой через прозрачную керамику.

### Методы исследований

В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические задачи решались с применением основных положений теории планирования эксперимента, математической статистики, научных основ технологии лазерной обработки материалов, теории термоупругости и теплопроводности с элементами дифференциального и интегрального исчисления. Эксперименты по пайке проводились на разработанной технологической установке, на базе YAG:Nd лазера фирмы «Лазеры и аппаратура». Для определения вакуумных свойств соединений использовался течеискатель Spectron 600 (MS-40), механические свойства определялись на испытательной машине UTS и измерительной системе FISCHERSCOPE H100C, микроструктура соединения исследовалась при помощи оптической и электронной микроскопии на анализаторе Zygo NewView 5022, микроскопе Keyence VHX-100 и микроанализаторе JEOL JXA-8100 SuperProbe. Обработка данных экспериментов проводилась при помощи стандартных программ Microsoft Excel и MathCAD.

### Научная новизна

1. Решена задача нагрева и пайки многослойной конструкции металл – припой – керамика, учитывающая:
  - нелинейную зависимость параметров модели от температуры соединяемых материалов;
  - многопроходность режимов лазерной пайки;
  - реальную форму МКУ.
2. Впервые решена задача оптимизации технологии получения металлокерамических соединений:
  - установлена связь технологических факторов с вакуумной плотностью и механической прочностью металлокерамического соединения гермоввода, показана корреляционная зависимость между вакуумными и прочностными свойствами металлокерамических узлов;
  - обоснована технология двухпроходного режима лазерной пайки, приведены технические требования для промышленного применения лазерной пайки металлокерамических узлов;
  - установлено, что высокая вакуумная плотность достигается плавлением медного припоя, которое происходит при плотностях мощности  $(0.5...2) \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> и скорости движения теплового источника на поверхности металлической детали  $v = 0,5...2,5$  мм/с.
3. Впервые экспериментально установлены пороговые характеристики лазерного разрушения прозрачной и металлизированной керамики и доказана возможность создания металлокерамических соединений методом лазерной пайки через оптически прозрачную алюмооксидную керамику.

### Практическая ценность

1. Разработаны методики и режимы предварительной подготовки деталей узлов для процесса лазерной пайки.
2. Разработаны технические требования и технологические рекомендации лазерной пайки конических соединений, используемых в промышленности.
3. Получены металлокерамические соединения, имеющие вакуумную плотность порядка  $10^{-11}$  м<sup>3</sup>Па/с, превышающие технические требования ТУ 7434-4740909-001-92Э «Вводы герметичные контрольных кабелей типа ВГКК для АЭС» по уровню натекания.
4. Доказана возможность создания металлокерамических соединений на основе оптически прозрачных алюмооксидных керамики лазерной пайкой через прозрачную керамику.

Результаты, изложенные в диссертации, были получены в рамках выполнения проекта Минобрнауки РФ: научный проект РНП 2.1.2.7351 «Постановка и совместное решение задач с подвижными границами и термоупругости для многослойных материалов при лазерном воздействии». Результаты работы рекомендуются к использованию в атомной энергетике при производстве гермовводов.

### Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались: на 3-й международной конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов» (г. Казивели, июнь, 2007), на 5-й международной конференции «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве» (г. Тирасполь, июнь 2007), на VIII межвузовской научной школе молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике электронике, экологии и медицине" (г. Москва, ноябрь 2007), на научном семинаре кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, январь 2008), на Второй Всероссийской школе для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (г. Саров, апрель 2008), на научном семинаре DAAD «Михаил Ломоносов» (г. Бонн, ноябрь 2008), на научном семинаре Bayerisches Laserzentrum (г. Эрланген, декабрь 2008).

### Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 4 печатных работах, результаты исследований приведены в научном отчете по гранту Минобрнауки (2007).

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и трех приложений, работа изложена на 216 страницах машинописного текста, содержит 96 рисунков, 28 таблиц и 130 наименований литературных источников.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении отмечается актуальность проблемы, указана цель работы, научная новизна, практическая ценность работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ научно-технической литературы, посвященной процессам пайки металла с керамикой и особенностям керамических материалов.

Приведены характеристики широко используемых для производства металлокерамических соединений (МКС) корундовых керамик и их свойств. Рассмотрены основные существующие технологии изготовления МКС, позволяющие получить вакуумно-плотное металлокерамическое соединение, способное выдерживать высокие температуры. Исходя из изложенного, определены цель и задачи работы.

Во второй главе описаны объекты, технологии, методы, используемые в работе. В качестве исследуемых керамических материалов рассмотрены

алюмооксидные материалы: микролит, поликор, лейкосапфир, приведены их химический состав, механические и термические свойства.

Рассмотрены свойства металлов и припоев, применяемых для получения паяного соединения: титан, ковар (29НК), медь и припой ПОС-61.

Представлена технология активной лазерной пайки прозрачного материала с металлом, использовавшаяся в работе, и приведены характеристики конического МКУ (рис.1).

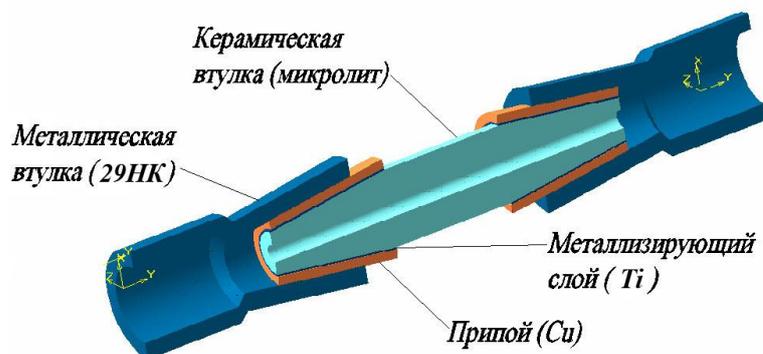


Рис.1. Конструкция охватывающего металлокерамического соединения

Внутренняя охватываемая деталь соединения выполнена из высокоглиноземистой керамики (микролит), на нее нанесен тонкий слой титана (толщина слоя 1-3 мкм). Поверх титана нанесен слой меди, выполняющий роль припоя (толщина слоя 90-110 мкм). Охватывающая внешняя металлическая деталь выполнена из ковара (толщина стенки 0,6-0,65 мм).

При оценке прозрачности технической керамики для лазерного излучения длиной волны 1,06 мкм удалось классифицировать ее по применимости для разработки промышленной технологии лазерной пайки металлокерамических соединений через керамику. Технический алюмоиттриевый гранат, технический поликристаллический сапфир имеют коэффициент пропускания  $70\% \pm 5\%$  для длины волны 1,06 мкм. Керамика поликор с коэффициентом пропускания  $50\% \pm 5\%$  может рассматриваться как полупрозрачная, керамики микролит, ВК94-1, ГБ-7 имеют коэффициент пропускания ниже 40% для длины волны 1,06 мкм.

Для проведения экспериментальных работ по пайке автором на базе лазерной лаборатории фирмы НПЦ «Лазеры и аппаратура» был создан автоматизированный лазерный технологический комплекс на основе Nd:YAG лазера с непрерывной ламповой накачкой. Параметры лазера: длина волны излучения 1,064 мкм, мощность излучения до 150 Вт, размер пятна в зоне обработки 0,2-3 мм.

Приведены методики металлизации керамики титаном и медью. Для нанесения покрытия на керамику была выбрана установка «Каролина D 10 К» производства фирмы «ЭСТО-Вакуум». Нанесение медного припоя

производилось гальваническим методом в институте физической химии и электрохимии РАН.

Описана методика измерения вакуумной плотности полученных МКС. Исследования вакуумной плотности проводились на базе фирмы «ЭСТО-Вакуум» с использованием гелиевого масс-спектрометрического течеискателя английской фирмы “Edwards”, модель Spectron 600 (MS-40).

Описаны методики определения температуры в зоне пайки методом скоростной тепловизионной съемки и бесконтактной пирометрии.

Структуры поверхности переходной зоны металлокерамических изоляторов исследовались на полированных шлифах с помощью трехмерного отображающего анализатора Zygo NewView 5022 с разрешением до 0,1 нм, цифровом металлографическом микроскопе Keyence VHX-100 с кратностью увеличения до 5000х, растровом электронном микроскопе Philips XL30 и электронно-зондовом рентгеновском микроанализаторе фирмы JEOL JXA-8100 SuperProbe.

Механические свойства соединения исследовались с помощью универсальной испытательной машины UTS в лаборатории ИПРИМ РАН и измерительной системы FISCHERSCOPE H100C.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию процесса лазерной пайки, которое позволяет теоретически оценить возникающие температурные поля, рассчитывать и сравнивать различные режимы пайки металлокерамических соединений.

В работах Швайка Д.С. рассмотрен процесс лазерной пайки плоского металлокерамического узла (МКУ) и построена его математическая модель. Процесс пайки описан квазистационарным уравнением теплопроводности, узел рассматривался, как набор четырех бесконечных пластин разной толщины (ковар - медь - титан - керамика). Из проведенных в работах расчетов следует, что при однократном режиме лазерной пайки непрерывным лазерным излучением, толщине ковара 0,5-0,6 мм, плотность мощности лазерного воздействия должна быть в диапазоне  $(2...8) \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> при скорости движения лазерного источника 6...10 мм/с, а общее время пайки около 40 с.

Проведенные нами исследования показали, что для цилиндрических и конических соединений можно значительно улучшить их качество, если использовать многопроходный, в частности, 2-х проходный режим пайки, при котором пайка ведется за два прохода лазерного луча. При этом были получены узлы, стабильно сохраняющие высокую вакуумную плотность и прочность.

С нашей точки зрения квазистационарный режим нагрева в рассмотренной выше модели не вполне обоснован, а моделирование многопроходных режимов пайки вряд ли возможно. Поэтому на основе экспериментальных данных по лазерной пайке, нами была сформулирована технологическая модель пайки МКУ, позволяющая сравнивать поля температур при разных режимах пайки.

Нелинейное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе

координат имеет вид:

$$\rho_i(T)C_i(T)\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda_i(T)r\frac{\partial T_i}{\partial r}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{\lambda_i(T)}{r}\frac{\partial T_i}{\partial \theta}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_i(T)\frac{\partial T_i}{\partial z}\right)$$

$$T_i = T_i(r, \theta, z, t), \quad R_i < r < R_{i+1}, \quad 0 < z < ZL, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

где  $i$  — номер слоя (1-ковар, 2-медь, 3-титан, 4-керамика (рис. 2)),  $T(r, \theta, z, t)$  — температура;  $c_i$  — массовая теплоемкость  $i$ -го слоя;  $\lambda_i$  — теплопроводность;  $\rho_i$  — плотность  $i$ -го слоя.

На наружной поверхности учитываем конвективно-радиационный теплообмен с окружающей средой и нагрев поверхности лазерным излучением  $q_{las}$  (рис. 3).

$$\left(-\lambda_4\frac{\partial T_4}{\partial r} + \varepsilon\sigma(T_a^4 - T_4^4) + \alpha_4(T_a - T_4)\right)\Big|_{r=R_5} - q_{las} = 0$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана;  $\varepsilon$  — излучательная способность поверхности,  $\alpha_i$  — коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхности  $i$ -го слоя.

Распределение излучения лазера в поперечном сечении считаем гауссовым. Плотность мощности лазерного излучения в момент времени  $t$  в точке боковой поверхности с координатами  $(R_5, \theta, z)$  определяется как

$$q_{las} = q_m \exp[-k(z - z_0(t))^2 - k(R_5 \cdot \sin(\theta - \theta_0(t)))^2] \cos(\theta - \theta_0(t))$$

где  $q_m$  — интенсивность излучения в центре потока в точке на боковой поверхности с координатами  $\theta_0(t) = \omega \cdot t$ ,  $z_0(t) = z_0$ ;  $k$  - коэффициент сосредоточенности.

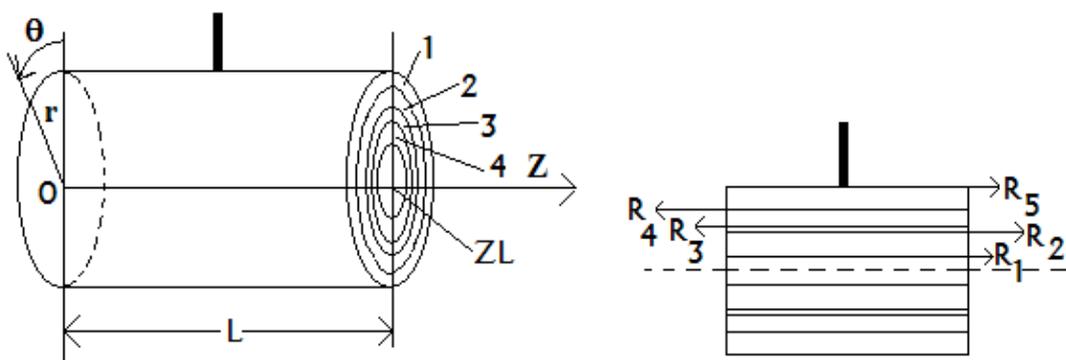


Рис.2. Цилиндрический металлокерамический узел.  
1 — ковар; 2 — медный припой; 3 — титан; 4 — керамика

На рис. 3.а приведена зависимость температуры от времени на границе керамика-титан. На рис.3. б. приведено распределение температуры на внутренней поверхности керамики. Видно, что после второго прохода перепад температур по длине образца незначителен. Кроме того, наши расчеты показывают, что температура на внутренней цилиндрической поверхности монотонно возрастает со временем с почти постоянной скоростью, достигая к концу второго прохода величины более 1000 К.

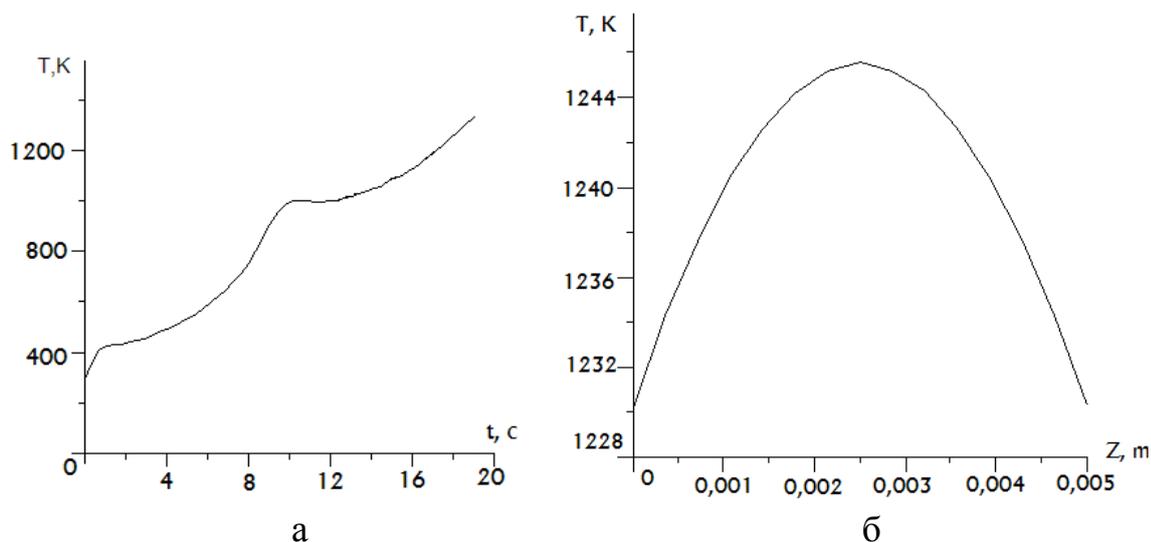


Рис.3. а Зависимость температуры от времени на границе керамика – титан  $T=T(R_1, 0, ZL/2, t)$  . б Распределение температуры на внутренней поверхности керамики  $T=T(R_0, 0, z, \tau_2)$  после второго прохода лазера ( $t = \tau_2$ )

При расчете режимов пайки МКУ учитывались следующие ограничения: температура на поверхности ковара не должна превышать линии солидуса ( $1750\text{ }^\circ\text{K}$ ), на границе титан—медь должна быть меньше температуры плавления титана ( $1933\text{ }^\circ\text{K}$ ) и на границе медь—ковар достигать температуры плавления меди ( $1350\dots 1370\text{ }^\circ\text{K}$ ).

Наши расчеты показали, что при двух проходах лазерного луча режимы пайки, обеспечивающие наивысшую вакуумную плотность, надо находить в диапазоне плотности мощности воздействия лазерного излучения  $(0,5\dots 2)\cdot 10^7\text{ Вт/м}^2$  и скорости движения теплового источника  $0,5\dots 2,5\text{ мм/с}$ . Установлено, что увеличение числа проходов (более 3-х) нецелесообразно из-за снижения производительности процесса, при этом вакуумная плотность соединения не повышается.

Пайку металлокерамических соединений можно вести и импульсным лазерным излучением. Исследовались технологические режимы импульсной лазерной пайки, рекомендованные в работе Юсупова З.Ф. Экспериментально показано, что в случае импульсного воздействия зона термического влияния существенно больше, выделяется зона плавления ковара, вследствие чего происходит снижение прочности соединения. Перегрев керамики приводит к тому, что под действием лазерного излучения происходит рост зерен кристаллической фазы, что приводит к снижению ее прочностных свойств.

Использование керамики в качестве оптического элемента предъявляет особые требования к лазерной стойкости керамики. Были проведены исследования процессов деструкции конструкционной прозрачной керамики, в том числе металлизированной, под действием лазерного излучения с различной энергией и длительностью импульсов. Были определены пороги разрушения для металлизированных оптически прозрачных алюмооксидных керамик содержащих различные металлизационные слои при разных длительностях импульса, разных плотностях энергии,:

- для металлизированной титаном керамики при плотности энергии выше  $0,11 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup> керамика не подвергается разрушению, а металлизационный слой сохраняет свою целостность;
- для керамики, металлизированной титаном и медью, в диапазоне плотности энергии  $0,1 \cdot 10^8 - 0,35 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup> происходит плавление и разрушение металлизационного слоя, при плотности энергии выше  $1 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup> в керамике возникают трещины.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию лазерной пайки металла с керамикой путем проведения многофакторного эксперимента. Проводившиеся ранее работы по лазерной пайке металла с керамикой предусматривали, как правило, выполнение однофакторных экспериментов.

Проведенные нами предварительные эксперименты пайки конических МКС, анализ каждого фактора, влияющего на процесс пайки металлокерамических узлов, позволил выделить несколько основных факторов, главным образом определяющих технические свойства соединений. Выбранные факторы: мощность лазерного излучения, скорость перемещения детали, размер пятна лазерного излучения на поверхности металла, прижимное усилие для конусных соединений. В качестве критерия качества рассматривалась вакуумная плотность паяного соединения.

Вакуумная плотность оценивалась по фоновому натеканию на течеискателе после откачки. В тех случаях, когда фоновое натекание не превышало  $1 \cdot 10^{-9}$  Па·м<sup>3</sup>/с, измерялось натекание в атмосфере гелия. При построении функции регрессии учитывались сами факторы и их комбинации второго порядка. Функцией цели был логарифм фонового натекания  $I_{gy}$ . Обработка результатов дала следующее уравнение регрессии:

$$\lg y = -9.0 - 0.02x_1 - 0.28x_2 - 0.03x_3 - 0.13x_4 - 0.73x_5 - 0.18x_7 - 0.38x_8 + 0.33x_9 - 0.23x_{10} - 0.35x_{11}$$

Значения коэффициентов регрессии говорят о различном влиянии технологических факторов на вакуумную плотность соединений:

- $x_1$  – мощность лазерного излучения – практически не влияет,
- $x_2$  – скорость вращения детали, влияет существенно,
- $x_3$  – диаметр пятна лазерного излучения на поверхности металла – не влияет,
- $x_4$  – прижимное усилие для конусных соединений – влияет слабо,
- $x_5$  – комбинация мощности и скорости, наиболее важный фактор (энергия, идущая на нагрев),
- $x_6$  – комбинация мощности и диаметра – отсутствует,
- $x_7$  – комбинация мощности и прижимного усилия – влияет,
- $x_8$  – комбинация диаметра пятна лазерного излучения и скорости вращения детали – влияет существенно (физический смысл - время нагрева),
- $x_9$  – комбинация скорости и прижимного усилия – влияет существенно,
- $x_{10}$  – комбинация диаметра пятна излучения и прижимного усилия - влияет.

$x_{11}$  – квадрат диаметра - фактор влияет существенно, он определяет размер зоны плавления меди.

Как показал анализ уравнения регрессии, наибольшее влияние оказывают не сами факторы по отдельности, а их комбинации, в частности комбинация мощности и скорости (энергия), диаметра пятна излучения и скорости вращения детали (время нагрева), квадрат диаметра (площадь пятна излучения). Влияние прижимного усилия, которое обеспечивает саму возможность начать процесс пайки, оказалось сложным. По всей видимости, это объясняется тем, что данный фактор должен иметь скорее пороговый характер. На рис.4 приведены экспериментальная и рассчитанная по уравнению регрессии вакуумная плотность в проведенной серии опытов. Сравнение графиков говорит о хорошем совпадении экспериментальных и теоретических величин.

Исследованные режимы можно условно разделить на три группы:

1. Первая группа - технологические режимы, при которых получаются качественные соединения, обеспечивающие с хорошей повторяемостью высокую вакуумную плотность (выше  $1 \cdot 10^{-9}$  Па·м<sup>3</sup>/с), которая устойчиво сохраняется во времени. Эти режимы характеризуются сочетанием следующих факторов: средняя мощность лазерного источника 65 Вт, средний диаметр пятна 2,6 мм и средняя скорость 1,2 мм/сек.

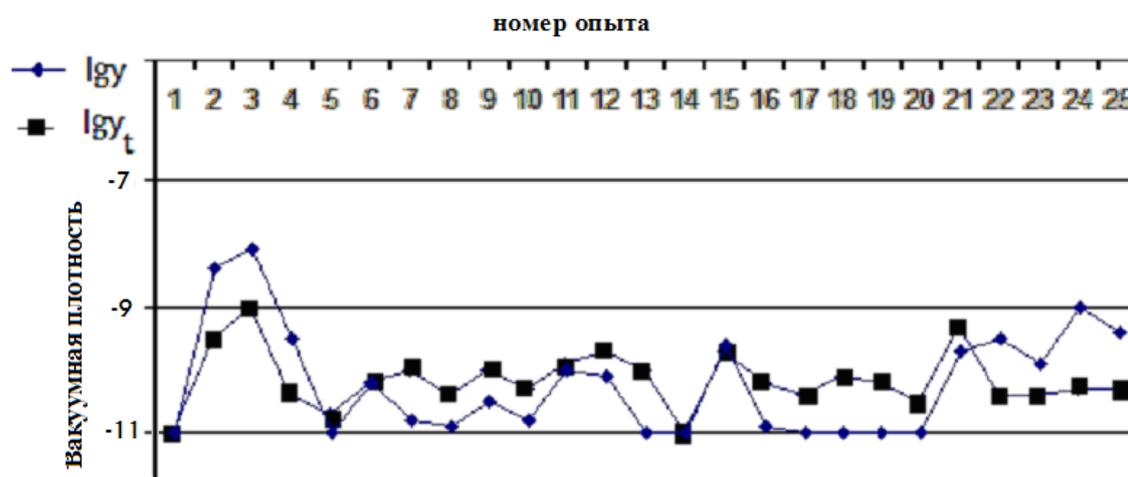


Рис.4. Теоретическая ( $lg y_t$ ) и экспериментальная ( $lg y$ ) вакуумная плотности (Па·м<sup>3</sup>/с)

2. Вторая группа – режимы, при которых требуемая вакуумная плотность не достигается. Более того, вакуумная плотность неустойчива и меняется во времени. Эти режимы характеризуются сочетанием следующих факторов: средний диаметр пятна менее 2,4 мм и средняя скорость менее 1,1 мм/сек. Меньшая, чем у первой группы режимов, скорость в сочетании с большой плотностью мощности приводит к перегреву соединения. В процессе такого нагрева может образовываться большая зона расплава припоя, и его вытеснение из зоны контакта металла с керамикой. Чаще всего перегрев

приводил к видимому изменению поверхности коваровой втулки вплоть до ее плавления.

3. Третья группа - режимы обработки, в которых теоретически предсказанная вакуумная плотность лучше экспериментальной. Следует предположить, что здесь речь идет о недостаточной предварительной подготовке деталей.

**В пятой главе** приводятся результаты исследований механических свойств и структуры переходной зоны. В процессе пайки МКУ подвергались лазерному нагреву разной степени интенсивности и имеют разную вакуумную плотность. Проведенные в главе 4 исследования режимов лазерной пайки позволили установить зависимость вакуумной плотности металлокерамического соединения от режима пайки.

Определить причину потери герметичности МКС можно только после детального анализа его микроструктуры. Исследования на разрыв показали, что можно выделить несколько типов разрушения образцов:

1) Разрушение керамической детали МКС. Подобный тип разрушения может быть вызван появлением трещин в керамической детали во время пайки.

2) Отделение металлической и керамической части образца без разрушения, как металла, так и керамики. Данный тип разрушения обусловлен недостаточной адгезией между титановым слоем и керамикой.

3) Разрушение металлических поверхностей. Разрушение данного типа происходит по припою.

Классификация типов разрушения позволяет сделать следующие выводы: наивысшей вакуумной плотностью обладают образцы, имеющие наилучшие механические свойства, при этом не происходит снижения прочности керамической детали вследствие нагрева.

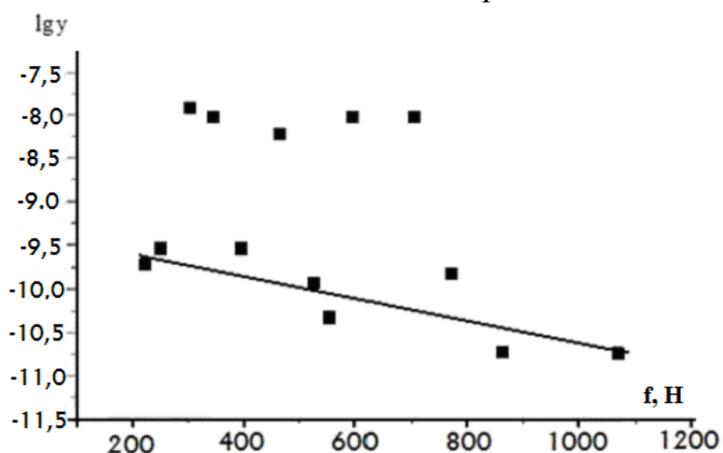


Рис.5. Зависимость уровня вакуумной плотности МКУ от усилия разрыва

Расчеты показали, что предел прочности этих паяных соединений лежит в диапазоне 35-50 МПа. Образцы, разрушенные по второму типу,

имеют, как правило, низкую прочность, что связано с повреждением (растрескиванием) керамики под действием термонапряжений. На рис.5 приведен график корреляционной зависимости вакуумной плотности от механической прочности образца для вакуумплотных образцов (степень натекания по гелию не превышает  $1 \cdot 10^{-8}$  Па·м<sup>3</sup>/с). Уравнение регрессии имеет вид:

$$\lg y = -0.0013 \cdot f - 8.3$$

Экспериментальные исследования переходной зоны МКУ, полученных методом лазерной пайки, проводились на базе ИПРИМ РАН и Баварского лазерного центра. Для подготовки поверхности шлифов использовалось оборудование фирмы Struers, комплексы TegraForce и TegraPol лаборатории кафедры материаловедения университета Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Были получены 3D-изображения разных участков переходных зон металлокерамического соединения, полученного при следующих технологических параметрах: P =65 Вт, v=1,25 мм/с, d=3 мм, F=355 Н, фоновое натекание  $1 \cdot 10^{-11,0}$  Па·м<sup>3</sup>/с (рис.6).

Увеличение времени выдержки при температурах выше 1100 К в процессе пайки приводит к возрастанию интенсивности взаимодействия титана с керамикой, что ведет к возрастанию числа продуктов, которые ослабляют спай, происходит растворение титанового слоя в припое с образованием хрупких интерметаллидов, ухудшающих пластичность и создающих условия для разрушения металлокерамического соединения. Поэтому при пайке металлокерамического соединения подбирались температура (1200 К) и время выдержки образца (30 сек.), не позволяющие полностью раствориться активному металлу в припое.

При лазерной активной пайке при режимах лазерного воздействия  $(1,1-1,3) \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> в зоне спая и в керамике, возникающие температуры не приводят к увеличению зерен керамики и другим ее структурным перестройкам.

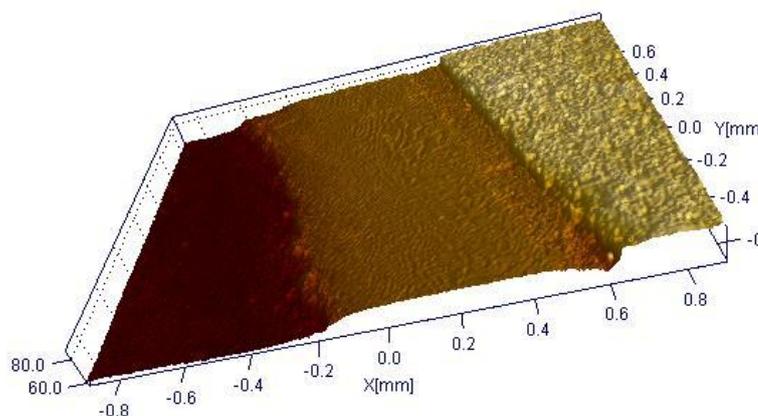


Рисунок 6. Модель границы металл – припой – керамика

Исследовалась принципиальная возможность получения металлокерамических узлов с использованием пайки через прозрачный диэлектрик. В качестве образцов для пайки были рассмотрены плоско-параллельные пластины из поликора. Паяное соединение поликора толщиной 1 мм с оловянно-свинцовой пластиной было получено на лазерной технологической установке при следующих режимах: длительность импульса – 4 мс, диаметр луча – 2 мм, энергия в импульсе – 1,1 Дж, частота импульсов 20 Гц, скорость пайки 0.3 мм/с. Толщина металлизационного слоя активного металла титана составила 3 мкм (покрытие нанесено методом вакуумного напыления), слой меди толщиной 70 мкм осажден гальванически, оловянно-свинцовый припой толщиной 0,5 – 0,6 мм. Оптимизация режимов пайки является отдельной сложной задачей и не входила в цели исследования.

В работе доказана принципиальная возможность создания МКУ на основе оптически прозрачных керамических материалов по технологии лазерной активной пайки. Определен диапазон плотностей энергий  $0,35 \cdot 10^6$  –  $5,7 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>, позволяющих получить МКУ. Получены плоские металлокерамические соединения на основе прозрачной керамики (поликор) с оловянно-свинцовой пластиной. Механическая прочность такого соединения при испытании на отрыв достигала 10 МПа.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Определены теоретически, в результате решения задачи лазерного нагрева и пайки многослойной конструкции металл – припой – керамика с учетом нелинейной зависимости параметров модели, многопроходности режимов лазерной пайки и реальной форму МКС технологические режимы пайки. Расчеты показали, что при двух проходах лазерного луча оптимальные режимы пайки лежат в диапазоне плотностей мощности воздействия лазерного излучения  $(0,5...2) \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> и скорости движения теплового источника 0,5...2,5 мм/с.
2. Экспериментально, в результате оптимизации технологии на основе планирования эксперимента установлено, что режимы воздействия с плотностью мощности  $(1,1-1,3) \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> и скоростью 1 мм/с позволяют получать МКС с высокой вакуумной и механической прочностью. Анализ переходной зоны позволяет сказать, что возникающие температуры не приводят к увеличению зерен керамики и другим ее структурным перестройкам.
3. Установлено, что наибольшее влияние на вакуумную плотность МКС оказывают следующие факторы: энергия нагрева, время нагрева и площадь нагрева, и показано, что между вакуумными и прочностными свойствами металлокерамических узлов существует линейная зависимость;
4. Получены результаты вакуумной плотности соединений порядка  $10^{-11}$  м<sup>3</sup>Па/с, превышающие технические требования ТУ 7434-4740909-001-92Э «Вводы герметичные контрольных кабелей типа ВГКК для АЭС» по уровню натекания;
5. Доказана принципиальная возможность создания МКУ на основе оптически прозрачных керамических материалов по технологии лазерной активной пайки. Определен диапазон плотностей энергий  $0,35 \cdot 10^6 - 5,7 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>, позволяющих получить МКС. Получены плоские металлокерамические соединения на основе прозрачной керамики (поликор) с оловянно-свинцовой пластиной, механическая прочность которых при испытании на отрыв достигала 10 МПа.
6. Определены пороги разрушения для металлизированных оптически прозрачных алюмооксидных керамик, содержащих различные металлизационные слои, при разных длительностях импульса, разных плотностях энергии:
  - для керамики, металлизированной титаном, при плотности энергии выше  $0,11 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup> происходит абляция на поверхности поликора;
  - для керамики, металлизированной титаном и медью, в диапазоне плотности энергии  $0,1 \cdot 10^8 - 0,35 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup> происходит плавление и разрушения металлизационного слоя, при плотности энергии выше  $1 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>2</sup> в керамике возникают трещины.

### **Основные положения диссертации отражены в работах:**

1. Решение осесимметричной тепловой задачи с учетом напряженно-деформационного состояния при пайке конусных металлокерамических соединений / Б.А.Виноградов, Д.Л.Харичева, А.О.Кудрявцев и др. // Сварочное производство. – 2007. - №12. -С.16-21.
2. Виноградов Б.А., Мещерякова Г.П., Кудрявцев А.О. Получение многослойных металлокерамических соединений лазерной пайкой // Механика композиционных материалов и конструкций. - 2008. -№2. – С. 250-268.
3. Кудрявцев А.О., Харичева Д.Л. Особенности лазерной пайки конусных металлокерамических соединений // Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине: Труды VIII межвузовской научной школы молодых специалистов.- Москва, 2007. – С. 85-87.
4. Сварка алюминиевых сплавов лазерным излучением с регулируемой формой импульсов на лазерном комплексе МЛ4-2 / А.А.Аллас , В.П.Вейко, А.О.Кудрявцев и др. // Beam technologies & Laser application: Proceeding of the Fifth international Conference. - Saint-Petersburg, 2006. -P. 216-220.