

УДК 533.525

А.А. Зенин, А.С. Климов

## Электронно-лучевая пайка алюмооксидной керамики с металлом с применением форвакуумного плазменного источника электронов

Представлены результаты исследований, направленных на создание механически прочных и вакуумно-плотных соединений алюмооксидной керамики с титаном посредством электронно-лучевой пайки. Компенсация зарядки электронным пучком поверхности электрически непроводящей керамики обеспечивалась применением для этих целей форвакуумного плазменного источника электронов. В качестве связующей прослойки использован алюминий.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая пайка, форвакуум, плазменный электронный источник, диэлектрики, металлокерамические соединения.

Наиболее распространенным методом создания металлокерамических соединений является пайка [1]. Причем пайке, проводимой с использованием припоев, предшествует, как правило, операция металлизации керамики, заключающаяся в нанесении металлосодержащей пасты и ее последующем вжигании в керамику. Поскольку эта операция усложняет весь процесс, то предпринимаются попытки ее исключения [2]. Собственно пайка может осуществляться как нагревом в печи, так и использованием иных источников энергии, например лазерного луча [3]. Для предотвращения окисления металла и припоя пайку проводят в атмосфере инертного газа. Альтернативное решение состоит в проведении пайки в вакууме, причем в этом случае конкуренцию лазерному лучу может составить ускоренный электронный пучок. Компенсация зарядки электронным пучком поверхности электрически непроводящей керамики обеспечивается применением для этих целей форвакуумного плазменного источника электронов [4]. Об успешном опыте применения электронного источника такого типа для соединения керамических деталей сообщалось нами в [5]. В настоящей работе приводятся результаты исследований электронно-лучевого метода для создания соединений металла с керамикой.

**Техника и методика эксперимента.** Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в [5] и схематически изображенной на рис. 1. Установка оснащена плазменным электронным источником, способным функционировать в так называемом форвакуумном диапазоне давлений (5–20 Па). Давление регулировалось напуском газа (воздух, гелий) непосредственно в рабочую камеру. Как показали ранее проведенные исследования [5], при генерации электронных пучков при столь высоких давлениях газа образующаяся в области транспортировки пучка плазма нивелирует процесс зарядки ускоренными электронами поверхности непроводящей керамической мишени. В этих условиях воздействие электронного пучка на керамику принципиально не отличается от электронно-лучевой обработки заземленных металлических образцов. В экспериментах плотность мощности электронного пучка достигала  $2 \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, что позволяло расплавлять и керамику, и металлы.

В качестве материалов для создания металлокерамических соединений использовались алюмооксидная керамика марки ВК94-1, керамика на основе талько-шамотной смеси, алюминий, титан ВТ-5, сталь 3, нержавеющая сталь. Соединяемые элементы представляли собой трубки. Образцы закреплялись в системе вращения с возможностью регулировки скорости в диапазоне от 1 до 30 оборотов в минуту, что позволяло осуществлять равномерный нагрев соединяемых деталей. Контроль качества соединения металла с керамикой осуществлялся измерением пределов прочности на излом и на разрыв с помощью разрывной машины 2167 Р-50, испытанием на устойчивость к термоциклированию и проверкой на герметичность, а также исследованием шлифов в растровом электронном микроскопе Hitachi TM-1000, снабженном энергодисперсионным микроанализатором QUANTAX50. Микроанализатор позволил определить относительное изменение концентрации элементов в поперечном направлении к границе металл–керамика.

Испытание на термоциклирование проводилось следующим образом – в нагретую до 350 °С муфельную печь помещались соединенные детали и выдерживались в печи 15 мин.

После чего образцы извлекались из печи и в течение 15 мин остывали при комнатной температуре, такой процесс повторялся 10 раз. Для испытания на герметичность зажатые в специальной оснастке трубчатые образцы помещались в емкость с водой, после чего во внутреннюю полость подавался газ (воздух) под давлением 6 атм. Наличие пузырьков воздуха в емкости с водой позволяло судить о герметичности шва.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** Для определения совместимых пар металл–керамика были проведены предварительные эксперименты, суть которых состояла в следующем. На очищенные плоские керамические пластины помещались кусочки металла, которые затем нагревались электронным пучком в вакууме до расплавления металла, либо керамики. Остуженные образцы извлекали из вакуумной камеры и проверяли наличие соединения. По итогам этих испытаний были выбраны пары: керамика ВК94-1 и алюминий, керамика на основе талько-шамотной смеси и титан ВТ-5.

Получение качественного соединения пары керамики ВК94-1 с алюминием оказалось затруднительным ввиду сложности образования паяного шва, несмотря на достаточно хорошую смачиваемость алюминием данного типа керамики. При достижении температуры плавления алюминий расплавлялся целиком и стекал с устройства крепления. На рис. 2 представлена пара ВК94-1 и алюминий. Данный образец был нагрет до температуры порядка 600 °С, и на нем уже заметны следы сильных деформаций.

Пайка керамики на основе талько-шамотной смеси с титаном проводилась в атмосфере гелия, поскольку данный металл активно взаимодействует (особенно в жидком состоянии) со всеми газами, составляющими атмосферу. Полученное соединение оказалось более прочным, однако паяный шов имел низкое качество ввиду наличия пор и несплавлений по всей его длине (рис. 3).

Для получения герметичного соединения было принято решение использовать алюминий в качестве связующего материала между алюмооксидной керамикой ВК94-1 и титаном ВТ-5 (рис. 1), содержащим, помимо титана, 5% алюминия. Успешность такого подхода было обусловлена хорошей смачиваемостью алюминием как керамики, так и титана.

Трубчатые образцы керамики и титана имели внешние диаметры 12 и 11 мм соответственно. Диаметр и толщина алюминиевой прокладки составляли 13 и 1 мм соответственно. Образцы керамики и титана имели внутренний диаметр 9 мм. Перед пайкой все исходные материалы обезжиривались и закреплялись в системе вращения. Дополнительной обработки поверхностей соединяемых деталей не проводилось. После вакуумирования рабочей камеры область стыка материалов прогревалась расфокусированным электронным пучком до температуры плавления алюминия, затем при неизменной температуре производилась выдержка в течение 3–5 мин, после чего за 10 мин мощность пучка плавно снижалась до нуля и спаянные детали остужались в вакууме в течение 10–15 мин. На рис. 4 представлены соединяемые образцы до и после пайки.

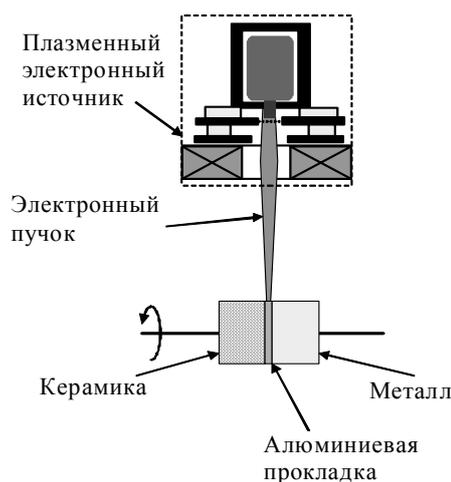


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки



Рис. 2. Соединение керамики ВК94-1 и алюминия (слева – алюминий, справа керамика)



Рис. 3. Соединение керамики на основе талько-шамотной смеси с титаном ВТ-5

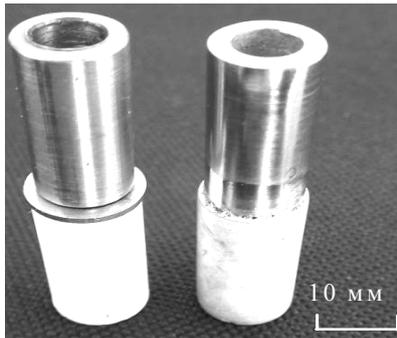


Рис. 4. Образцы до (слева) и после (справа) пайки: сверху титан ВТ-5; внизу керамика ВК94-1

Исследование полученных металлокерамических соединений методами растровой электронной микроскопии (рис. 5) и рентгеноспектрального микроанализа (рис. 6) выявили, что структура переходной зоны алюминий–керамика более резкая по сравнению с зоной алюминий–титан, что может свидетельствовать о частичном растворении титана в алюминии.

При испытаниях на термоциклирование четыре из шести испытываемых образцов сохранили свою герметичность, а в двух образцах появилась течь. Прочность на разрыв полученного соединения составила 8–20 МПа в зависимости от времени экспозиции при максимальной мощности пучка (таблица), причем разрыв происходил по алюминию.

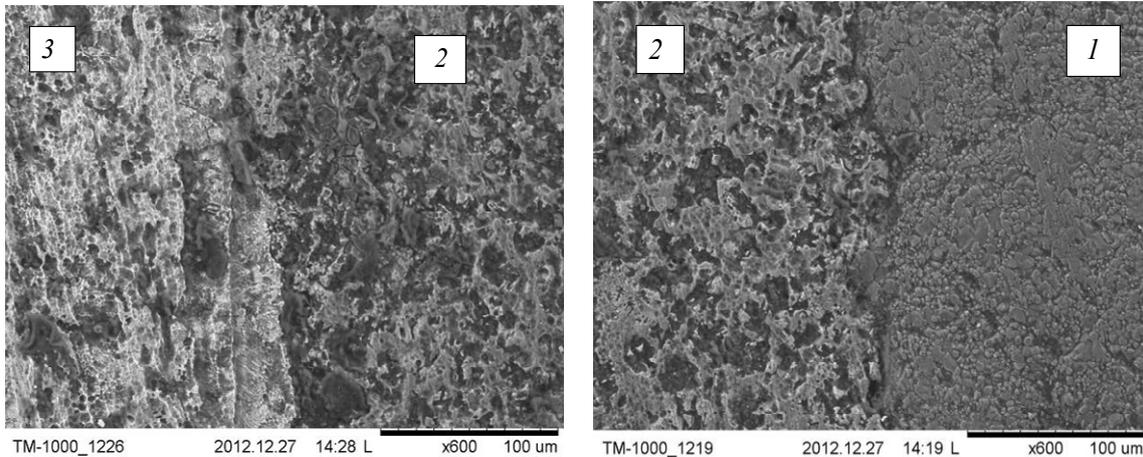


Рис. 5. Микрофотографии шлифов граничных областей соединения керамики с титаном через прослойку алюминия: 1 – керамика; 2 – алюминий; 3 – титан

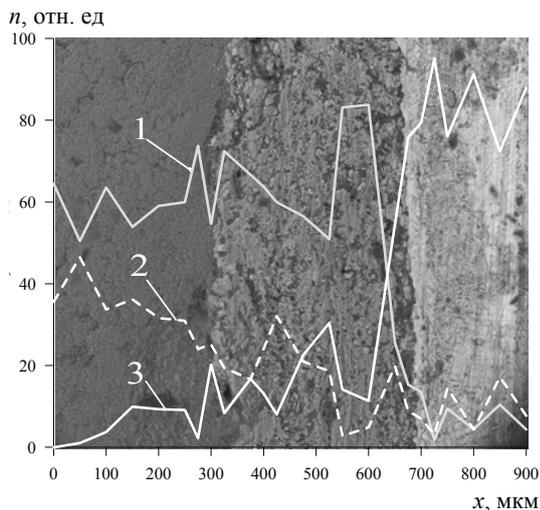


Рис. 6. Распределение концентрации  $n$  элементов в поперечном направлении к паяному соединению (на рисунке: слева – керамика, справа – титан, посередине – прослойка алюминия): 1 – алюминий; 2 – кислород; 3 – титан

#### Прочностные характеристики металло-керамических соединений

№ образца	Время экспозиции, мин	Предел прочности на разрыв, МПа
1	11	8
2	14	12
3	16	20

Несмотря на то, что указанные значения на порядок ниже прочности керамики, они могут оказаться достаточными для ряда металлокерамических узлов.

**Заключение.** Приведенные результаты указывают на перспективность использования электронно-лучевого метода для получения вакуумно-плотного металлокерамического соединения. Важной особенностью предлагаемой процедуры является отсутствие операции металлизации керамики, что заметно упрощает создание металлокерамических узлов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (12-08-31043 мол-а) и Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №7.3101.2011).

*Литература*

1. Ерошев В.К. Конструирование и технология изготовления паяных металлокерамических узлов: справ. материалы / В.К. Ерошев, Ю.А. Козлов, В.Д. Павлова. – М.: Энергия, 1988. – Ч. 1. – 280 с.
2. Nascimento R.M. Recent advances in metal-ceramic brazing / R.M. Nascimento, A.E. Martinelli, A.J.A. Buschinelli // *Ceramica*. – Vol. 49, № 312. – P. 178–198.
3. Виноградов Б.А. Получение многослойных металлокерамических соединений лазерной пайкой / Б.А. Виноградов, Г.П. Мещерякова, А.О. Кудрявцев // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2008. – № 2. – С. 250–268
4. Бурдовицин В.А. О возможности электронно-лучевой обработки диэлектриков плазменным источником электронов в форвакуумной области давлений / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс. // *Письма в ЖТФ*. – 2009. – Т. 35, вып. 11. – С. 61–66.
5. Гореев А.К. Электронно-лучевая сварка керамики с металлом с использованием форвакуумного плазменного источника электронов / А.К. Гореев, В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс // *Перспективные материалы*. – 2012. – № 3. – С. 77–80.

---

**Зенин Алексей Александрович**

Мл. науч. сотрудник каф. физики ТУСУРа

Тел.: 8-952-807-62-02

Эл. почта: zenin1988@gmail.com

**Климов Александр Сергеевич**

Доцент каф. физики ТУСУРа

Тел.: 8-905-990-52-41

Эл. почта: klimov@main.tusur.ru

Zenin A.A., Klimov A.S.

**Electron-beam soldering of alumina ceramics and metal with using plasma electron source**

The results of the research aimed at the creation of mechanically strong and leakproof compound of alumina ceramics and titanium using electron beam soldering. Compensation of charging the surface of electrically non-conductive ceramic by electron beam is provided with using a forevacuum plasma electron source. As a binder layer we used aluminum.

**Keywords:** electron-beam soldering, forevacuum, plasma electron source, dielectric, metal-ceramic composites.