

# Электронно-лучевая сварка керамики с металлом с использованием форвакуумного плазменного источника электронов

А. К. Гореев, В. А. Бурдовицин, А. С. Климов, Е. М. Окс

---

Рассмотрена возможность создания металлокерамических соединений методом электронно-лучевой сварки. Сварку алюмооксидной керамики с алюминием и титаном проводили в форвакуумной области давлений (5 – 20 Па) с использованием плазменного электронного источника. Исследованы структура и состав переходного слоя керамика-металл. Показано, что толщина переходного слоя существенно превышает размер микронеровностей исходной керамики, что подтверждает наличие перемешивания материалов, то есть сварки. Измерена зависимость прочности полученных соединений на излом от мощности электронного пучка. Установлено резкое различие прочности от выбора металла: прочность сварного соединения керамика-алюминий на порядок превышает прочность системы керамика-титан.

**Ключевые слова:** плазменный катод, электронно-лучевая сварка, форвакуумная область давлений, плавление керамики и металла, прочность сварного соединения.

---

Results of creation of ceramic-metal connections by a electron-beam welding are presented. Welding of alumina oxide ceramics with aluminum and titan were carried out in fore-vacuum pressure range (5 – 20 Pa) with use of a plasma electron source. Results of composition and structure measurements of transitive layer ceramics-metal are presented. It is shown, that the thickness of a transitive layer essentially exceeds the size of micro-roughnesses of initial ceramics that confirms presence of materials hashing, i.e. welding. Dependence of break mechanical strength for prepared connections on electron beam power is measured. Sharp distinction of strength from a metal choice is established. Strength of welded connection for ceramics-aluminum 10 times exceeds the same value for system ceramics-titan.

**Key words:** plasma cathode, electron beam welding, fore-vacuum pressure range, ceramics and metal melting, mechanical strength of welded connection.

---

## Введение

К настоящему времени получило распространение представление о сложности и низкой эффективности технологии создания металлокерамических соединений плавлением вследствие природной несовместимости соединяемых композиций [1]. Для получения подобных соединений применяют, как правило, пайку и диффузионную сварку. Вместе с тем встречаются сообщения о принципиальной возможности как лазерной [2], так и электронно-лучевой [3] сварки металла с керамикой. Последний способ заслуживает особого внимания, поскольку относится к категории вакуумных, а следовательно, потенциально пригодных для качественной сварки более

широкой по сравнению со сваркой в атмосфере номенклатуры материалов.

Проблемы, возникающие при электронно-лучевой сварке металла с керамикой, могут быть разделены на две группы. Первая группа включает в себя аспекты, связанные с особенностями поведения различных материалов при облучении электронным пучком. Известен эффект накопления электрического заряда на непроводящей керамике, вызывающего дефокусировку и отражение электронного пучка. Кроме того, металлы и керамика существенно отличаются по температуре и теплоте плавления и имеют различную стойкость к пространственному и временному перепаду температур. Ко второй группе следует отнести проблемы, возникающие на молеку-

лярном уровне и проявляющиеся в возможности создания механически прочного и вакуумно-плотного переходного слоя в области соединения металла с керамикой.

Проблемы, отнесенные к первой группе, в значительной степени снимаются использованием для электронно-лучевой сварки металла с керамикой плазменного источника электронов, функционирующего в форвакуумной области давлений (5 – 20 Па) [4]. При столь высоких рабочих давлениях образующаяся при транспортировке электронного пучка плазма практически полностью компенсирует зарядку непроводящей керамики ускоренными электронами [5]. Именно этот эффект и обеспечивает непосредственную электронно-лучевую обработку керамики. Импульсный электронный пучок большого сечения может быть эффективно использован для модификации поверхностных свойств керамических изделий [6]. Узкофокусированный непрерывный электронный пучок форвакуумного плазменного источника подходит для сварки непроводящих материалов. Успешная реализация электронно-лучевой сварки керамических изделий [5] обусловила и возможность сварки керамики с металлом. Перепады температур, возникающие из-за низкой теплопроводности керамики в области сварного шва с металлом, удается понизить используя предварительный прогрев керамики расфокусированным электронным пучком [7].

Цель работы — исследование качества сварных металлокерамических соединений полученных методом электронно-лучевой сварки.

### **Техника и методика эксперимента**

Эксперименты по электронно-лучевой сварке металла с керамикой проводили на установке, оснащенной источником электронов с плазменным эмиттером, специально созданным для генерации пучка в форвакуумной области давлений [8]. В диапазоне ускоряющих напряжений 5 – 15 кВ источник электронов генерировал непрерывный электронный пучок с током до 100 мА. Магнитная фокусировка электронного пучка обеспечивала его сжатие в пятно диаметром до 3 мм и, соответственно, повышение удельной мощности, выделяемой на мишени, до 20 кВт/см<sup>2</sup>. Проведенные нами ранее исследования [9] показали, что при электронно-лучевой обработке непроводящей керамики форвакуумным плазменным источником электронов эффекты, связанные с влиянием процесса зарядки керамики на параметры электронного пучка, не наблюдаются. В данных условиях воздействие

электронного пучка на непроводящую керамическую мишень практически не отличается от его воздействия на проводящий металлический образец.

Процессу сварки металла с керамикой предшествовал нагрев керамики в области стыка электронным пучком в отсутствие магнитной фокусировки. После предварительного нагрева керамики пучок фокусировали на область стыка и проводили собственно сварку. В экспериментах использовали алюмооксидную керамику ВК94, поверхность которой предварительно подвергали шлифовке так, чтобы размеры неровностей на поверхности не превышали 1 – 2 мкм. В качестве металлического компонента сварного соединения были выбраны алюминий и титан. Образцы керамики представляли собой бруски размером 30 × 5 × 4 мм. Сварной шов формировался в результате перемещения свариваемых деталей со скоростью 1 мм/мин. Сварку проводили при различной удельной мощности пучка. Качество сварного шва контролировали измерением прочности на излом и исследованием шлифов в оптическом микроскопе и растровом электронном микроскопе Qvanta 200 3D dual beam, снабженном рентгеновским микроанализатором. С помощью микроанализатора были измерены распределения концентрации элементов в направлении, перпендикулярном границе раздела металл – керамика.

### **Результаты и их обсуждение**

На рис. 1 приведены микрофотографии сварных швов керамики с алюминием и титаном. Обращает на себя внимание резкое различие качества шва. Для сварочного шва с алюминием граница керамика – металл резко выражена, а структура металла — мелкозернистая с размером зерна не более 5 мкм. Напротив, для случая сварки керамики с титаном граница раздела рыхлая, а структура титана претерпела заметные изменения — она содержит крупные зерна размером более 25 мкм. В исходном состоянии размер зерна титана составлял не более 5 мкм. Измеренные по интенсивности рентгеновских линий  $K_{\alpha}$  распределения элементов в сварных швах представлены на рис. 2. Более резкие изменения концентрации металлов, имеют место на границе титан – керамика по сравнению с системой керамика – алюминий. На первый взгляд этот результат противоречит выводам, сделанным на основе анализа рис. 1. Противоречие, однако, снимается, если принять во внимание поперечный размер зонда рентгеновского микроанализатора, составляющий доли микрометра. Отметим, что анализатор измеряет концентрацию элемента на границе конкретного

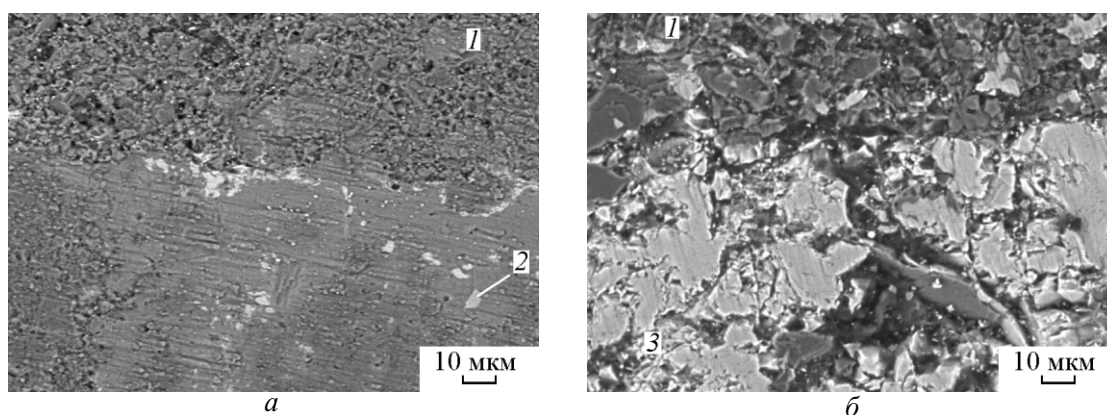


Рис. 1. Микрофотографии шлифов сварки керамики с металлами: *a* – керамика – алюминий, *б* – керамика – титан. 1 – керамика 2 – алюминий, 3 – титан.

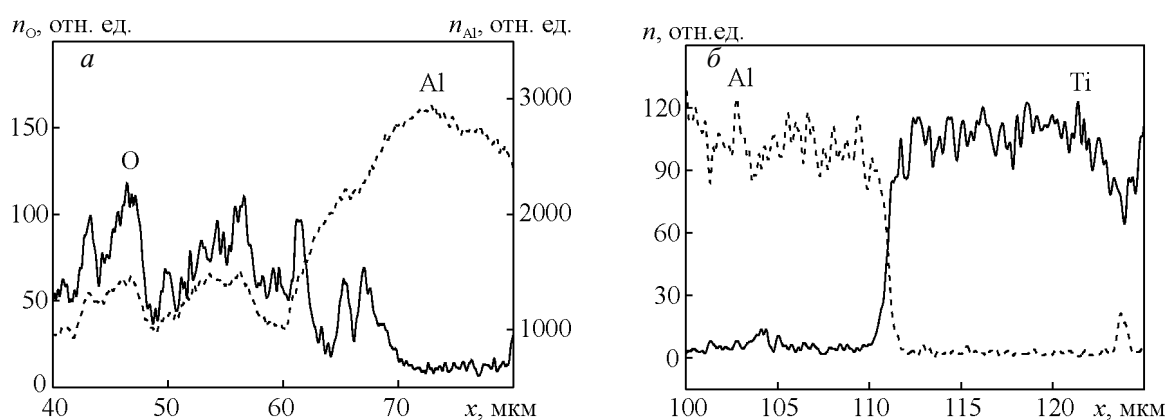


Рис. 2. Распределение концентрации  $n$  элементов на границе: *a* – керамика – алюминий, *б* – керамика – титан.

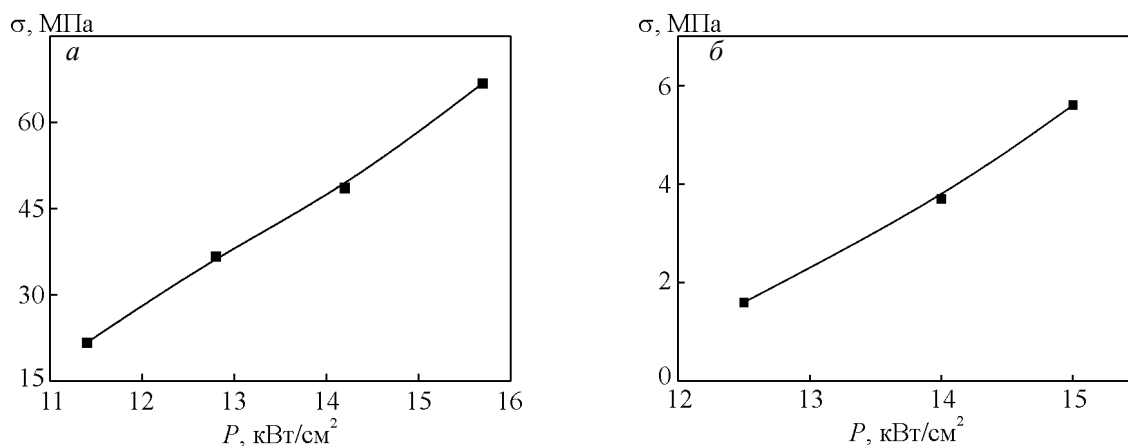


Рис. 3. Зависимость прочности  $\sigma$  шва на излом от удельной мощности  $P$  пучка для системы: *a* – керамика – алюминий, *б* – керамика – титан.

зерна. Взгляд с этой точки зрения означает, что перемешивание материалов в системе керамика – титан менее вероятно, чем в системе керамика-алюминий, что и проявляется в различии толщин переходных слоев, составляющих  $\sim 2$  мкм для титана и  $\sim 10$  мкм для алюминия. В обоих случаях переходные области

заметно превышают по размеру неровности на поверхности исходной керамики, что дает основания утверждать наличие сплавления, то есть образование слоя, в котором керамика и металл перемешаны.

Значения прочности на излом для соединений керамики с алюминием и титаном заметно отли-

чаются. В то же время для обоих сочетаний прочность возрастала с увеличением мощности пучка в интервале 10 – 16 кВт/см<sup>2</sup> (рис. 3). Дальнейшее увеличение удельной мощности при сохранении скорости перемещения свариваемых деталей оказалось нецелесообразным из-за испарения, как металла, так и керамики. Рост прочностных зависимостей, приведенных на рис. 3, обусловлен, по нашему мнению, улучшением перемешивания свариваемых материалов с увеличением мощности пучка. Достигнутые при сварке с алюминием значения прочности приближаются к величинам, характерным для исходной керамики (80 – 100 МПа), в то время как для системы керамика – титан прочность на порядок ниже. Исследование образцов после испытаний на механическую прочность позволило прийти к заключению о том, что разлом, как правило, происходил по границе раздела керамика – металл.

#### **Заключение**

Приведенные результаты дают убедительные свидетельства принципиальной возможности использования форвакуумного плазменного источника электронов для непосредственной электронно-лучевой сварки металла с керамикой. При этом качество соединения зависит от выбора свариваемых материалов. Тот факт, что лучшие результаты получены для системы алюмооксидная керамика – алюминий, по-видимому, не случаен и обусловлен присутствием алюминия в керамическом материале.

*Работа поддержана РФФИ (проект № 11-08-98004-р\_сибирь\_a) и Минобрнауки (Проект № 7.3101.2011).*

#### **Литература**

1. Бачин В.А. Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами. М.: Машиностроение, 1986, 184 с.
2. Pelletier J.M., Robin M. Metal-ceramic joining by laser. Journal de Physique IV. 1993, v. 3, p. C7-1061 – 1064.
3. Ceramic Fabrication Technology (Materials Engineering, 20). Ed. by R.W. Rice. CRC Press. 2002.
4. Burdovitsin V.A., Oks E.M. Fore-vacuum plasma-cathode electron sources. Laser and particle beams, 2008, v. 26, iss. 04, p. 619 – 635.
5. Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М. О возможности электронно-лучевой обработки диэлектриков плазменным источником электронов в форвакуумной области давлений. Письма в ЖТФ, 2009, т. 35, вып. 11, с. 61 – 66.
6. Юшков Ю.Г., Бурдовицин В.А., Медовник А.В., Окс Е.М. Форвакуумный плазменный источник импульсных электронных пучков. ПТЭ, 2011, № 2, с. 85 – 88
7. Burdovitsin V.A., Oks E.M., Klimov A.S., Goreev A.K. Features of Ceramic Material Welding by Ribbon Electron Beam under Fore-vacuum Pressure. Proceedings of 10<sup>th</sup> Conference on Modification of Materials with Particle beams and Plasma Flows. Tomsk, Russia, September 2010, Изд-во ИОА СО РАН, 2010, p. 239 – 242.
8. Бурдовицин В.А., Жирков И.С., Окс Е.М., Осипов И.В., Федоров М.В. Источник электронов с плазменным катодом для генерации сфокусированного пучка в форвакуумном диапазоне давлений. ПТЭ, 2005, № 6, с. 66 – 68.
9. Медовник А.В., Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М. Электронно-лучевая обработка керамики. Физика и химия обработки материалов, 2010, № 3, с. 39 – 44.

*Статья поступила в редакцию 19.04.2011 г.*

**Гореев Антон Константинович** — Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, аспирант. Специалист в области эмиссии электронов из плазмы, формирования и применения электронных пучков. E-mail: Anton1006@mail2000.ru.

**Бурдовицин Виктор Алексеевич** — Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, доктор технических наук, профессор. Специалист в области физики и техники газового разряда, а также эмиссии электронов из плазмы и формирования электронных пучков. E-mail: burdov@fet.tusur.ru.

**Климов Александр Сергеевич** — Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кандидат технических наук, доцент. Специалист в области конструирования плазменных электронных источников и их применения в технологических операциях. E-mail: klimov@main.tusur.ru.

**Окс Ефим Михайлович** — Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой. Специалист в области физики и техники вакуумного и газового разрядов, а также эмиссии заряженных частиц из плазмы и формирования электронных и ионных пучков. E-mail: oks@fet.tusur.ru.