

**И. И. Габ, Т. В. Стецюк, Б. Д. Костюк, С. И. Мартынюк,
Ю. В. Найдич***

АДГЕЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЕ СОЕДИНЕНИЕ ОКСИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕТАЛЛАМИ

Исследована возможность получения активной пайкой в вакууме и сваркой давлением металлокерамических адгезионно-механических соединений, способных работать при повышенных температурах с одновременной нагрузкой на кручение в разных средах (вакууме, восстановительной, окислительной). Такие соединения представляют собой комбинацию механического зацепления керамической детали с металлической с одновременной пайкой металлическими адгезионными припоями либо сваркой давлением через пластичную металлическую прокладку. Разработаны разные варианты конструкций таких соединений, изготовлены и испытаны опытные образцы.

***Ключевые слова:** адгезионно-механическое соединение, металлокерамическое соединение, пайка, сварка давлением, припой.*

Введение

Неметаллические неорганические высокотемпературные материалы на основе оксидов, в частности алюмооксидной и оксидноциркониевой керамик, карбидов и нитридов [1—3], часто используются на практике в комбинации с металлическими конструкциями как путем обычного механического сочленения [4—9], так и посредством пайки [10—19]. Такие металлокерамические соединения находят широкое применение в энергетике, машиностроении (двигатели и т. п.) и других областях техники. Характерной является конструкция, в которой необходимо передать крутящий момент от керамического ротора, часто находящегося при повышенной температуре (400—600 °С) да еще и в агрессивной среде, металлическому валу. Кроме того, подобные соединения зачастую должны выдерживать большое число термоциклов, что еще больше ужесточает условия их эксплуатации вследствие значительного различия температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) используемых керамических материалов и металлов.

Для уменьшения остаточных механических напряжений, возникающих в металлокерамических соединениях из-за разницы значений ТКЛР соединяемых материалов, и повышения их прочности и долговечности заведомо подбирают по возможности близкие по ТКЛР соединяемые материалы и соответствующие припои. Большую роль также в данном случае играет сама конструкция соединения. С точки зрения общей

*И. И. Габ — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев; Т. В. Стецюк — научный сотрудник, там же; Б. Д. Костюк — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, там же; С. И. Мартынюк — главный механик, там же; Ю. В. Найдич — академик НАН Украины, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом, там же.

конструкции и принципов создания соединения могут быть классифицированы на две группы.

1. Адгезионное, которое получают пайкой или сваркой (или склеиванием). При этом соединение обеспечивается химической связью между контактирующими поверхностями. В связи с высокими требованиями к качеству соединений (высокая прочность и термостойкость) металлургические технологии, такие как пайка или сварка, являются перспективными при их изготовлении. Неметаллические огнеупорные материалы характеризуются высокой хрупкостью, низкой термостойкостью, значительным различием их ТКЛР и ТКЛР металлов, в частности химической инертностью и неспособностью смачиваться обычными припойными сплавами. Это делает невозможным использование обычных технологий соединения их с металлами посредством пайки. Для этого необходимо разрабатывать специальные припои и технологии, что определяется условиями работы деталей и технологическими требованиями к качеству изделий.
2. Механическое, которое получают механическим зацеплением обеих частей. Этого достигают благодаря специальной конструкции соединяемых частей. Например, выступ одной детали входит в паз другой, создавая сцепленную пару, что способствует сопротивлению нагрузке, действующей в направлении, в котором относительное смещение деталей невозможно.

Основная цель данной работы заключается в создании сочленения керамики с металлом путем одновременного использования механического зацепления и адгезионного соединения, а также в разработке адгезионно-механического метода сочленения.

Особенностью адгезионно-механического метода соединения является то, что прочность соединения непосредственно определяется прочностью соединяемых материалов, в частности керамики. В данной работе основное внимание уделено разработке различных конструкций адгезионно-механического металлокерамического соединения.

Методика и результаты эксперимента

В адгезионно-механических соединениях, состоящих из металлических и неметаллических материалов, адгезионное закрепление их осуществлялось с помощью адгезионно-активных, желательно пластичных, металлических припоев, способных смачивать неметаллические материалы, либо пластичных деформируемых металлических прокладок, имеющих хорошую адгезию к соединяемым деталям. В этом типе соединений основную механическую нагрузку, действующую в определенном направлении, принимают на себя непосредственно металлическая и керамическая детали, а припой преимущественно обеспечивает целостность всего соединения и его высокую термическую и коррозионную стойкость.

Металлические детали изготавливали из инвара и титановых сплавов, материалами керамических деталей являлись алюмооксидная и высокопрочная нитридокремнивая керамики. Разработаны четыре

варианта механического зацепления деталей: прямоугольный шип-паз, круглый шип-отверстие, обычные круглые торцы и сочленение фигурных полукруглых торцов (рис. 1).

В свободных керамических и металлических торцах выполнены лыски для фиксации в специальном устройстве при испытании на кручение.

Металлические втулки 2 на рис. 1 служат как для фиксации деталей при сборке под пайку, так и для дополнительного упрочнения сочленения керамической и металлической деталей в результате пайки. Сами адгезионно-механические металлокерамические соединения получали двумя технологическими способами: пайкой расплавленными металлическими припоями и сваркой давлением через деформируемую металлическую прокладку.

На рис. 2 приведена подборка деталей для сварки давлением разных конструкций металлокерамического сочленения.

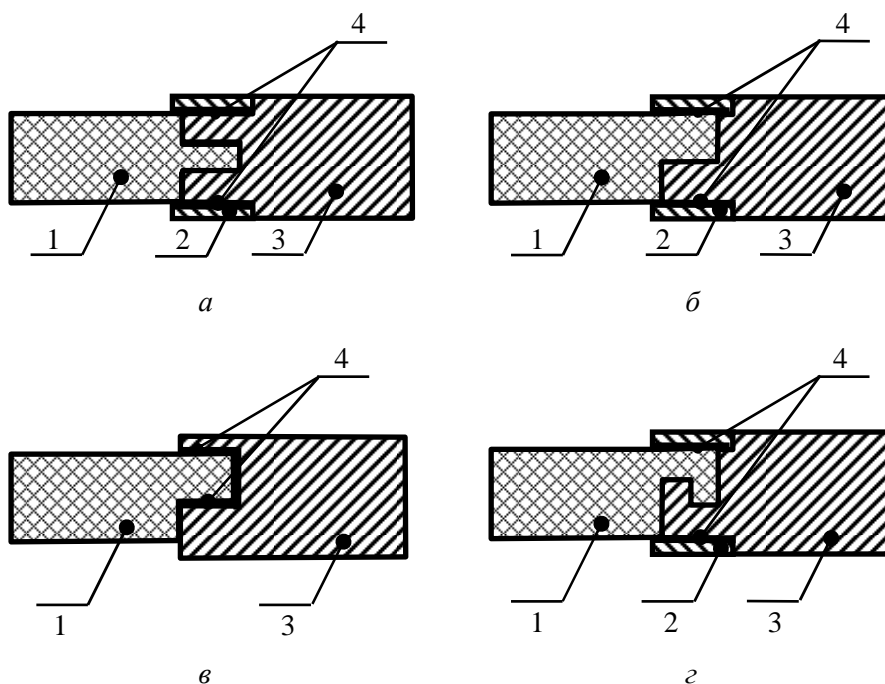


Рис. 1. Различные конструкции механического зацепления металлической и керамической деталей: *a* — прямоугольный шип-паз; *б* — сочленение обычных полукруглых торцов; *в* — круглый шип-отверстие; *г* — сочленение фигурных полукруглых торцов; 1 — керамическая деталь; 2 — металлическая втулка; 3 — металлическая деталь; 4 — припой

Fig. 1. Various designs of the mechanical engagement of the metal and ceramic parts: *a* — rectangular tongue-groove; *б* — joint of ordinary semicircular ends; *в* — round tongue-hole; *г* — joint figurate semicircular ends; 1 — ceramic part; 2 — metal sleeve; 3 — metal part; 4 — solder

Для соединения деталей пайкой использовали сплав Ag—Cu—Ti в виде проволоки (содержание титана — 6%, меди — 22% (мас.), остальное — серебро), который хорошо смачивает как металлическую, так и керамическую детали и затекает в предназначенные для него зазоры как в самом сочленении керамики с металлом, так и между упрочняющей металлической втулкой 2 и боковыми поверхностями соединяемых деталей. При сварке деталей давлением используют алюминиевую ленту, которую закладывают в увеличенный зазор между боковыми поверхностями соединяемых деталей. Деформацию алюминиевой прокладки осуществляют посредством приложения давления к упрочняющему металлическому кольцу при температурах 600—620 °С (рис. 3, б).

На рис. 3 показаны схемы сборки металлокерамических сочленений под пайку (рис. 3, а) и для сварки давлением (рис. 3, б). Для пайки медно-серебряный припой в виде проволоки диаметром до 1 мм закладывают в фаску металлической втулки, всю сборку помещают в графитовую оснастку в виде цилиндра с отверстием и проводят пайку в вакуумной печи при температуре 700 °С в течение 10 мин.



Рис. 2. Подборка деталей для сварки давлением разных конструкций металлокерамического сочленения: *а* — круглый шип-отверстие; *б, в* — сочленение фигурных полукруглых и обычных полукруглых торцов соответственно

Fig. 2. Selection of parts for pressure welding of different designs metal-ceramic joint: *a* — round tongue-hole; *б* — joint figurate semicircular ends; *в* — joint of ordinary semicircular ends

Для сварки давлением деформируемую алюминиевую прокладку в виде ленты толщиной 0,5—1 мм помещают в зазор между металлической втулкой и боковой поверхностью соединяемых торцов, после чего сборку в графитовой оснастке загружают в специальную вакуумную установку. В последней проводят нагрев до 600—620 °С, после чего к поджимному кольцу прикладывают давление 8—10 МПа и выдерживают при этом давлении 10 мин. В результате приложенного давления алюминиевая прокладка сильно деформируется, происходит контакт образующихся при этом ювенильных поверхностей ее с поверхностями соединяемых торцов и образуется прочное сварное соединение деталей. Вид паяных и сварных соединений представлен на рис. 4.

Испытания полученных адгезионно-механических соединений на кручение показали, что во всех конструкциях сочленений разрушение происходило не в месте соединения, а по керамической детали, причем разрушенные части керамики имели коническую форму (рис. 5). Прочность металлоалюмооксидных соединений при кручении при комнатной температуре достигала 130 МПа, а в случае соединений с металлами гораздо более прочной нитрокремниевой керамики прочность составляла 340—360 МПа. Следует отметить, что прочность при изгибе исходной алюмооксидной керамики составляла 260—280 МПа,

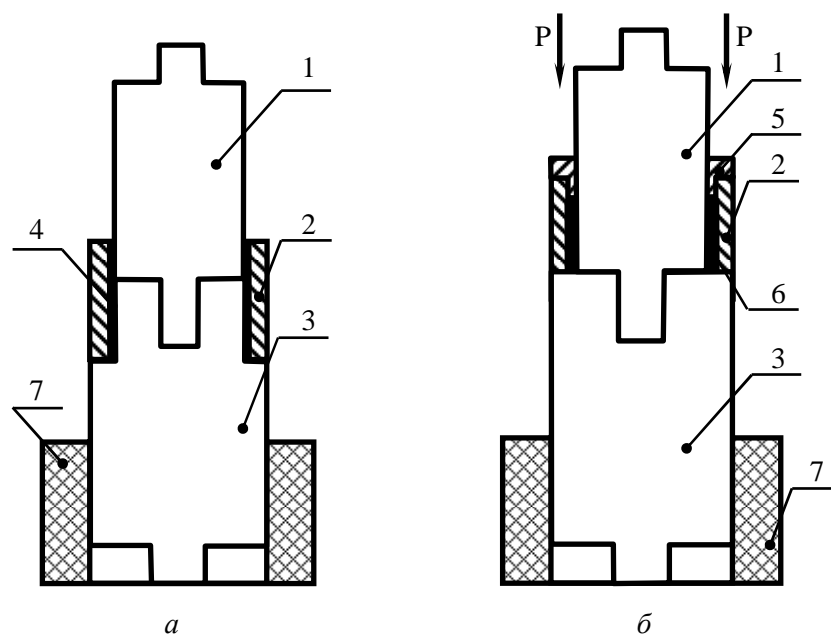


Рис. 3. Схемы сборки металлокерамического сочленения типа “шип-паз” под пайку (а) и для сварки давлением (б): 1 — керамическая деталь; 2 — металлическая втулка; 3 — металлическая деталь; 4 — припой; 5 — прижимное кольцо; 6 — алюминиевая прокладка; 7 — графитовая оснастка

Fig. 3. Schemes assembly of ceramic-metal joint of the “tongue-groove” type for brazing (a) and for pressure welding (b): 1 — ceramic part; 2 — metal sleeve; 3 — metal part; 4 — solder; 5 — presser ring; 6 — aluminum gasket; 7 — graphite rig



Рис. 4. Паяное и сваренные давлением адгезионно-механические соединения керамики с металлом

Fig. 4. Brazed and pressure welded adhesion-mechanical ceramic to metal joints

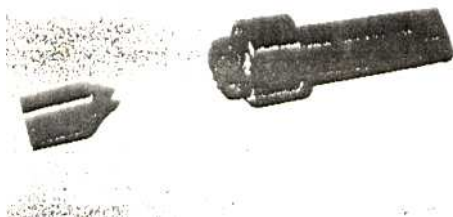


Рис. 5. Вид разрушения паяного металлокерамического образца при кручении

Fig. 5. Destruction of brazed metal-ceramics sample under torsion

а нитридокремниевой — 760—800 МПа, то есть крутящие нагрузки для керамики являются более жесткими по сравнению с изгибающими, поскольку прочность испытанных керамик при кручении почти в два раза меньше, чем при изгибе.

Паяные соединения нитридокремниевой керамики с жаропрочной сталью типа "шип-паз" испытывали на термоциклирование. Диаметр керамической детали — 12 мм, ширина шипа — 8 мм, припой — сплав Cu—Sn—Ti. Такие соединения выдержали без разрушения сто термоциклов по режиму 20—600—20 °С при крутящей нагрузке 115 МПа.

Выводы

Разработаны четыре варианта конструкций адгезионно-механического металлокерамического соединения, в котором основная нагрузка приходится на механическое зацепление торцов керамической и металлической деталей, а дополнительное упрочнение соединения обеспечивается пайкой медно-серебряно-титановым припоем либо сваркой давлением через алюминиевую прокладку.

При испытаниях на кручение разрушение у всех вариантов металлокерамического соединения происходило по керамике. Самыми простыми вариантами конструкций соединений являются "шип-паз" и сочленение полукруглых торцов, а более сложное соединение фигурных полукруглых торцов пригодно в тех случаях, когда имеются осевые нагрузки. Паяные адгезионно-механические соединения типа "шип-паз" нитридокремниевой керамики с жаропрочной сталью испытаны в жестких условиях большого количества термоциклов при температуре 650 °С с одновременным крутящим усилием 115 МПа и показали хорошие результаты. Таким образом, разработанные адгезионно-механические

соединения керамики с металлами могут найти практическое применение в различных технических специфических устройствах.

РЕЗЮМЕ. Досліджено можливість отримання активною пайкою в вакуумі та зварюванням тиском металокерамічних адгезійно-механічних з'єднань, здатних працювати при підвищених температурах з одночасним навантаженням на крутіння в різних середовищах (вакуумі, відновлюючому, окиснювальному). Такі з'єднання є комбінацією механічного зачеплення керамічної деталі з металевою з одночасним паянням металевими адгезійними припоями або зварюванням тиском через пластичну металеву прокладку. Розроблено різні варіанти конструкцій таких з'єднань, виготовлено і випробувано дослідні зразки.

Ключові слова: адгезійно-механічне з'єднання, метало-керамічне з'єднання, паяння, зварювання тиском, припій.

1. *Mandal H.* Comparison of the effectiveness of rare-earth sintering additives on the high-temperature stability of α -sialon ceramics / H. Mandal, N. Camuscu, D. P. Thompson // *J. Mater. Sci.* — 1995. — **30**, No. 23. — P. 5901—5909.
2. *Балкевич В. Л.* Техническая керамика. — М. : Стройиздат, 1984. — 256 с.
3. *Эшби М.* Конструкционные материалы (пер. с англ.). Полный курс / М. Эшби, Д. Джонс. — М. : Издательский дом "Интеллект", 2010. — 672 с.
4. *Suganuma K.* Recent advances in joining technology of ceramics to metal // *ISYj Internat.* — 1990. — **30**, No. 12. — P. 1046—1058.
5. *Резник С. В.* Проектирование замкового соединения керамической лопатки и металлического диска газовой турбины / С. В. Резник, Д. В. Сапронов // *Изв. вузов. Машиностроение.* — 2014. — № 9. — С. 20—38.
6. *Букатый С. А.* Оптимизация турбинных замковых соединений лопатка—диск типа “елка” / С. А. Букатый, И. Б. Андреев // *Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та.* — 2009. — № 3. — С. 18—23.
7. *Панова И. М.* Особенности конструирования изделий из керамических материалов // *Изв. вузов. Машиностроение.* — 2013. — № 4. — С. 45—50.
8. *Ножицкий Ю. А.* Конструктивно-технологические решения, обеспечивающие повышение прочностной надежности и ресурса дисков авиационных ГТД / Ю. А. Ножицкий, К. Д. Каримбаев, С. Д. Потапов // *Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та.* — 2011. — № 3—4. — С. 298—304.
9. *Davidge R. W.* Mechanical behavior of ceramics — Cambridge : Cambridge University Press, 1980. — 248 p.
10. *Батыгин В. Н.* Вакуумноплотная керамика и ее спаи с металлами / В. Н. Батыгин, И. И. Метелкин, А. М. Решетников. — М. : Энергия, 1982. — 197 с.

11. *Метелкин И. И.* Сварка керамики с металлами / И. И. Метелкин, М. А. Павлов, Н. В. Поздеева. — М. : Metallurgia, 1977. — 160 с.
12. *Каллистер У. Д.* Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамика, полимеры) (пер. с англ.) / У. Д. Каллистер, Д. Дж. Ретвич. — С.- Пб. : Научные основы и технологии, 2011. — 896 с.
13. *Михайлов П. Г.* Неразъемные соединения в измерительных модулях полупроводниковых датчиков силовых параметров / П. Г. Михайлов, М. А. Черенцов, А. Ф. Зубков // Труды Международ. симпозиума "Надежность и качество". — 2011. — Т. 2. — С. 93—105.
14. *Минаев А. М.* Диффузионная сварка металлов к ситаллу / [А. М. Минаев, Л. Н. Тялина, В. А. Пручкин, Д. М. Мордасов] // Вопросы современной науки и практики. — 2012. — № 3. — С. 342—344.
15. *Коганицкая Е. В.* Спаи керамики с активными металлами // Электроника. — 1959. — № 4. — С. 86—93.
16. *Рубашев М. А.* Термостойкие диэлектрики и их спаи с металлом в новой технике / [М. А. Рубашев, Г. И. Бердов, В. Н. Гаврилов и др.]. — М. : Атомиздат, 1980. — 246 с.
17. *Найдич Ю. В.* Исследование процессов соединения (пайки) керамических материалов с использованием нанопленок металлов / [Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Б. Д. Костюк и др.] // Доп. НАН України. — 2007. — № 35. — С. 97—104.
18. http://www.glynwed.ru/u/ceramics/soedinenie_oxidnoj_keramiki.pdf
19. <http://www.friatec.com/content/friatec/ru/Ceramics/FRIALIT-DEGUSSIT-Oxide-Ceramics/Downloads/downloads/Frialit-Degussit-Ceramic-to-metal-components-ru.pdf>

Поступила 06.09.15

Gab I. I., Stetsyuk T. V., Kostyuk B. D., Martynyuk S. I., Naidich Yu. V.

Oxide materials with the metal adhesive-mechanical joint

The possibility of obtaining by active brazing in a vacuum and pressure welding the metal-ceramic adhesive-mechanical joints capable of operating at elevated temperatures with concurrent torsion loading in different environments (vacuum, reducing, oxidizing) is investigated. Such compounds are a combination of mechanical interlocking of ceramic with metal parts with simultaneous brazing by metallic adhesion solder or by welding pressure using the metallic plastic gasket. Designs of different variants of such compounds are developed and prototypes of such compounds manufactured and tested.

Keywords: *adhesive-mechanical joint, metal-ceramic joint, brazing, pressure welding, solder.*