

УДК 621.791

*Е.И. Краснов<sup>1</sup>, Е.И. Курбаткина<sup>1</sup>, А.А. Шавнев<sup>1</sup>, В.М. Серпова<sup>1</sup>, А.Н. Жабин<sup>1</sup>***ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКТИВНОЙ ПАЙКИ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С КЕРАМИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-63-72

*Представлен обзор по применению метода активной пайки для соединения волокнистых композиционных материалов на основе титанового сплава с керамикой на основе оксида алюминия и диоксида циркония. Описаны основные проблемы, возникающие при соединении металлов и керамики, приведены примеры решения проблем соединения, представлена взаимосвязь микроструктуры зоны соединения с механическими свойствами и показано влияние добавок Ti, W и B на микроструктуру и механические характеристики. Сделаны выводы о возможности получения качественных и прочных соединений и факторов, влияющих на них.*

**Ключевые слова:** волокнистый композиционный материал на основе титановых сплавов, керамика из оксида алюминия  $Al_2O_3$  и диоксида циркония  $ZrO_2$ , пайка, титановый сплав, зона соединения, реакционный слой.

*E.I. Krasnov<sup>1</sup>, E.I. Kurbatkina<sup>1</sup>, A.A. Shavnev<sup>1</sup>, V.M. Serpova<sup>1</sup>, A.N. Zhabin<sup>1</sup>***APPLICATION OF THE ACTIVE BRAZING METHOD FOR CONNECTING FIBER MATERIALS WITH CERAMIC MATERIALS (review)**

*Presents a review of the application of the active brazing method for joining fibrous composite materials based on titanium alloy with ceramics based on aluminum oxide and zirconium dioxide. The basic problem arising from the combination of metals and ceramics, examples of solving problems compounds represented by the relationship of the microstructure of the connection zone with mechanical properties and shows the effect of additives Ti, B and W on microstructure and mechanical properties. Conclusions are made about the possibility of obtaining high-quality and durable compounds and factors affecting them.*

**Keywords:** fiber composite material based on titanium alloys, aluminum oxide ceramics  $Al_2O_3$ , zirconium dioxide ceramics  $ZrO_2$ , brazing, titanium alloy, connecting zone, reaction layer.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Важнейшей стратегической задачей российской промышленности является разработка и производство перспективных высокоскоростных летательных аппаратов, для создания которых требуется использование новых термостойких композиционных материалов (КМ) и решение задачи соединения деталей из них. Темпы развития в Российской Федерации КМ, уступают зарубежным показателям в основном из-за низкого уровня внедрения разрабатываемых материалов, что связано в основном с отсутствием ряда технологий, а именно: проектирования узлов и элементов из металлокерамических,

керамических композиционных и функциональных теплозащитных материалов, расчета узлов и элементов из них, а также их соединения с классическими металлическими и неметаллическими материалами.

Титановые сплавы благодаря своим свойствам, таким как низкая плотность, высокая температурная и коррозионная стойкость, хорошо подходят для использования в аэрокосмической и автомобильной промышленности [1–3]. Однако их применение ограничено при температурах эксплуатации, не превышающих 550 °С, из-за неудовлетворительной высокотемпературной стойкости к окислению и ползучести [3]. Использование материалов, например, в узлах воздухозаборного устройства, камерах сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя и твердотопливного реактивного двигателя для перспективных летательных аппаратов требует более высоких температур эксплуатации для сохранения жесткости конструкции и аэродинамических характеристик в процессе полета. Перспективными в этом направлении являются металлические композиционные материалы, армированные неорганическими волокнами [4–7] системы Ti–SiC, характеризующиеся высокими прочностью и сопротивлением усталостному разрушению, а также жаропрочностью [8, 9]. Использование соединений из волокнистых КМ на основе титановых сплавов позволяет создавать легкие и жесткие конструкции благодаря сочетанию высокой прочности, жесткости и низкой плотности.

Возможность сочетания свойств волокнистых КМ с другими материалами, такими как суперсплавы на основе никеля, сталь или керамика, позволит разработчикам проектировать соединения со сложной геометрической формой и с комбинацией свойств этих материалов. Керамические материалы на основе оксида алюминия и диоксида циркония хорошо зарекомендовали себя в электронике, аэрокосмической, атомной и автомобильной промышленности [10, 11]. Керамика обладает высокой износостойкостью, термостойкостью и термохимической стабильностью [12, 13]. Однако ей присуща хрупкость, дороговизна и высокая твердость, что ограничивает производство крупных и сложных по форме деталей. Успешное применение керамических материалов зависит от их соединения с металлами. Однако такие материалы, как правило, менее пригодны для обработки и получения неразъемных соединений по сравнению с обычными сталями и в большинстве случаев их сварка обычными методами плавления затруднена или невозможна.

Соединение волокнистого КМ производится через матрицу, которая по прочности существенно уступает прочности волокон. В месте соединения волокна претерпевают разрывы, и для обеспечения прочности соединения необходимо использовать большие площади перекрытия зоны соединения матрицы. Соединение волокнистых КМ сводится к обеспечению равнопрочности соединения с основным материалом матрицы.

К одному из способов получения неразъемного соединения металла и керамики относится метод активной пайки, который привлекателен своей простотой, экономичностью и возможностью изготовления качественных разнородных соединений. Возможность получения качественных соединений КМ на основе титановых сплавов с керамическими материалами позволит разрабатывать конструкции не только со сложной геометрической формой, но и с комбинацией свойств, значения которых превышают значения свойств этих материалов при их индивидуальном использовании. В данной статье приводится краткий обзор современных достижений в области соединения титановых сплавов (TiAl и Ti6Al4V) с керамикой на основе оксида алюминия  $Al_2O_3$  и диоксида циркония  $ZrO_2$  в качестве перспективных соединений для использования их в авиационно-космической промышленности. Рассмотрены методы соединения, ограниченные температурой процесса не более 1000 °С, при взаимодействии на границе раздела «волокно–матрица» в волокнистом КМ [14] для предотвращения деградирования физико-механических свойств волокнистых КМ.

### Проблемы соединения металлов с керамикой

Соединения металлов с керамикой могут быть востребованы в узлах конструкций высокоскоростных летательных аппаратов, способных работать в экстремальных условиях, таких как высокие температура и напряжения и агрессивная среда. Но для соединений металла с керамикой возникает несколько проблем, которые препятствуют получению хорошей механической прочности таких соединений. Керамика из-за присущей ей хрупкости – наиболее важный материал для получения надежного соединения [15].

Развитие остаточных напряжений на границе раздела является основной проблемой в соединении металла и керамики. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) керамики обычно значительно меньше, чем у металлов, что вызывает формирование остаточных напряжений по границе соединения при охлаждении. Хотя несоответствие значений ТКЛР является основным фактором, который необходимо учитывать, существуют и другие факторы, связанные с различием межатомных связей, определяющих кристаллическую структуру, физическими и химическими свойствами материалов, состоянием поверхностей соединения этих материалов [16].

Различия в физических и химических свойствах вызывают большие трудности для обеспечения эффективного процесса соединения. Из-за высокой химической стабильности керамики реакция между различными материалами затруднена. Титановые сплавы имеют значительное преимущество перед другими металлами для использования в качестве основного материала в соединениях «металл–керамика», так как титан является активным элементом, который способствует реакции между основными материалами.

Поверхности соединяемых материалов имеют важное значение для механической прочности разнородных соединений. Механизм образования связи на границе раздела определяет структуру поверхности, которая существенно зависит от условий обработки, а также от типа материалов. Движущей силой формирования этих границ раздела является уменьшение свободной энергии ( $\Delta G$ ), которое происходит, когда между поверхностями основных материалов устанавливается тесный контакт [17]. Дефекты на поверхности могут действовать как концентраторы растягивающих напряжений, что может привести к растрескиванию.

Технологические параметры соединения, такие как температура, давление, продолжительность выдержки и использование промежуточных слоев, влияют на поверхность и химические реакции, которые будут обеспечивать связь. Химические реакции на границе раздела приводят к образованию межфазных реакционных фаз со свойствами, которые отличаются от обоих основных материалов, такие как хрупкие интерметаллиды и твердые растворы, которые вызывают снижение прочности соединений. Повышение температуры технологического процесса и продолжительности выдержки может усиливать химические реакции и приводить к образованию толстого реакционного слоя, который будет увеличивать образование остаточных напряжений, снижающих прочность соединения.

### Процесс пайки разнородных материалов

Основной проблемой пайки оксидной керамики и циркония является устойчивость к смачиванию из-за присутствия оксидов на поверхности керамики. Возможным решением может быть увеличение давления во время процесса, которое разрушит оксидные слои и обеспечит лучшую смачиваемость. В то же время высокое давление может также способствовать формированию более высокого уровня остаточных напряжений. Одним из способов преодоления этой проблемы является использование паяльных

сплавов с активными элементами для улучшения сцепления с керамикой или с возможностью снижения остаточных напряжений либо уменьшения образования интерметаллидов и твердых растворов. Проблема с образованием интерметаллических соединений заключается в снижении механических свойств, в то время как образование твердых растворов, таких как серебро, приведет к снижению температуры эксплуатации соединения по сравнению с эксплуатационными температурами соединяемых материалов. Кроме того, очень важно обеспечить правильный выбор технологических параметров процесса пайки, чтобы выбрать оптимальный припой для предотвращения образования высоких остаточных напряжений при охлаждении и улучшения смачиваемости керамической поверхности. В работах [18–23] показана возможность получения качественных соединений титановых сплавов с керамикой.

В работе [18] исследованы микроструктура и механические свойства поверхности соединения жаропрочного титанового сплава TiAl с керамикой  $Al_2O_3$  при помощи композиционного припоя Ag–Cu–Ti и добавками W. Эксперименты по пайке проводили при температурах от 860 до 920 °C и с продолжительностью выдержки от 1 до 30 мин в вакууме. Максимальное значение прочности при сдвиге составило 148 МПа при температуре пайки 880 °C в течение 10 мин с использованием композиционного припоя (Ag–Cu–Ti)+20% (по массе) W. Граница раздела состоит из твердого раствора серебра (Ag), частиц TiCu, AlCu<sub>2</sub>Ti, W и фазы Ti<sub>3</sub>(Cu, Al)<sub>3</sub>O. Повышение температуры пайки приводило к увеличению толщины реакционных слоев, состоящих из фазы Ti<sub>3</sub>(Cu, Al)<sub>3</sub>O и частиц AlCu<sub>2</sub>Ti, что в свою очередь приводило к снижению значения прочности при сдвиге. Отмечено также, что частицы W, добавленные в припой, уменьшают разницу в значениях ТКЛР между керамикой  $Al_2O_3$  и паяным швом, таким образом снимая остаточные напряжения, создаваемые в керамической подложке, и улучшая прочность соединения. На рис. 1 показано влияние содержания W на микроструктуру зоны соединения  $Al_2O_3$ +TiAl, спаянного при температуре 880 °C в течение 10 мин с композиционным припоем (Ag–Cu–Ti)+W. Увеличение количества частиц W приводило к дефектам, таким как микротрещины и микропоры в соединении, что снижало прочность при сдвиге.

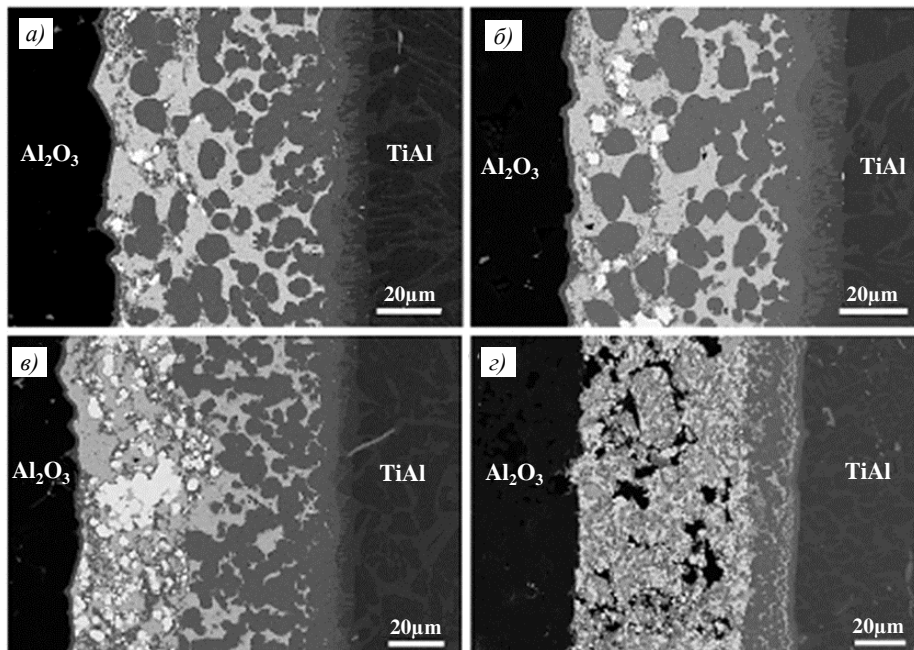


Рис. 1. Влияние на микроструктуру зоны соединения  $Al_2O_3$ /(Ag–Cu–Ti)+W/TiAl, спаянного при 880 °C в течение 10 мин, при содержании W, % (по массе): 5 (а), 10 (б), 30 (в), 40 (г) [18]

Для пайки жаропрочного титанового сплава TiAl и керамики Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> также используют припои Ag–27,5Cu–2,5Ti и Ag–28Cu с различным содержанием TiH<sub>2</sub>. Процесс пайки проводят при температурах от 840 до 940 °С с продолжительностью выдержки от 0 до 30 мин в вакуумной печи. Границы раздела соединения, выполненного при температуре 880 °С в течение 10 мин, состоят из следующих реакционных слоев: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti<sub>3</sub>(Cu, Al)<sub>3</sub>O/твердый раствор Ag+AlCu<sub>2</sub>Ti+Ti(Cu, Al)+твердый раствор Cu/AlCu<sub>2</sub>Ti+AlCuTi/TiAl. Увеличение температуры пайки или продолжительности выдержки способствует образованию более крупной микроstructures реакционного слоя Ti<sub>3</sub>(Cu, Al)<sub>3</sub>O из-за растворения TiAl, что отрицательно сказывается на механических свойствах. Максимальная прочность при сдвиге составила 94 МПа для соединения, выполненного при температуре 880 °С в течение 10 мин при использовании припоя Ag–28Cu. В работе [18] толщина реакционного слоя, состоящего из соединений AlCu<sub>2</sub>Ti и Ti<sub>3</sub>(Cu, Al)<sub>3</sub>O, сильно зависит от содержания Ti в припое. Увеличение количества Ti приводит к увеличению толщины реакционного слоя, что положительным образом влияет на механическую прочность соединений. Максимальная прочность при сдвиге составила 102 МПа для соединений, спаянных с использованием припоя Ag–Cu–2% (по массе) TiH<sub>2</sub> при температуре 880 °С в течение 10 мин. На рис. 2 представлена микроstructure зоны соединения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiAl с различным содержанием Ti [19].

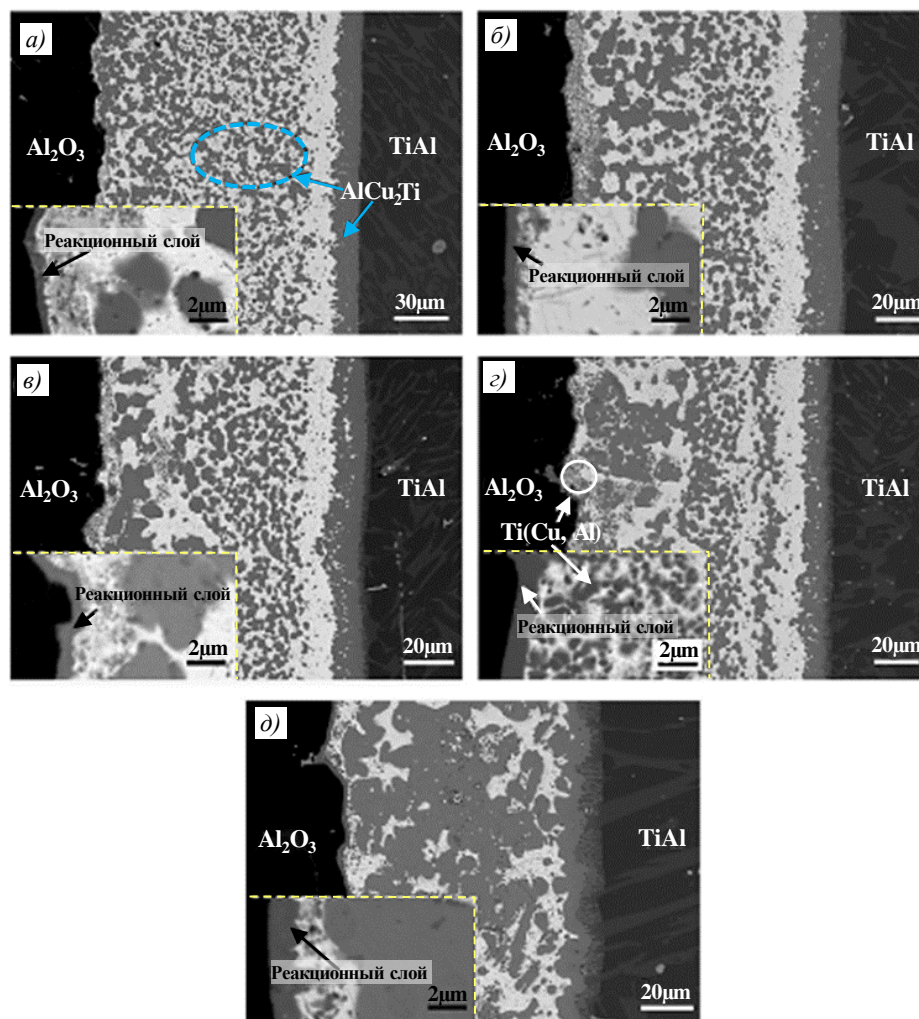


Рис. 2. Микроstructure зоны соединения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiAl (а – без Ti), припаянного при 880 °С в течение 10 мин, с содержанием Ti, % (по массе): 2 (б), 4 (в), 6 (г) и 8 (д) [19]

В работе [20] исследован процесс пайки титанового сплава Ti6Al4V с керамикой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с использованием припоев Ag–Cu и (Ag–Cu)+В. Эксперименты по пайке проводили при температурах от 840 до 920 °С в течение 10 мин в вакуумной печи. Бездефектная граница раздела формировалась при 880 °С в течение 10 мин с использованием припоя Ag–Cu с добавлением и без добавления В. Границы раздела состоят из следующих реакционных слоев Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti<sub>3</sub>Cu<sub>3</sub>O/твердый раствор Ag/TiCu<sub>4</sub>/TiCu<sub>2</sub>Al/TiCu/Ti<sub>2</sub>Cu/(α–β)Ti/Ti6Al4V. Присутствие В в композиционном припое оказывает влияние на формирование мелкодисперсной структуры и на прочность зоны соединения. Добавление В способствует уменьшению толщины соединений Ti–Cu, составляющих реакционный слой. Это влияние на микроструктуру поверхности раздела привело к улучшению механических свойств соединений – значение прочности при сдвиге увеличилось с 82 (зона соединения, полученная с использованием припоя Ag–Cu) до 111 МПа (зона соединения, полученная с использованием припоя (Ag–Cu)+В). Такое улучшение объясняется тем, что микроструктура изменяется и происходит уменьшение остаточных напряжений, вызванных формированием нитевидных кристаллов TiВ при процессе *in situ* за счет добавления В (рис. 3).

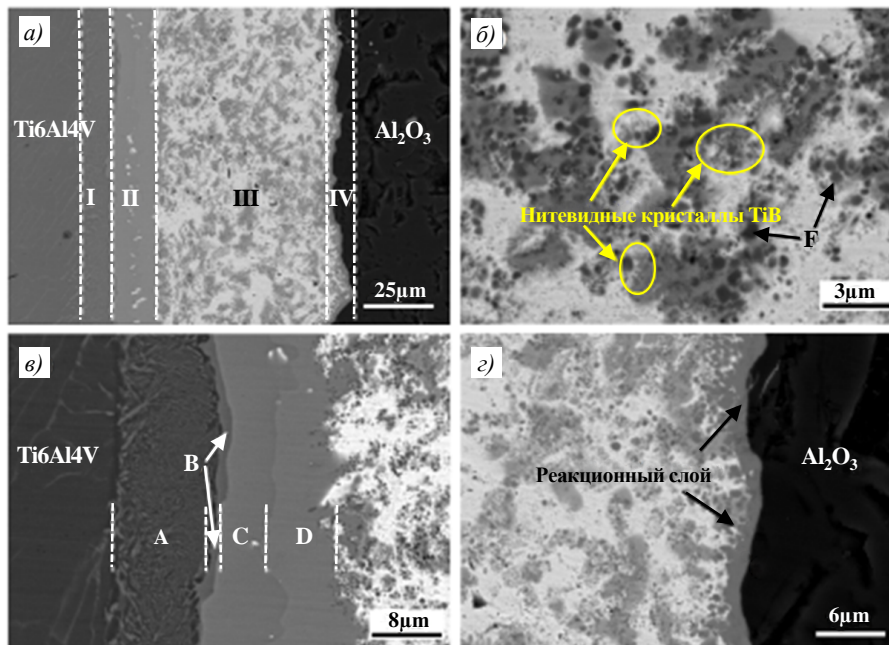


Рис. 3. Микроструктура зоны соединения Ti6Al4V/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (а), спаянного с композитным наполнителем (Ag–Cu)+0,5% (по массе) В, при 880 °С в течение 10 мин увеличением паяного шва (б) и границ раздела: Ti6Al4V+наполнитель (в) и наполнитель+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (г) [20]

Проводились также исследования [21] изменения микроструктуры и механических свойств паяных соединений титанового сплава TiAl и керамики ZrO<sub>2</sub> с использованием припоя Ag–Cu. Эксперименты по пайке осуществляли при температурах от 860 до 940 °С в течение 5–30 мин в вакууме. Типичная межфазная структура соединения TiAl/ZrO<sub>2</sub> состоит из следующих слоев: сплав TiAl/γ-TiAl/AlCuTi/AlCu<sub>2</sub>Ti/твердый раствор Ag+AlCu<sub>2</sub>Ti+AlCu<sub>4</sub>/Cu<sub>3</sub>Ti<sub>3</sub>O+TiO/ZrO. Отмечено, что температура пайки оказывает существенное влияние на изменение микроструктуры и прочность соединения при сдвиге. С увеличением температуры пайки толщина реакционной зоны, прилегающей к сплаву TiAl и реакционным слоям рядом с керамикой ZrO<sub>2</sub>, увеличивается и происходит агрегированное распределение фазы AlCu<sub>2</sub>Ti (рис. 4). Эти микроструктурные

изменения приводят к резкому ухудшению механических свойств соединения. Наибольшая прочность при сдвиге 48,4 МПа достигнута в соединении при пайке по режиму 880 °С в течение 10 мин.

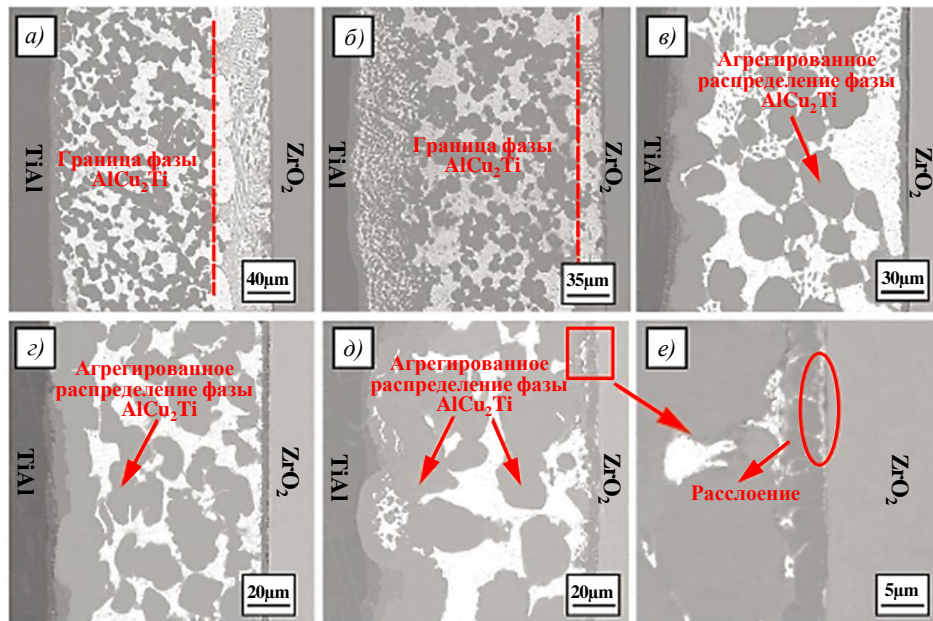


Рис. 4. Микроструктуры соединений  $ZrO_2/TiAl$ , припаянных при температурах 860 (а), 880 (б), 900 (в), 920 (г) и 940 °С (д) в течение 10 мин, и реакционного слоя, прилегающего к поверхности  $ZrO_2$  (е) [21]

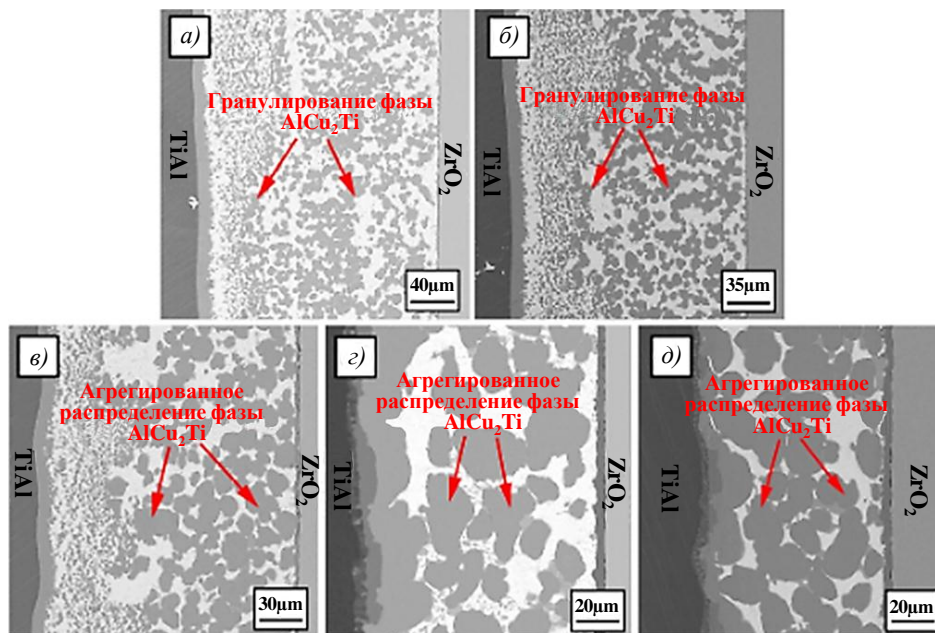


Рис. 5. Микроструктура соединения  $ZrO_2/AgCu/TiAl$ , полученного при температуре 880 °С при продолжительности выдержки 5 (а), 10 (б), 15 (в), 20 (г) и 25 мин (д) [22]

В работе [22] исследовали влияние продолжительности выдержки на соединение  $TiAl/ZrO_2$  с использованием припоя  $Ag-Cu$ . При этом температура пайки в вакууме составляла 880 °С, а продолжительность выдержки варьировалась с 5 до 25 мин. Установлено, что зона соединения состоит из различных реакционных слоев:

TiAl/AlCu<sub>2</sub>Ti/твердый раствор Ag+гранулированный AlCu<sub>2</sub>Ti/Cu<sub>3</sub>Ti<sub>3</sub>O+TiO/ZrO<sub>2</sub>. Микроструктура границы раздела соединений существенно зависит от продолжительности выдержки. Ее увеличение приводит к увеличению толщины реакционных слоев, которые обеспечивают связь между обоими соединяемыми материалами: AlCu<sub>2</sub>Ti и Cu<sub>3</sub>Ti<sub>3</sub>O+TiO, как показано на рис. 5. Толщина этих слоев должна быть достаточной для обеспечения прочной межфазной связи. Однако, если эта толщина превышает определенное значение, это может способствовать слабому сцеплению. В течение 5 и 10 мин процесса пайки частицы AlCu<sub>2</sub>Ti мелкодисперсны и однородно распределены, в течение более длительного времени наблюдается агломерация и рост этих частиц. Максимальная прочность при сдвиге составила 48,4 МПа при пайке при температуре 880 °С в течение 10 мин. Прочность при сдвиге снижается в течение более длительного времени, так как эти частицы могут быть источником микротрещин, приводящих к ухудшению механических свойств.

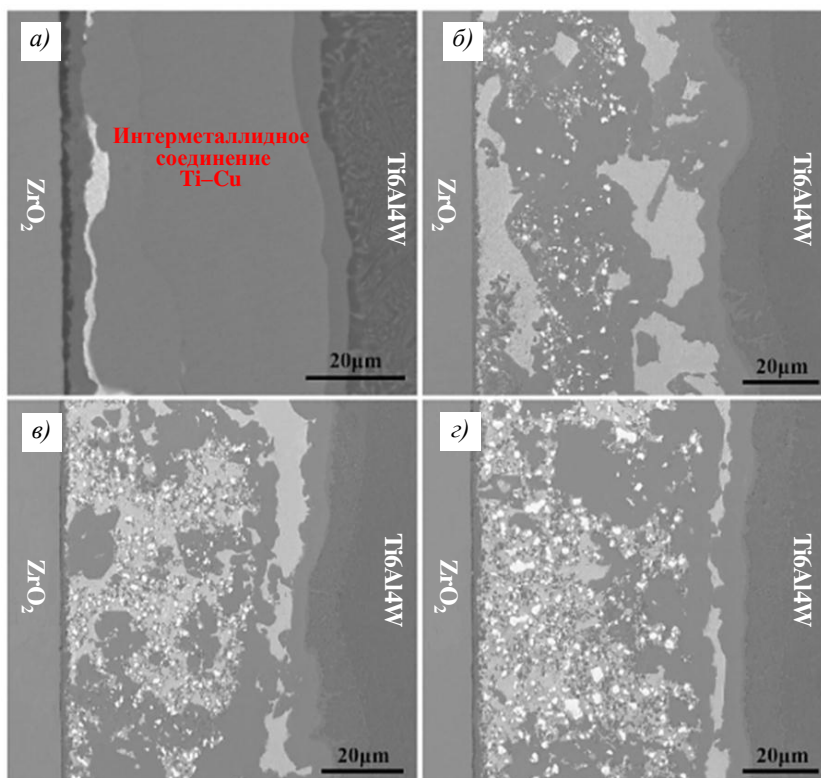


Рис. 6. Микроструктура зоны соединения, полученного при 870 °С в течение 10 мин, без WB (а) и с содержанием WB, % (по массе): 5 (б), 7,5 (в) и 10 (г) [23]

Исследования микроструктуры и механических свойств соединения Ti6Al4V/ZrO<sub>2</sub> с использованием присадочного сплава Ag–28% (по массе) Cu и добавками WB в диапазоне от 5 до 10% (по массе) показали, что добавление WB к присадочному металлу системы Ag–Cu способствует измельчению микроструктуры границы раздела и благоприятно сказывается на механических свойствах. С повышением температуры пайки (с 830 до 890 °С в течение 10 мин) происходит рост содержания количества нитевидных кристаллов TiB и частиц W на границе раздела (рис. 6), что способствовало снятию остаточных напряжений. Отмечается, что соединения, полученные при 870 °С в течение 10 мин, с содержанием 7,5% (по массе) WB обладали максимальной прочностью при сдвиге 83,2 МПа, что на 59,4% больше, чем без добавления WB [23].

### Заключения

Возможность сочетания свойств волокнистых КМ на основе титановых сплавов со свойствами других материалов, таких как керамика, путем разнородного соединения позволит разрабатывать детали не только со сложной геометрической формой, но и с комбинацией свойств, значения которых превышают значения свойств этих материалов при их индивидуальном использовании. Однако разнородное соединение металла и керамики вызывает ряд проблем, которые приводят к сложностям получения бездефектной микроструктуры и высокой механической прочности соединений.

Образование остаточных напряжений на границе раздела имеет решающее значение в этих разнородных соединениях из-за несоответствия значений ТКЛР соединяемых разнородных материалов, но другие факторы, такие как технологические параметры соединения (температура, давление и продолжительность выдержки) и качество поверхности, также оказывают значительное влияние на надежность соединения.

Использование припоев на основе Ag и Ti позволяет получать качественные соединения титановых сплавов с керамикой с приемлемой механической прочностью. Однако образующиеся фазы, толщина реакционных слоев и возникновение остаточных напряжений не позволяют получить соединения с высокими механическими свойствами. Добавление таких элементов, как В, Ti и W, к припоям приводит к повышению механических свойств соединения, так как способствует образованию более тонких микроструктур и уменьшению накапливания остаточных напряжений, образующихся при охлаждении.

### Библиографический список

1. Dai J., Zhu J., Chen C., Weng F. High temperature oxidation behavior and research status of modifications on improving high temperature oxidation resistance of titanium alloys and titanium aluminides: A review // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 685. P. 784–798. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.06.212.
2. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
3. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2020. №1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
6. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. №5. С. 8–18.
7. Nayat M.D., Singh H., He Z., Cao P. Titanium metal matrix composites: An overview // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. Vol. 121. P. 418–438. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.04.005.
8. Smith P.R., Graves J.A., Rhodes C. Comparison of orthorhombic and alpha-two titanium aluminides as matrices for continuous SiC-reinforced composites // *Metallurgical Materials Transaction A*. 1994. Vol. 25A. P. 1267–1283. DOI: 10.1007/BF02652301.
9. Aldinger F., Weberruss V.A. *Advanced Ceramics and Future Materials: An Introduction to Structures, Properties, Technologies, Methods*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2010. P. 170–260.

10. Richerson D.W., Lee W.E. Composites Manufacturing // *Modern Ceramic Engineering: Properties, processing, and Use in Design, Composites Manufacturing*. 2018. Vol. 5. Is. 1. P. 58–59. DOI: 10.1016/0956-7143(94)90021-3.
11. Micari F., Buffa G., Pellegrino S., Fratini L. Friction Stir Welding as an Effective Alternative Technique for Light Structural Alloys Mixed Joints // *Proceedings of 11th International Conference on Technology of Plasticity*. 2014. Vol. 81. P. 74–83. DOI:10.1016/j.proeng.2014.09.130.
12. Darsell J.T., Weil K.S. High temperature strength of YSZ joints brazed with palladium silver copper oxide filler metals // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36. Is. 7. P. 4519–4524.
13. Si X.Q., Cao J., Song X.G., Qu Y., Feng J.C. Reactive air brazing of YSZ ceramic with novel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles reinforced Ag–Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite filler: micro-structure and joint properties // *Materials and Design*. 2017. Vol. 114. P. 176–184.
14. Wakelkamp W., van Loo F., Metselaar R. Phase relation in the Ti–Si–C system // *Journal of the European Ceramic Society*. 1991. Vol. 8. P. 135–139.
15. Mizuhara H., Huebel E., Oyama T. High-reliability joining of ceramic to metal // *American Ceramic Society Bulletin*. 1989. Vol. 68. Is. 9. P. 1591–1599.
16. Uday M.B., Ahmad-Fauzi M.N., Noor A.M., Rajoo S. Current Issues and Problems in the Joining of Ceramic Metal // *Materials Science*. 2016. P. 169–175. DOI: 10.5772/64524.
17. Nakahashi M. Joining of ceramics to metals (1): Interfacial reactions between ceramics and metals // *Welding International*. 1996. Vol. 10. Is. 10. P. 765–770.
18. Yang Z., Lin J., Wang Y., Wang D. Characterization of microstructure and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiAl joints vacuum-brazed with Ag–Cu–Ti+W composite filler // *Vacuum*. 2017. Vol. 143. P. 294–302.
19. Niu G.B., Wang D.P., Yang Z.W., Wang Y. Microstructure and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic and TiAl alloy joints brazed with Ag–Cu–Ti filler metal // *Materials Science Ceramics International*. 2016. Vol. 42. P. 6924–6934.
20. Qiu Q., Wang Y., Yang Z., Wang D. Microstructure and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic and Ti6Al4V alloy joint brazed with inactive Ag–Cu and Ag–Cu+B // *Journal of the European Ceramic Society*. 2016. Vol. 36. P. 2067–2074. DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2016.01.078.
21. Feng J., Dai X., Wang D., Li R., Cao J. Microstructure evolution and mechanical properties of ZrO<sub>2</sub>/TiAl joints vacuum brazed by Ag–Cu filler metal // *Materials Science and Engineering A*. 2015. Vol. 639. P. 739–746.
22. Dai X., Cao J., Liu J., Su S., Feng J. Effect of holding time on microstructure and mechanical properties of ZrO<sub>2</sub>/TiAl joints brazed by Ag–Cu filler metal // *Materials and Design*. 2015. Vol. 87. P. 53–59.
23. Dai X., Cao J., Wang Z., Wang X., Chen L., Huang Y., Feng J. Brazing ZrO<sub>2</sub> ceramic and TC4 alloy by novel WB reinforced Ag–Cu composite filler // *Microstructure and properties. Ceramics International*. 2017. Vol. 43. P. 15296–15305.