

УДК 669.018.95

А.А. Шавнев¹, Е.И. Курбаткина¹, Д.В. Косолапов¹**МЕТОДЫ СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-35-42

В высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как авиационно-космическая, на смену традиционным материалам и сплавам приходят композиционные материалы благодаря их высоким эксплуатационным свойствам – прочности, износостойкости, малой плотности и др.

Композиционные материалы на основе алюминия являются наиболее динамично развивающимся и значимым направлением – как по количеству проводимых исследований и выпускаемых патентов, так и по объему промышленного производства. Наряду с разработками в области структуры, свойств и технологий, крайне важными становятся результаты по вторичной обработке – в частности в области соединения металлических композиционных материалов между собой и с другими материалами.

Рассмотрены основные технологии соединения алюминиевых композиционных материалов: сварка, пайка, склеивание и механическое крепление. Проанализированы основные преимущества и недостатки каждого метода и даны рекомендации по выбору технологических режимов для получения качественных соединений с высокими механическими свойствами.

Ключевые слова: порошковая металлургия, механическое легирование, композиционные материалы, твердофазное взаимодействие.

In high-technology industries such as aerospace industry, traditional materials and alloys have nowadays been replaced by composite materials due to their high operational properties – strength, wear resistance, low density, etc.

Aluminum-based composite materials are the most dynamically developing and significant direction – both in terms of the number of conducted researches and issued patents and in terms of volume of industrial production. Along with the developments in the field of structure, properties and technologies the results in secondary processing are becoming extremely important, in particular, in the field of joining of metal composite materials between themselves and with other materials.

The main joining methods of aluminum composite materials such as: welding, soldering, bonding and mechanical fastening are considered. The advantages and disadvantages of each method are analyzed, and recommendations on the choice of technological modes to obtain quality joints with high mechanical properties are given.

Keywords: powder metallurgy, mechanical alloying, composite materials, solid-phase interaction.

¹Федеральное 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

Металлические композиционные материалы (МКМ) находят применение в авиационно-космической отрасли благодаря высоким эксплуатационным свойствам – прочности, жесткости, износостойкости и др. В последние годы МКМ на основе алюминиевых сплавов стали основным направлением исследований и разработок. Наряду с исследованиями в области структуры, свойств и технологий производства крайне важными становятся результаты по вторичной обработке данных материалов и деталей из них – механической и деформационной обработках, способах соединения и др., поскольку они определяют успешное применение МКМ в изделиях [1–5].

Разработка технологии соединения композиционных материалов между собой и с другими материалами является актуальной задачей. К предпочтительным способам соединения подобных мате-

риалов относятся сварка, обеспечивающая прочность и рабочие температуры соединения, близкие к аналогичным характеристикам исходного композиционного материала, а также механические и интегральные соединения, при которых прочность механического крепления ограничена наиболее хрупким элементом. Пайка и склеивание допустимы, однако обеспечивают значительно более низкие прочностные свойства и температуры эксплуатации [6]. Свойства паяного соединения определяет используемый припой. Клеевое соединение редко используется для соединения МКМ, исключением являются случаи, когда речь идет о функциональном применении композиционного материала и определяющими свойствами является, например, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) [6].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12.1.

«Металлические композиционные материалы (МКМ), армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений», а также затрагивает следующие научные направления: 10.7. «Ресурсосберегающие технологии сварки в твердой фазе трудносвариваемых конструкционных и функциональных материалов», 10.8. «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» и 10.9. «Припой и технологии высокотемпературной диффузионной пайки с компьютерным управлением технологическими параметрами для формирования оптимальной структуры паяного соединения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [7].

1. Методы сварки плавлением

К методам сварки плавлением, которые применяются для соединения металлических композиционных материалов, относятся: дуговая, сопротивлением, лазерная и электронно-лучевая. При сварке МКМ на основе алюминиевых сплавов существует ряд особенностей, которые необходимо учитывать.

Высокая вязкость расплава. Показатель вязкости расплава имеет важное значение при использовании технологии газовой дуговой сварки вольфрамовым (GTAW) и металлическим (GMAW) электродами. При одинаковых температурах вязкость расплавленного МКМ выше, чем чистого матричного сплава, что затрудняет работу со сварочной ванной и препятствует смешиванию присадочных элементов с основным расплавом. Повышение температуры сварочной ванны позволяет снизить вязкость расплава и тем самым улучшить технологичность процесса.

Взаимодействие между матрицей и армирующим компонентом. При высоких температурах матричный материал взаимодействует с армирующим компонентом. Например, взаимодействие в системе Al–SiC происходит с образованием крупных игольчатых фаз Al_4C_3 , Al_4SiC_4 , Al_4Si_2C и др., которые отличаются пластинчатой структурой, хрупкостью и склонностью к коррозии [8–12]. В работах [13, 14] отмечается, что увеличение скорости нагрева и охлаждения, а также использование кремнийсодержащей присадки (например, ER4043, ER4047) позволяет минимизировать взаимодействие на границе раздела.

Известен также способ, позволяющий избежать образования игольчатых фаз в алюминиевых МКМ, армированных карбидом кремния, при котором между двумя свариваемыми элементами из МКМ делается вставка из чистого титана [15]. При этом в зоне сварного соединения образуются фазы TiN, AlN, TiC, Ti_5Si_3 и Al_3Ti , имеющие более благоприятную морфологию.

Сегрегация. Сегрегация армирующего компонента может происходить на макро- и микроуровне. Известно [13], что поток защитного газа и

продолжительность технологического процесса дуговой сварки может вызывать скопление армирующих частиц на периферии сварного шва. Использование лазерной или электронно-лучевой сварки помогает избежать этой проблемы.

Сегрегация часто проявляется при сварке МКМ сопротивлением. Возможно, данная особенность связана с гидродинамическим эффектом, генерирующим центробежные силы или эффектом поверхностного натяжения [13]. Однако тщательный выбор и контроль за технологическими параметрами сварки может свести сегрегацию к минимуму.

1.1. Дуговая сварка электродом в газовой среде

Частой проблемой при сварке МКМ электродом в газовой среде является пористость и растрескивание сварного шва. Причем пористость самого МКМ повышает вероятность образования пор и дефектов во время технологического процесса. Даже несмотря на высокое содержание SiC (до 50%) свариваемость МКМ может находиться на уровне матричного алюминиевого сплава [16]. Однако взаимодействие на границе раздела «матрица–упрочнитель» в результате термического перегрева определяет свойства полученного соединения.

Компания DURALCAN активно применяет газовую дуговую сварку вольфрамовым электродом для литейных алюминиевых МКМ благодаря высокой технологичности метода, который позволяет использовать стандартное сварочное оборудование [17]. Так, МКМ марки F3S.20S (система A356–20% SiC_p) сваривается с использованием присадочной проволоки с высоким содержанием кремния ER4047 (система Al–(10–13)% Si). Для деформируемых МКМ марок W6A.10A (система 6061–10% Al₂O_{3p}) и W6A.20A (система 6061–20% Al₂O_{3p}) используется магнийсодержащая присадка ER5356 (система Al–(4,5–5,5)% Mg–Mn–Cr–Ti), которая повышает смачиваемость и препятствует слипанию частиц в сварочной ванне. Известна работа [18], в которой МКМ системы 6061–20% SiC_p, полученный по порошковой технологии, сварен с использованием присадки ER4043 (система Al–(4,5–6,0)% Si), что также позволило избежать образования хрупких фаз.

В табл. 1 рассмотрено влияние технологических режимов GTAW на прочностные свойства сварного соединения МКМ системы 2080–20% SiC_p. Наиболее оптимальной является энергия дуги 1,09 кДж, при которой прочность при растяжении сварного соединения является максимальной и составляет 218 МПа. Уменьшение этого параметра приводит к образованию пор в сварном шве, а увеличение – к падению прочностных свойств, что объясняется взаимодействием на границе раздела фаз.

Исследование процесса сварки боралюминиевого МКМ [20] показало, что сварка без присадочной

Таблица 1

Основные технологические режимы и свойства сварных соединений МКМ системы 2080–20% SiC_p с присадочным материалом ER4047 [19]

Ток, А	Напряжение, В	Энергия дуги, кДж	Термическая обработка после сварки	Предел прочности при растяжении, МПа	Место разрушения
154	12,0	1,09	Закалка+старение	218	Сварной шов
145	11,5	1,54	Закалка+старение	196	Сварной шов
149	12,0	1,29	Закалка+старение	153	Сварной шов
147	11,5	1,15	Закалка+старение	175	Сварной шов
147	12,8	0,90	–	59–125	Сварной шов*

* Выявлена пористость в сварном шве.

проволоки приводит к дефрагментации и растворению волокна. При использовании присадки марки ER4043 расплав не взаимодействует с бором и деградации волокна не происходит.

Газовая дуговая сварка металлическим электродом также применяется для алюминиевых композиционных материалов. Компания DURALCAN рекомендует именно ее [17] для экструдированного МКМ марки W6A.20A. Прочность сварного соединения после термообработки (старения) составляет 230–265 МПа, что превышает прочность аналогичного сварного соединения матричного сплава 6061. Однако концентрация частиц армирующего компонента в сварном шве отличается от МКМ, что является причиной различия механических характеристик данных областей, поэтому место соединения должно выбираться таким образом, чтобы минимизировать этот эффект.

На МКМ системы 6061–25% В₄С_p газовая дуговая сварка металлическим электродом показала лучшие результаты с точки зрения качества и повторяемости, чем при сварке GTAW [21].

1.2. Лазерная сварка

Лазерная сварка обладает рядом преимуществ, таких как высокая скорость, прецизионность и автоматизация процесса. Скорость 2–4 м/мин возможна и с низким тепловым потоком, что обеспечивает небольшую зону термического влияния, низкую термическую деформацию и малые остаточные напряжения. Однако при сварке алюминиевых МКМ часто возникает проблема пористости сварного соединения. Причиной, вероятнее всего, являются оксиды, присутствующие в матрице, которые поглощают больше энергии лазера, чем металл, в результате чего образуются локальные перегревы «пятна», а затем поры. Возможно также выделение влаги и других газовых примесей при разложении оксидов, что является причиной дефектов сварного шва [22].

Исследование влияния тепловложения и продолжительности термического цикла проводилось на МКМ системы A356–15% SiC_p с использованием CO₂-лазера и импульсного Nd:YAG-лазера [23]. Различий в микроструктуре сварных швов не

выявлено. В центральной зоне сварного шва происходит взаимодействие между Al и SiC с образованием соединения Al₄C₃, чистого кремния и Al–Si-эвтектики. Установлено, что мощность лазерного излучения и длительность рабочего цикла лазера обуславливают степень взаимодействия на границе раздела фаз.

1.3. Электронно-лучевая сварка

Электронно-лучевая сварка обычно осуществляется в условиях высокого вакуума. Как и лазерная сварка, она обеспечивает быстроту технологического процесса, но отличается меньшей пористостью сварного шва. Природа электронного пучка такова, что он не поглощается керамическими частицами SiC, это может спровоцировать локальный перегрев и образование соединения Al₄C₃. Однако по сравнению с лазерной сваркой данный метод отличается меньшей склонностью к образованию хрупких фаз в сварном шве при схожих скоростях и уровнях мощности. Для предотвращения образования карбида алюминия рекомендуется увеличить скорость сварки и резкость фокуса (оптимальный диаметр луча ~0,4 мм). К недостаткам метода можно отнести высокую чувствительность к поверхностным загрязнениям и высокую стоимость [24].

1.4. Сварка сопротивлением

Преимуществом данной технологии является стабильность геометрических размеров свариваемых деталей. Процесс сварки возможно осуществлять с приложением давления, что благоприятно сказывается на свойствах сварного шва. На качество соединений сильное влияние оказывает чистота свариваемых поверхностей и наличие на них оксидных и других пленок. Например, оксидный слой на поверхности может выступать в качестве изолятора и препятствовать сварке, также оксид может являться источником влаги, а следовательно, пористости. В дисперсноупрочненных МКМ выявляется значительная сегрегация частиц в области сварного соединения.

Сварка сопротивлением успешно применяется для боралюминиевых МКМ, поскольку в отличие

от дуговой, лазерной и электронно-лучевой сварки не вызывает деградации волокон бора [25].

Одним из видов сварки сопротивлением является точечная конденсаторная сварка. Ее принцип заключается в том, что детали собирают внахлест и зажимают между электродами. Детали нагреваются кратковременным импульсом тока (0,01–0,5 с) до появления расплавленной зоны в месте контакта между деталями. Соединение происходит за счет накопленной в конденсаторной батарее электрической энергии и кратковременного расходования ее на сварку. Конденсаторная сварка применяется для алюминиевых МКМ, армированных нитевидными кристаллами и частицами SiC, карбидом бора, причем ни сегрегации, ни взаимодействия на границе раздела не выявлено [19].

2. Методы сварки в твердой фазе

Технологии сварки в твердой фазе являются перспективными методами соединения МКМ, поскольку позволяют избежать образования хрупких фаз на границе раздела, сегрегации и пористости.

2.1. Сварка трением

Сварка трением является перспективным методом соединения МКМ, в особенности на основе легких сплавов, часто применяется для соединения экструдированных деталей. Технологическими преимуществами данного метода является отсутствие расходуемых электродов, флюсов и защитной атмосферы. При этом данный метод способствует формированию беспористого соединения с низким уровнем остаточных напряжений [26]. При сварке алюминиевых МКМ из-за интенсивной пластической деформации происходит разрушение оксидных плен на поверхности контакта, это положительно сказывается на однородности сварного шва и его прочности. Однако деформация и переориентация зерен частиц армирующего компонента может разупрочнить сварное соединение или снизить длительную прочность.

Начиная с 1990-х годов активно используется сварка трением с перемешиванием (с использованием инструмента), которая хорошо зарекомендовала себя при сварке изделий сложной конфигурации, а также трудно свариваемых материалов. Например, в работе [27] после сварки листов из литого МКМ системы 6061–20% SiC_p при скорости вращения

инструмента 1370 об/мин, скорости сварки 88,9 мм/мин и усилия в направлении оси 9,6 кН получено сварное соединение с пределом прочности при растяжении 265 МПа, что составляет 92% от прочности самого композиционного материала.

В табл. 2 приведены механические свойства сварных соединений алюминиевого МКМ системы 2618–14% SiC_p, полученных при скорости вращения инструмента 950 об/мин и различных вариантах термической обработки [28]. Полная термическая обработка после сварки (закалка+старение) позволяет получить прочностные свойства, сравнимые со свойствами исходного МКМ без сварного соединения. Исследование структуры показало, что в сварном шве частицы SiC имеют меньший размер, что связано с их измельчением во время технологического процесса.

2.2. Диффузионная сварка и пайка

Диффузионная сварка/пайка применяется для МКМ, однако желательно использование промежуточного слоя (фольги), по крайней мере для алюминиевых МКМ, из-за оксидной пленки на поверхности алюминиевой матрицы, а также керамических частиц армирующего компонента, которые ограничивают процесс диффузии.

2.2.1 Диффузионная сварка в твердой фазе

Эксперименты показали [6], что МКМ систем Al–20% SiC_p и 6061–20% SiC_p подвергаются диффузионной сварке с использованием Cu и Ag фольг, а также и без них. Проведенные металлографические исследования подтвердили необходимость точного контроля технологических параметров, чтобы избежать сегрегации армирующего компонента на границе.

Проводилось исследование влияния технологических режимов сварки и материала фольги на свойства МКМ системы 6061–20% Al₂O₃. Результаты приведены в табл. 3 [30]. Подготовку поверхности перед сваркой осуществляли либо электрополировкой, либо проволочной щеткой на токарном станке. В первом случае формировалась более прочная связь на границе и механические свойства соединения были выше.

2.2.2. Диффузионная пайка

Жидкофазная диффузионная сварка подразумевает расплавление металлической фольги

Таблица 2

Механические характеристики сварных соединений МКМ системы 2618–14% SiC_p [28]

Состояние	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
Исходное	455	4,2
Сварное соединение	385	1,8
Сварное соединение:		
после закалки и старения	432	1,0
после старения	371	1,3

Таблица 3

Влияние основных технологических параметров диффузионной сварки на свойства МКМ на основе алюминиевого сплава 6061, армированного нитевидными кристаллами Al_2O_3 [30]

Материал фольги (толщина)	Температура, °C	Давление, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Область разрушения
Без фольги	600	2	97,5	Граница раздела
A2017 (75 мкм)	610	1	161	То же
	600	2	184	Матрица МКМ
	600	2	181	То же
	600	1	173	Граница раздела
A2017 (30 мкм)	610	1	177	То же
	600	2	187	-«-
Ag (6 мкм)	600	2	166,5	-«-
Cu (5 мкм)	610	1	125	-«-
	600	2	179	-«-
	600	2	181	Матрица МКМ
	600	1	162	Граница раздела
	550	1	119	То же

между свариваемыми поверхностями. Для алюминиевых МКМ используется, как правило, Cu, Zn и Ag фольга. Использование медной фольги вызывает образование эвтектической связи на границе раздела, которая образуется ниже точки плавления основных материалов. Известна технология [31], в которой сварка боралюминиевого МКМ системы 6061–50% В осуществляется с использованием фольги Al–Si (температура плавления 580°C) или Al–Cu–Zn (температура плавления 380°C). Данная технология успешно применялась для изготовления Al–В ленты для космического корабля Space Shuttle.

Технология жидкофазной диффузионной сварки также опробована на МКМ системы W6A.15A (6061–10% SiC_p) с использованием Al, Cu и BAlSi-4 фольги. Наибольшая прочность при растяжении сварного соединения (~175 МПа) достигнута с использованием Ag фольги при температуре 575°C в течение 100 мин и BAlSi-4 фольги при температуре 585°C в течение 20 мин.

Жидкофазная диффузионная сварка возможна и без использования фольги, однако прочностные свойства в этом случае относительно невысокие. Например, для МКМ на основе сплава 6061, армированного волокнами Al_2O_3 [32], прочность сварных соединений, полученных с использованием алюминиевой (сплав 2017), медной и серебряной фольги превышала в среднем в 1,5 раза прочность соединения, полученного без использования специальных вставок.

3. Пайка металлических композиционных материалов

Технологический процесс пайки позволяет избежать плавления металлической составляющей МКМ и деградации армирующего компонента.

Пайка МКМ осуществляется с использованием припоя, который обычно выбирают исходя из матричного металла. Продолжительность и температура технологического процесса должны быть сведены к минимуму. Как показывает практика, наиболее перспективной технологией является диффузионная пайка твердым припоем. Теоретически технологический процесс должен обеспечивать диффузию припоя в металлическую составляющую композиционного материала, в результате чего свойства соединения меняются и могут приблизиться к свойствам матрицы. Однако на практике существует ряд технологических проблем, которые связаны с особенностями структуры и фазового взаимодействия в МКМ, что ограничивает широкое применение диффузионной пайки. Так, при пайке на воздухе алюминиевых дисперсноупрочненных композиционных материалов припоем на основе меди существует проблема неудовлетворительной смачиваемости поверхности в результате образования оксидов. Использование твердого припоя из алюминиевого сплава типа 2124 позволяет избежать проблемы непропаянных областей, однако прочность при растяжении подобных соединений не превышает 50 МПа [33].

Известна работа [34], в которой для диффузионной пайки МКМ системы Al(6063)–SiC_p использовали припой, состоящий из порошков Al, Si, Ti и SiC. Технологический процесс проводили по следующему режиму: давление 0,003 МПа, температура 595°C, продолжительность выдержки 90 мин; предел прочности при растяжении полученного соединения составил 50 МПа.

Использование защитной атмосферы инертного газа (аргона) и изменение технологических параметров позволило авторам работы [35] повысить предел прочности при растяжении соединения

до 68 МПа при диффузионной пайке МКМ марки Al(6061)–15% SiC_p медным припоем по следующему режиму: давление 2 МПа, температура 560°C, продолжительность выдержки 20 мин.

Авторам работ [36, 37] удалось получить предел прочности при растяжении паяного соединения, равный 92% от предела прочности матричного алюминиевого сплава, используя диффузионную пайку в вакууме по следующему режиму: давление 0,1–0,2 МПа, температура 560°C, продолжительность выдержки 20 мин с последующей операцией изостатического прессования для устранения непропаянных областей.

В работе [38] проведено исследование алюминиевых МКМ, армированных проволокой из нержавеющей стали, а также волокнами бора, и установлены математические зависимости, описывающие кинетику межфазных взаимодействий, что, в свою очередь, позволяет минимизировать образование хрупких фаз на границе раздела. Технологические режимы пайки, оптимизированные с учетом проведенной работы, позволили получать соединения с прочностью, равной 80–90% от прочности матричного материала.

Следует отметить, что МКМ, армированные волокнами BORSIC, обладают лучшей термостойкостью в диапазоне температур пайки 520–620°C благодаря покрытию из карбида кремния, нанесенного на борные волокна. Для повышения термостойкости и технологичности материала Al–BORSIC применяют также специальную вставку из титановой фольги между слоями. Титан выступает в качестве диффузионного барьера, предотвращающего взаимодействие на границе раздела фаз. Исследование боралюминиевых МКМ, полученных пайкой с использованием припоя ER4047, алюминиевой фольги A718 и титановой вставки между слоями, показали, что прочность соединения Al–Ti–BORSIC в 2,5 раза выше по сравнению с двумя первыми вариантами [39].

Перспективным методом является добавление армирующего компонента в припой – для улучшения его свойств и получения более однородной структуры соединения. В настоящее время дан-

ный технологический прием успешно реализован в функциональных композиционных материалах, где для повышения износостойкости в припой добавляется карбид вольфрама (WC).

4. Механическое или интегральное соединение металлических композиционных материалов

Соединение и крепление деталей из МКМ можно осуществлять с помощью крепежных деталей, в том числе с резьбой, и/или с помощью разработанных интегральных креплений (например, типа «ласточкин хвост»). Данный технологический процесс соединения не имеет каких-либо специфических требований или ограничений и выбирается исходя из свойств МКМ и особенностей конструкции. Однако необходимо учитывать, что обычно армирующим компонентом МКМ чаще всего выступают керамические частицы и волокна, обладающие высокой твердостью и жесткостью, что усложняет сверление и обработку, а также ускоряет износ инструмента [40]. В деталях, армированных волокнами, механическое соединение не должно нарушить целостность волокна, а места крепления необходимо проектировать на этапе создания самой детали. Прочность механического соединения зависит от выбранной конструкции, крепежного элемента и действующих полей напряжений.

5. Клеевое соединение металлических композиционных материалов

Выбор клея необходимо осуществлять исходя из металлической матрицы композиционного материала. Как показывает практика, если клей обеспечивает прочное склеивание металла, то он будет пригоден и для склеивания МКМ на его основе.

Эксперименты по склеиванию МКМ системы 8090–SiC_p с помощью акрила, эпоксидной смолы и модифицированной эпоксидной пленки проводили в работе [19]. Результаты представлены в табл. 4. Клеевые соединения, особенно полученные с использованием акрила, чувствительны к подготовке поверхности. Во всех случаях разрушение проходит в клеевом слое.

Таблица 4

Характеристики клеевого соединения МКМ системы 8090–SiC_p [19]

Клей	Подготовка поверхности	Предел прочности при сдвиге, МПа
Акриловый	Обезжиривание	2,5
	Шлифовка+обезжиривание	16
	Шлифовка+обезжиривание+ +связывающий агент	17
Эпоксидная смола	Обезжиривание	20
	Шлифовка+обезжиривание	25
	Шлифовка+обезжиривание+ +связывающий агент	27
Эпоксидная пленка	Обезжиривание	21

Клеевое соединение МКМ используется в основном в частных случаях функционального применения, например, – в МКМ с эффектом «памяти формы» или пьезоэлектрическими свойствами.

Выводы

Таким образом, композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов могут быть соединены с использованием сварки, пайки, механических и адгезионных методов соединения.

Методы сварки плавлением (дуговая, лазерная, электронно-лучевая и сопротивлением) отличаются простотой и технологичностью. Однако получение качественных сварных соединений может быть осложнено из-за взаимодействия матричного материала с армирующим компонентом, сегрегации керамических частиц, а также высокой вязкости расплава сварочной ванны. Для того чтобы избежать вышеперечисленных проблем, необходимо использовать специальные присадки и увеличить скорости нагрева и охлаждения.

Технологии сварки в твердой фазе (диффузионная, трением) и пайка позволяют избе-

жать плавления металлической составляющей композиционного материала, а следовательно, деградации армирующего компонента, взаимодействия на границе раздела и сегрегации.

Сварка трением позволяет получать соединения в среднем на 20–30% более прочные, чем при применении других технологий. Однако данный метод более технологически сложный, требует тщательного контроля технологических параметров и не применим для некоторых конфигураций свариваемых деталей.

Механические и интегральные соединения не имеют каких-либо специфических требований или ограничений и выбираются исходя из свойств композиционного материала и особенностей конструкции.

Клеи, как правило, не развивают высокой адгезии с металлической матрицей, поэтому предел прочности при сдвиге получаемых соединений, как правило, не превышает 30 МПа. Клеевое соединение применяется в основном в частных случаях, например в МКМ с эффектом «памяти формы» или пьезоэлектрическими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
2. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // *Крылья Родины*. 2010. №4. С. 31–33.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2011. №SP2. С. 13–19.
4. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.08.2016).
5. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
6. Robert W., Messler Jr. *Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology*. Butterworth-Heinemann, 2004. 816 p.
7. 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.
8. Urena A., Escalera M.D., Gil L. Influence of interface reactions on fracture mechanisms in TIG arc-welded aluminum matrix composites // *Composites Science and Technology*. 2000. Vol. 60. P. 613–622.
9. Urena A., Rodrigo P., Gil L. Interfacial reactions in an Al–Cu–Mg (2009)/SiCw composite during liquid processing (Part II): Arc welding // *Journal of Materials Science*. 2001. Vol. 36. P. 429–439.
10. Lean P.P., Gil L., Ureña A. Dissimilar welds between unreinforced AA6082 and AA6092/SiC/25p composite by pulsed-MIG arc welding using unreinforced filler alloys (Al–5Mg and Al–5Si) // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 143/144. P. 846–850.
11. Cola M.J., Lienert T.J., Gould J.E., Hurley J.P. Laser welding of a SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composite // *Mater. Sci. Technol.* 1994. Vol. 10. No. 5. P. 297–301.
12. Storzjohann D., Babu S.S., David S.A., Sklad P. Comparison of mechanical properties and microstructure of weld nugget between weld-bonded and spot-welded PM material // Report U.S. Department of Energy, Office of Heavy Vehicle Technology and Office of Transportation under contract number DE-ACO5-000R22725 with UT-Battelle LLC. URL: www.aws.org/conferences/abstracts/2003/10c.pdf (дата обращения: 23.11.2016).
13. Dahotre N.B., McCay M.H., McCay T.D., Gopinathan S., Allard L.F. Pulse laser processing of SiC/Al-alloy metal matrix composite // *Journal of Material Research*. 1991. Vol. 6. No. 3. P. 514–529.
14. Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В., Ходыкин Л.Г., Нигметов М.С. Исследование влияния добавки кремния на фазовый состав алюминиевых композиционных материалов, армированных частицами карбида кремния // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S6. С. 35–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-35-38.

15. Lei Y., Yuan W., Chen X., Zhu F., Cheng X. In-situ weld-alloying plasma arc welding of SiCp/Al MMC // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2007. Vol. 17. P. 313–317.
16. Devletian J.H. SiC/Al Metal Matrix Composite Welding by a Capacitor Discharge Process // *Welding Journal*. 1987. No. 6. P. 33–39.
17. ARC Welding Guidelines – DURALCAN TM Composites. San Diego, 1991. 253 p.
18. Ahearn J.S., Cooke C., Fishman S.G. Fusion welding of SiC-reinforced Al composites // *Metal Construction*. 1982. Vol. 14. No. 4. P. 192–197.
19. Ellis M.B.D. Joining of Al-Based Metal Matrix Composites-A Review // *Materials and Manufacturing Processes*. 1996. Vol. 11. No. 1. P. 45–66.
20. Kennedy J.R. Microstructural observations in arc welded boron-aluminium composites // *Welding Journal*. 1973. Vol. 52. No. 3. P. 120–124.
21. Stantz T.M., Aidun D.K., Momson D.J. et al. Weldability of boron carbide reinforced aluminum // *Proceedings of Machining Composite Materials Symposium*, 1992. P. 781–785.
22. Mosca E., Marchetti A., Lampugnani U. Laser welding of PM materials // *Proceedings International Conference PM Powder Metallurgy*, 1982. P. 193–200.
23. McCay M.H., McCay T.D., Dahotre N.B., Sharp C.M. Fusion zone structures in laser welded Al–SiC composites // *Laser Applications*. 1991. Vol. 3. No. 3. P. 35–39.
24. Hamill J.A. Materials what are the joining process and techniques for power metal parts // *Welding Journal*. 1993. No. 2. P. 37–45.
25. Baeslack III W.A., Lata W.P. A study of heat-affected zone and weld metal liquation cracking in alloy 903 // *Welding Research Supplement*. 1988. P. 1395–1495.
26. Uzun H. Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite // *Materials and Design*, 2007. Vol. 28. P. 1440–1446.
27. Periyasamy P., Mohan B., Balasubramanian V. et al. Multi-objective optimization of friction stir welding parameters using desirability approach to join Al/SiCp metal matrix composites // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2013. Vol. 23. P. 942–955.
28. Ellis M.B.D., Gittos M.F., Threadgill P.L. Joining Aluminum Metal Matrix Composites // *Materials World*. 1994. Vol. 2. No. 8. P. 415–417.
29. Partridge P.G., Dunford D.V. The role of interlayers in diffusion bonded joints in metal matrix composites // *Journal of Materials Science*. 1991. Vol. 26. P. 2255–2258.
30. Enjo T., Ikeochi K., Murakami Y., Suzuki N. Diffusion bonding of A6063 aluminium alloy reinforced with alumina short fibers // *Quarterly Journal of Japanese Welding Society*. 1987. Vol. 15. No. 3. P. 317–323.
31. Benyukian C.S. Brazing of refractory, superalloy, and composite material for space shuttle applications. Downey, 1972. 758 p.
32. Dunkerton S.B. Applications of diffusion bonding // *Welding and Applied Developments for the Process Industries: proceedings of International Symposium (London, 12–14 April, 1988)*. Cambridge, 1988. P. 273–282.
33. Bushby R.S., Scott V.D. Joining aluminum/nicalon composite by diffusion bonding // *Composites Engineering*. 1995. Vol. 5. No. 8. P. 1029–1042.
34. Huang J., Dong Y., Wan Y. et al. Investigation on reactive diffusion bonding of SiCp/6063 MMC by using mixed powders as interlayers // *J. Mater. Process. Technol*. 2007. Vol. 190. P. 312–316.
35. Pal T.K. Joining of aluminum metal matrix composites // *Mater. Manuf. Process*. 2005. Vol. 20. P. 717–726.
36. Shirzadi A.A., Wallach E.R. New approaches for transient liquid phase diffusion bonding of aluminium based metal matrix composites // *Mater. Sci. Technol*. 1997. Vol. 13. P. 135–142.
37. Morimoto H.T., Tanashi T.S., Yamada K. Effects of brazing temperature on joint properties of SiC fiber reinforced aluminium alloy matrices // *Proceedings of Advances in Joining Newer Structural Materials*. Oxford, 1990. P. 137–142.
38. Khorunov V.F., Kutchuk-Yatsenko V.S., Dykhno I.S., Kasatkina N.V. Brazing of sheet composite materials // *Proceedings of the International conference «Advantages in joining newer structural materials» (Monreal, 23–25 July, 1990)*. Monreal: Pergamon Press, 1990. P.143–153.
39. Swartz M.M. *Composite Materials Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1984. 645 p.
40. Каблов Е.Н., Щеганов Б.В., Гращенко Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №3. С. 373–380.