

УДК 669.017.165:669.295

А.А. Скупов<sup>1</sup>, А.В. Свиридов<sup>1</sup>, Е.А. Ходакова<sup>1</sup>, А.Н. Афанасьев-Ходыкин<sup>1</sup>**СОЗДАНИЕ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ИЗ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-31-38

*Представлен обзор исследований по разработке технологий создания неразъемных соединений интерметаллидных титановых сплавов. В настоящее время наиболее распространенным методом получения сварных соединений данного класса сплавов является электронно-лучевая сварка. Приведены марки присадочных материалов и припоев, применяемых для интерметаллидных титановых сплавов, а также свойства, которые удается получить при их использовании. Рассмотрены подходы к выбору технологии сварки, обеспечивающей получение качественных соединений с требуемыми характеристиками.*

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, лазерная сварка, аргоно-дуговая сварка, интерметаллидные титановые сплавы, присадочные материалы, пайка, жаропрочные материалы.

А.А. Skupov<sup>1</sup>, А.В. Sviridov<sup>1</sup>, Е.А. Khodakova<sup>1</sup>, А.Н. Afanasev-Khodykin<sup>1</sup>**CREATION OF JOINTS FROM  
INTERMETALLIC TITANIUM ALLOYS (review)**

*An review of studies on the development of technologies for creating joints of intermetallic titanium alloys is presented. Today, electron beam welding is most common method for producing welded joints of this class of alloys. Brands of filler materials and solders used for intermetallic titanium alloys, as well as the properties that can be obtained when using them, are given. Approaches to the choice of welding technology that ensure the production of high-quality joints with the required characteristics are described.*

**Keywords:** electron-beam welding, laser welding, argon arc welding, intermetallic titanium alloys, filler materials, brazing, heat-resistant materials.

<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**

Повышение эффективности работы авиационных двигателей и энергетических установок невозможно без разработки и внедрения новых материалов, обладающих комплексом свойств, которые ранее были недостижимы. Особые требования предъявляют к жаропрочным сплавам, предназначенным для изготовления лопаток, дисков, направляющих аппаратов и корпусных элементов компрессора и турбины, поскольку эти детали подвергаются высоким тепловым и силовым нагрузкам. Для изготовления ответственных деталей газотурбинного двигателя (ГТД) до недавнего времени применяли такие легкие жаропрочные материалы, как псевдо- $\alpha$ - и  $(\alpha + \beta)$ -титановые сплавы типа ВТ25У и ВТ18У (РФ), IMI 834 (Великобритания), Ti6242S и Timetal 1100 (США), с рабочей температурой до 550–600 °С и плотностью 4,5–4,6 г/см<sup>3</sup>. Однако использование

данных сплавов при температурах  $>600$  °С ограничено резким снижением жаропрочных свойств и повышенным окислением, обусловленным деградацией структуры. К материалам, которые могли бы частично заменить традиционные жаропрочные никелевые сплавы и стали с плотностью  $8\text{--}8,5$  г/см<sup>3</sup>, относятся легкие интерметаллидные сплавы на основе  $\gamma$ (TiAl)- и орто(Ti<sub>2</sub>AlNb)-фаз с плотностью  $4\text{--}4,3$  и  $5,1\text{--}5,4$  г/см<sup>3</sup> соответственно. Интерметаллиды титана и сплавы на их основе привлекают внимание металлургов благодаря уникальному сочетанию физических и эксплуатационных свойств, реализация которых на практике поможет решить самые амбициозные задачи промышленного газо- и турбостроения [1–6].

Большой интерес к сплавам на основе интерметаллида TiAl связан с их высокими температурой плавления и коэффициентом упругости, низкой плотностью и хорошей стойкостью к окислению. В настоящее время эти сплавы являются наиболее перспективной альтернативой жаропрочным сталям и сплавам в авиационных ГТД, планерах и автомобильных двигателях. Однако низкие пластичность и вязкость разрушения при комнатной температуре долгое время препятствовали их промышленному применению [7]. Такие сплавы уже используются для изготовления лопаток в двигателях GE9x™, а новый стабилизированный сплав TiAl (TNM) – для производства лопаток LPT в двигателях PW1100G™ [8, 9].

Для широкого внедрения конструкционных материалов, в том числе и интерметаллидных титановых сплавов, в конструкции авиационных двигателей необходима разработка технологий сварки, обеспечивающей получение качественных соединений с высокими показателями их механических характеристик [10–12].

Как правило, основные методы сварки, используемые для обычных титановых сплавов, также можно применять и для соединения интерметаллидных титановых сплавов. Однако необходимо оптимизировать параметры процесса сварки. В некоторых случаях, например для обеспечения сравнительно низкой скорости охлаждения сварного шва, требуется дополнительная оснастка, которая минимизирует возможность образования трещин, а также способствует формированию оптимальной структуры сварного соединения и получению требуемых механических характеристик.

Опубликованные к настоящему времени работы по свариваемости интерметаллидных сплавов в основном рассматривают соединение Ti<sub>3</sub>Al с самим собой или со сплавом на основе титана. В меньшей степени исследованы сплавы Ti<sub>2</sub>AlNb и Ti<sub>3</sub>AlNb.

В данной статье представлены основные достижения в области создания неразъемных соединений из интерметаллидных титановых сплавов. Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.8. «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

### **Сварка плавлением интерметаллидных титановых сплавов**

Некоторые методы создания неразъемных соединений, широко применяемые в авиационной промышленности (аргоно-дуговая, электронно-лучевая и лазерная сварка), используются для соединения интерметаллидных титановых сплавов с переменным успехом. Так, кратковременная прочность при комнатной температуре сварных соединений сплавов составов Ti–24Al–17Nb и Ti–22Al–27Nb, полученных лазерной сваркой, соответствовала показателям прочности основного материала. Сварные соединения различных сплавов – например, сплава состава Ti–22Al–25Nb и сплава TC11, выполненные электронно-лучевой сваркой, достигали значений прочности, характерных для сплава TC11 [14–19].

Поскольку интерметаллидные титановые сплавы обладают низкой пластичностью и высокими термическими напряжениями, возникающими под воздействием термического цикла сварки плавлением, их соединения характеризуются высокой склонностью к образованию холодных трещин. Однако данный эффект можно уменьшить путем тщательного выбора параметров сварки и с помощью предварительного подогрева сплавов до температуры 700–800 °С [20].

В настоящее время наиболее распространенный метод получения сварных соединений жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана – электронно-лучевая сварка [21, 22]. Для деталей небольших размеров влияние фазового превращения на вероятность образования холодных трещин является преобладающим. Таким образом, параметры процесса сварки должны обеспечивать протекание фазового превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  с образованием  $(\gamma + \alpha_2)$ -структуры сварного шва. Для крупногабаритных деталей и жестких конструкций влияние фазовых превращений на свариваемость уменьшается по сравнению с влиянием остаточных напряжений [7]. Помимо технологических параметров сильное влияние на процесс электронно-лучевой сварки оказывает содержание легирующих элементов. Например, добавка ниобия в количестве 5–8 % (по массе) способствует повышению значений прочности, ползучести и коррозионной стойкости [18].

Другим перспективным методом создания неразъемных соединений интерметаллидных титановых сплавов с использованием концентрированного источника энергии, наряду с электронным лучом, является лазерная сварка [23]. В последнее время благодаря универсальности и гибкости этого процесса, высоким удельной погонной энергии и скорости, а также малым деформациям возрос интерес к лазерной сварке титановых сплавов, в том числе и на основе интерметаллида TiAl [24]. Как и в случае с электронно-лучевой сваркой, перед проведением процесса лазерной сварки соединяемые детали рекомендуется подогревать: чем больше температура подогрева, тем выше может быть скорость самого процесса. В работе [19] установлено, что качественные сварные соединения жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана можно получить при скорости сварки 50 мм/с, если начальная температура составляла 600 °С, при скорости 43 мм/с и температуре 400 °С, а также при скорости 33 мм/с и комнатной температуре. В статье [23] показано, что благодаря применению лазерного источника и организации качественной защиты сварочной ванны от воздействия газов атмосферы получены сварные соединения из сплава состава Ti–22Al–27Nb, обладающие прочностью, близкой к прочности основного материала.

В работе [25] продемонстрирована возможность получения бездефектных сварных соединений из интерметаллидного  $\gamma$ -титанового сплава методом аргоно-дуговой сварки без предварительного подогрева при условии обеспечения необходимой величины тока сварки. Установлено, что для толщины соединяемого материала 2 мм значение тока должно быть не менее 75 А.

### **Присадочные материалы для сварки интерметаллидных титановых сплавов**

Следует отметить, что в настоящее время в Российской Федерации наиболее жаропрочными серийно изготавливаемыми сварочными проволоками являются проволоки марок ВТ20-1св и ВТ20-2св. Однако они не способны обеспечить высокий уровень прочностных характеристик при рабочих температурах >500 °С (в частности, длительную прочность), а сварочные материалы для сплавов на основе интерметаллида TiAl отсутствуют.

За рубежом, преимущественно в КНР, активно ведутся работы по исследованию влияния на структуру и свойства сварных соединений интерметаллидных титановых сплавов состава присадочных материалов, а также по их разработке. Так, в статье [26]

представлено исследование влияния присадочного материала (чистого ниобия) на структуру и свойства сварных соединений сплава состава Ti–24Al–15Nb, полученных с помощью лазерной сварки. Установлено, что структура металла шва, изготовленного без присадочного материала, представляет собой сочетание хрупкой  $\alpha'_2$ - и B2-фаз. Прочность сварного соединения в данном случае составила 330 МПа, при этом разрушение происходило по шву. Применение присадочного материала позволило значительно повысить эту механическую характеристику до 724 МПа (что составляет 0,82 от прочности основного материала), оказывая сильное влияние на его состав и микроструктуру. По сравнению со сварными швами, изготовленными без использования присадочного металла, в сварных швах, полученных с применением ниобия, увеличивается содержание последнего и уменьшается содержание алюминия, что способствует выделению орто-фазы в матрице B2 и сдерживает образование мартенсита. Таким образом, авторы работы [26] считают, что для улучшения механических свойств сварных соединений интерметаллидных орто-титановых сплавов, полученных лазерной сваркой, целесообразно использовать в качестве присадочного материала чистый ниобий.

Применение присадочного материала оригинального химического состава позволит соединять интерметаллидные титановые сплавы с жаропрочными сплавами на никелевой основе, являющимися одними из основных конструкционных материалов для ГТД. Исследования сварных соединений сочетания сплава состава Ti–24Al–15Nb–1Mo и сплава In718, изготовленных аргоно-дуговой сваркой с использованием присадочных материалов систем Ti–Nb и Ti–Ni–Nb, показали, что наибольшего значения прочности сварного шва удастся достичь при большем содержании ниобия и отсутствии никеля в составе присадки [14].

В работе [27] продемонстрированы преимущества использования присадочного материала при лазерной сварке сплава на основе интерметаллида титана. Так, применение в качестве сварочной проволоки чистого титана позволило повысить прочность сварных соединений до 0,75 от основного материала.

#### **Сварка давлением интерметаллидных титановых сплавов**

Поскольку сплавы на основе интерметаллида титана обладают высокой склонностью к образованию трещин, применение методов сварки в твердой фазе является перспективным направлением для получения неразъемных соединений этого класса материалов. Одним из широко применяемых методов является диффузионная сварка. Наиболее часто встречающийся дефект при использовании данного технологического процесса – это несплошность, образующаяся при недостаточной продолжительности или температуре выдержки. Термическая обработка после диффузионной сварки позволяет получать соединения, равные по прочности основному материалу [7].

В работе [28] показано использование перспективного для конструкции ГТД метода линейной сварки трением для изготовления сварных соединений из сплава на основе интерметаллида Ti<sub>2</sub>AlNb. Структура сварного шва представляла собой B2-фазу с включениями орто- и  $\alpha_2$ -фаз. Прочность сварного соединения соответствовала прочности основного металла.

#### **Пайка интерметаллидных титановых сплавов**

В настоящее время в мире создано большое количество припоев для пайки титановых сплавов, которые можно разделить на три основные группы:

- припой на основе алюминия;
- припой на основе серебра;
- сложнoleгированные припои на основе сплава системы Ti–Ni–Cu.

Наиболее широко используемые припои для пайки титановых сплавов представлены в табл. 1 и 2 [29–34].

Таблица 1

## Припои на основе серебра и алюминия

Сплав	Химический состав сплава, % (по массе)	Температура пайки, °С
–	Ag–5Al	920–980
–	Ag–5Al–5Ti	920–940
–	Ag–5Al–0,5Mn	970–980
–	Ag–23Cu–5Ti	–
–	Ag–27Cu–5Sn	820–850
–	Al–1Mn	660–690
AA3003	Al–1Mn–0,6Si–0,7Fe	660–670
Gapasil-9	Ag–9Pd–9Ga	–
SCP-1	Ag–26,5Cu–5Pd	–
VH720	Ag–24Cu–14,5In	–
VH850	Au–20Ag–20Cu	–
–	Al–4,8Si–3,8Cu–0,2Fe–0,2Ni	610–680

Таблица 2

## Припои на основе сплава системы Ti–Ni–Cu

Сплав	Химический состав сплава, % (по массе)										Температура пайки, °С
	Ti	Zr	Cu	Ni	Co	Nb	Cr	Mo	Ag	Be	
BTi-1	Ост.*	–	15	15	–	–	–	–	–	–	980–1050
BTi-2	Ост.	–	15	25	–	–	–	–	–	–	930–950
BTi-3	Ост.	26	14	14	–	–	–	0,5	–	–	860–890
BTi-4	Ост.	20	20	20	–	–	–	–	–	–	870–890
BTi-5	Ост.	37,5	15	10	–	–	–	–	–	–	850–880
MBF-5001	–	Ост.	–	17	–	–	–	–	–	–	990–1020
MBF-5004	Ост.	25	50	–	–	–	–	–	–	–	860–900
MBF-5011	Ост.	–	18,5	27,5	–	–	–	–	–	–	970–980
MBF-5012	Ост.	–	20	20	–	–	–	–	–	–	940–970
ВПр16	Ост.	12,5	22,5	9	–	–	–	–	–	–	930–960
ВПр28	Ост.	22,5	15,5	15,5	–	–	–	–	–	–	860–870
ВПр38	–	–	20	9	–	1	–	–	–	–	1000–1050
Стемет 1201	Ост.	12	12	12	–	–	–	–	–	–	900–1000
Стемет 1406	11	Ост.	13	14	–	–	–	–	–	–	900
–	Ост.	12	12	12	–	–	14	–	–	–	940–970
–	Ост.	40	–	20,5	–	–	–	–	–	–	870–885
–	Ост.	41	–	14	–	–	–	–	–	4	870–885
–	Ост.	–	21	21	–	–	–	–	16	–	930–960
–	Ост.	48	–	–	–	–	–	–	–	2	930
–	Ост.	10	–	20	–	15	–	–	–	–	950–980
–	Ост.	20	20	20	–	–	–	–	–	–	930–970
–	Ост.	25,5	13	12	2,5	–	–	2,0	–	–	880–930
–	Ост.	24	7,5	25	<5	–	–	–	–	–	910–1030
–	Ост.	30	15	9	5	–	–	–	–	–	910–930

\*Ост. – остальное.

Припой на основе серебра обладают высокими технологическими характеристиками, хорошо смачивают титановые сплавы и имеют невысокую температуру пайки. Паяные соединения, выполненные с их применением, достаточно пластичны, однако имеют невысокий уровень прочности при повышенных температурах и низкую коррозионную стойкость при воздействии сред, содержащих ионы хлора. Ввиду существенных недостатков припои на основе серебра в настоящее время почти не применяются.

Припой на основе алюминия интенсивно разрабатывали в 1960–1970-х гг. Низкая температура плавления алюминия позволяет легко создавать на его основе припой с температурой плавления меньше температуры  $\beta$ -превращения титановых сплавов, что сохраняет высокие прочностные характеристики соединяемых материалов. Паяные соединения, выполненные алюминиевыми припоями, показывают удовлетворительную прочность при срезе. Однако из-за образования на границе паяного шва и основного материала интерметаллидных включений TiAl, паяные соединения хрупкие, обладают низкими характеристиками сопротивления усталости и ударной вязкости. При этом длительная эксплуатация паяных соединений титановых сплавов, выполненных алюминиевыми припоями, показала склонность этих соединений к коррозии практически во всех условиях.

В настоящее время сложнолегированные припой на основе сплавов систем Ti–Cu–Ni и Ti–Zr–Cu–Ni позволяют получить наиболее высокопрочные паяные соединения титановых сплавов, которые нашли широкое применение в промышленности во всем мире. Паяные соединения, выполненные с использованием таких припоев, обладают наиболее высокой прочностью при повышенных температурах и практически не подвержены коррозии. Данная группа припоев появилась в 1970-х гг. Их разрабатывали независимо друг от друга такие исследователи, как С.Е. Smeltzer, А.Н. Hammer и В.С. Рыльников. Для получения низкой температуры плавления данная группа припоев содержит в своем составе большое количество меди и никеля, которые формируют в паяном шве значительное количество хрупких интерметаллидных и эвтектических структур, делающих паяный шов хрупким. Однако благодаря применению гомогенизирующей термической обработки паяных соединений содержание хрупких включений в паяном шве значительно сокращается, что позволяет получать высокопрочные относительно пластичные паяные соединения. Основными недостатками таких припоев являются невысокая жаростойкость и недостаточно высокий уровень прочности паяных соединений при температурах  $>600$  °С.

Для пайки интерметаллидных титановых сплавов наиболее перспективными в настоящее время считаются сложнолегированные припой на основе сплава системы Ti–Ni–Cu, дополнительно содержащие в своем составе Co, Nb и Mo, которые повышают жаростойкость и жаропрочность паяных соединений (табл. 3) [30, 32, 34].

Таблица 3

Припой на основе сплава систем Ti–Ni–Cu и Ti–Zr–Cu–Ni, дополнительно легированные Co, Nb и Mo

Патент	Химический состав сплава, % (по массе)						
	Ti	Zr	Cu	Ni	Co	Nb	Mo
CN110605498A	Ост.*	8–11	–	18–22	–	14–17	–
CN103949802A	Ост.	24–27	12–14	11–13	1,8–4,2	–	1,2–1,8
CN102430874A	Ост.	25–35	10–24	5–15	0,5–8,0	–	–

\*Ост. – остальное.

### Заключения

Анализ научно-технической литературы в области создания неразъемных соединений из сплавов на основе интерметаллидов TiAl показал, что исследования, посвященные данному вопросу, затрагивают все технологические процессы, распространенные в авиационной отрасли. Основные трудности связаны с низкой пластичностью сплавов этого класса и их высокой склонностью к образованию холодных трещин. При использовании методов сварки плавлением рекомендуется предварительно подогреть заготовки и контролировать фазовые превращения параметрами процесса и применением присадочных материалов.

### Библиографический список

1. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
2. Каблов Е.Н., Лукин В.И. Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники // Автоматическая сварка. 2008. № 11. С. 76–82.
3. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-стабилизаторы // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
4. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 2. С. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
5. Анташев В.Г., Ночовная Н.А., Павлова Т.В., Иванов В.И. Жаропрочные титановые сплавы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 3. С. 7–8.
6. Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Лукина Е.А., Новак А.В. Структура и свойства листовых полуфабрикатов из деформируемых интерметаллидных титановых сплавов разных классов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 17–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-17-25.
7. Cao J., Qi J., Song X., Feng J. Welding and Joining of Titanium Aluminides // Materials. 2014. No. 7. P. 4930–4962.
8. Bewlay B.P., Nag S., Suzuki A., Weimer M.J. TiAl alloys in commercial aircraft engines // Materials at High Temperatures. 2016. No. 33 (4–5). P. 549–559.
9. Loretto M.H., Godfrey A.B., Hu D. et al. The influence of composition and processing on the structure and properties of TiAl-based alloys // Intermetallics. 1998. No. 6 (7–8). P. 663–666.
10. Пантелеев М.Д., Бакрадце М.М., Скупов А.А., Щербаков А.В., Белозор В.Е. Технологические особенности сварки плавлением алюминиевого сплава В-1579 // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-11-17.
11. Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Иода Е.Н., Мовенко Д.А. Эффективность применения редкоземельных металлов для легирования присадочных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 14–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-14-19.
12. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Сварка и безопасность». Якутск: ИФТПС СО РАН, 2012. С. 21–30.
13. 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.
14. Chen B., Xiong H., Sun B. et al. Microstructures and mechanical properties of Ti<sub>3</sub>Al/Ni-based superalloy joints arc welded with Ti–Nb and Ti–Ni–Nb filler alloys // Progress in natural science: Materials international. 2014. No. 24. P. 313–320.
15. Liu X.L., Wu S.J., Ji Y.P. et al. Ultrasonic frequency pulse tungsten inert gas welding of Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloy // Chinese journal of rare metals. 2014. Vol. 38. No. 4. P. 541–547.

16. Arenas M.F., Acoff V.L. An investigation of the cracking susceptibility of gamma titanium aluminide welds produced by gas tungsten arc welding // High temperature materials processes. 2014. Vol. 23. No. 1. P. 25–34.
17. Chaturvedi M.C., Richards N.L., Xu Q. Electron beam welding of a Ti–45Al–2Nb–2Mn + 0.8 vol. % TiB<sub>2</sub> XD alloy // Material Science and Engineering: A. 1997. Vol. 239–240. P. 605–612.
18. Reisinger U., Olschok S., Backhaus A. Electron beam welding of titanium aluminides – Influence of the welding parameters on the weld seam and microstructure // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2010. Vol. 41. No 11. P. 897–907. DOI: 10.1002/mawe.201000683.
19. Kuwahara G., Yamaguchi S., Nanri K., Ootani M., Seto S., Arai M., Fujioka T. CO<sub>2</sub> laser welding of titanium aluminide intermetallic compound // Proceedings of SPIE. 2000. Vol. 3888. P. 411–417.
20. Davies P.D., Davies H.M., Watkins I., Britton D.A. The joining of gamma titanium aluminides via the powder interlayer bonding method // The international journal of advanced manufacturing technology. 2020. No. 109. P. 2049–2054.
21. Chen G.Q., Zhang B.G., Liu W., Feng J.C. Crack formation and control upon the electron beam welding of TiAl-based alloys // Intermetallics. 2011. No. 19. P. 1857–1863.
22. Chaturvedi M.C., Xu Q., Richards N.L. Development of crack-free welds in a TiAl-based alloy // Journal of Materials Processing Technology. 2001. Vol. 118. No. 1. P. 74–78. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00870-6.
23. Lei Zh., Dong Zh., Chen Ya. et al. Microstructure and tensile properties of laser beam welded Ti–22Al–27Nb alloys // Materials & Design. 2013. Vol. 46. P. 151–156. DOI: 10.1016/j.mades.2010.10.022.
24. Auwal S.T., Ramesh S., Yusof F., Manladan S.M. A review on laser beam welding of titanium alloys // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97. No. 1. P. 1–28. DOI: 10.1007/s00170-018-2030-x.
25. Arenas M.F., Acoff V.L. Analysis of gamma titanium aluminide welds produced by gas tungsten arc welding // Welding journal. 2003. No. 5. P. 110–115.
26. Wang L., Sun D., Li H. et al. Microstructures and mechanical properties of a laser-welded joint of Ti<sub>3</sub>Al–Nb alloy using pure Nb filler metal // Metals – Open Access Metallurgy Journal. 2018. Vol. 8. No. 10. P. 785. DOI: 10.3390/met8100785.
27. Cai X., Sun D., Li H. et al. Microstructure characteristics and mechanical properties of laser-welded joint of  $\gamma$ -TiAl alloy with pure Ti filler metal // Optics & Laser Technology. 2017. Vol. 97. P. 242–247. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.07.011.
28. Chen X., Xie F.Q., Mab T.J., Lib W.Y., Wu X.Q. Microstructure evolution and mechanical properties of linear friction welded Ti<sub>2</sub>AlNb alloy // Journal of alloys and compounds. 2015. Vol. 646. P. 490–496.
29. Shapiro A., Rabinkin A. State of the art of titanium-based brazing filler metals // Welding journal. 2003. Vol. 82. No. 10. P. 36–43.
30. TiNiNbZr high-temperature brazing filler metal for TiAl alloy, preparation method and brazing method thereof: pat. CN 110605498A; filed 14.05.19; publ. 24.12.19.
31. Brazing filler metal for brazing titanium-containing material, preparation method and brazing method: pat. CN 110666395A; filed 21.10.19; publ. 10.01.20.
32. Ti–Zr–Cu–Ni–Co–Mo amorphous brazing filler metal and preparing method thereof: pat. CN 103949802A; filed 23.04.14; publ. 30.07.14.
33. Ti-based filler alloy compositions: pat. WO 2014169133A1; filed 10.04.14; publ. 16.10.14.
34. Titanium-based amorphous brazing alloy foil strip for brazing and preparation method for foil strip: pat. CN 102430874A; filed 01.11.11; publ. 02.05.12.