

СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ВСТАВОК, СОДЕРЖАЩИХ МЕДЬ И ТАНТАЛ*

*Ю.Н. МАЛЮТИНА¹, аспирант
Н.В. СТЕПАНОВА¹, мл. науч. сотруд.
А.Г. ЧЕРКОВ², инженер-технолог
Л.В. ЧУЧКОВА¹, студент
(¹НГТУ, г. Новосибирск,
²ИФП СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 16 июля 2015

Рецензирование 17 августа 2015

Принята к печати 20 октября 2015

Малютина Ю.Н. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: iuliamaliutina@gmail.com

Проведены исследования сварных швов, а также прочностных характеристик композитов, формируемых путем сварки взрывом пластин из титанового сплава BT20 и нержавеющей стали 09X18N10T с применением промежуточных слоев. Функцию промежуточных слоев выполняли пластины из тантала либо пара пластин «бронза – тантал». Методами микроструктурного анализа установлено, что в зоне соединений пластин образуются твердые растворы на основе меди и железа, а также титана и тантала. На границе сварки пластин из бронзы и тантала зафиксирована структура, представляющая собой механическую смесь меди и нанодисперсных включений β -тантала. В качестве критерия механических свойств композиционных материалов использовали уровень прочности соединения слоев. Максимальный предел прочности 420 МПа характерен для композиционных материалов с промежуточными слоями из бронзы и тантала.

Ключевые слова: сварка взрывом, промежуточный слой, структура швов, прочность соединения слоев.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-61-71

Введение

Титан и сплавы на его основе привлекают повышенное внимание специалистов, поскольку обладают такими важными свойствами, как высокая удельная прочность, вязкость при комнатной температуре, сопротивление коррозии, ползучесть [1, 2]. В связи с увеличением объема применения титана и его сплавов в космической, ядерной и химической промышленности все более актуальной становится проблема получения высокопрочных надежных соединений этих материалов с другими металлическими сплавами, в том числе с широко используемой в современном

производстве нержавеющей сталью. Разработанные к настоящему времени методы формирования соединений между титановыми сплавами и коррозионно-стойкими сталями, включающие в себя сварку (давлением или плавлением), пайку и прокатку, не во всех случаях удовлетворяют повышенным требованиям, предъявляемым к изделиям ответственного назначения [3, 4]. В большинстве случаев явные различия в свойствах разнородных металлических материалов приводят к химической, механической и структурной неоднородности получаемых на практике соединений [5, 6]. При непосредственном контакте заготовок из титана и нержавеющей

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00230).

стали в зонах соединения образуются различные типы интерметаллидов, негативно отражающиеся на комплексе механических свойств сварных конструкций.

Одно из эффективных решений отмеченной проблемы заключается в развитии направления, основанного на так называемом «непрямом соединении» разнородных металлов, когда между заготовками из основных (разнородных) материалов композиции фиксируются промежуточные или барьерные слои. Такой подход позволяет предотвратить нежелательную диффузию элементов взаимодействующих металлов, склонных к образованию интерметаллидов, а также получить бездефектные соединения с повышенными прочностными показателями. В качестве материалов барьерных слоев для сварки титановых сплавов и сталей нержавеющей класса чаще всего используют чистые металлы, такие как никель, серебро, медь, магний [7–10], или сплавы на их основе [11, 12]. Из этой группы особо можно выделить медь и сплавы на ее основе. Медь не образует хрупких химических соединений с элементами, входящими в состав нержавеющей стали (Fe, Cr, Ni, C). Она создает условия для релаксации напряжений, возникающих между свариваемыми материалами, которые, в свою очередь, обусловлены различием коэффициентов термического линейного расширения.

В технической литературе описаны различные схемы сварки разнородных материалов с применением промежуточных вставок. Во многих случаях эксперименты выполнены на образцах, полученных в процессе лазерной сварки заготовок. Экспериментально установлено, что предел прочности образцов, полученных при лазерной сварке титановых сплавов со сталью аустенитного класса через прослойку меди, превышает 340 МПа [13]. Процесс формирования сварного шва сопровождается интенсивным растворением стали в ванне расплавленной меди. При последующем охлаждении в пределах медной матрицы наблюдали пластинчатые включения α -фазы мартенсита [14]. Со стороны титанового сплава, в свою очередь, образуется промежуточный слой толщиной 100...150 мкм, характеризующийся повышенной твердостью (4500 МПа). Его присутствие способствует хрупкому разрушению сварного шва. Полностью исключить образование в зоне сварного соединения хрупких

интерметаллидов, отрицательно влияющих на комплекс механических характеристик композиции, невозможно. В некоторых случаях с целью повышения качества сварных швов и соответствующего улучшения комплекса механических свойств получаемых материалов предлагается использовать промежуточные вставки, состоящие из материалов двух типов [15–17]. Применение при сварке технически чистого титана ВТ1-0 и хромоникелевой стали 12Х18Н10Т композитной вставки «тантал – медь», полученной по технологии сварки взрывом, обеспечило предел прочности сварного соединения на уровне 420 МПа [17]. Это значение существенно выше по сравнению с подобными сварными швами, сформированными с использованием только медного промежуточного слоя.

В настоящей работе изучена возможность использования промежуточных слоев с целью формирования бездефектных сварных соединений при динамическом соударении пластин из титанового сплава ВТ20 и коррозионно-стойкой стали 09Х18Н10Т. Одно из анализируемых в работе технических решений было основано на использовании в качестве прослойки пластин тантала. Второе решение предусматривало сварку заготовок из титанового сплава и хромоникелевой стали с использованием одновременно двух промежуточных слоев – бронзы и тантала.

Материалы и методы исследования

В качестве основных материалов исследования в работе использовали пластины титанового деформируемого сплава марки ВТ20 и хромоникелевой аустенитной стали 09Х18Н10Т толщиной 1 и 3 мм соответственно. Пластины из бериллиевой бронзы БрБ2 и тантала ТВЧ технической чистоты толщиной 200 и 100 мкм соответственно использовали для получения промежуточного слоя между стальными и титановыми заготовками. Химический состав указанных материалов представлен в табл. 1. С целью удаления оксидных пленок поверхности всех пластин перед сваркой подвергали механической зачистке.

Сварку взрывом тонколистовых заготовок и получение слоистых композитов осуществляли в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН по схеме с параллельным расположением пластин. Процесс формирования соединений

Химический состав основных материалов (вес. %)

| Материал | C | Fe | Ti | Mn | Si | Cr | Ni | Al | V | Zr | Mo | Ta | O | Cu | Be |
|-----------|------|-------|-------|------|-----|-------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|
| BT20 | – | – | 88,69 | – | – | – | – | 6,58 | 1,41 | 2,27 | 1,05 | – | – | – | – |
| 09X18H10T | 0,09 | 70,54 | 0,45 | 0,91 | 0,5 | 18,42 | 9,09 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| БрБ2 | – | – | – | – | – | – | 0,27 | – | – | – | – | – | – | 98,16 | 1,56 |
| ТВЧ | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 98,65 | 1,35 | – | – |

из анализируемых материалов осуществлялся за один этап. Пластины из нержавеющей стали при сварке являлись неподвижными, а пластины из титанового сплава – метаемыми. Пластины из бериллиевой бронзы взаимодействовали с легированной сталью, а пластины тантала – с титановым сплавом BT20. Расположенные таким образом материалы позволяют исключить химическое взаимодействие стальных и титановых пластин. Схематически процесс получения четырехслойного композиционного материала представлен на рис. 1. Расстояние между пластинами составляло 1 мм. Функцию взрывчатого вещества выполнял аммонит 6ЖВ, распределенный слоем толщиной 10 мм непосредственно на пластине из хромоникелевой стали.

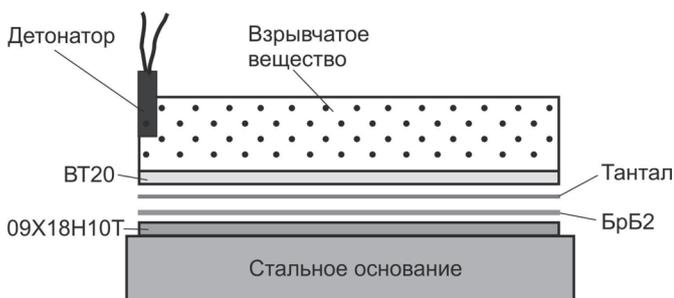
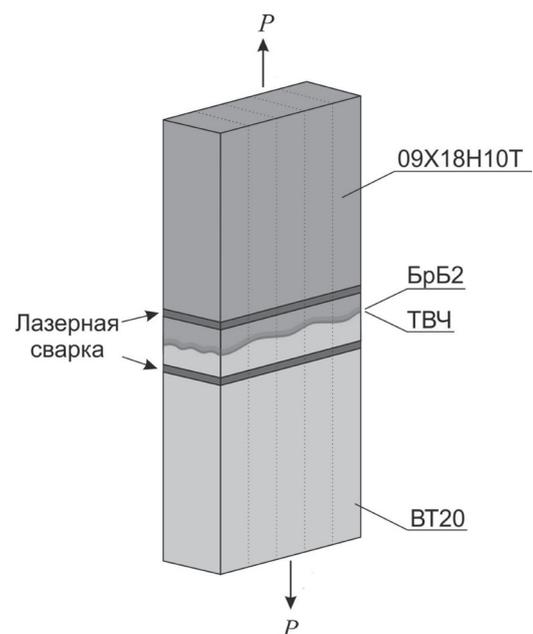


Рис. 1. Схема сварки взрывом четырехслойного композита

Структурные исследования выполнялись на поперечных образцах, вырезанных в направлении, совпадающем с направлением продвижения точки контакта во время динамического взаимодействия металлических заготовок. Полированные поверхности шлифов исследовали методами оптической металлографии на микроскопе Axio Observer Z1m. Для получения подробной информации о структуре сварных швов на различных масштабных уровнях шлифы изучали на растровом электронном микроскопе EVO 50 XVP в режиме обратно отраженных электронов. Наиболее глубокие исследования структуры, сфор-

мированной в зоне соударения пластин, были проведены с использованием методов просвечивающей электронной микроскопии (микроскоп Теснаи G2). Для проведения элементного анализа материалов на границах раздела заготовок использовали энергодисперсионный микроанализатор INCA X-ACT. Кроме того, метод растровой электронной микроскопии был использован при изучении поверхностей разрушения образцов после проведения прочностных испытаний.

Прочностные испытания четырехслойных композитов проводились на универсальной машине Instron 3369 в условиях одноосного растяжения. Скорость перемещения подвижной траверсы составляла 5 мм/с. Для проведения испытаний слоистые пакеты, полученные по технологии сварки взрывом, разрезали на заготовки сечением 50x5 мм. Методом лазерной сварки к ним приваривали дополнительные пластины, выполнявшие при растяжении функции захватов (рис. 2).

Рис. 2. Форма образцов при поперечном расположении слоев относительно приложенной нагрузки (P)

Оптимизация режимов лазерной сварки позволила избежать растрескивания стыка тантал – бронза. Из полученных заготовок вырезали образцы на растяжение. Нагрузка в процессе испытаний прикладывалась перпендикулярно плоскости сварных швов. С использованием этой схемы испытаний на растяжение в работе была определена прочность соединения слоев в композиции, полученной при сварке взрывом разнородных материалов. Для сравнения использовали экспериментальные данные, полученные при испытании аналогичных образцов, сваренных через промежуточную вставку из тантала.

Результаты и обсуждение

Общий вид композиционного материала «титан – нержавеющая сталь» с прослойкой из бронзы и тантала, сформированного по технологии сварки взрывом, представлен на рис. 3. В сваренном взрывом слоистом пакете отсутствуют микродефекты в виде трещин, пор и непроваров, что свидетельствует о прочном металлургическом соединении металлических заготовок. Методом оптической металлографии зафиксирован разный профиль возникших границ раздела, что обусловлено различием физических свойств, в том числе значений плотности свариваемых материалов. Ниже представлены результаты структурного анализа сварных швов полученного композита, выполненного с использованием методов растровой и просвечивающей электронной микроскопии.

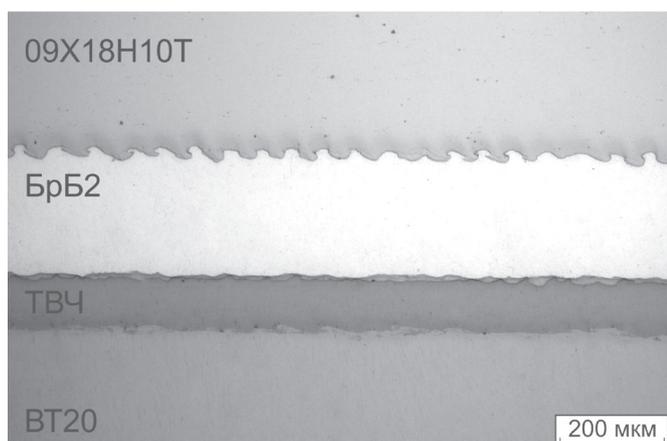


Рис. 3. Общий вид четырехслойного композиционного материала 09X18H10Т-БрБ2-ТВЧ-ВТ20

Сварной шов

«бронза–нержавеющая сталь»

Особенности сопряжения слоев из нержавеющей стали и бронзы отражены на рис. 4, а. Сварной шов имеет характерную для сварки взрывом волнообразную форму. Средние значения длины и периода волны составляют 11,0 и 6,8 мкм соответственно. Явно выраженных следов пластической деформации бронзы в виде вытянутых зерен, непосредственно примыкающих к границе сопряжения, не обнаружено. На границе раздела материалов наблюдаются области переплава, что свидетельствует об интенсивном нагреве поверхностных слоев заготовок при их динамическом взаимодействии. Результаты исследований, проведенных с использованием методов растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа, свидетельствуют о том, что зоны переплава представляют собой мелкодисперсную смесь, состоящую преимущественно из меди (~78 вес.%) и железа (рис. 4, б). Это означает, что при соударении разнородных пластин деформация реализуется главным образом за счет вовлечения в процесс более легкого и пластичного материала [18, 19]. В зонах переплава также была зафиксирована малая концентрация хрома и никеля. Незначительное содержание этих элементов обусловлено кратковременностью процесса сварки взрывом. Эффективного перемешивания всех элементов нержавеющей стали и бронзы не происходит.

Результаты анализа тонкой структуры зоны переплава между бронзой и нержавеющей сталью, выполненного методами просвечивающей электронной микроскопии, представлены на рис. 4 в, г. Область перемешивания разнородных материалов характеризуется мелкокристаллической структурой, размер зеренно-субзеренных построений в которой составляет ~ 50 нм. В пределах некоторых зерен зафиксированы двойники деформационного происхождения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что двойникование является доминирующим механизмом деформации при реализации процесса сварки взрывом. Анализ дифракционных картин показал, что в результате динамического нагружения соударяемых пластин и их последующего высокоскоростного охлаждения в зоне сварного шва произошло образование твердого раствора на основе меди и железа состава $\text{Cu}_{51}\text{Fe}_{49}$. Эта

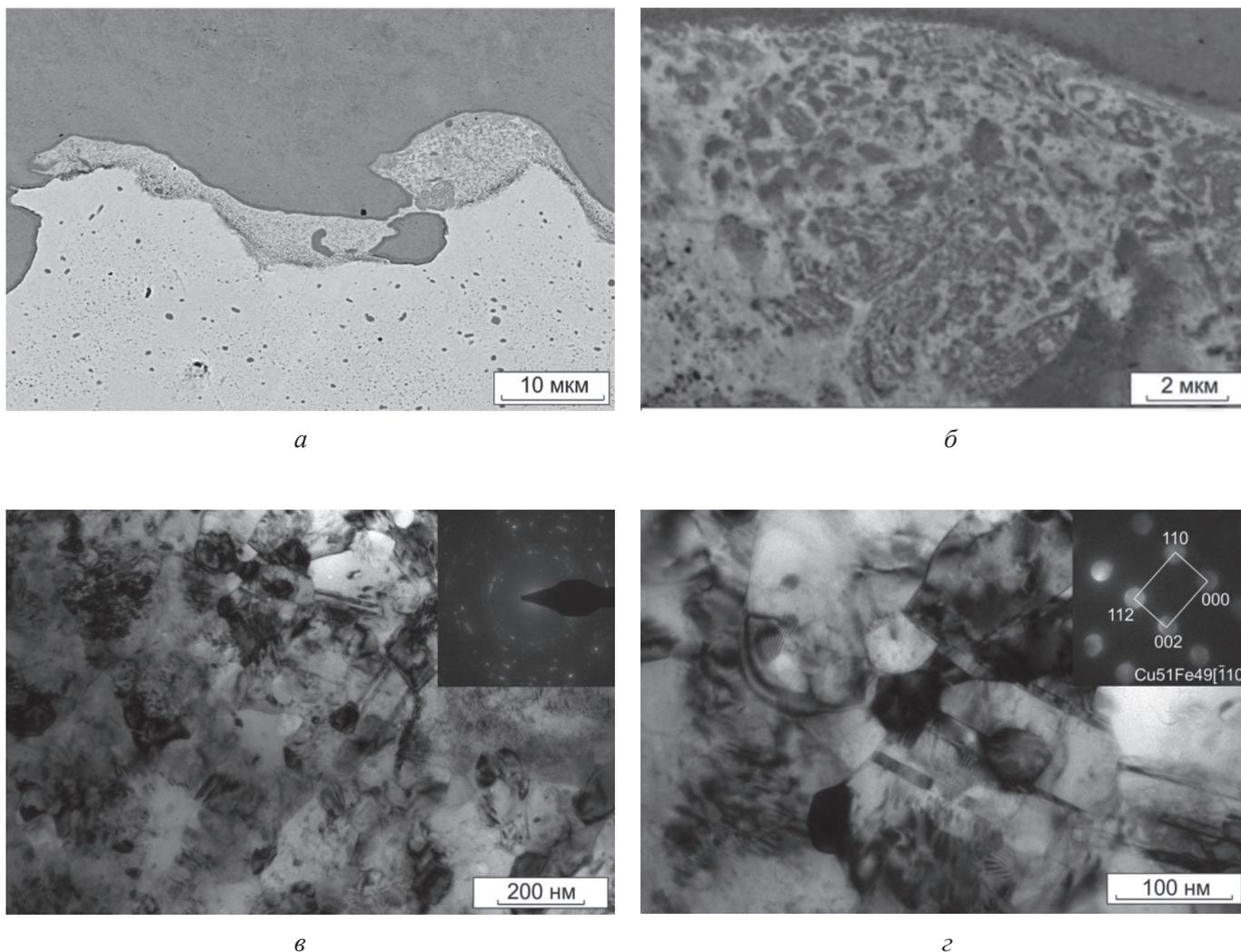


Рис. 4. Общий вид зоны сопряжения пластин из нержавеющей стали и бронзы (а) и тонкое строение зоны переплава (б–д), сформированной в процессе сварки взрывом

фаза является метастабильной и ее образование возможно только при реализации неравновесных условий.

Сварной шов «бронза – тантал»

Особенности структуры, возникшей на границе раздела «бронза – тантал», представлены на рис. 5. Граница сварного соединения имеет преимущественно безволновой характер. На поверхности сопряжения разнородных пластин возник промежуточный слой толщиной 5 мкм (рис. 5, а). Содержание меди и тантала в этом слое составляет 65 и 35 вес. % соответственно.

Тонкое строение зоны сварки бронзы и тантала было изучено методом просвечивающей электронной микроскопии (см. рис. 5). В процессе высокоскоростной деформации в пластине тантала была сформирована вытянутая субмикроструктурная структура с длиной субзерен

~1 мкм и шириной ~300...500 нм. Ориентация субзерен соответствует направлению движения фронта ударной волны в процессе сварки материалов взрывом. В структуре бронзы наблюдаются высокоплотные скопления дислокаций, свидетельствующие о пребывании материала в напряженно-деформированном состоянии.

Внутри областей перемешивания бронзы и тантала содержатся темные, хаотично распределенные в матрице частицы размером 5...60 нм формой, близкой к глобулярной (рис. 5, д). Наблюдаемые выделения представляют собой частицы тугоплавкого тантала, а матричным материалом является медь. Анализ микродифракционных картин, зафиксированных при анализе зон взаимодействия металлических заготовок, показал, что тантал в процессе интенсивной деформации из стабильной ОЦК-фазы переходит в метастабильную ГЦК-фазу, которая в литерату-

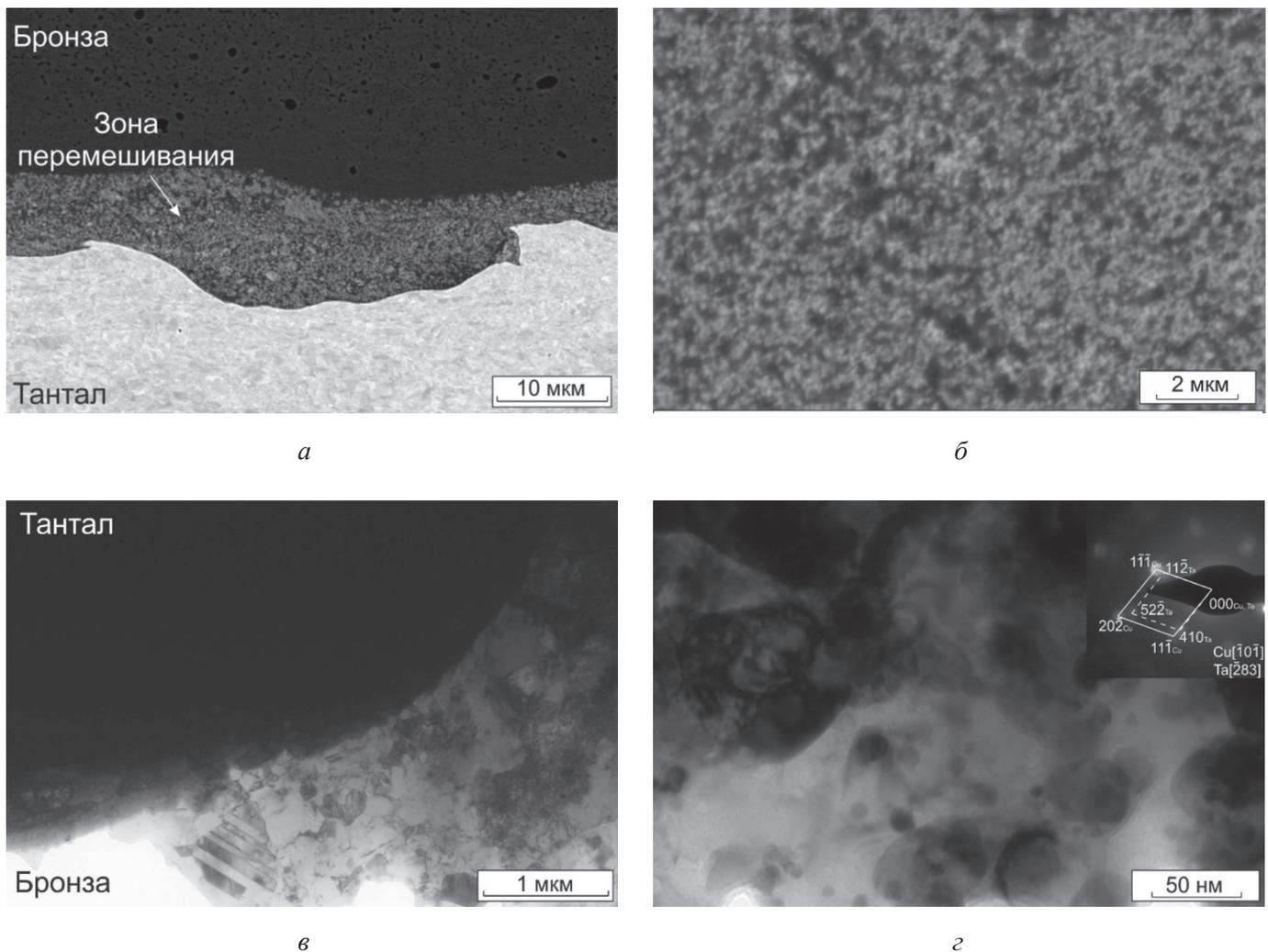


Рис. 5. Граница сварного соединения между бронзой и танталом (а) и тонкое строение области механического перемешивания (б–д)

ре описывается как β -тантал [20]. Таким образом, зона перемешивания материалов имеет структуру в виде смеси частиц β -Та и медной основы.

Сварной шов «тантал – титан»

В зонах соединения пластин тантала и титана в процессе сварки сформировался промежуточный слой толщиной от 2 до 5 мкм (рис. 6). Его структура представляет собой твердый раствор титана и тантала. Концентрация этих элементов в зоне перемешивания составляла 52 и 44 вес. % соответственно. Методом энергодисперсионного анализа зафиксировано также присутствие алюминия и ванадия, входящих в состав титанового сплава.

Механические свойства сварных соединений

Результаты испытаний материалов на растяжение представлены в табл. 2. Анализ экспери-

ментальных данных показал, что в композите, полученном при использовании тантало-бронзовой прослойки, предел прочности на отрыв составляет 420 МПа. Прочность композиционного материала, сваренного через тонколистовую пластину тантала, на 22 % меньше. При этом предел текучести обоих материалов практически одинаков – 250 МПа. Фрактографические исследования показали, что разрушение образцов с однослойной промежуточной вставкой (из тантала) происходило по сварному соединению. Об этом свидетельствует характерный волновой рельеф, возникающий в зоне сварки материалов взрывом (рис. 7, а, б). Вблизи гребней волн присутствуют участки размером до 20 мкм, соответствующие расплавленным зонам на границе между танталом и нержавеющей сталью. Из диаграммы состояния «железо – тантал» следует [21], что эта пара материалов склонна к образованию интерметаллидов типа Fe_2Ta или $FeTa$,

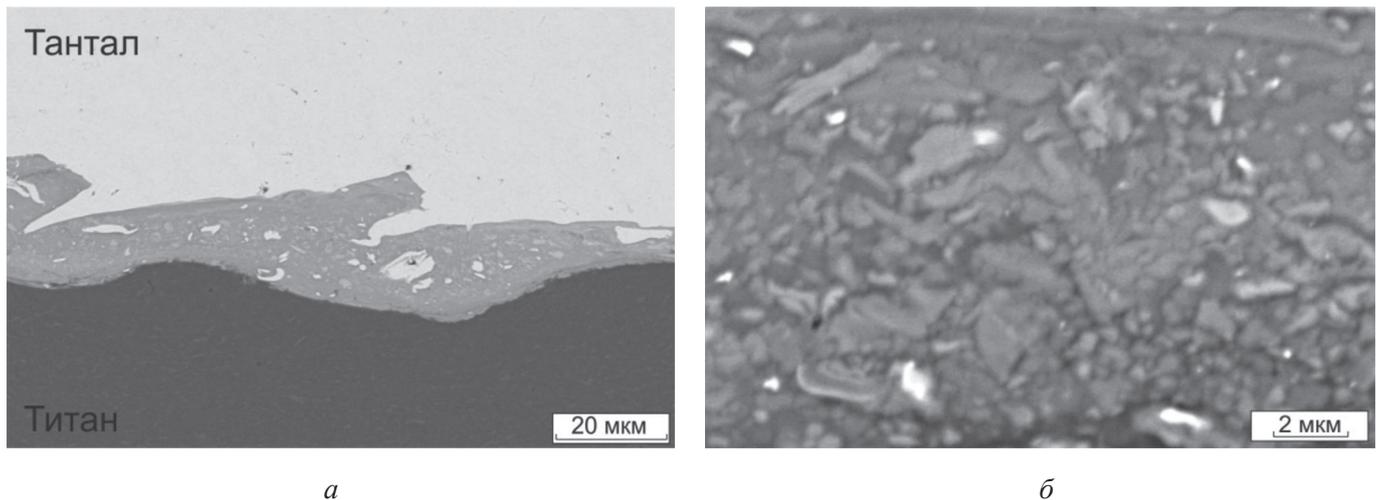


Рис. 6. Строение материала в зоне сопряжения пластин тантала (а) и титанового сплава (б)

Таблица 2

Результаты прочностных испытаний композиционных материалов с одно- и двухслойной промежуточной вставкой

| Исследуемые материалы | Предел прочности, σ_B , МПа | Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа |
|-------------------------|------------------------------------|--|
| 09Х18Н10Т-БрБ2-ТВЧ-ВТ20 | 420 | 250 |
| 09Х18Н10Т-ТВЧ-ВТ20 | 330 | 250 |

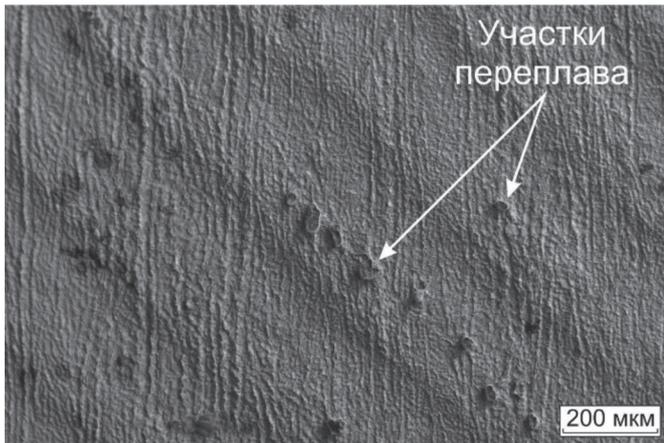
охрупчивающих и ослабляющих сварные соединения. Можно предположить, что в процессе сварки взрывом в тонких поверхностных слоях пластин из нержавеющей стали и тантала были сформированы зоны расплава, при охлаждении которых возникли малопластичные химические соединения на основе тантала и железа. Образование зон расплава подтверждается результатами фрактографических исследований образцов после проведения прочностных испытаний. Состав этих участков соответствует танталу (21 ат. %), железу (37 ат. %), а также титану, никелю и хрому, входящим в состав нержавеющей стали.

Фрактографические исследования композиционных материалов с двухслойной промежуточной вставкой (бронза – тантал) показали, что разрушение происходило не по границе сварного соединения, а по пластине бронзы. Об этом, в частности, свидетельствует характерный чашечный излом поверхности разрушения (рис. 7, в, з). Малоразвитый рельеф чашечного излома является признаком высоких прочностных свойств и ограниченной пластичности бронзы.

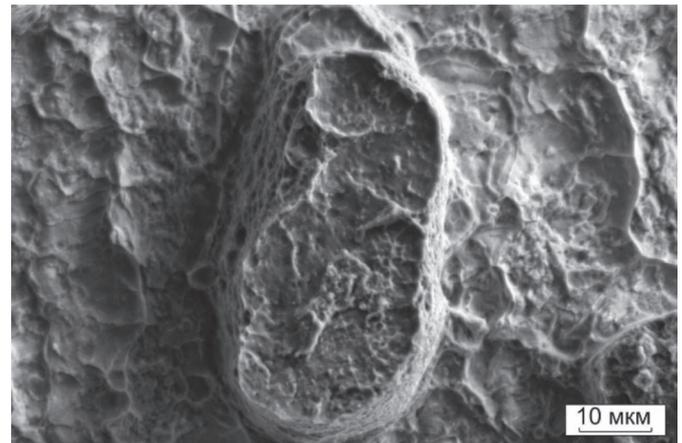
Проведенные механические испытания позволяют сделать вывод о том, что с позиции увеличения прочности соединения разнородных пластин из хромоникелевой стали и титанового сплава ВТ20 рационально введение между ними двухслойных промежуточных вставок «бронза – тантал».

Выводы

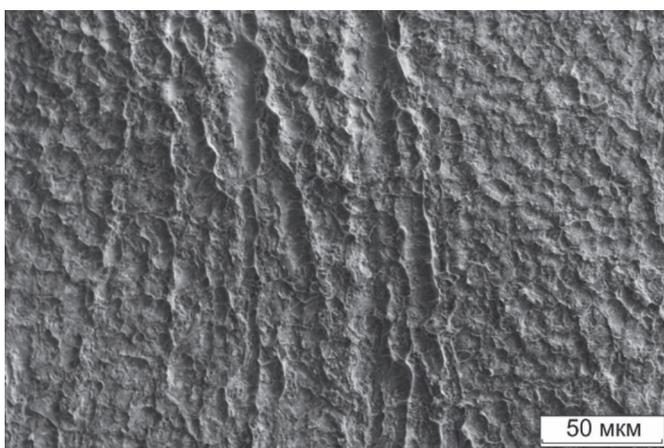
Использование при сварке взрывом заготовок из хромоникелевой аустенитной стали 09Х18Н10Т и титанового сплава ВТ20 дополнительных промежуточных слоев из тонколистовых пластин бронзы и тантала позволяет сформировать качественное соединение сплавов, относящихся к группе трудно свариваемых. Характер взаимодействия металлических материалов способствует формированию при сварке зон расплава, при охлаждении которых образуются твердые растворы на основе компонентов взаимодействующих материалов (бронза – нержавеющая сталь, тантал – титан) и смесь из механически несмешиваемых материалов (бронза – тантал).



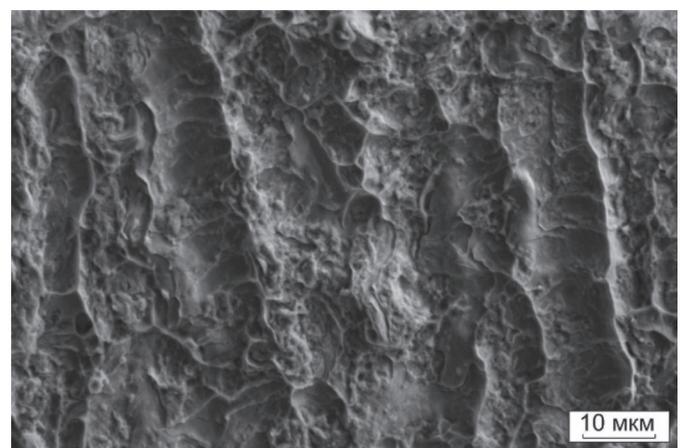
а



б



в



з

Рис. 7. Поверхности разрушения композиционных материалов с промежуточной однослойной вставкой из тантала (а, б) и двухслойной вставкой «бронза – тантал» (в, з)

Формирование сваркой взрывом барьерных слоев «бронза – тантал» в композиционном материале «титановый сплав – нержавеющая сталь» является эффективным решением, позволяющим предотвращать образование хрупких химических соединений в зоне соединения и получать сварные швы, характеризующиеся отсутствием дефектов, снижающих трещиностойкость материалов. Важным преимуществом использования барьерных слоев является возможность повышать прочностные характеристики композитов за счет дополнительного деформационного упрочнения тонколистовых пластин. Экспериментально показано, что с позиции повышения прочности соединения заготовок из разнородных материалов (стали 09Х18Н10Т и сплава ВТ20) двухслойная промежуточная вставка, сочетающая пластины бронзы и тантала, более предпочтительна по сравнению с танталовой вставкой.

Список литературы

1. Титановые сплавы в машиностроении / Б.Б. Че-чулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева, В.Н. Гольдфайн. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
2. *Leyens C., Peters M.* Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2003. – 532 p. – ISBN 978-3-527-30534-6.
3. Наномодифицирование сварных соединений при лазерной сварке металлов и сплавов / А.М. Ори-шич, А.Н. Черепанов, В.Н. Шапеев, Н.Б. Пугачева. – Новосибирск: СО РАН, 2014. – 252 с. – ISBN 978-5-7692-1379-3.
4. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижев-ская. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.
5. Structural and mechanical properties of metallic–intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing / I.A. Bataev, A.A. Bataev, V.I. Mali, D.V. Pavliukova // *Materials and Design*. – 2013. – Vol. 35. – P. 225–234. – doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.030.

6. Неоднородность пластической деформации титановых сплавов при высокоскоростном нагружении в процессе сварки взрывом / Д.В. Павлюкова, И.А. Батаев, В.И. Мали, Т.В. Журавина, Е.Б. Макарова, П.С. Ярцев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2011. – № 2. – С. 46–47.

7. Friction welding of TiNi alloy to stainless steel using Ni interlayer / S. Fukumoto, T. Inoue, S. Mizuno, K. Okita, T. Tomita, A. Yamamoto // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2010. – Vol. 15, iss. 2. – P. 124–130. – doi: 10.1179/136217109X12577814486692.

8. Deng Y., Sheng G., Xu C. Evaluation of the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints of titanium to stainless steel with a pure silver interlayer // *Materials and Design*. – 2013. – Vol. 46. – P. 84–87. – doi: 10.1016/j.matdes.2012.09.058.

9. Diffusion bonding of commercially pure titanium to 304 stainless steel using copper interlayer / S. Kundu, M. Ghosh, A. Laik, K. Bhanumurthy, G.B. Kale, S. Chatterjee // *Materials Science and Engineering: A*. – 2005. – Vol. 407, iss. 1/2. – P. 154–160. – doi: 10.1016/j.msea.2005.07.010.

10. Characterisation of laser welded dissimilar Ti/steel joint using Mg interlayer / M. Gao, S.W. Mei, Z.M. Wang, X.Y. Li, X.Y. Zeng // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2012. – Vol. 17, iss. 4. – P. 269–276. – doi: 10.1179/1362171812Y.0000000002.

11. Elrefaey A., Tillmann W. Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, iss. 5. – P. 2746–2752. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.014.

12. Kundu S., Sam S., Chatterjee S. Interfacial reactions and strength properties in dissimilar titanium alloy/Ni alloy/microduplex stainless steel diffusion bonded joints // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 560. – P. 288–295. – doi: 10.1016/j.msea.2012.09.069.

13. Formation of the structure of titanium and stainless steel in laser welding / S.F. Gnyusov, V.A. Klimenov, Y.V. Alkhimov, A.D. Budnitskii, A.M. Orishich, A.N. Cherepanov, et al. // *Welding*

International. – 2013. – Vol. 27, iss. 4. – P. 295–299. – doi: 10.1080/09507116.2012.715908.

14. Структура и свойства композиции нержавеющей стали – медь – титан, полученной лазерной сваркой / В.Г. Буров, Н.С. Белоусова, А.Н. Черепанов, А.Г. Маликов, Е.В. Мельникова // *Материалы 11 Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе»*. – Новосибирск, 2013. – С. 347–351.

15. Mali V.I., Maliutina Iu.N., Skorokhod K.A. Microstructure and strength of explosively welded titanium/Ni-based alloy composite with Cu/Ta as interlayer // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 21–24. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.21.

16. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Арисова В.Н. Диффузия в слоистых композитах: монография. – Волгоград: Политехник, 2006. – 403 с. – ISBN 5-230-04764-X.

17. Черепанов А.Н., Оришич А.М., Мали В.И. Лазерная сварка нержавеющей стали с титановым сплавом с применением многослойной вставки, полученной взрывом // *Физика горения и взрыва*. – 2014. – Т. 50, № 4. – С. 124–129.

18. Киселев С.П., Мали В.И. Численное и экспериментальное моделирование образования струи при высокоскоростном косом соударении металлических пластин // *Физика горения и взрыва*. – 2012. – Т. 48. – № 2. – С. 100–112.

19. Геометрические преобразования тонколистовых заготовок в процессе сварки взрывом многослойных пакетов / В.И. Мали, И.А. Батаев, А.А. Батаев, Д.В. Павлюкова, Е.А. Приходько // *Физическая мезомеханика*. – 2011. – № 14. – С. 117–124.

20. Thermal stability of a Cu/Ta multilayer: an intriguing interfacial reaction / H.J. Lee, K.W. Kwon, C. Ryu, R. Sinclair // *Acta Materialia*. – 1999. – Vol. 47, iss. 15/16. – P. 3965–3975. – doi: 10.1016/S1359-6454(99)00257-8.

21. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3 т. Т. 2 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с. – ISBN 5-217-01569-1.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 61–71

Welding of dissimilar materials with interlayers employment containing copper and tantalum**Maliutina Iu.N.**¹, Ph.D. student, e-mail: iuliamaliutina@gmail.com**Stepanova N.V.**¹, Junior researcher, e-mail: naty@ya.ru**Cherkov A.G.**², Technologist, e-mail: cher@isp.nsc.ru**Chuchkova L.V.**¹, Student, e-mail: twitty-kun@mail.ru¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the RAS, 13 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation**Abstract**

Investigations of welded joints as well as strength properties of composites formed by explosive welding of plates from titanium alloy VT20 and stainless steel 09Cr18Ni10Ti with interlayer's employment are conducted. The duty of interlayers are performed by the plates of tantalum or «brass – tantalum». It results in the suppression of brittle intermetallic phase's formation in the joining zone and obtaining the welds characterized by lack of defects that reduce fracture strength of materials. By the means of a microstructural analysis it is found that in the bonding zone the copper and iron as well as titanium and tantalum based solid solutions are formed. By the means of a transmission electron microscopy the deformation twins are detected in some grains of melted zone between copper alloy and stainless steel. There is evidence that twinning is the predominant deformation mechanism of explosive welding process. At the welding interface of brass and tantalum plates the structure represents a mechanical mixture of copper and nano dispersive inclusions of β – tantalum. The level of layers joining strength is used as a criterion of mechanical properties of composite materials. The maximum ultimate strength 420 MPa is characteristic of composite materials with interlayers from brass and tantalum. The strength of composite materials with tantalum plate as interlayer is 22 % less than the composite with «brass – tantalum» interlayers. This reduction is probably due to the molten zones formation in the thin surfaces layers of plates between stainless steel and tantalum. During crystallization of these zones the low plastic tantalum and iron based chemical compounds were formed. Insertion of two layered «brass – tantalum» interlayer between stainless steel and titanium alloy is reasonable to increase the strength properties of composites.

Keywords:

explosive welding, interlayer, bonding structure, layers joining strength.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-61-71

References

1. Chechulin B.B., Ushkov S.S., Razuvaeva I.N., Goldfain V.N. *Titanovye splavy v mashinostroenii* [Titanium alloys in engineering]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 248 p.
2. Leyens C., Peters M. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications. Weinheim, Wiley-VCH Verlag, 2003. 532 p. ISBN 978-3-527-30534-6
3. Orishich A.M., Cherepanov A.N., Shapeev V.N., Pugacheva N.B. *Nanomodifitsirovanie svarnykh soedinenii pri lazernoi svarke metallov i splavov* [Nanomodification of welded joints by laser welding of metals and alloys]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2014. 252 p. ISBN 978-5-7692-1379-3
4. Ryabov V.R., Rabkin D.M., Kurochko R.S., Strizhevskaya L.G. *Svarka raznorodnykh metallov i splavov* [Welding of dissimilar metals and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 239 p.
5. Bataev I.A., Bataev A.A., Mali V.I., Pavliukova D.V. Structural and mechanical properties of metallic–intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing. *Materials and Design*, 2013, vol. 35, pp. 225–234. doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.030
6. Pavliukova D.V., Bataev I.A., Mali V.I., Zhuravina T.V., Makarova E.B., Yartsev P.S. Neodnorodnost' plasticheskoi deformatsii titanovykh splavov pri vysokoskoprostnom nagruzhении v protsesse svarki vzryvom [Inhomogeneity of the plastic flow of titanium alloys under the high-speed loading during the explosion welding process]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 2 (51), pp. 46–47.

7. Fukumoto S., Inoue T., Mizuno S., Okita K., Tomita T., Yamamoto A. Friction welding of TiNi alloy to stainless steel using Ni interlayer. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, vol. 15, iss. 2, pp. 124–130. doi: 10.1179/136217109X12577814486692
8. Deng Y., Sheng G., Xu C. Evaluation of the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints of titanium to stainless steel with a pure silver interlayer. *Materials and Design*, 2013, vol. 46, pp. 84–87. doi: 10.1016/j.matdes.2012.09.058
9. Kundu S., Ghosh M., Laik A., Bhanumurthy K., Kale G.B., Chatterjee S. Diffusion bonding of commercially pure titanium to 304 stainless steel using copper interlayer. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 407, iss. 1–2, pp. 154–160. doi: 10.1016/j.msea.2005.07.010
10. Gao M., Mei S.W., Wang Z.M., Li X.Y., Zeng X.Y. Characterisation of laser welded dissimilar Ti/steel joint using Mg interlayer. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, vol. 17, iss. 4, pp. 269–276. doi: 10.1179/1362171812Y0000000002
11. Elrefaey A., Tillmann W. Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 5, pp. 2746–2752. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.014
12. Kundu S., Sam S., Chatterjee S. Interfacial reactions and strength properties in dissimilar titanium alloy/Ni alloy/microduplex stainless steel diffusion bonded joints. *Materials Science and Engineering: A*. 2013, vol. 560, pp. 288–295. doi: 10.1016/j.msea.2012.09.069
13. Gnyusov S.F., Klimenov V.A., Alkhimov Y.V., Budnitskii A.D., Orishich A.M., Cherepanov A.N., Afonin Yu.V. Formation of the structure of titanium and stainless steel in laser welding. *Welding International*, 2013, vol. 27, iss. 4, pp. 295–299. doi: 10.1080/09507116.2012.715908
14. Burov V.G., Belousova N.S., Cherepanov A.N., Malikov A.G., Mel'nikova E.V. [Structure and properties of stainless steel – copper – titanium composite produced by laser welding]. *Materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Problemy povysheniya effektivnosti metalloobrabotki v promyshlennosti na sovremennom etape"* [Proceedings of the 11th All-Russian scientific and practical conference “Problems of increasing the efficiency in the metalworking industry at the present stage”]. Novosibirsk, 2013, pp. 347–351. (In Russian)
15. Mali V.I., Maliutina Iu.N., Skorokhod K.A. Microstructure and strength of explosively welded titanium/Ni-based alloy composite with Cu/Ta as interlayer. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 21–24. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.21
16. Trykov Yu.P., Gurevich L.M., Arisova V.N. *Diffuziya v sloistykh kompozitakh* [Diffusion in layered composites]. Volgograd, Politehnik Publ., 2006, 403 p. ISBN 5-230-04764-X
17. Cherepanov A.N., Orishich A.M., Mali V.I. Lazernaya svarka nerzhavayushchei stali s titanovym splavom s primeneniem mnogoslainoi vstavki, poluchennoi vzryvom [Laser welding of stainless steel with a titanium alloy with the use of a multilayer insert obtained in an explosion]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 124–129. (In Russian)
18. Kiselev S.P., Mali V.I. Chislennoe i eksperimental'noe modelirovanie obrazovaniya strui pri vysokoskorostnom kosom soudarenii metallicheskih plastin [Numerical and experimental modeling of jet formation during a high-velocity oblique impact of metal plates]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 100–112. (In Russian)
19. Mali V.I., Bataev I.A., Bataev A.A., Pavliukova D.V., Prihod'ko E.A., Esikov M.A. Geometricheskie preobrazovaniya tonkolistovykh zagotovok v protsesse svarki vzryvom mnogoslainykh paketov [Geometrical transformation of thin sheet billets in the process of explosion welding of multilayered laminals]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2011, vol. 14, no. 6, pp. 117–124. (In Russian)
20. Lee H.J., Kwon K.W., Ryu C., Sinclair R. Thermal stability of a Cu/Ta multilayer: an intriguing interfacial reaction. *Acta Materialia*, 1999, vol. 47, iss. 15–16, pp. 3965–3975. doi: 10.1016/S1359-6454(99)00257-8
21. Lyakishev N.P., ed. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem. Spravochnik. V 3 t. T. 2* [Phase diagrams of binary metallic systems. Reference book. In 3 vol. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997. 1024 p. ISBN 5-217-01569-1

Funding

This study was supported by Russian Science Foundation (project No. 15-19-00230).

Article history:

Received 16 July 2015

Revised 17 August 2015

Accepted 20 October 2015