

УДК 669.295 : 621.791

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-71-78

Перспективы получения и применения гибридных конструкций и композитов из титановых сплавов и нитинола

Обзор

© 2017 г. **К.С. Сенкевич**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ)

Статья поступила в редакцию 26.10.16 г., доработана 18.12.16 г., подписана в печать 20.12.16 г.

Сплавы на основе титана нашли широкое применение в различных областях промышленности благодаря сочетанию высоких механических свойств и низкой плотности. Наиболее эффективно эти качества используются при создании изделий для авиации и медицинских имплантатов. Сплавы с эффектом памяти формы на основе никелида титана (нитинол) являются перспективными материалами для изготовления сверхупругих медицинских имплантатов и инструментов, а также термомеханических элементов авиационной и космической техники. Совместное применение этих материалов в качестве элементов гибридных конструкций или композиционных материалов перспективно для создания изделий с уникальным комплексом свойств – высокие механические характеристики, сверхупругость и демпфирующая способность, повышенная износостойкость, а также термомеханическая память. Проанализированы основные свойства сплавов на основе никелида титана и наиболее широко распространенного титанового сплава ВТ6 (Ti–6Al–4V). Показано, что сочетание функциональных свойств нитинола и конструктивных свойств титановых сплавов в единой конструкции позволит получать разнообразные изделия, прежде всего для использования в аэрокосмической и медицинских областях. Рассмотрены возможности создания высокопрочных неразъемных соединений из титановых сплавов и нитинола. Для получения таких конструкций в настоящее время исследуются различные способы сварки (в основном лазерная и диффузионная) и пайки, а наибольшие возможности связаны с использованием промежуточных прослоек, которые позволят избежать формирования хрупких интерметаллических фаз в неразъемных соединениях.

Ключевые слова: титановые сплавы, нитинол, сплавы с эффектом памяти формы, гибридные конструкции, композиты, сварка, пайка.

Сенкевич К.С. – канд. техн. наук, инженер кафедры материаловедения и термической обработки материалов МАИ (125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4). Email: senkevichk@yandex.ru.

Для цитирования: Сенкевич К.С. Перспективы получения и применения гибридных конструкций и композитов из титановых сплавов и нитинола: Обзор // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. No. 4. С. 71–78. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-71-78.

Senkevich K.S.

Prospects of production and application of titanium alloy and nitinol hybrid structures and composites. Overview

Titanium-based alloys are widely used in various industries thanks to a combination of high mechanical properties and low density. The most effective use of these properties is making aircraft components and medical implants. Shape memory alloys based on titanium nickelide (nitinol) are promising materials for production of superelastic medical implants and tools as well as thermo-mechanical elements in aerospace technology. The combination of these materials used as the elements of hybrid structures or composites can allow the creation of products with a unique set of properties such as high mechanical properties, superelasticity and damping capacity, increased wear resistance, and thermal shape memory. The basic properties of alloys based on titanium nickelide and the most widely used titanium alloy VT6 (Ti–6Al–4V) are analyzed. It is found that the functional properties of nitinol combined with structural properties of titanium alloys in an integrated structure make it possible to make a variety of products, especially for aerospace and medical industries. The possibilities to make high-strength permanent joints of titanium alloys with nitinol are analyzed. Various methods of welding (generally laser and diffusion welding) and soldering are currently investigated in order to produce such structures, and best prospects are associated with the use of intermediate layers that eliminate brittle intermetallic phase formation in the permanent joints.

Keywords: titanium alloys, nitinol, shape memory alloys, hybrid structures, composites, welding, soldering.

Senkevich K.S. – Cand. Sci. (Tech.), engineer of the Department of material science and heat treatment materials, Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Russia, Moscow, Volokolamskoe highway, 4). Email: senkevichk@yandex.ru.

Citation: Senkevich K.S. Perspektivy polucheniya i primeneniya gibridnykh konstruktssii i kompozitov iz titanovykh splavov i nitinola: Obzor. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2017. No. 4. P. 71–78.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-71-78.

Введение

Появление новых изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками возможно лишь на базе разработки и внедрения новых материалов. Одно из эффективных направлений в этой области — создание композиционных материалов и гибридных конструкций, сочетающих в себе различные, порой взаимоисключающие свойства отдельных элементов — например, такие, как упругость и пластичность. К числу наиболее интересных материалов, применение которых может значительно расширить возможности существующих изделий, относятся сплавы с эффектом памяти формы на основе никелида титана (нитинол). Наличие эффекта памяти формы позволяет создавать гибридные конструкции, совершающие механическую работу в заданных температурных условиях, а сверхупругое поведение — композиционные материалы с высокими демпфирующими свойствами [1–4]. Активно исследуются методы получения и физико-механические свойства сварных конструкций из нитинола и различных марок сталей, которые используются для изготовления термомеханических силовых элементов, сочетающих высокую прочность стали со сверхупругим поведением нитинола. Благодаря таким соединениям обеспечивается экономия дорогостоящего нитинола, так как он будет применяться только в отдельных «рабочих» узлах конструкций. В качестве упрочнителя и упругого компонента композиционных материалов нитинол представляет наибольший интерес в сочетании с алюминием и полимерами [1, 2]. Рассматриваются возможности получения композитов из нитинола и керамики на основе Ti_3SiC_2 диффузионной сваркой [4].

Перспективным, но малоизученным направлением в области создания композиционных материалов и гибридных конструкций является разработка методов получения неразъемных соединений нитинола с титановыми сплавами. Цель настоящей работы — анализ существующих способов соединения титановых сплавов с нитинолом

и определение перспективных областей применения композиционных материалов и гибридных конструкций, создаваемых на основе данных материалов.

Анализ информационных источников

Свойства элементов гибридных конструкций и композитов

Целью создания конструкций являются повышение комплекса эксплуатационных свойств существующих изделий, расширение области их использования, а также разработка новых изделий с принципиально новыми служебными характеристиками. Для этого требуется проанализировать свойства рассматриваемых материалов с точки зрения возможности их совместного применения.

Основные характеристики сплавов на основе никелида титана, представляющие интерес для их практического использования, — это сверхупругое поведение и возможность реализации эффекта памяти формы при заданных температурах [5]. Сочетание этих качеств определило применение данных сплавов в областях промышленности, где они незаменимы, — термомеханические конструкции с эффектом памяти формы в различных технических устройствах в машиностроении и авиации, сверхупругие имплантаты в медицине.

Высокие механические свойства и низкая плотность титановых сплавов обусловили их широкое использование в самых разнообразных областях, из которых наиболее важной является авиационная промышленность [6]. Также они активно применяются при создании медицинских имплантатов, так как обладают хорошей биологической совместимостью и коррозионной стойкостью в среде организма человека [7].

Таким образом, для рассматриваемых материалов общие области использования — это производство медицинских имплантатов и авиакосмической техники. В таблице представлены неко-

Свойства титанового сплава ВТ6 и сплавов на основе никелида титана [8–10]

Сплав	Предел прочности (σ_B), МПа	Модуль Юнга, ГПа	Максимальная восстанавливаемая упругая/сверхупругая деформация, %
ВТ-6	834–1254	115	1,2
Нитинол	900–2000 (для деформированного состояния)	70–90 (аустенит при 150 °С)	10–12

торые свойства сплавов на основе никелида титана и наиболее распространенного титанового сплава ВТ6.

Можно отметить, что нитинол и титановый сплав обладают высокими прочностными свойствами. При этом они существенно отличаются характеристиками сверхупругого поведения при деформации. Таким образом, возможно создание неразъемных конструкций типа нитинол—титановый сплав, которые способны выдерживать высокие механические нагрузки. При этом нитиноловый элемент, реализуя эффект памяти формы и сверхупругое поведение при деформации, выполняет термомеханическую работу в заданном температурном интервале. Высокие характеристики биологической совместимости и коррозионной стойкости в среде организма человека титановых сплавов и нитинола свидетельствуют о перспективности применения гибридных конструкций из них в медицине.

Применение конструкций типа нитинол—титановый сплав

Анализ информационных источников показал, что, несмотря на заманчивые возможности использования таких материалов и конструкций в промышленности, имеется мало примеров их практического применения. Известны лишь отдельные запатентованные разработки и результаты научных экспериментов. Например, в патенте [11] показана возможность создания способом диффузионной сварки лопатки турбины, выполненной из титанового сплава, плакированного слоем из сплава NiTiCr, который должен способствовать повышению износостойкости изделия. В работе [12] изучается возможность получения покрытия из нитинола на изделии из сплава Ti—6Al—4V в процессе горячего изостатического прессования. Высокие демпфирующие возможности сверхупругого нитинола позволяют рассматривать его как элемент броневого защиты в изделии, состоящем из слоев нитинола и различных титановых сплавов [13].

В настоящий момент исследуется и уже применяется в качестве медицинского устройства для эндопротезирования позвоночника транспедикулярный аппарат, включающий титановые винты в качестве крепежа и сверхупругие нитиновые балки, выполняющие функцию упругих элементов, по биомеханическому поведению соответствующие замещаемым костным структурам позвоночника [14]. Однако аппарат является разъемным, с механическим соединением, и возможность замены его сварным или паяным не рассматривалась.

Изучаются механическое поведение при деформации и биологическая совместимость с организмом человека композиционного материала TiAlV/Al₂O₃/TiNi [15].

В работе [16] показано, что для более широкого использования сплавов на основе никелида титана в авиационной технике большое внимание уделяется важной технологической задаче их соединения с разнородными материалами, в частности титановыми сплавами. Наиболее интересным примером разработки и перспективного практического применения в авиации гибридных сварных конструкций типа нитинол—титановый сплав являются совместные исследования фирмы «Роллс-Ройс» и университета Крэнфилда по созданию адаптивного зубчатого сопла ГТД [17]. Оно представляет собой гибридную неразъемную конструкцию, состоящую из монолитной основы из сплава Ti—6Al—4V и присоединенного методом сварки или пайки тонкого листа из нитинола, который при заданной температуре реализует эффект памяти формы и изменяет форму сопла. Исследования включали разработку методов соединения нитинола и титанового сплава Ti—6Al—4V различными методами пайки и сварки. Отмечена перспективность получения таких конструкций, прежде всего методом пайки, обеспечивающим наибольшую прочность.

Таким образом, проведенный анализ уже существующих патентованных разработок и отдельных экспериментальных работ показывает, что в

настоящее время рассматриваются самые разнообразные варианты сочетания в перспективных изделиях титановых сплавов и нитинола.

Анализ способов соединения нитинола с титановыми сплавами

При сварке разнородных материалов основной причиной пониженной прочности сварных соединений является образование хрупких интерметаллидных фаз в случае отсутствия взаимной растворимости свариваемых материалов. При сварке сплавов на основе TiNi с титаном и его сплавами в зоне соединения всегда возникает переходная зона, обогащенная титаном и представленная фазой Ti_2Ni , обладающей более высокой твердостью, чем матрица сплава из TiNi. Успешность получения высокопрочных неразъемных соединений титана с нитинолом связана с возможностью избежать формирования такой хрупкой интерметаллидной зоны.

Известно, что наиболее производительными являются различные способы сварки плавлением, однако при их использовании в зоне соединения всегда образуется переходная литая сварная зона, которая может обладать повышенной, по сравнению с основой соединяемых материалов, хрупкостью. Это сильно снижает прочность сварных соединений, особенно в случае, когда одним из соединяемых материалов является интерметаллидный сплав, уже обладающий невысокой пластичностью. Для соединения нитинола с титаном и его сплавами исследовали способ лазерной сварки [16, 17]. Установлено, что получению качественных сварных соединений препятствуют формирование литой дендритной микроструктуры в сварном шве и изменение его фазового состава. Способ лазерной сварки позволяет получить сварное соединение нитинола с титаном с прочностью при растяжении 109 МПа и со сплавом Ti—6Al—4V с прочностью 28,4 МПа.

Аналогичные недостатки обнаружены и при применении электронно-лучевой и аргонодуговой сварки. В случае ручной дуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в среде инертного защитного газа было получено сварное соединение нитинола с титановым сплавом с прочностью при растяжении 108 МПа [17]. У сварных соединений, полученных электронно-лучевой сваркой, этот показатель составил 70,85 МПа [17]. Использование промежуточной прослойки из меди позволяет избежать образования нежела-

тельных хрупких фаз в зоне сварки, и прочность сварки при растяжении достигает 300 МПа [18].

Широкие возможности варьирования фазового и химического составов зоны соединения материалов обеспечиваются применением пайки. В работах [17, 19] показаны примеры получения паяных соединений нитинола со сплавом Ti—6Al—4V с помощью различных видов припоев. Так, использование медно-серебряного припоя BAg-8 позволило получить неразъемное соединение с максимальной прочностью при сдвиге, равной 219 МПа [19]. Была изучена пайка нитинола со сплавом Ti—6Al—4V через припой состава TiCuNi, TiCuNi60 и сплав TiNi67. Максимальная прочность на сдвиг паяных соединений, полученная с применением припоя TiCuNi60, составила около 30 МПа [17]. Таким образом, от правильного выбора материала припоя значительно зависит качество неразъемного соединения нитинола с титаном и его сплавами.

Наиболее успешно разнородные металлы соединяются различными методами сварки в твердой фазе, которые позволяют избежать расплавления в зоне соединения, а также обеспечить контролируемую диффузию атомов через границу раздела. Применительно к соединению пары нитинол—титановый сплав уже рассмотрены методы диффузионной сварки и сварки трением [17, 20]. Соединение в твердой фазе способом сварки трением не позволило получить качественное сварное соединение нитинола со сплавом Ti—6Al—4V, так как было установлено, что происходит в основном механическое перемешивание соединяемых материалов за счет их пластической деформации [17].

Варьирование различных режимов диффузионной сварки (температуры и времени) показало возможность управления толщиной диффузионной зоны между соединяемыми сплавами, что позволило добиться максимальной прочности соединения при сдвиге, равной 180 МПа [20]. При этом, так же как и при сварке плавлением, в зоне диффузионной сварки формируется область, обогащенная титаном и соответствующая соединению Ti_2Ni (рис. 1, а). Однако за счет взаимной диффузии из титанового сплава ВТ6 в нитинол формирование этой зоны происходит плавно, что видно при сравнении микротвердости основ соединяемых сплавов и различных участков диффузионной зоны (рис. 1, б). Добиться такого результата сварка плавлением не позволяет. В работе [21] показано, что при использовании дуговой сварки между титаном и нитинолом формируется литая переходная зона,

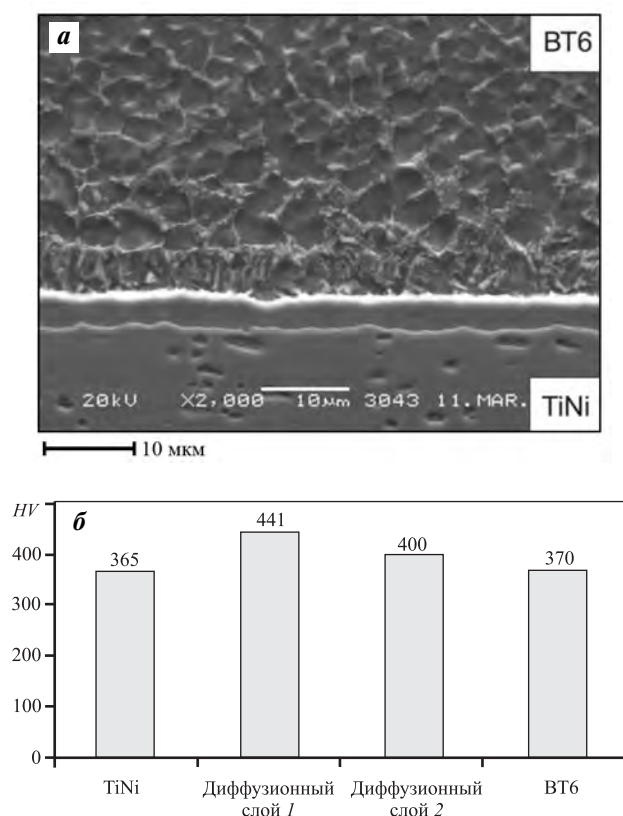


Рис. 1. Микроструктура зоны диффузионной сварки титанового сплава BT6 и сплава TiNi (а) и распределение микротвердости (б) [20]

имеющая дендритную структуру и отличающаяся по твердости от основы соединяемых материалов почти в 3 раза. Такое же значительное различие в твердости основ и зоны сварки наблюдается при лазерной сварке титанового сплава Ti—6Al—4V и нитинола [18].

Дополнительные возможности оптимизации режимов диффузионной сварки появляются в случае субмикро- и наноструктурного состояний соединяемых сплавов. Использование наноструктурного состояния нитинола [22] и сплава BT6 (Ti—6Al—4V) [23, 24] позволило снизить температуру диффузионной сварки с 900—950 до 750 °C (рис. 2). Показано (см. рис. 2), что уже при температуре 750 °C наблюдается формирование диффузионного соединения. Это связано с повышенной диффузионной свариваемостью титанового сплава BT6 в субмикрокристаллическом состоянии (его высокой пластичностью и формированием физико-механического контакта в зоне сварки в условиях сверхпластичности) и более активным протеканием зернограницной диффузии в процессе сварки [25].

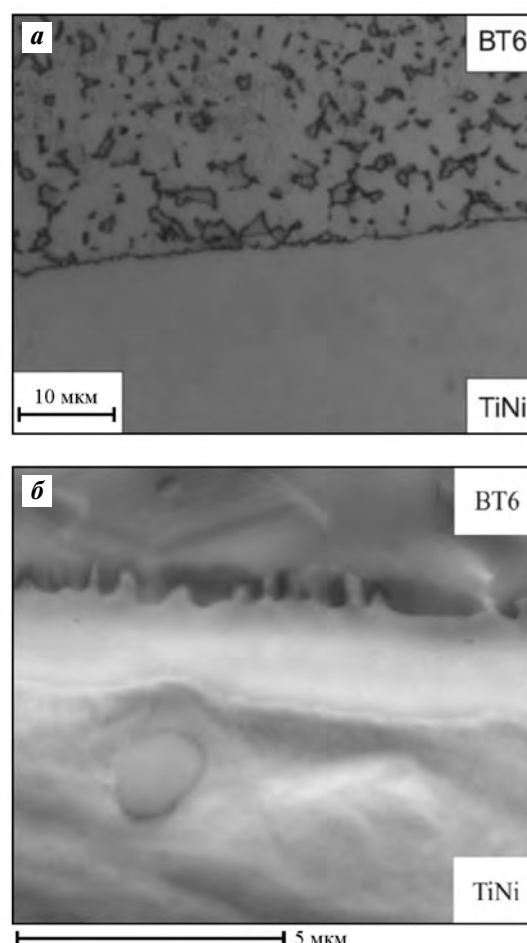


Рис. 2. Зона диффузионной сварки субмикрокристаллического сплава BT6 и нитинола, полученная при 750 °C, снятая на оптическом (а) и сканирующем электронном (б) микроскопах¹

Существует возможность управления фазовым составом диффузионной зоны соединяемых материалов за счет применения промежуточных прослоек [26]. В работе [27] изучены особенности формирования зоны диффузионной сварки между нитинолом и титановым сплавом Ti—6Al—4V, соединяемыми через напыленные чередующиеся нанослои титана и никеля. Показан механизм образования многослойной и многофазной диффузионной зоны, состоящей из различных интерметаллидных фаз, однако наличие этой зоны не способствует получению высоких механических свойств диффузионных соединений [28].

¹ Исследование проводилось совместно с Н.В. Лопатыным в лаборатории объемных наноструктурных материалов БелГУ [22].

Подбор оптимальных составов промежуточных прослоек, позволяющих избежать возникновения хрупких интерметаллидных фаз между титаном и нитинолом, является актуальной задачей.

Выводы

1. В настоящее время активно изучаются возможности получения гибридных конструкций и композитов на основе сочетания нитинола с титановыми сплавами. Наиболее перспективно их применение в авиационной технике в качестве термомеханических конструкций, работающих при заданной температуре за счет проявления эффекта памяти формы у нитинола. Кроме того, существует возможность создания медицинских имплантатов, обладающих высокими механическими свойствами, присущими титановым сплавам и нитинолу, а также характеризующихся сверхупругим поведением отдельных элементов конструкций из нитинола.

2. Для соединения нитинола с титановыми сплавами рассматриваются практически все существующие методы сварки, а также пайка. Получению высокопрочных сварных соединений нитинола с титаном препятствует образование промежуточной зоны, обогащенной хрупким интерметаллидом Ti_2Ni . Особенно это критично при использовании способов сварки плавлением, так как при этом дополнительно формируется литая сварная зона с дендритной микроструктурой. Применение диффузионной сварки позволяет обеспечить плавный переход между соединяемыми материалами и переходной зоной за счет взаимной диффузии составляющих компонентов, что обеспечивает повышение прочности соединения по сравнению со сваркой плавлением.

3. Для получения высокопрочных неразъемных соединений нитинола с титановыми сплавами необходимо избегать формирования в зоне соединения фазы Ti_2Ni , что обеспечивается при использовании промежуточных прослоек или припоя. Для соединения элементов медицинских имплантатов необходим также анализ биологической совместимости материалов припоя и промежуточных прослоек с организмом человека.

Литература

1. Wei Z.G., Tang C.Y., Lee W.B. Design and fabrication of intelligent composites based on shape memory alloys // J. Mater. Process. Tech. 1997. Vol. 69 (1–3). P. 68–74.
2. Neuking K., Abu-Zarifa A., Youcheu-Kemtchou S., Eggele G. Polymer/NiTi-composites: Fundamental aspects, processing and properties // Adv. Eng. Mater. 2005. Vol. 7. Iss. 11. P. 1014–1023.
3. Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник (мл.) В.В., Рубаник О.Е. Влияние отжига на мартенситные превращения в биметаллическом композите «сталь — сплав TiNi», полученном сваркой взрывом // Металловедение и терм. обраб. металлов. 2010. No. 9. С. 30–34.
4. Kothalkar A.D., Benitez R., Hu L., Radovic M., Karaman I. Thermo-mechanical response and damping behavior of shape memory alloy-MAX phase composites // Metall. Mater. Trans. A. 2014. Vol. 45. Iss. 5. P. 2646–2658.
5. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys // Progr. Mater. Sci. 2005. Vol. 50. P. 511–678.
6. Колачев Б.А., Елисеев Ю.С., Братухин А.Г., Талалаев В.Д. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники. М.: МАИ, 2001.
7. Geetha M., Singh A.K., Asokamani R., Gogia A.K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants: A review // Progr. Mater. Sci. 2009. Vol. 54. Iss. 3. P. 397–425.
8. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИС—МАТИ, 2009.
9. Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Орешко Е.И., Бурнаев А.В. Повышение характеристик работоспособности медицинских имплантатов из сплавов титана и никелида титана методом термической обработки // Технол. легких сплавов. 2013. No. 3. С. 40–46.
10. Муслов С.А., Андреев В.А., Бондарев А.Б., Сухочев П.Ю. Сверхэластичные сплавы с эффектом памяти формы в науке, технике и медицине: Справ.-библ. изд. М.: Фолиум, 2010.
11. Gigliotti M.F.X., Hardwicke Jr.C.U., Jiang L., Short J.W., Lipkin D.M., Blank J.P., Anand K. Erosion and wear resistant protective structures for turbine engine components: Pat. 7300708 (USA). 2007.
12. Cai C., Song B., Wei O., Xue P., Wen S., Liu J., Shi Y. In-situ integrated fabrication of Ti–Ni coating during hot isostatic pressing of Ti_6Al_4V parts: Microstructure and tribological behavior // Surf. Coat. Tech. 2015. Vol. 280. P. 194–200.
13. Reichman S.H. Light weight armor with repeat hit and high energy absorption capabilities: Pat. 20030159575 (USA). 2006.
14. Левченко С.К., Древаль О.Н., Ильин А.А., Коллеров М.Ю., Рынков И.П., Басков А.В., Каримов А.А. Клинические

- исследования функциональной транспедикулярной стабилизации позвоночника // *Вопр. нейрохир.* 2009. No. 4. С. 31—35.
15. Filip P., Musialek J., Michalek K., Yen M., Mazanec K. TiAlV/Al₂O₃/TiNi shape memory alloy smart composite biomaterials for orthopedic surgery // *Mater. Sci. Eng. A.* 1999. Vol. 273—275. P. 769—774.
 16. Chau E.T.F., Friend C.M., Allen D.M., Hora J., Webster J.R. A technical and economic appraisal of shape memory alloys for aerospace applications // *Mater. Sci. Eng. A.* 2006. Vol. 438—440. P. 589—592.
 17. Chau E.T.F. Comparative study of joining methods for a SMART aerospace application: Eng. doctorate thesis. Cranfield University, 2007.
 18. Zoeram A.S., Akbari Mousavi S.A.A. Laser welding of Ti—6Al—4V to nitinol // *Mater. Design.* 2014. Vol. 61. P. 185—190.
 19. Shiue R.K., Wu Shyi-Kaan. Infrared brazing Ti₅₀Ni₅₀ and Ti—6Al—4V using the BAg-8 Braze alloy // *Mater. Trans.* 2005. Vol. 46. No. 9. P. 2057—2066.
 20. Сенкевич К.С., Князев М.И., Рунова Ю.Э., Шляпин С.Д. Особенности формирования диффузионного соединения TiNi—ВТ6 // *Металловедение и терм. обраб. металлов.* 2013. No. 8. С. 21—24.
 21. Ivanovna A.K., Hirata V.M.L., Lopez E.O., Figueroa R.R., Miramontes J.R. Microstructural and mechanical characterization of nitinol GTAW and FB welds of titanium // *Mater. Sci. Forum.* 2006. Vol. 509. P. 165—170.
 22. Мухаметрахимов М.Х. Твердофазное соединение титанового сплава ВТ6 через наноструктурированную прослойку из сплава TiNi // Сб. матер. V Междунар. школы «Физическое материаловедение» (26 сент. — 1 окт. 2011 г.). Тольятти: ТГУ, 2013. С. 128—131.
 23. Лопатин Н.В., Сенкевич К.С., Кудрявцев Е.А., Выдумкина С.В. Влияние микроструктуры титанового сплава ВТ6 на свойства сварных соединений, полученных диффузионной сваркой // *Титан.* 2014. No. 1. С. 41—50.
 24. Lopatin N., Senkevich K., Kudryavtsev E.A. Effect of microstructure state of titanium alloy Ti—6Al—4V on structure and mechanical properties of joints produced by diffusion bonding process // *Mater. Sci. Forum.* 2014. Vol. 783—786. P. 2659—2664.
 25. Лутфуллин Р.Я. Сверхпластичность и твердофазное соединение наноструктурированных материалов (Обзор). Ч. II. Физическая модель формирования твердофазного соединения в титановом сплаве в условиях низкотемпературной сверхпластичности // *Письма о материалах.* 2011. Т. 1. No. 2. С. 88—91.
 26. Казакова Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. М.: Машиностроение, 1981.
 27. Simões S., Viana F., Ramos A.S., Vieira M.T., Vieira M.F. Reaction zone formed during diffusion bonding of TiNi to Ti₆Al₄V using Ni/Ti nanolayers // *J. Mater. Sci.* 2013. Vol. 48. Iss. 21. P. 7718—7727.
 28. Emadinia O., Simões S., Viana F.M., Vieira F., Cavaleiro A.J., Ramos A.S., Vieira M.T. Cold rolled versus sputtered Ni/Ti multilayers for reaction-assisted diffusion bonding // *Weld World.* 2016. Vol. 60. P. 337—344.

References

1. Wei Z.G., Tang C.Y., Lee W.B. Design and fabrication of intelligent composites based on shape memory alloys. *J. Mater. Process. Tech.* 1997. Vol. 69 (1—3). P. 68—74.
2. Neuking K., Abu-Zarifa A., Youcheu-Kemtchou S., Eggeler G. Polymer/NiTi-composites: Fundamental aspects, processing and properties. *Adv. Eng. Mater.* 2005. Vol. 7. Iss. 11. P. 1014—1023.
3. Belyaev S.P., Rubanik V.V., Resnina N.N., Rubanik Jr. V.V., Rubanik O.E. Effect of annealing on martensitic transformations in «steel — TiNi alloy» explosion welded bimetallic composite. *Metal Sci. Heat Treat.* 2011. Vol. 52. Iss. 9. P. 432—436.
4. Kothalkar A.D., Benitez R., Hu L., Radovic M., Karaman I. Thermo-mechanical response and damping behavior of shape memory alloy-MAX phase composites. *Metall. Mater. Trans. A.* 2014. Vol. 45. Iss. 5. P. 2646—2658.
5. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti—Ni-based shape memory alloys. *Progr. Mater. Sci.* 2005. Vol. 50. P. 511—678.
6. Kolachev B.A., Eliseev Yu.S., Bratukhin A.G., Talalaev V.D. Titanovye splavy v konstruktivnykh i proizvodstvennykh aviadvigatel'nykh i aviasionno-kosmicheskoi tekhnike [Titanium alloys in the design and manufacture of aircraft engines and aerospace equipment]. Moscow: MAI, 2001.
7. Geetha M., Singh A.K., Asokamani R., Gogia A.K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants: A review. *Progr. Mater. Sci.* 2009. Vol. 54. Iss. 3. P. 397—425.
8. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. Titanovye splavy. So-stav, struktura, svoistva [Titanium alloys. The composition, structure, properties]. Moscow: VILS—MATI, 2009.
9. Kollerov M.Yu., Gusev D.E., Oreshko E.I., Burnaev A.V. Povyshenie kharakteristik rabotosposobnosti meditsinskikh implantatov iz splavov titana i nikelida titana metodom termicheskoi obrabotki [Improved performance characteristics of medical implants made of titanium alloys and NiTi by heat treatment]. *Tekhnologiya legkikh splavov.* 2013. No. 3. P. 40—46.

10. Muslov S.A., Andreev V.A., Bondarev A.B., Sukhochev P.Yu. Sverkhelasticheskiye splavy s effektivom pamyati formy v nauke, tekhnike i meditsine [Superelasticity alloys with shape memory effect in science, technology and medicine]. Moscow: Folium, 2010.
11. Gigliotti M.F.X., Hardwicke Jr.C.U., Jiang L., Short J.W., Lipkin D.M., Blank J.P., Anand K. Erosion and wear resistant protective structures for turbine engine components: Pat. 7300708 (USA). 2007.
12. Cai C., Song B., Wei O., Xue P., Wen S., Liu J., Shi Y. In-situ integrated fabrication of Ti—Ni coating during hot isostatic pressing of Ti₆Al₄V parts: Microstructure and tribological behavior. *Surf. Coat. Tech.* 2015. Vol. 280. P. 194—200.
13. Reichman S.H. Light weight armor with repeat hit and high energy absorption capabilities: Pat. 20030159575 (USA). 2006.
14. Levchenko S.K., Dreval' O.N., Il'in A.A., Kollerov M.Yu., Rynkov I.P., Baskov A.V., Karimov A.A. Klinicheskie issledovaniya funktsional'noi transpedikulyarnoi stabilizatsii pozvonochnika [Clinical studies of transpedicular system using TiNi rod with functionally optimal rigidity]. *Voprosy neirokhirurgii*. 2009. No. 4. P. 31—36.
15. Filip P., Musialek J., Michalek K., Yen M., Mazanec K. TiAlV/Al₂O₃/TiNi shape memory alloy smart composite biomaterials for orthopedic surgery. *Mater. Sci. Eng. A*. 1999. Vol. 273—275. P. 769—774.
16. Chau E.T.F., Friend C.M., Allen D.M., Hora J., Webster J.R. A technical and economic appraisal of shape memory alloys for aerospace applications. *Mater. Sci. Eng. A*. 2006. Vol. 438—440. P. 589—592.
17. Chau E.T.F. Comparative study of joining methods for a SMART aerospace application: Eng. doctorate thesis. Cranfield University, 2007.
18. Zoeram A.S., Akbari Mousavi S.A.A. Laser welding of Ti—6Al—4V to nitinol. *Mater. Design*. 2014. Vol. 61. P. 185—190.
19. Shiue R.K., Wu Shyi-Kaan. Infrared brazing Ti₅₀Ni₅₀ and Ti—6Al—4V using the BAg-8 Braze alloy. *Mater. Trans.* 2005. Vol. 46. No. 9. P. 2057—2066.
20. Senkevich K.S., Knyazev M.I., Runova Yu.E., Shlyapin S.D. Special features of formation of a TiNi—VT6 diffusion joint. *Metal Sci. Heat Treat.* 2013. Vol. 55. Iss. 7. P. 419—422.
21. Ivanovna A.K., Hirata V.M.L., Lopez E.O., Figueroa R.R., Miramontes J.R. Microstructural and mechanical characterization of nitinol GTAW and FB welds of titanium. *Mater. Sci. Forum*. 2006. Vol. 509. P. 165—170.
22. Mukhametrakhimov M.Kh. Tverdogaznoe soedinenie titanovogo splava VT6 cherez nanostrukturirovannuyu prosloiku iz splava TiNi. In: *Sbornik materialov V Mezhdunarodnoi shkoly «Fizicheskoe materialovedenie»* [Solid-state bonding of titanium alloy VT6 through nanostructured layer of TiNi alloy. In: *The collection of materials of the VI International School «Physical material science»* (26 Sept.—1 Oct. 2011)]. Tol'yatti: TGU, 2011. P. 128—131.
23. Lopatin N.V., Senkevich K.S., Kudryavtsev E.A., Vydumkina S.V. Vliyaniye mikrostruktury titanovogo splava VT6 na svoystva svarykh soedinenii, poluchennykh diffuzionnoi svarkoi [Effect of microstructure state of titanium alloy Ti—6Al—4V on properties of joints produced by diffusion bonding]. *Titan*. 2014. No. 1. P. 41—50.
24. Lopatin N., Senkevich K., Kudryavtsev E.A. Effect of microstructure state of titanium alloy Ti—6Al—4V on structure and mechanical properties of joints produced by diffusion bonding process. *Mater. Sci. Forum*. 2014. Vol. 783—786. P. 2659—2664.
25. Lutfullin R.Ya. Sverkhplastichnost' i tverdogaznoe soedinenie nanostruktirovannykh materialov (Obzor). Chast' II. Fizicheskaya model' formirovaniya tverdogaznogo soedineniya v titanovom splave v usloviyakh nizkotemperaturnoi sverkhplastichnosti [Superplasticity and solid-phase bonding of nanostructured materials (Review). Part II. The model of the solid-phase joint formation in titanium alloy under conditions of low temperature superplasticity]. *Pis'ma o materialakh*. 2011. Vol. 1. Iss. 2. P. 88—91.
26. Kazakova N.F. Diffuzionnaya svarka materialov [Diffusion bonding of materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1981.
27. Simões S., Viana F., Ramos A.S., Vieira M.T., Vieira M.F. Reaction zone formed during diffusion bonding of TiNi to Ti₆Al₄V using Ni/Ti nanolayers. *J. Mater. Sci.* 2013. Vol. 48. Iss. 21. P. 7718—7727.
28. Emadinia O., Simões S., Viana F.M., Vieira F., Cavaleiro A.J., Ramos A.S., Vieira M.T. Cold rolled versus sputtered Ni/Ti multilayers for reaction-assisted diffusion bonding. *Weld World*. 2016. Vol. 60. P. 337—344.