

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЛОМАКИН Иван Владимирович

**ТЕРМОБИМЕТАЛЛЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ  
ФОРМЫ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2015

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник кафедры  
теории упругости СПбГУ,  
**БЕЛЯЕВ Сергей Павлович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
**АБРАМЯН Андрей Карэнович**  
(Институт проблем машиноведения РАН,  
главный научный сотрудник лаборатории  
гидроупругости)

доктор физико-математических наук,  
**КОЛЕДОВ Виктор Викторович**  
(Институт радиотехники и электроники  
им. В.А.Котельникова РАН, ведущий  
научный сотрудник лаборатории  
магнитных явлений в микроэлектронике)

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО “Петербургский  
государственный университет путей  
сообщения императора Александра I”

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2015 г. в \_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.232.30 на базе Санкт-Петербургского  
государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый  
Петергоф, Университетский пр. 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького  
Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-  
Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте  
<http://spbu.ru/science/disser/dissertatsii-dopushchennye-k-zashchite-i-svedeniya-o-zashchite/details/12/503>

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

Кустова Е.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Сплавы с памятью формы представляют огромный интерес в связи с их необычной способностью восстанавливать значительные неупругие деформации при нагревании. Этот эффект носит название “эффект памяти формы”. Самым ярким представителем данного класса материалов является никелид титана, который проявляет, как функциональные свойства, такие как эффект памяти формы, обратимой памяти формы, пластичности превращения и псевдоупругости, так и технологические свойства, такие как высокая прочность и коррозионная стойкость. Кроме того, его биологическая инертность позволяет широко применять этот сплав в медицине. Одним из преимуществ никелида титана является то, что меняя его состав и режим предварительной термообработки, можно направлено изменять параметры мартенситных переходов, которые определяют функциональные свойства этого материала.

Одним из перспективных технических применений сплавов с эффектом памяти формы является их использование в качестве активного компонента термомеханического привода многократного действия. В таких приводах используется два основных явления, сопровождающие термоупругое мартенситное превращение – эффект пластичности превращения, проявляющийся как способность сплава накапливать большую неупругую деформацию при охлаждении под напряжением, и эффект памяти формы, проявляющийся как способность сплава восстанавливать неупругую деформацию даже в присутствии противодействующих сил. Необходимым условием функционирования привода является наличие не только элемента из сплава TiNi, но и упругого контртела, которое обеспечивает усилие, необходимое для реализации в сплаве TiNi эффекта пластичности превращения. В результате, при теплосменах через температурный интервал мартенситных превращений такое устройство способно осуществлять обратимые перемещения и развивать усилия для совершения полезной работы.

Обычные термомеханические приводы состоят из двух элементов: сплава с эффектом памяти формы и упругого контртела, однако в настоящее время перспективной является идея создания такого устройства в виде биметалла, в котором оба элемента объединены в единый объект. Это позволит создавать компактные приводы для применения в условиях ограниченного пространства. Как ожидается, терробиметаллы с памятью формы будут иметь ряд преимуществ по сравнению с обычными биметаллами, основным из которых будет являться значительно большее перемещение, поскольку в биметаллах с памятью формы деформация обеспечивается за счет реализации эффектов пластичности превращения и памяти формы, а не за счет различия в коэффициентах термического расширения, как это имеет место в обычных биметаллах.

Вместе с тем при создании биметаллов с памятью формы возникает сложная задача надежного соединения сплава TiNi с другими металлическими материалами. Применение традиционных видов сварки приводит к появлению зон термического влияния, что существенно снижает прочность материала и приводит к деградации их функциональных свойств. Новые перспективы

получения биметаллов с памятью формы связаны с технологией сварки взрывом, которая позволяет получить надежное соединение сплава TiNi с другими сплавами и со сплавами TiNi различного стехиометрического состава. Несмотря на очевидные перспективы использования термобиметаллов с памятью формы, изготовленных сваркой взрывом, их физико-механические и функциональные свойства остаются неизученными. Поэтому тема настоящей работы является **актуальной** и важной, как с научной, так и с практической точек зрения.

**Целью работы** явилось систематическое изучение функционально-механических свойств биметаллических композитов с памятью формы, определение оптимальных термических и деформационных воздействий на биметаллы для достижения максимальной обратимой деформации и развитие методов описания и прогнозирования термомеханического поведения термобиметаллов с памятью формы.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать строение сварного соединения, структуру слоев и кинетику мартенситных превращений в биметаллических композитах на основе сплава TiNi с эффектом памяти формы, полученных методом сварки взрывом.
2. Изучить влияние режимов предварительной термообработки на структуру слоев и кинетику мартенситных превращений в биметаллических композитах.
3. Разработать методику испытания биметаллических пластин в режиме изгиба, позволяющую производить деформирование при постоянной температуре, а также измерять деформацию в условиях переменной температуры при термоциклировании в интервале температур мартенситных превращений.
4. Изучить влияние различных факторов, таких как соотношение толщин слоев, величина предварительной деформации, режим предварительной термообработки и количество теплосмен на функциональные свойства биметаллических композитов.
5. Выполнить численное моделирование механического поведения биметаллических композитов на основе сплавов с эффектом памяти формы с использованием существующих теоретических моделей, описывающих термомеханическое поведение сплавов с эффектом памяти формы. Произвести сравнение полученных экспериментальных и расчетных данных.

#### **Научная новизна:**

1. Экспериментально установлено, что наибольшее значение величины обратимой деформации в биметаллических композитах “сталь X18H10T – Ti<sub>49,4</sub>Ni<sub>50,6</sub>” и “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” наблюдается в том случае когда толщина функционального слоя (Ti<sub>49,4</sub>Ni<sub>50,6</sub> – в композите “сталь X18H10T – Ti<sub>49,4</sub>Ni<sub>50,6</sub>” и Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> – в композите “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>”) составляет примерно 60% от общей толщины биметалла.

2. Установлено, что величина обратимой деформации биметалла определяется величиной остаточной деформации, материалом упругого слоя, режимом термообработки и может достигать значения 1%.
3. Показано, что характер влияния величины остаточной деформации на функционально-механические свойства биметаллов зависит от состава слоев композита и режима предварительной термообработки.
4. Установлено, что термоциклирование может приводить как к увеличению величины обратимой деформации в биметалле при увеличении номера термоцикла за счет эффекта тренировки, так и к её уменьшению.
5. Предложена теоретическая модель, основанная на теории термомеханического поведения сплавов с эффектом памяти формы, позволяющая описать механическое поведение терробиметаллов с эффектом памяти формы при изотермическом деформировании и при последующих теплосменах.
6. Выполнено компьютерное моделирование механического поведения биметаллических композитов “сталь X18H10T – Ti<sub>49,4</sub>Ni<sub>50,6</sub>” и “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>”, результаты которого находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментальными данными.

#### **Практическая значимость:**

Результаты работы могут быть использованы при разработке биметаллических термомеханических приводов, термосенсоров, термореле и переключателей в различных отраслях техники.

**Достоверность** результатов работы обеспечена использованием современных методов решения поставленных задач, воспроизводимостью результатов экспериментов, согласием экспериментальных и расчетных данных и соответствием обнаруженных закономерностей и их интерпретации известным представлениями о механизмах реализации термоупругих мартенситных превращений и эффектов памяти формы.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика исследования механических и функциональных свойств биметаллических пластин с эффектом памяти формы, позволяющая в режиме трех-точечного изгиба измерять силу и прогиб в условиях непрерывного изменения температуры в широком интервале.
2. Особенности обратимого формоизменения биметаллических композитов с памятью формы при термоциклировании, заключающиеся в зависимости обратимой деформации от последовательности мартенситных превращений, реализующихся в слое из сплава с эффектом памяти формы, а также от величины предварительной деформации.
3. Экспериментально установленная зависимость величины обратимой деформации биметалла от отношения толщины функционального слоя к общей толщине биметаллической пластичны, имеющая максимум при определенном отношении толщин. Положение максимума определяется составом биметалла.
4. Результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния биметаллов с памятью формы и их

функционального поведения при изменении температуры, выполненные с использованием модели, учитывающей упруго-пластические свойства материалов композита и функциональные свойства сплава с эффектом памяти формы

### **Апробация диссертации**

Результаты работы были представлены автором на всероссийских и международных конференциях: International Conference on Martensitic Transformations ICOMAT-2014 (Бильбао, июль 2014), Международная конференция “Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы” (Витебск, май 2014), Euro Intelligent Materials (Киль, сентябрь 2013), 52-й международная научная конференции «Актуальные проблемы прочности» (Уфа, июнь 2013), VII Международная конференция “Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений” (MPFP-2013) (Тамбов, июнь 2013), European Symposium on Martensitic Transformations ESOMAT-2012 (Санкт-Петербург, сентябрь 2012), “XX Петербургские чтения по проблемам прочности” (Санкт-Петербург, апрель 2012), 51-й международная научная конференция “Актуальные проблемы прочности” (Харьков, май 2011), Бернштейновские чтения по термообработке металлических материалов (Москва, октябрь 2011), 50-й международный симпозиум «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, сентябрь-октябрь 2010), V Международная конференция с элементами научной школы для молодежи “Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений” (MPFP-2010) (Тамбов, июнь 2010), The 8<sup>th</sup> European Symposium on Martensitic Transformations (ESOMAT) (Prague, 2009)

Достижения соискателя:

1. Победитель конкурса грантов студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга в 2012
2. Руководитель проекта “Новые термочувствительные биметаллические элементы из сплава TiNi с эффектом памяти формы” в рамках ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2012-2013
3. Стипендиат правительства РФ в 2013-2014 г.

### **Публикации**

По материалам работы имеется 15 публикаций из них 4 в изданиях из перечня ВАК.

### **Личный вклад автора**

Автор выполнил анализ имеющихся данных по теме исследования, выполнил основную часть экспериментов, осуществил обработку и анализ полученных данных, участвовал в разработке методики расчета механического поведения и функциональных свойств биметаллических композитов с эффектом памяти формы и выполнил компьютерное моделирование, участвовал в

обсуждении полученных данных и подготовке публикаций. Беляеву С.П. и Ресниной Н.Н. принадлежит постановка задачи исследования. Рубаником В.В. были предоставлены биметаллические пластины, полученные сваркой взрывом. Рубанику В.В. мл., Рубаник О.Е. принадлежат экспериментальные исследования распределения химических элементов в поперечном сечении биметаллического композита.

Работа выполнена при поддержке лаборатории механики перспективных массивных наноматериалов для инновационных инженерных приложений (Mechanics of Advanced Bulk Nanomaterials for Innovative Engineering Applications) (дог. № 14.В25.31.0017 от 28.06.2013) СПбГУ

### **Структура и объем работы:**

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, выводов и списка использованной литературы, состоящего из 85 наименований. Работа изложена на 122 страницах, иллюстрирована 56 рисунками и содержит 1 таблицу.

### **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Во введении** раскрыта актуальность работы, кратко изложено ее содержание; сформулированы цель и задачи, отмечена научная значимость и представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В главе 1** представлен обзор литературы, в котором изложены принципы устройства и функционирования термоприводов на основе сплавов с эффектом памяти формы. Описаны особенности термоупругих мартенситных превращений и эффекты памяти формы, которые определяют принцип работы термоприводов с эффектом памяти формы. Сформулированы преимущества приводов на основе эффекта памяти формы перед обычными биметаллами. Рассмотрены некоторые примеры применения термоприводов с памятью формы. Сделан вывод о необходимости создания биметаллических композитов для уменьшения габаритных размеров приводов и рассмотрены основные методы соединения сплавов с эффектом памяти формы с другими металлическими материалами. Сделан вывод о целесообразности использования метода сварки взрывом для соединения сплавов с эффектом памяти формы, так как этот метод исключает локальное плавление свариваемых материалов. Проведен анализ работ посвященных сварке взрывом сплавов с эффектом памяти формы с различными материалами и установлено, что функционально-механические свойства термобиметаллов с эффектом памяти формы ранее не были изучены. Рассмотрены модели, описывающее деформационное поведение слоистых композитов, работающих в режиме изгиба.

**В главе 2** на основе аналитического обзора, выполненного в главе 1, сформулирована цель и задачи исследования. Описаны использованные материалы и методики исследования. В качестве объектов исследования выбраны биметаллические композиты, полученные сваркой взрывом, “сталь X18H10T – Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>”, в котором роль упругого-пластического слоя выполнял слой нержавеющей стали X18H10T, и “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” в котором роль упругого-пластического слоя выполнял слой никелида титана Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>, проявляющий

свойство псевдоупругости. Структуру сварного соединения исследовали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборах ЛОМО и Zeiss Merlin. Исследование распределения химического состава по толщине слоев проводили с использованием аппарата INCAENERGY 350x-act/Synergy package Premium. Мартенситные превращения, реализующиеся в слоях TiNi, исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в аппарате Mettler Toledo 822° при охлаждении и нагревании в интервале температур от 140 °С до -100 °С, и скорости изменения температуры 10°С/мин. Исследование распределения значения микротвердости в направлении перпендикулярном сварному шву проводили с использованием аппарата Buehler Micromet 5103 под нагрузкой 100 г.

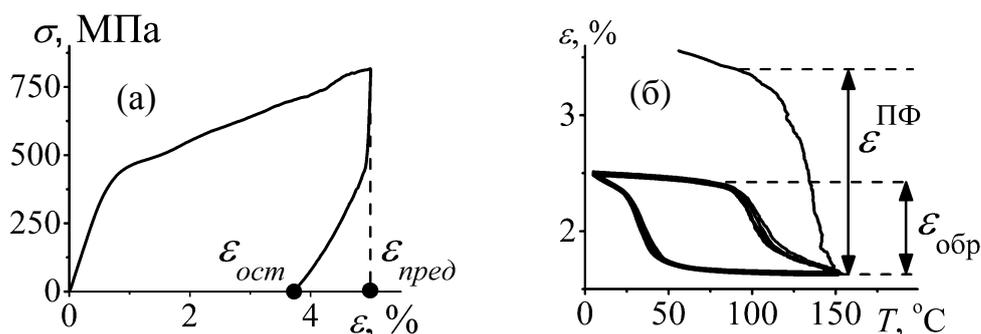


Рис. 1. (а) - диаграмма деформирования биметаллического композита, (б) – изменение деформации в процессе изменения температуры.

Для исследования функционально-механических свойств биметаллических композитов была разработана специальная методика, основанная на методике трехточечного изгиба. Образцы шириной 5 мм и длиной 40 мм с различной толщиной деформировали изгибом при постоянной температуре до различных значений предварительной деформации ( $\epsilon_{пред}$ ) и разгружали, фиксируя показания значений остаточной деформации ( $\epsilon_{ост}$ ) (Рис. 1а). Далее образцы нагревали для инициирования эффекта памяти формы в функциональном слое композитов и термоциклировали 5 раз в интервале температур мартенситных превращений (Рис. 1б). Из экспериментально полученных зависимостей в координатах  $\epsilon - T$  определяли величины эффекта памяти формы при первом нагреве ( $\epsilon^{ПФ}$ ) и обратимой деформации при термоциклировании ( $\epsilon_{обр}$ ). Для пересчета машинных показателей силы  $F$  и перемещения  $f$  использовались следующие формулы для напряжения  $\sigma = 3FL_s/2bh^2$  и деформации  $\epsilon = h/2R$ ,  $R = f/2 + L_s^2/8f$ , где  $L_s$  - ширина базы изгиба,  $R$  - радиус кривизны изгиба,  $h$  - толщина образца,  $b$  - ширина образца. Температуру образцов измеряли с помощью хромель-копелевой термопары.

В главе 3, состоящей из двух разделов, изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований. В Разделе 3.1 представлены результаты экспериментальных исследований свойств биметаллических композитов. Данные оптической микроскопии и СЭМ показали, что в композите “сталь Х18Н10Т – Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>” граница между слоями является волнистой без каких-либо видимых макроскопических дефектов. В композите “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” граница между слоями также волнистая. Обнаружено измельчение

зеренной структурой в зоне соединения, что может быть связано с большими пластическими деформациями в процессе сварки взрывом. Исследование распределения химического состава в поперечном сечении биметалла “сталь X18H10T – Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>” показало, что ширина зоны перемешивания составляет 6 мкм. В композите “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” зона перемешивания не выявлена в связи с близким химическим составом слоев композита.

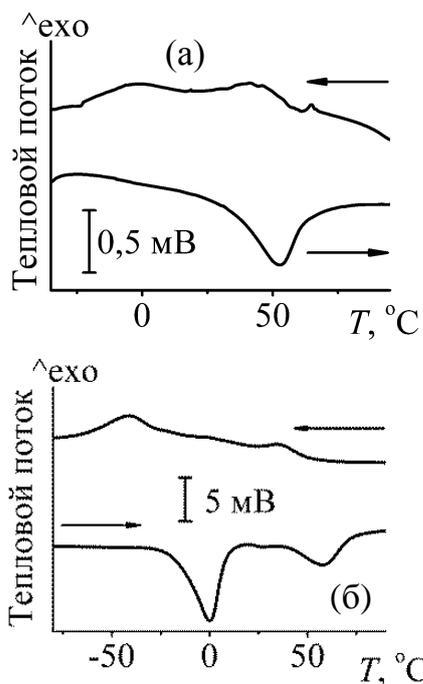


Рис. 2. Калориметрические кривые, полученные при охлаждении и нагревании биметаллических композитов “сталь X18H10T – Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>” (а) и “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” (б) после сварки взрывом.

Методом ДСК исследованы мартенситные превращения, реализующиеся при охлаждении и нагреве биметаллических композитов после сварки взрывом. Установлено, что в обоих композитах сварка взрывом приводит к изменению параметров мартенситных превращений – наблюдается смещение температур тепловых пиков, соответствующих фазовым переходам, увеличение температурных интервалов превращений и уменьшение энтальпии превращений. Такие изменения характерны для сплава TiNi, подвергнутого большой пластической деформации. Для того, чтобы восстановить функциональные свойства слоя TiNi необходимо подвергнуть биметаллы термообработке. В работе исследовано влияние термообработки при температуре 600°C в течение 1 часа и при температуре 450°C в течение 2 часов на мартенситные превращения в биметаллических композитах. Установлено, что после отжига при температуре 600°C в слое TiNi биметалла “сталь X18H10T – Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>” наблюдается B2 ↔ B19’ превращение (Рис.3, а). В биметалле “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” после отжига

при той же температуре наблюдали два пика выделения тепла при нагревании и два пика поглощения тепла при охлаждении. Эти пики соответствуют B2 ↔ B19’ превращениям, последовательно протекающим при различных температурах в двух слоях TiNi, имеющих различный химический состав (Рис. 3, б). После отжига при температуре 450°C в богатых никелем слоях композитов наблюдали двухстадийное B2 → R → B19’ превращение при охлаждении, вызванное образованием частиц вторичной фазы Ti<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub>. В то же время эквиатомный слой композита “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” претерпевал B2 ↔ B19’ превращение при теплосменах. При нагревании во всех слоях имеет место B19’ → B2 переход. Появление частиц фазы Ti<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub> в заникеленном сплаве Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> приводит не только к изменению последовательно превращений, но и существенно повышает микротвердость слоя (Рис. 3, в).

Для исследования влияния соотношения толщин слоев на обратимую деформацию биметаллического композита, применяли методику трехточечного изгиба с величиной предварительной деформации равной 5%. Полученные данные показали, что в биметаллическом композите “сталь X18H10T – Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>”

наибольшая величина обратимой деформации наблюдается в том случае, когда толщина слоя TiNi составляет 60-65 % от общей толщины образца. В биметаллическом композите “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” наибольшая величина обратимой деформации наблюдается в том случае, когда толщина слоя Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> составляет 55-60 % от общей толщины образца (Рис. 4).

Способность композитов восстанавливать неупругую деформацию при первом нагреве после деформации оценивали по величине  $\epsilon^{ПФ}$  и коэффициенту возврата K, который вычисляли по формуле  $K = \epsilon^{ПФ} / \epsilon_{ост}$ . Установлено, что в биметаллическом образце “сталь X18Н10Т – Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>” отожженном при 600°C 1 час, по мере возрастания предварительной деформации величина эффекта памяти формы увеличивается до 3%, а затем уменьшается. Если биметалл подвергали отжигу при температуре 450°C в течение 2-х часов, то величина эффекта памяти формы монотонно возрастала при увеличении предварительной деформации. Различие в зависимостях  $\epsilon^{ПФ}(\epsilon_{ост})$ , обнаруженное в биметаллах, подвергнутых различной термообработке, по-видимому, обусловлено различием дислокационного предела текучести. В слое Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> после отжига 450°C 2ч присутствуют частицы фазы Ti<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub>, которые упрочняют сплав и затрудняют дислокационное скольжение, поэтому в процессе предварительной деформации вклад пластической деформации в остаточную деформацию мал. В результате, большая часть остаточной деформации восстанавливается при нагревании. Поэтому с ростом остаточной деформации возрастает деформация восстанавливаемая при нагревании. При отжиге 600°C 1ч частицы Ti<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub> растворяются, что существенно понижает предел дислокационного скольжения, поэтому в процессе предварительной деформации в сплаве накапливается пластическая деформация, которая не восстанавливается при нагревании. Чем больше предварительная деформация, тем больше пластическая деформация и тем меньше деформации вернется при нагревании.

Аналогичные закономерности установлены для биметалла “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>”. Таким образом, полученные результаты показали, что биметаллы,

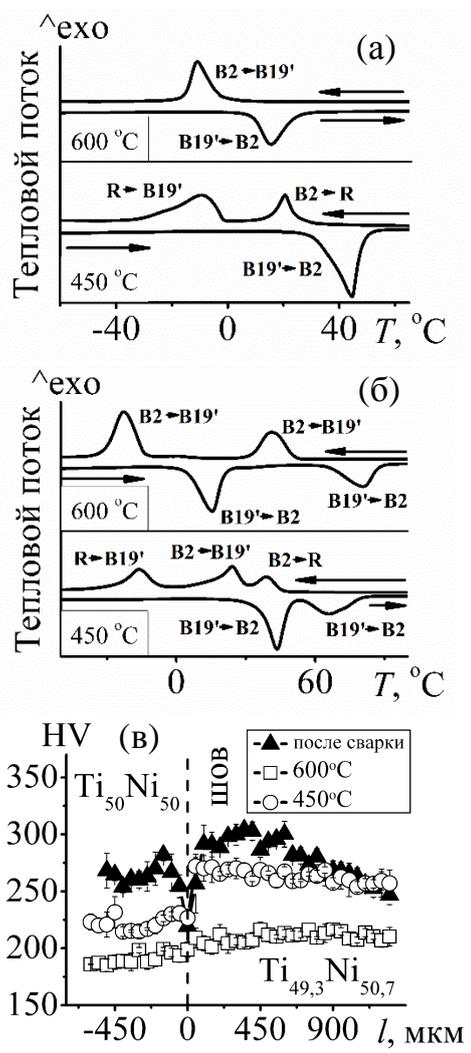


Рис. 3. Калориметрические кривые, полученные при охлаждении и нагревании биметаллов “сталь X18Н10Т – Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>”(а) и “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>”(б), подвергнутых различной термообработке. Изменение распределения микротвердости в направлении, перпендикулярном к сварному шву в биметалле “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” после различных термообработок (в).

отожженные при температуре 450°C, демонстрируют более высокую способность к формовосстановлению, чем биметаллы подвергнутые отжигу при температуре 600°C, что связано с влиянием температуры отжига на упрочнение сплава за счет образования дисперсных частиц вторичных фаз.

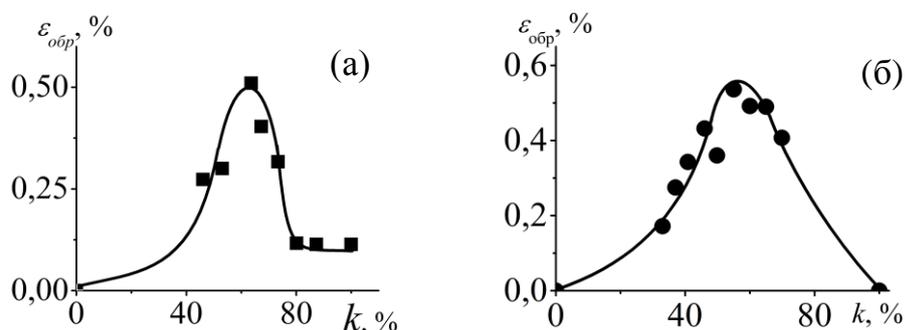


Рис. 4 . Изменение обратимой деформации при изменении соотношения толщин слоев в биметаллических композитах "сталь X18H10T – Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>"(а) и "Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>"(б). Коэффициент  $k$  – отношение толщины функционального слоя к общей толщине биметаллического композита.

Функциональные свойства биметаллических композитов оценивали по их способности обратимо изменять деформацию при теплосменах. На Рисунке 5 представлены зависимости  $\epsilon_{обр}(\epsilon_{ост})$ , полученные в первом и пятом термоциклах в биметаллических композитах, подвергнутых различной термомеханической обработке. Показано, что в том случае, когда величина остаточной деформации в биметалле "сталь X18H10T – Ti<sub>49,4</sub>Ni<sub>50,6</sub>" не превосходит 2%, обратимой деформации в образце не наблюдается. Это связано с тем, что при деформировании до 2 % в композите не возникают напряжения, способные инициировать эффект пластичности превращения при охлаждении. В образцах с остаточной деформацией более 2%, наблюдается обратимое изменение деформации при охлаждении и нагревании. Величина обратимой деформации зависит от номера термоцикла. Так в образцах с остаточной деформацией 7% термоциклирование приводит к увеличению  $\epsilon_{обр}$ , а в образцах, деформированных более, чем на 7% теплосмены приводят к уменьшению величины обратимой деформации вследствие известного эффекта уменьшения пластичности превращения в процессе термоциклирования при больших напряжениях. Максимальное значение величины  $\epsilon_{обр}$  в биметалле "сталь X18H10T – Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>" после отжига при температуре 600°C наблюдали в образце с остаточной деформацией 8,7%. Установлено, после отжига при температуре 450°C в биметалле "сталь X18H10T – Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>" обратимая деформация наблюдается при любом значении  $\epsilon_{ост}$ . С увеличением  $\epsilon_{ост}$  величина обратимой деформации приближается к 1% и далее слабо меняется. Дальнейшее термоциклирование приводит к уменьшению величины  $\epsilon_{обр}$  до среднего значения 0,6% при любом значении остаточной деформации. Результаты исследования влияния температуры термообработки на функциональные свойства биметаллического композита "Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>" показали, что термообработка оказывает существенное влияние на вид зависимости  $\epsilon_{обр}(\epsilon_{ост})$ . Так, в образцах, подвергнутых отжигу при 600°C, величина обратимой деформации возрастает до 0,5 % при увеличении  $\epsilon_{ост}$  до 4%. При дальнейшем увеличении  $\epsilon_{ост}$  величина

обратимой деформации уменьшается и при 8,1% составляет 0,3%. Термоциклирование слабо влияет на величину обратимой деформации при любых значениях величины остаточной деформации. Установлено, что в образцах, отожженных при температуре 450°C в течение 2-х часов, обратимая деформация резко возрастает и её максимальное значение 0,83% достигается при  $\varepsilon_{ост}=8\%$ . Термоциклирование приводит к увеличению обратимой деформации на 0,05 – 0,1 % при  $\varepsilon_{ост}>2\%$ .

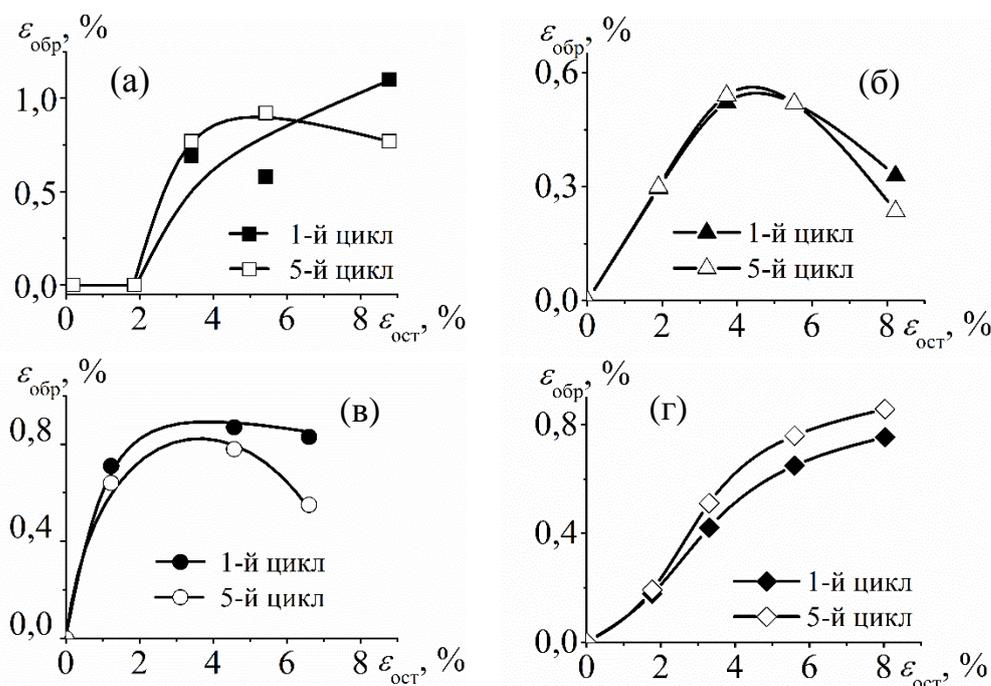


Рис. 5. Зависимости обратимой деформации, измеренной в первом и пятом термоциклах, от остаточной деформации, полученные в биметаллических композитах “сталь X18H10T – Ti<sub>49,4</sub>Ni<sub>50,6</sub>” (а, в) и “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” (б, г) после термообработки 600°C 1 час (а, б) и 450 °C 2 часа (в, г).

Таким образом, проведенные в работе исследования позволили установить основные закономерности влияния геометрических параметров биметалла, термообработки и предварительной деформации на функциональные свойства биметаллических композитов разного состава. Полученные результаты показали, что термобиметаллы с эффектом памяти формы, полученные сваркой взрывом, проявляют такое же изменение деформации при многократных теплосменах, как и обычные термомеханические приводы, следовательно, они могут быть успешно использованы при разработке таких устройств.

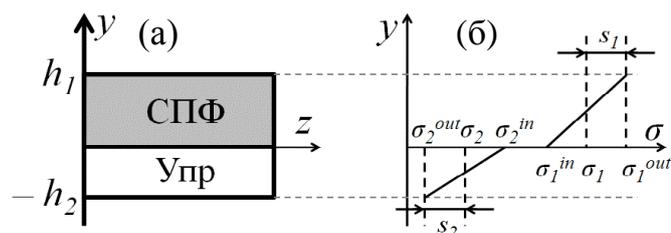


Рис. 6. Схематическое изображение участка биметаллической пластины (а) с указанием распределения напряжений в нем (б).

**Раздел 3.2** посвящен теоретическому описанию и моделированию механического поведения двухслойных композитов, состоящих из упруго-пластического слоя и слоя из материала с эффектом памяти формы.

Описана модель биметаллического композита и сформулированы упрощения и гипотезы принятые для её построения, основанные на модели сформулированной Волковым А.Е. и Евард М.Е. Полагали, что изгиб происходит только в плоскости  $yz$  (Рис. 6), а напряженное состояние в биметалле одноосное. Кроме этого были приняты следующие гипотезы: 1) напряжения в каждом слое распределены по линейному закону; 2) продольные силы равны нулю; 3) предполагается неразрывность деформаций на границе соединения двух слоев; 4) для биметалла справедлива гипотеза плоских сечений. Эти гипотезы записаны в виде уравнений 1 - 4:

$$\sigma_{\text{спф}} = \sigma_1 + \frac{2s_1}{h_1} \left( y - \frac{h_1}{2} \right) \quad , \quad \sigma_{\text{упр}} = \sigma_2 + \frac{2s_2}{h_2} \left( y + \frac{h_2}{2} \right), \quad (1)$$

$$h_1 d\sigma_1 + h_2 d\sigma_2 = 0, \quad (2)$$

$$d\varepsilon_1^{\text{in}} = d\varepsilon_2^{\text{in}}, \quad (3)$$

$$h_2 (d\varepsilon_1^{\text{out}} - d\varepsilon_1^{\text{in}}) + h_1 (d\varepsilon_2^{\text{out}} - d\varepsilon_2^{\text{in}}) = 0 \quad (4)$$

Определяющие соотношения были получены путем аппроксимации изотермических упруго-пластических диаграмм деформирования материалов слоев композита и имели следующий вид:

$$d\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1} d\sigma_1^* + \left( \frac{1}{H_1} - \frac{1}{E_1} \right) \text{H}(|\sigma_1^*| - \sigma_1^y) \text{H}(d|\sigma_1^*|) d\sigma_1^* \quad (5)$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2} d\sigma_2^* + \left( \frac{1}{H_2} - \frac{1}{E_2} \right) \text{H}(|\sigma_2^*| - \sigma_2^y) \text{H}(d|\sigma_2^*|) d\sigma_2^*, \quad (6)$$

где,  $E_i$  и  $H_i$  — модуль Юнга и коэффициент упрочнения  $\sigma_i^y$  — напряжение течения  $i$ -го слоя ( $i = 1$  соответствует слою с памятью формы,  $i = 2$  соответствует упруго-пластическому слою),  $\sigma_i^*$  — действующее в  $i$ -м слое напряжение (например, в наружном слое с памятью формы  $\sigma_i^* = \sigma_1^{\text{out}} = \sigma_1 + s_1$ ),  $\text{H}$  — функция Хевисайда:  $\text{H}(x) = 1$  при  $x > 0$ , и  $\text{H}(x) = 0$  при  $x \leq 0$ . Поскольку модуль упругости никелида титана при нагрузке и при разгрузке может отличаться, эта особенность была учтена при расчете.

Деформация элемента из сплава с памятью формы при изменении температуры складывается из упругого формоизменения, деформации теплового расширения, деформации, связанной с фазовым переходом, и микропластической деформации, обусловленной аккомодацией мартенсита. При этом деформацию, обусловленную фазовым превращением, считали пропорциональной объемной доле мартенситной фазы  $\Phi$  -  $d\varepsilon_1^\Phi = \varepsilon^0 d\Phi$ , где  $\varepsilon^0$  - коэффициент пропорциональности), а микропластическую деформацию — пропорциональной фазовой деформации при прямом мартенситном переходе с коэффициентом пропорциональности, равным коэффициенту  $K_r$  возврата деформации в образце из сплава с памятью формы:

$$d\varepsilon_1^{\text{MP}} = (1 - K_r) d\varepsilon_1^\Phi \text{H}(d\varepsilon_1^\Phi), \quad (7)$$

Таким образом, уравнение (5) приобрело следующий вид:

$$d\varepsilon_1 = \left\{ \frac{1}{E_1^A} + \left[ \left( \frac{1}{H_1^A} - \frac{1}{E_1^A} \right) H(|\sigma_1^*| - \sigma_1^{y(A)}) H(d|\sigma_1^*|) \right] (1 - \Phi) \right\} d\sigma_1^* + \left\{ \frac{1}{E_1^M} - \left( \frac{1}{H_1^M} - \frac{1}{E_1^M} \right) H(|\sigma_1^*| - \sigma_1^{y(M)}) H(d|\sigma_1^*|) \right\} \sigma^* d\Phi + \varepsilon_0 d\Phi + d\varepsilon_1^{MP} \quad (8)$$

где верхний индексы А и М при коэффициентах  $E_1$ ,  $H_1$  и  $\sigma_1^y$  обозначают аустенитную и мартенситную фазы соответственно.

Показано, что решение системы состоящей из уравнений (1)-(4), (6) и (8) позволяет определить напряжение и деформацию внешних и внутренних волокон слоев при деформировании биметалла и изменении температуры. Для реализации модельных экспериментов была создана универсальная программа, в ходе выполнения которой происходила симуляция механических и термических воздействий на объект, подобных тем, которые реализовали в реальных экспериментах

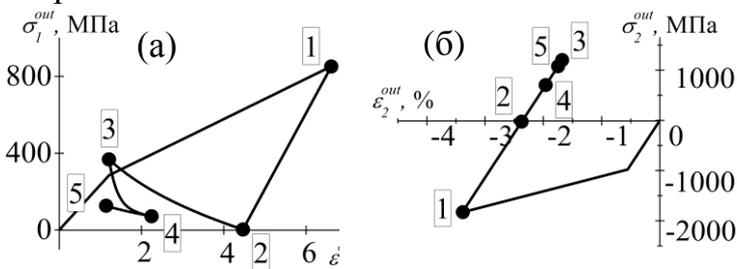


Рис. 7. Зависимости  $\sigma - \varepsilon$  для внешних волокон слоя из сплава с памятью формы (а) и упругого слоя (б).

Получены модельные зависимости  $\sigma - \varepsilon$  для внутренних и внешних слоев каждого композита (Рис. 7) и проведен их анализ. Точками 1 – 4 обозначены этапы экспериментальной процедуры. 0→1

предварительное деформирование; 1→2 – разгрузка; 2→3 – первый нагрев; 3→4 охлаждение и 4→5 – второе нагревание. Таким образом, предложенная модель позволяет определить напряжение и деформацию в каждом из слоев композита по отдельности и на каждом этапе вычислительной процедуры. С помощью полученных зависимостей было построено распределение напряжений и деформаций по толщине биметаллического композита (Рис.8). Результаты численного эксперимента показали, что нейтральная линия, соответствующая волокну с нулевой деформацией, перемещается по толщине биметалла и может многократно переходить из одного слоя в другой. Установлено, что наибольшая величина обратимой деформации наблюдается в том случае, когда нейтральная линия в точках (1) и (2) на рисунке совпадает с границей раздела двух слоев.

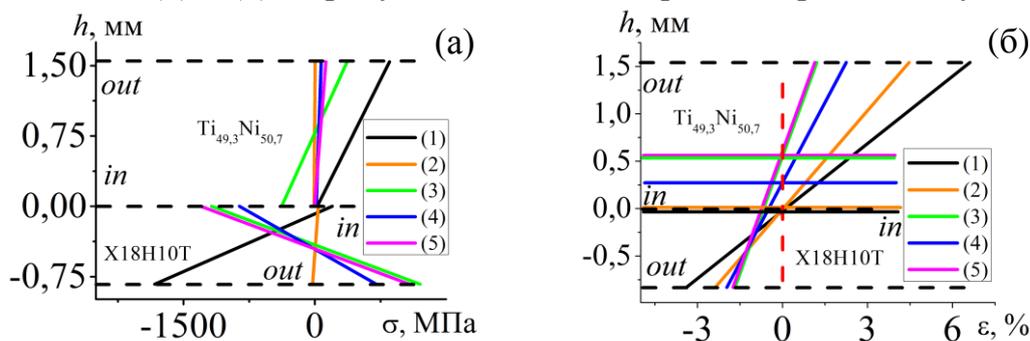


Рис. 8. Распределение напряжений (а) и деформаций (б) по толщинам слоев на разных этапах модельного эксперимента, соответствующих точкам (1)-(5) на Рис. 7.

Сравнение полученных расчетных данных с экспериментальными результатами показало хорошее совпадение (Рис. 9), что однозначно указывает на то, что используемая модель удовлетворительно описывает функциональные свойства биметаллического композита.

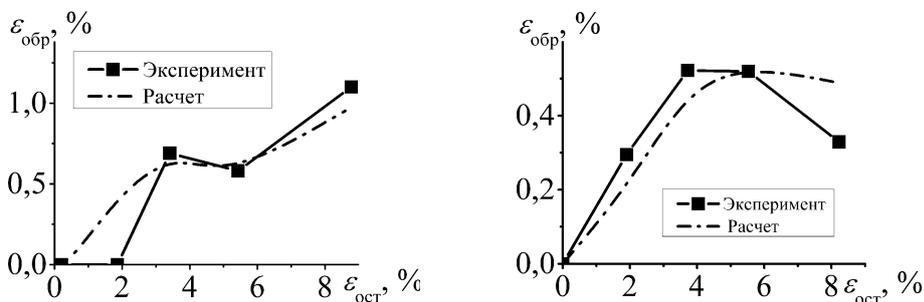


Рис. 9. Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей обратимой деформации от остаточной, полученных в биметаллах “сталь X18H10T – Ti<sub>49,4</sub>Ni<sub>50,6</sub>” (а) и “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” (б), подвергнутых отжигу при температуре 600 °С.

## ВЫВОДЫ

1. В результате сварки взрывом температурная кинетика мартенситных превращений в никелиде титана существенно изменяется: расширяются температурные интервалы превращений и смещаются характеристические температуры. Такие изменения являются следствием большой пластической деформации соударяющихся пластин. Высокотемпературная обработка при температурах, больших 450°С, приводит к восстановлению характеристик мартенситных превращений.
2. Термобиметаллы с эффектом памяти формы после предварительной деформации обратимо деформируются при термоциклировании. Деформирование происходит в узком интервале температур, соответствующем температурному интервалу мартенситных превращений, происходящих в сплаве с эффектом памяти формы.
3. В биметаллических пластинах обратимая деформация зависит от соотношения толщин слоя с памятью формы и упруго-пластического слоя. В композите “сталь X18H10T – Ti<sub>49,4</sub>Ni<sub>50,6</sub>” максимальная обратимая деформация имеет место при отношении толщин слоя из сплава TiNi к общей толщине биметаллического композита равном 60 – 65 %. В композите “Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>” это соотношение составляет 55 – 60 %.
4. Величина самопроизвольной обратимой деформации зависит от режима термообработки и величины остаточной деформации и достигает 1 %. При многократных теплосменах величина обратимой деформации изменяется незначительно и может, как уменьшаться, так и возрастать в зависимости от величины предварительной деформации биметаллического композита.
5. Выполнено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в различных слоях биметаллического композита при изотермическом деформировании и изменении температуры с использованием модели, учитывающей упруго-пластические свойства материалов композита и функциональные свойства сплава с эффектом памяти формы, связанные с

мартенситными фазовыми превращениями. Компьютерные расчеты обратимой деформации биметаллов в зависимости от размеров слоев композита и предварительной деформации удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным, что позволяет сделать заключение о применимости используемой модели для расчета и прогнозирования функционально-механических свойств биметаллов с эффектом памяти формы.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В. мл., Ломакин И.В., Рубаник О.Е. Влияние предварительной деформации на функциональные свойства биметаллического композита «TiNi –сталь»// Вестник тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. Том 15, вып. 3, 2010, стр. 1152-1155.
2. Belyaev S., Rubanik V., Resnina N., Rubanik V.(jr), Rubanik O., Borisov V., Lomakin I. Functional properties of bimetel composite of “stainless steel – TiNi alloy” produced by explosion welding// Physics Procedia, vol. 10, 2010, p. 52-57.
3. Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В. мл., Ломакин И.В. Мартенситные превращения и обратимая деформация в биметаллическом композите  $Ti_{49,3}Ni_{50,7} - Ti_{50}Ni_{50}$  // Вестник тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. Том 18, вып. 4, 2013, стр. 2029.
4. S. Belyaev, V. Rubanik, N. Resnina, V. Rubanik Jr., I. Lomakin. Functional properties of ‘ $Ti_{50}Ni_{50}-Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ ’ shape memory composite produced by explosion welding// Smart Materials and Structures 23 (2014) 085029 (8pp).

Статьи в других изданиях:

5. V. Rubanik, V. Rubanik (jr.), N. Resnina, S. Belyaev, O. Rubanik, I, Lomakin. Influence of annealing on kinetics of martensitic transformations and structure in bimetel composite “stainless steel - TiNi” produced by explosion welding// The 8th European Symposium on Martensitic Transformations (ESOMAT), Prague, 2009. — P. 130
6. Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В. мл., Рубаник О.Е., Ломакин И.В. Функциональные свойства биметаллического композита “сплав TiNi - сталь”, полученного сваркой взрывом// Сборник материалов 50-го международного симпозиума «Актуальные проблемы прочности» 27 сентября – 1 октября 2010 г. Витебск, Беларусь Часть 1, с.130-132.
7. Реснина Н.Н., Беляев С.П., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Ломакин И.В. Обратимая деформация в биметаллическом композите «Сталь – сплав TiNi с памятью формы»// Материалы 51-й международной конференции “Актуальные проблемы прочности” 16 - 20 мая 2011 г., Харьков, Украина, с. 258.
8. С.П. Беляев, Н.Н. Реснина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., И.В. Ломакин. Обратимая деформация пластины «Сталь – сплав TiNi» // Научно-технический

семинар «Бернштейновские чтения по термической обработке мбметаллических материалов», Москва. 26-28 октября 2011г. Тезисы докладов.- М: НИТУ «МИСиС», 2011. – стр. 64.

9. Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В. мл., Ломакин И.В. Структура сварного шва и изменение микротвердости в биметаллических композитах на основе сплава TiNi, полученных сваркой взрывом// Сборник материалов "XX Петербургские чтения по проблемам прочности", 10-12 апреля 2012, СПб. С. 197-199.

10. Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В. мл., Рубаник О.Е., Ломакин И.В. Свойства биметаллических композитов с эффектом памяти формы// Сборник тезисов докладов 52-й международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности» 4 – 8 июня 2012 г. Уфа, Россия, с. 83.

11. Belyaev Sergey, Resnina Natalia, Rubanik Vasilij, Rubanik Vasilij (jr.), Rubanik Oksana, Lomakin Ivan. Properties of Ti–50.0 at. % Ni/ Ti – 50.7 at. % Ni bimetal composite produced by explosion welding// The 8th European Symposium on Martensitic Transformations (ESOMAT), Saint Petersburg, Russia, 2012. — P. 105.

12. Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В. мл., Ломакин И.В. Термобиметаллы на основе сплавов TiNi // 54 Международная конференция “Актуальные проблемы прочности”, тезисы докладов. ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, 2013 г. – с.161.

13. S. Belyaev, V. Rubanik, N. Resnina, V. Rubanik Jr., I. Lomakin. Martensitic transformations and recoverable strain in Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>-Ti<sub>49.3</sub>Ni<sub>50.7</sub> bimetal composite produced by explosion welding// Euro Intelligent Materials Conference, Kiel, Germany, 2013. – P. 68.

14. Беляев С.П., Волков А.Е., Евард М.Е., Ломакин И.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл. Биметаллы с эффектом памяти формы: эксперимент и расчет // Международная конференция “Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы”. 26-30 мая 2014 года. Витебск, Беларусь : Материалы конференции/ УО «ВГТУ» - Витебск, 2014. Стр. 122.

15. S. Belyaev, M. Evard, I. Lomakin, N. Resnina, V. Rubanik, V. Rubanik Jr., A. Volkov. Functional properties of shape memory bimetal plates// International Conference on Martensitic Transformations 2014 (ICOMAT-2014). Abstract Book. Bilbao, Spain, 2014. – P. 51.