

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА "СПЛАВ TiNi – СТАЛЬ", ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

Беляев С. П.<sup>1</sup>, Рубаник В. В.<sup>2,3</sup>, Реснина Н. Н.<sup>1</sup>, Рубаник В. В. мл.<sup>2,3</sup>,  
Рубаник О. Е.<sup>2</sup>, Ломакин И. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Витебский государственный технологический университет, Витебск, Белоруссия

<sup>3</sup> Институт технической акустики НАН Белоруссии, Витебск, Белоруссия

[resnat@mail.ru](mailto:resnat@mail.ru)

Как правило, в термомеханических приводах элемент из сплава с памятью формы и упругий элемент являются различными телами, соединенными между собой. Однако возможно и иное конструктивное решение, которое заключается в том, что два элемента, один из которых обладает эффектом памяти формы, а другой – упругими свойствами, составляют одно тело. Это может быть реализовано в биметаллическом композите, составленном из сплава с памятью формы и, например, стали. В этом случае возникает проблема соединения двух разнородных сплавов между собой. Существует несколько возможных решений этой технологической задачи, одним из которых является «холодная» сварка взрывом. В работе [1] впервые было показано, что сплав с памятью формы на основе TiNi и нержавеющая сталь могут быть соединены сваркой взрывом с образованием прочного шва на границе между двумя материалами. В [2] было установлено, что при сварке взрывом зона перемешивания между сплавом TiNi и сталью оказывается очень узкой (не более 6 мкм), а интерметаллидные и неметаллические включения не образуются, что способствует повышению прочности биметаллического соединения. Обнаружено, что в результате взрыва соединяемые поверхности подвергаются значительным пластическим деформациям, что приводит к частичному подавлению мартенситных превращений в слое TiNi, а, следовательно, и к ухудшению функциональных свойств. Вместе с тем в работе [3] показано, что последующий отжиг приводит к восстановлению кинетики фазовых переходов.

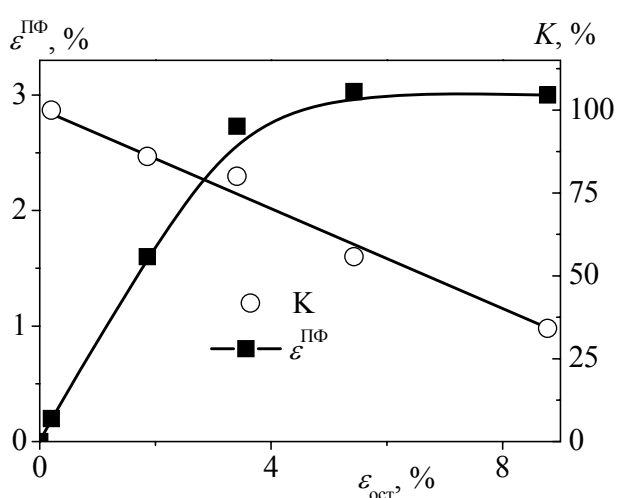
Обратимое изменение деформации в биметаллическом композите определяется двумя факторами – способностью слоя TiNi восстанавливать деформацию при нагревании и возможностью стального слоя упруго деформироваться, поэтому естественно полагать, что функциональные свойства композита будут определяться геометрическими параметрами пластин. В работе [4] установлено, что наилучшим сочетанием свойств обладает биметаллический композит, в котором слой никелида титана составляет 60 – 65 % от общей толщины образца. Вместе с тем известно, что в никелиде титана величины эффектов памяти формы и обратимой памяти формы напрямую зависят от величины предварительной деформации, заданной сплаву в мартенситном состоянии. Поэтому естественно полагать, что в биметаллическом композите «сплав TiNi - сталь» функциональные свойства будут определяться величиной предварительной деформации. Исследование влияния предварительной деформации на свойства биметалла и явилось целью настоящей работы.

В качестве объектов исследования выбраны биметаллические композиты “сталь X18H10T – сплав с памятью формы Ti–51 ат. % Ni”, полученные “холодной” сваркой взрывом. Образцы длиной 45 мм, шириной 5 мм и толщиной 2,13 мм, в которых слой TiNi составлял 64 % от общей толщины образца, предварительно отжигали при температуре 600 °С в течение 2 часов. Калориметрические исследования, проведенные в дифференциальном сканирующем калориметре Mettler Toledo 822e, показали, что после указанной термообработки, при охлаждении в слое TiNi реализуется превращение из кубической B2 фазы в моноклинную B19' фазу при температурах  $M_n = 6$  °С и  $M_k = -17$  °С,

а при нагревании обратный переход из фазы В19' в фазу В2 при температурах  $A_n = 8^\circ\text{C}$  и  $A_k = 26^\circ\text{C}$ .

Для исследования влияния предварительной деформации на функциональные свойства биметаллического композита производили следующие эксперименты. При температуре  $-170^\circ\text{C}$ , при которой слой TiNi находился в мартенситном состоянии, биметаллические образцы изгибали до различных деформаций  $\varepsilon$  от 0.5 % до 10 % и разгружали. После этого их нагревали до температуры  $180^\circ\text{C}$ , для того чтобы перевести сплав TiNi в аустенитное высокотемпературное состояние и измерить величину эффекта памяти формы. Далее биметаллический композит термоциклировали в интервале температур  $120^\circ\text{C} \div -170^\circ\text{C}$  десять раз для изучения влияния количества теплосмен на характеристики обратимого формоизменения. Деформирование осуществляли в режиме трех-точечного изгиба в испытательной машине Lloyd 30k Plus, оснащенной термокамерой.

Зависимости  $\varepsilon(T)$  при нагреве и последующем термоциклировании были получены для биметаллических композитов,



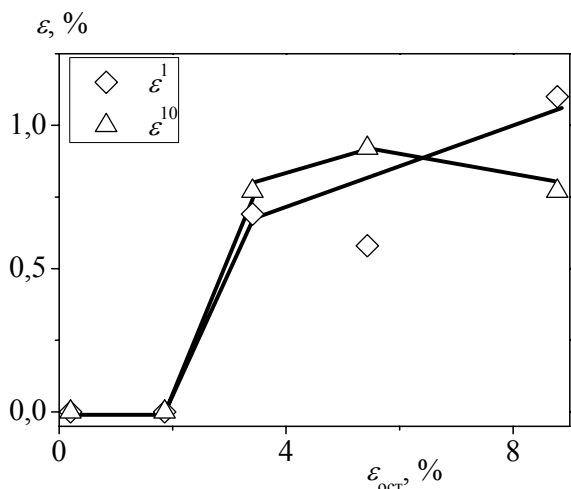
**Рис. 1.** Зависимость величины эффекта памяти формы и коэффициента возврата от остаточной деформации в биметаллическом композите «сплав TiNi - сталь»

деформацию оценивали коэффициентом возврата деформации, вычисляемый как отношение деформации, восстановленной при первом нагреве  $\varepsilon^{\text{ПФ}}$ , к деформации, оставшейся в образце после разгрузки в мартенситном состоянии  $\varepsilon_{\text{ост}}$ . Установлено, что хотя величина эффекта памяти формы увеличивается при возрастании остаточной деформации, коэффициент возврата при этом линейно уменьшается (рис. 1). Так, например, в образце, предварительно деформированном до 3 % ( $\varepsilon_{\text{ост}} = 1.86\%$ ), при нагревании восстанавливается 86 % от остаточной деформации, а в образце, деформированном до 10% ( $\varepsilon_{\text{ост}} = 8.8\%$ ), коэффициент  $K$  равен лишь 34 %.

На рис. 2 представлена зависимость обратимой деформации, измеренной в первом и десятом термоциклах, от величины остаточной деформации. Видно, что в том случае, когда остаточная деформация не превосходит 2 %, обратимая деформация в биметаллическом образце не наблюдается. По всей видимости, изменения деформации при нагревании столь незначительны, что возникающих напряжений оказывается недостаточно для инициирования сколь-нибудь значительного по величине эффекта пластичности превращения в первом термоцикле. В образцах с остаточной деформацией более 2 % в первом термоцикле наблюдается изменение деформации. Как и следовало ожидать, эта величина нарастает по мере увеличения предварительной деформации. Дальнейшее термоциклирование по-разному влияет на величину обратимой деформации в зависимости от уровня предварительной деформации. При остаточных деформациях не пре-

для биметаллических композитов, деформированных до различных степеней деформации. Для каждой серии экспериментов определяли величину эффекта памяти формы  $\varepsilon^{\text{ПФ}}$ , величины обратимой деформации, наблюдаемой в первом и десятом циклах  $\varepsilon^1$  и  $\varepsilon^{10}$ , а также температуры формовосстановления при первом нагревании  $A_n$  и  $A_k$ , в первом и десятом термоциклах  $A_n^1$ ,  $A_k^1$ ,  $A_n^{10}$ ,  $A_k^{10}$ . На рис.1 представлена зависимость величины эффекта памяти формы от остаточной деформации после разгрузки в мартенситном состоянии  $\varepsilon_{\text{ост}}$ . Видно, что с ростом остаточной деформации величина эффекта памяти формы увеличивается до 3% и далее не меняется. Способность материала восстанавливать неупругую

вышающих 7 % наблюдается эффект тренировки и величина обратимой деформации увеличивается от цикла к циклу. В то же время в образцах с остаточной деформацией более 7 % имеет место уменьшение величины обратимой деформации по мере увеличения количества циклов.



**Рис. 2.** Зависимость обратимой деформации, наблюдаемой в первом и десятом термоциклах от остаточной деформации биметаллического композита «сплав TiNi - сталь»

циклирования под высокими напряжениями. Результаты работы показали, что биметаллический образец может быть использован как активный элемент термомеханического привода, а величина предварительной деформации может быть выбрана в качестве воздействия, управляющего функциональными свойствами таких объектов.

*Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ для молодых кандидатов наук (МК – 466.2010.8) и Российско-Белорусского гранта РФФИ (10-08-90003\_Бел\_а) и БФФИ (Т10Р - 223).*

### Список литературы

1. R. Prummer, D. Stockel NITINOL – stainless steel compound material, made by explosion welding// Fundamental issue and applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena, K.P. Staudhammer, L. E. Murr, M.A. Meyers eds., Elsevier, 2001.
2. S.Belyaev, V. Rubanik, N. Resnina, V. Rubanik Jr., O. Rubanik, V. Borisov Martensitic transformation and physical properties of “steel - TiNi” bimetall composite, produced by explosion welding// Phase Transitions V.83, N.4, 2010, P.276-283.
3. С.П. Беляев, В.В. Рубаник, Н.Н. Реснина, В.В. Рубаник мл., О.Е. Рубаник Влияние отжига на мартенситные превращения в биметаллическом композите «сталь-сплав TiNi», полученном сваркой взрывом//Металловедение и термическая обработка металлов (принята в печать).
4. С.П. Беляев, В.В. Рубаник, Н.Н. Реснина, В.В. Рубаник (мл), О.Е. Рубаник Оптимизация свойств биметаллического композита «сталь-сплав TiNi с памятью формы» Сборник докладов Международной научной конференции Актуальные проблемы физики твердого тела (20-23 октября 2009 г. Минск, Белоруссия) Минск, 2009, Том 3 с. 242-244.

Таким образом, результаты работы показали, что изменяя величину предварительной деформации биметаллического композита удается направленно изменять функциональные свойства биметаллического композита «сплав TiNi - сталь». По мере увеличения предварительной деформации наблюдается возрастание величины эффекта памяти формы, величины обратимой деформации, увеличение температур формовосстановления и расширение температурного интервала при первом нагреве. Установлено, что термоциклирование может приводить как к возрастанию величины обратимой деформации за счет эффекта тренировки, так и к её уменьшению вследствие подавления мартенситных превращений в результате термоциклирования.