

УДК 539.3

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА «TiNi – СТАЛЬ»

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

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

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

<sup>3)</sup> Институт технической акустики НАН Белоруссии, г. Витебск, Белоруссия, e-mail: farad2005@yandex.ru

*Ключевые слова:* биметаллический композит; сварка взрывом; сплав TiNi.

Исследовано влияние предварительной деформации на эффект памяти формы, обратимую деформацию и температуры восстановления деформации в биметаллическом композите «TiNi – сталь», полученном сваркой взрывом.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из применений сплавов с памятью формы являются приводы многократного действия. Принцип их работы основан на том, что при нагревании элемент из сплава с памятью формы может не только восстанавливать свою первоначальную форму, но и развивать значительные усилия. Для того чтобы это действие повторялось многократно, элемент из сплава с памятью формы, предварительно деформированный в низкотемпературном мартенситном состоянии, соединяют с упругим контртелом. При нагревании элемент из сплава с памятью формы восстанавливает свою первоначальную форму, деформирует упругий элемент и в системе возникают напряжения. При охлаждении через интервал прямого мартенситного превращения эти напряжения инициируют в элементе из сплава с памятью формы эффект пластичности превращения. В результате этот элемент деформируется и накапливает неупругую деформацию, а напряжение в системе релаксирует. При последующих термоциклах все описанные действия повторяются, и тем самым обеспечивается многократное срабатывание термомеханического привода.

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.

**Объекты и методики исследования.** 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 ч. Калориметрические исследования, проведенные в дифференциальном сканирующем калориметре Mettler Toledo 822e, пока-

зали, что после указанной термообработки, при охлаждении, в слое TiNi реализуется превращение из кубической B2 фазы в моноклинную B19' фазу при температурах  $M_n = 6^\circ\text{C}$  и  $M_k = -17^\circ\text{C}$ , а при нагревании – обратный переход из фазы B19' в фазу B2 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  $120\text{--}170^\circ\text{C}$  десять раз для изучения влияния количества теплосмен на характеристики обратимого формоизменения. Деформирование осуществляли в режиме трехточечного изгиба в испытательной машине Lloyd 30k Plus, оснащенной термокамерой.

#### Результаты экспериментальных исследований.

На рис. 1 представлены изменения деформации, наблюдаемые при нагревании образца непосредственно после деформации ( $\varepsilon = 5\%$ ) и при нагревании в последующих первом и десятом термоциклах. Видно, что при первом нагревании значительная часть деформации восстанавливается в температурном интервале  $27\text{--}36^\circ\text{C}$ , что обусловлено реализацией обратного мартенситного превращения. При последующем термоциклировании также наблюдается изменение формы, однако величина изменения деформации становится существенно меньше, а температуры формовосстановления смещаются в область низких температур. Так, при первом нагревании восстанавливается 2,73 %, а в первом термоцикле изменение деформации составляет лишь 0,7 %. Следует отметить, что дальнейшее термоциклирование в интервале температур фазового превращения приводит к некоторому увеличению этого значения. Так, в десятом термоцикле величина обратной деформации составляет уже 0,77 %. Такое явление известно под названием «эффект тренировки». По кривым  $\varepsilon(T)$  были определены температуры формовосстановления. На рис. 1 видно, что эффект памяти формы реализуется в биметаллическом композите при первом нагреве при более высоких температурах, чем изменение деформации при последующих термоциклах. Известно, что в никелиде титана предварительное деформирование сплава, находящегося в мартенситном состоянии, приводит к стабилизации мартенситной фазы. Это выражается в том, что при нагреве обратное превращение происходит при существенно больших температурах, чем в недеформированном материале. Эффект стабилизации мартенсита является однократным и при последующих нагреваниях не проявляется [5]. Результаты, полученные в настоящей работе, показывают, что аналогичные закономерности наблюдаются и в биметаллическом композите (см., например, рис. 1).

Зависимости  $\varepsilon(T)$  при нагреве и последующем термоциклировании были получены для биметаллических композитов, деформированных до различных степеней деформации. Для каждой серии экспериментов определяли величину эффекта памяти формы  $\varepsilon^{\text{ПФ}}$ , величины обратной деформации, наблюдаемой в первом и деся-

том 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. 2 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 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. 2). 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 К остался равен лишь 34 %.

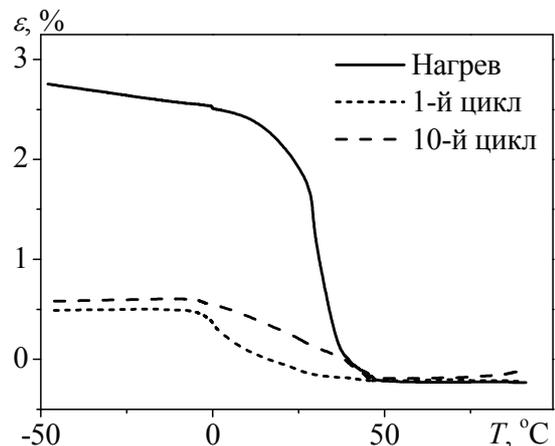


Рис. 1. Изменение деформации при нагревании биметаллического образца «сплав TiNi – сталь», деформированного до деформации  $\varepsilon = 5\%$  ( $\varepsilon_{\text{ост}} = 2,75\%$ ), и при нагревании в последующих первом и десятом термоциклах

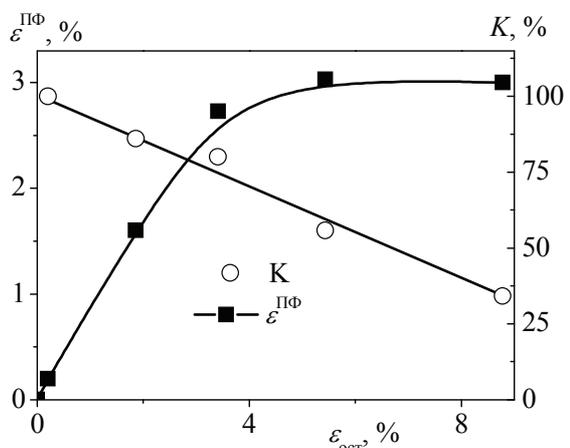


Рис. 2. Зависимость величины эффекта памяти формы и коэффициента возврата от остаточной деформации в биметаллическом композите «сплав TiNi – сталь»

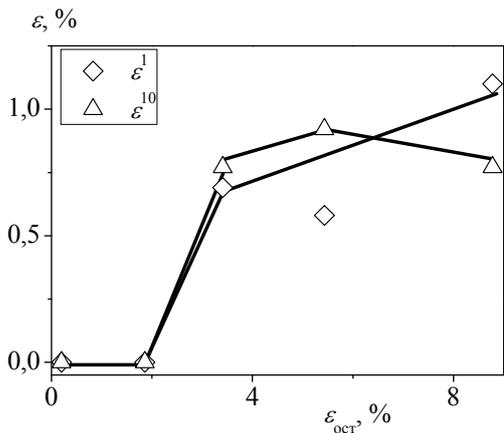


Рис. 3. Зависимость обратимой деформации, наблюдаемой в первом и десятом термоциклах от остаточной деформации биметаллического композита «сплав TiNi – сталь».

Для того чтобы понять влияние предварительной деформации на способность биметаллического композита восстанавливать неупругие деформации, рассмотрим процессы, происходящие в биметаллическом образце при деформировании и последующем нагревании. После деформирования биметалла слой сплава TiNi и слой стали приобретают некоторую остаточную деформацию ( $\epsilon_{ост}$ ). При последующем нагревании в сплаве TiNi происходит обратное мартенситное превращение, что способствует восстановлению деформации композита. Изменение формы слоя сплава TiNi при нагревании вызывает деформирование слоя стали, при этом в образце возникают напряжения. Чем больше предварительная деформация биметаллического образца, тем больше величина восстанавливаемой деформации, а следовательно, тем выше напряжения, возникающие в образце при нагревании. Эти напряжения препятствуют восстановлению формы, что и является основной причиной уменьшения коэффициента возврата с ростом предварительной деформацией. При охлаждении напряжение инициирует эффект пластичности превращения, что приводит к увеличению деформации биметаллического образца и релаксации напряжения. При последующем нагревании накопленная деформа-

ция уменьшается, а напряжения вновь аккумулируются. Такая генерация – релаксация напряжения приводит к тому, что в первом и последующих термоциклах наблюдается обратимое формоизменение. На рис. 3 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 превышающих 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. Как уже отмечалось, чем больше предварительная деформация, тем выше напряжения, возникающие в образце. При превышении величины остаточной деформации более 7 % величина этих напряжений оказывается очень высокой, что приводит к уменьшению восстанавливаемой при нагреве деформации.

На рис. 4 представлены зависимости температур начала и окончания формовосстановления при первом нагревании и в первом и десятом термоциклах от величины остаточной деформации. Видно, что температура  $A_n$  линейно нарастает по мере увеличения остаточной деформации. Такое поведение связано с уже обсуждавшимся эффектом стабилизации мартенсита, для которого характерно увеличение смещения температур обратного превращения с ростом предварительной деформации (рис. 4, а). При этом температуры начала и окончания обратного превращения должны изменяться синхронно. Однако в биметалле температура  $A_k$

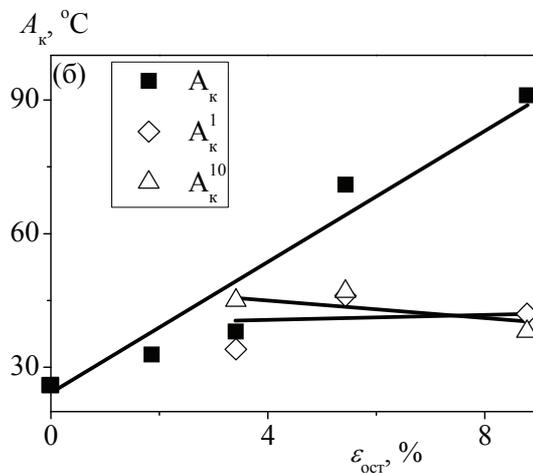
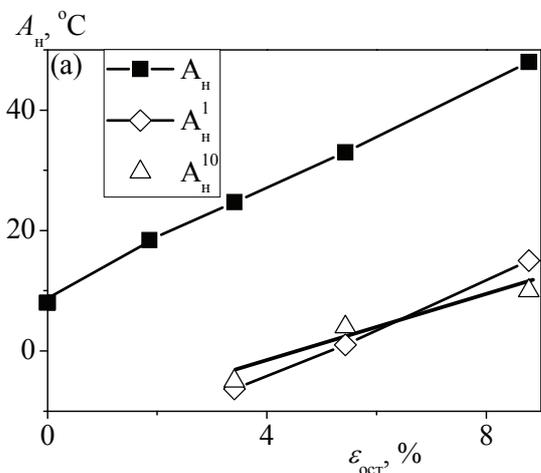


Рис. 4. Зависимость температур начала (а) и окончания (б) формовосстановления при нагревании и в первом и десятом термоциклах от остаточной деформации биметаллического образца «сплав TiNi – сталь»

нарастает с большим темпом по сравнению с температурой  $A_n$  (рис. 4, б). Дело в том, что в биметаллическом образце действует дополнительный фактор, оказывающий действие на температуру  $A_k$ , а именно напряжение, создаваемое упругим компонентом биметалла. В результате при росте предварительной деформации температурный интервал восстановления формы при первом нагревании существенно увеличивается.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом результаты работы показали, что, изменяя величину предварительной деформации биметаллического композита, удастся 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 ее уменьшению вследствие подавления мартенситных превращений в результате термоциклирования 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.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Prummer R., Stockel D.* NITINOL – stainless steel compound material, made by explosion welding // *Fundamental issue and applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena* / ed. by K.P. Staudhammer, L.E. Murr, M.A. Meyers. Elsevier, 2001.
2. *Belyaev S., Rubanik V., Resnina N., Rubanik V. Jr., Rubanik O., Borisov V.* Martensitic transformation and physical properties of “steel - TiNi” bimetal composite, produced by explosion welding // *Phase Transitions* V. 83. № 4. 2010. P. 276-283.
3. *Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В. мл., Рубаник О.Е.* Влияние отжига на мартенситные превращения в биметаллическом композите «сталь-сплав TiNi», полученном сваркой взрывом // *Металловедение и термическая обработка металлов (принята в печать)*.
4. *Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В. мл., Рубаник О.Е.* Оптимизация свойств биметаллического композита «сталь-сплав TiNi с памятью формы» // *Актуальные проблемы физики твердого тела: сборник докладов Международной научной конференции (20–23 октября 2009 г. Минск, Белоруссия)*. Минск, 2009. Т. 3. С. 242-244.
5. *Liu Y., Favier D.* Stabilization of martensite due to shear deformation via variant reorientation in polycrystalline NiTi // *Acta Mater.* V. 48. 2000. P. 3489-3499.

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

Поступила в редакцию 15 апреля 2010 г.

Belyaev S.P., Rubanik V.V., Resnina N.N., Rubanik V.V. Jr., Lomakin I.V., Rubanik O.E. Influence of preliminary deformation on functional properties of bimetal composite “TiNi – steel”. Influence of preliminary deformation on shape memory effect, recoverable strain and temperatures of strain recovery in bimetal composite “TiNi – steel”, produced by explosion welding, was studied.

*Key words:* bimetal composite; explosion welding; TiNi alloy.