

## КИНЕТИКА МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В БИМЕТАЛЛИЧЕСКОМ КОМПОЗИТЕ “СТАЛЬ – СПЛАВ TiNi” ПРИ МНОГОКРАТНОМ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ

Клубович В.В., Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В. мл.,  
Рубаник О.Е.

*Институт технической акустики НАН Беларуси,  
Витебский государственный технологический университет,  
Санкт-Петербургский государственный университет*

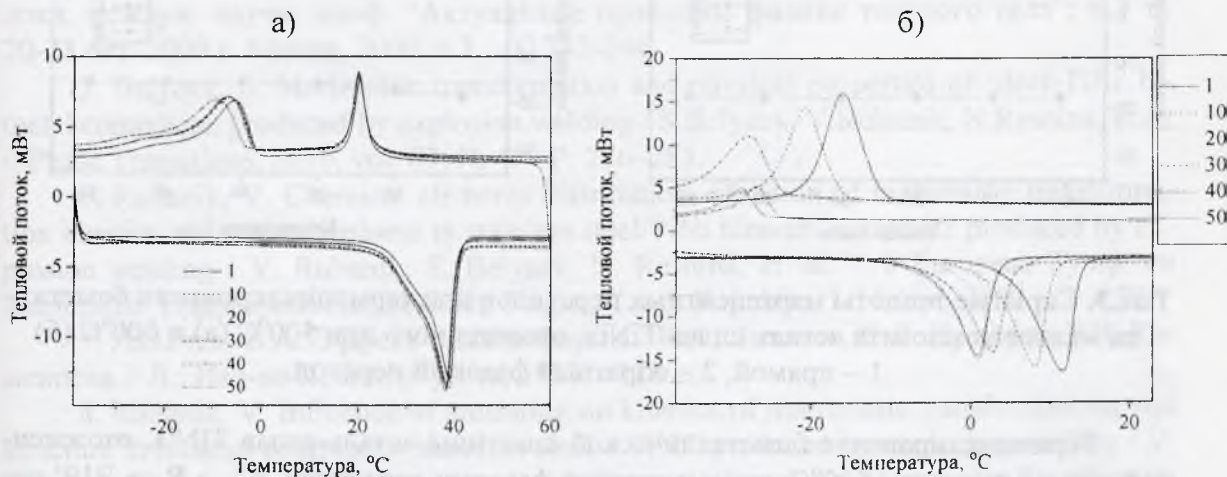
Одним из применений сплавов с памятью формы являются термомеханические приводы (термоактуаторы), принцип действия которых основан на способности материала восстанавливать значительные неупругие деформации при нагревании или же развивать значительные усилия. В термомеханических приводах может использоваться упругое контртело в сочетании с элементом из сплава с памятью формы (СПФ), что обеспечивает многократное срабатывание привода при термоциклировании без необходимости повторного деформирования после каждого нагревания.

Одним из способов получения биметаллических композитов является соединение сваркой взрывом [1-3]. При этом свойства сплавов изменяются из-за больших пластических деформаций в результате ударного нагружения. Последующей термообработкой удастся полностью или частично восстановить структуру и функциональные характеристики композита [3-5]. Однако использование биметалла на базе СПФ в качестве термомеханического привода многократного действия сдерживается отсутствием данных по закономерностям реализации мартенситных превращений и обратимого деформирования при многократных теплосменах. Это связано с тем, что термоциклирование через интервалы фазовых превращений вызывает изменение кинетики мартенситных переходов и параметров деформационных эффектов в СПФ. Поскольку основное изменение свойств материала при термоциклировании обуславливается влиянием фазового и деформационного упрочнения, то в зависимости от напряженно-деформированного состояния сплава многократные теплосмены могут приводить как к улучшению, так и к ухудшению функциональных свойств.

В связи с этим, основной целью работы являлось исследование изменения температур, температурных интервалов и последовательности мартенситных превращений, при многократном термоциклировании термоактуатора на основе биметаллического композита “упругое тело – сплав TiNi с памятью формы”.

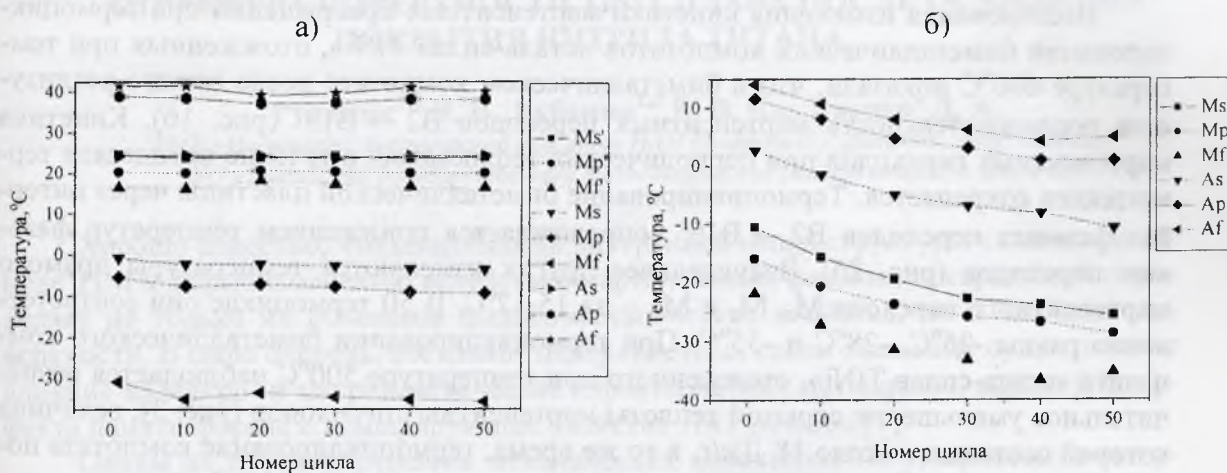
Образцы получали методом холодной сварки взрывом пластин стали 12Х18Н10Т и сплава Ti-50,6ат.%Ni, обладающего эффектом памяти формы. После интенсивного ударного нагружения в процессе сварки сплав оказывается сильно деформированным, его структура насыщена дефектами и, как результат, мартенситные превращения в значительной степени подавлены [6]. Действие пластической деформации может быть устранено отжигом материала [7]. Кроме этого, варьируя температуру и длительность отжига можно изменять и последовательность мартенситных переходов [8]. Отжиг при температуре 500°C в течение 1-2 часов с последующей закалкой в воду со льдом биметаллического композита приводит к тому, что влияние деформации полностью устраняется. При охлаждении в материале реализуется структурный переход из кубической B2 фазы в ромбоэдрическую R, и далее в моноклинную B19'. Кинетика мартенситных переходов сохраняется при периодических теплосменах в течение первых пятидесяти термоциклов (рис. 1а).

При сварке взрывом значительной пластической деформации подвергается не только зона соударения, о чем свидетельствует распределение микротвердости, но и весь объем пластин [5, 6]. Основным механизмом влияния отжига на кинетику мартенситных превращений в биметаллическом композите является устранение последствий пластической деформации.

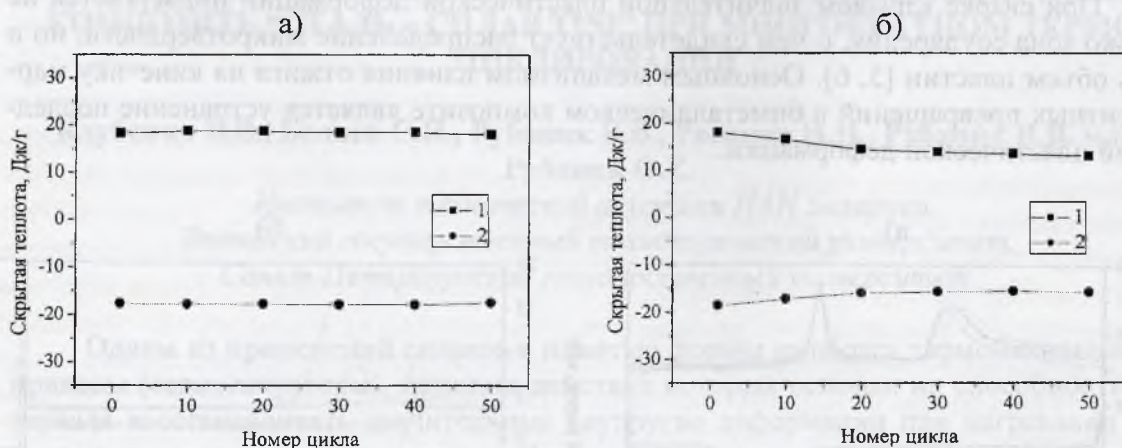


**Рис.1.** Кинетика мартенситных переходов при термоциклировании биметаллического композита «сталь-сплав TiNi», отожженного при 500°C (а) и 600°C (б).

Числа указывают номера термоциклов



**Рис.2.** Характеристические температуры мартенситных переходов при термоциклировании биметаллического композита «сталь-сплав TiNi», отожженного при 500°C (а) и 600°C (б)



**Рис.3.** Скрытые теплоты мартенситных переходов при термоциклировании биметаллического композита «сталь-сплав TiNi», отожженного при 500°C (а) и 600°C (б) 1 – прямой, 2 – обратный фазовый переход

Термоциклирование биметаллической пластины «сталь-сплав TiNi», отожженной при температуре 500°C, через интервал фазовых переходов B2 → R → B19' сопровождается понижением температур фазовых переходов (рис. 2), что связано с увеличением плотности дефектов в материале пластины. Значительнее других изменяются температуры прямого мартенситного перехода R → B19':  $M_s$ ,  $M_p$  и  $M_f$ . Изменение характеристических температур составляет до 5-7°C (рис. 2).

Исследования изменения кинетики мартенситных превращений при термоциклировании биметаллических композитов «сталь-сплав TiNi», отожженных при температуре 600°C показали, что в биметаллическом композите после отжига реализуется последовательность мартенситных переходов B2 → B19' (рис. 16). Кинетика мартенситных переходов при периодических теплосменах в течение пятидесяти термоциклов сохраняется. Термоциклирование биметаллической пластины через интервал фазовых переходов B2 → B19' сопровождается понижением температур фазовых переходов (рис. 26). Значительнее других изменяются температуры прямого мартенситного перехода  $M_s$ ,  $M_p$  и  $M_f$  – на 15-17°C. В 50 термоцикле они соответственно равны -25°C, -28°C и -35°C. При термоциклировании биметаллического композита «сталь-сплав TiNi», отожженного при температуре 500°C наблюдается незначительное уменьшение скрытой теплоты мартенситных переходов (рис. 3), величина которой составляет около 18 Дж/г, в то же время, термоциклирование композита после отжига при 600°C уменьшает скрытую теплоту переходов до 14 Дж/г.

Таким образом, установлены закономерности изменения кинетики мартенситных превращений при многократном термоциклировании биметаллического композита «сталь – сплав TiNi» после отжига при 500°C и 600°C. Термоциклирование биметаллической пластины «сталь 12X18H10T – сплав TiNi», полученный сваркой взрывом, через интервал фазовых переходов сопровождается понижением характеристических температур и уменьшение скрытой теплоты фазовых переходов.

#### Список использованных источников

1. Захаренко, И.Д. Сварка металлов взрывом. Минск, Наука и техника, 1990, 205 с.
2. Крупин, А.В. Деформация металлов взрывом / А.В. Крупин, В.Я. Соловьев, Н.И. Шефтель, А.Г. Кобелев М. // Металлургия, 1975, 416с.

3. Рубаник, О.Е. Получение сваркой взрывом и свойства композитов TiNi-сталь / О.Е.Рубаник, В.В.Клубович, В.В.Рубаник мл. // Сб. докл. 8 междунар. конф. «Авангардные машиностроительные технологии», Болгария, Кранево, 18-20 июня 2008 г. – С.185-189.

4. Беляев, С.П. Оптимизация свойств биметаллического композита «сталь сплав TiNi с памятью формы» / С.П.Беляев, В.В.Рубаник, Н.Н.Реснина и др. // Сб. докл. междунар. научн. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела»: в 3 т., 20-23 окт. 2009 г. Минск, 2009, т.3. – С.242-244.

5. Belyaev, S. Martensitic transformation and physical properties of 'steel-TiNi' bi-metal composite, produced by explosion welding / S.Belyaev, V.Rubanik, N.Resnina, et.al. // Phase Transitions, 2010, vol. 83, № 4. – P. 276–283.

6. Rubanik, V. Chemical elements distribution, variation of martensitic transformation kinetics and micro-hardness in stainless steel/TiNi bimetal composite produced by explosion welding / V. Rubanik, S. Belyaev, N. Resnina, et. al. // 8 European Symp. on Martensitic Transformations: abstract. Prague, Czech Republic, 7-11 sept. 2009. – P. 130.

7. Лихачев, В.А. Эффект памяти формы / В.А. Лихачев, С.Л. Кузьмин, З.П. Каменцева // Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. - 216 с.

8. Rubanik, V. Influence of annealing on kinetics of martensitic transformations and structure in bimetal composite “stainless steel – TiNi” produced by explosion welding / V. Rubanik, N. Resnina, S. Belyaev, et. al. // 8 European Symp. on Martensitic Transformations: abstract. Prague, Czech Republic, 7-11 sept. 2009. – P. 132.

## СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ TiNi СПЛАВА ПОСЛЕ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НИТРИДА ТИТАНА

Рубаник<sup>1,2</sup> В. В., Рубаник<sup>1,2</sup> В. В. мл., Багрец<sup>1</sup> Д. А.

<sup>1</sup>ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск, ita@vitebsk.by

<sup>2</sup>УО «Витебский государственный технологический университет», г. Витебск

Хорошо известно, что способность внутренней микроструктуры сплавов на основе TiNi к формоизменению вследствие мартенситных фазовых превращений определяет не только их объемные физико-механические свойства, но и свойства поверхности. В свою очередь, состояние поверхностных слоев оказывает существенное влияние на микро- и макропластические характеристики материалов, параметры эффекта памяти формы и демпфирующие свойства этих сплавов [1].

Одним из путей улучшения механических характеристик (твердости, износостойкости, снижения коэффициента трения) поверхностных слоев TiNi сплавов, а также их коррозионных свойств и биосовместимости, при одновременном сохранении эффекта памяти формы и сверхэластичности, является осаждение защитных покрытий.

Поэтому актуальной задачей видится установление закономерностей изменения структурно-фазового состояния, микроструктуры поверхности и приповерхностных слоев в результате модификации поверхности сплавов на основе TiNi и, в частности, осаждения тонких (порядка 1-2 мкм) пленок нитрида титана.

В качестве образцов использовали медицинский сплав TiNi в виде проволоки диаметром 0,6 мм. Образцы перед нанесением TiN покрытий проходили ультразвуковую обработку в специальной таре для обезжиривания с последующей промывкой в дистиллированной воде. Для нанесения TiN покрытий использовали установку