

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Витебский государственный технологический университет (УО «ВГТУ»)

669.24

УДК 621.9.02.048

№ ГР 20102501

Инв. № \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной  
работе УО «ВГТУ»



Е.В. Ванкевич

2012 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ФУНКЦИОНАЛЬНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОАКТУАТОРА НА  
ОСНОВЕ БИМЕТАЛЛА, СОДЕРЖАЩЕГО СПЛАВ TiNi С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ  
(заключительный)

2010- г/б-№616

Научный руководитель  
к.ф.-м.н.

15.03.2012 В.В. Рубаник

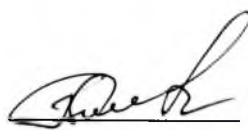
Начальник НИЧ УО «ВГТУ»

15.03.2012 С.А. Беликов

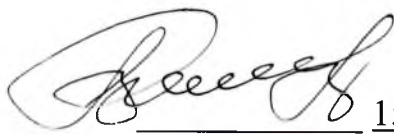
Витебск 2012

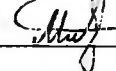
## Список исполнителей

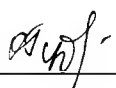
Научный руководитель,  
к.ф.-м.н, доцент


 15.03.2012 В.В. Рубаник мл.  
(разделы 1-4)


Исполнители:

д.т.н.  15.03.2012 В.В. Рубаник  
(введение,  
разделы 1-4)

м.н.с.  15.03.2012 С.Н. Милюкина  
(раздел 2, 3)

м.н.с.  15.03.2012 О.Е. Рубаник  
(раздел 2, 3)

м.н.с.  15.03.2012 А.В. Шадурский  
(раздел 2, 3)

Нормоконтролер  15.03.2012 А.Д.Шилин



## Реферат

Отчет 47 с., 23 рис., 32 источника.

### ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ, АКТУАТОР, ФАЗОВОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ, БИМЕТАЛЛ, СВАРКА ВЗРЫВОМ

Объектом исследований является биметаллический композит сталь-сплав TiNi с памятью формы.

Целью работы является исследование изменения температур, температурных интервалов и последовательности мартенситных превращений, параметров обратной деформации при многократном термоциклировании термоактуаторов на основе биметаллического композита “упругое тело – сплав TiNi с памятью формы”.

Установлены закономерности изменения кинетики мартенситных превращений при многократном термоциклировании биметаллического композита «сталь–сплав TiNi» после отжига при 500°C и 600°C в котором соответственно реализуется последовательность мартенситных переходов  $B2 \rightarrow B19'$  и  $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ . Кинетика мартенситных переходов при периодических теплосменах в течение пятидесяти термоциклов сохраняется и сопровождается понижением температур фазовых переходов.

Исследования деформационного поведения биметаллического композита «сталь-сплав TiNi» показали, что инициировании фазовых переходов методом ультразвуковых колебаний, предварительно деформированных и отожженных при температурах 500°C и 600°C, реализует в нем проявление обратимой памяти формы.

Результаты исследований показывают, что биметаллический образец может быть использован как активный элемент термомеханического привода, а величина предварительной деформации может быть использована в качестве воздействия, управляющего функциональными свойствами таких объектов.

## Содержание

Введение.....	5
1 Изготовление образцов биметаллического композита «сталь – сплав TiNi» методом холодной сварки взрывом и их термическая обработка при температурах 500°C и 600°C.....	7
2 Кинетика мартенситных превращений при многократном термоциклировании биметаллических композитов «сталь-сплав TiNi».....	12
2.1 Исследование изменения кинетики мартенситных превращений при многократном термоциклировании биметаллических композитов «сталь-сплав TiNi», отожженных при температуре 500°C.....	12
2.2 Исследование изменения кинетики мартенситных превращений при многократном термоциклировании биметаллических композитов «сталь-сплав TiNi», отожженных при температуре 600°C.....	18
3 Исследование изменения величины обратимой деформации и генерируемых напряжений при многократном инициировании фазовых переходов.....	23
3.1 Разработка методики, позволяющей проводить измерения обратимой деформации и генерируемых напряжений при многократном инициировании фазовых переходов ультразвуковым воздействием...	23
3.2 Исследование изменения величины обратимой деформации (мягкий режим) при многократном инициировании фазовых переходов методом ультразвуковых колебаний в биметаллических композитах «сталь-сплав TiNi», предварительно деформированных и отожженных при температуре 500°C.....	27
3.3 Исследование изменения величины обратимой деформации (мягкий режим) при многократном инициировании фазовых переходов методом ультразвуковых колебаний в биметаллических композитах «сталь-сплав TiNi», предварительно деформированных и отожженных при температуре 600°C.....	31
3.4 Исследование изменения величины генерируемых напряжений (жесткий режим) при многократном инициировании фазовых переходов методом ультразвуковых колебаний в биметаллических композитах «сталь-сплав TiNi».....	36
4 Изучение перспектив дальнейшего развития и практического использования полученных результатов.....	39
Заключение.....	42
Список использованных источников.....	43

## Список использованных источников

- 1 Захаренко, И.Д. Сварка металлов взрывом / Захаренко, И.Д. // Мн.: 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. – 416 с.
- 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 международной конфер. «Авангардные машиностроительные технологии АМО\*2008», Болгария, Кранево, 18-20 июня 2008 г. - 2008. – 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, В.В.Рубаник,мл., О.Е.Рубаник // Сб. докладов международной научной конфер. “Актуальные проблемы физики твердого тела”: В 3 т., 20-23 октября 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, V.Rubanik Jr., O.Rubanik, V.Borisov // Phase Transitions, 2010, vol. 83, № 4. – P. 276–283.
- 6 Zhu, Y. Microstructure and Martensitic Transformation Behaviors of Explosively Welded NiTi/NiTi Laminates / Y. Zhu, C. Li-shan, Z. Yan-jun // Chinese Journal of Aeronautics, № 20, 2007. – P. 168-171.
- 7 Ting-yong, X. Influence of aging on damping behavior of TiNi/TiNi alloys synthesized by explosive welding / X. Ting-yong, Z. Yan-jun, C. Li-shan, M. Xu-jun// Trans. Nonferrous Met. Soc. China. № 19, 2009. – P. 1470-1473.
- 8 Gugel, H. Laser welding of NiTi wires / H.Gugel, A.Schuermann, W.Theisen // Mater. Sci. Eng., A 481-482, 2008. – P. 668-671.
- 9 Falvo, A. Laser welding of a NiTi alloy: Mechanical and shape memory behaviour / A.Falvo, F.M.Furgiulele, C.Maletta // Mater. Sci. Eng., A 412, 2005. – P.235-240.

10 Fukumoto, S. Friction welding of TiNi alloy to stainless steel using Ni interlayer / S.Fukumoto, T.Inoue, S.Mizuno, K.Okita, T.Tomita, A.Yamamoto // Sci. Technol. Weld. Join.; 15, 2010. – P.124-130.

11 Ejik, C. Microwave brazing of NiTi shape memory alloy with Ag-Ti and Ag-Cu-Ti alloys / C. van der Ejik, Z.K.Sallom, O.M.Akselsen // Scripta Mater., 58, 2008. – P.779-781.

12 / Shiue, R.H. Infrared brazing of Ti50Ni50 shape memory alloy using two Ag-Cu-Ti active braze alloys / R.H.Shiue, S.K.Wu // Intermetallics, № 14, 2006. – P. 630-638.

13 Prummer, R. NITINOL – stainless steel compound material, made by explosion welding / R. Prummer, D. Stockel // Fundamental issue and applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena: K.P. Staudhammer, L. E. Murr, M.A. Meyers eds., Elsevier, 2001.

14 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, V. Rubanik Jr., O. Rubanik, V. Borisov // 8 European Symposium on Martensitic Transformations (ESOMAT): abstract. Prague, Czech Republic, 7-11 sept. 2009. – P. 130.

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

16 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, V. Rubanik Jr. O. Rubanik, I. Lomakin // 8 European Symposium on Martensitic Transformations (ESOMAT). Abstract/ Prague, Czech republic, 7-11 sept. 2009. – P. 132.

17 Standard test method for transformation temperature of nickel- titanium alloys by thermal analysis, ASTM F2004-00 Standard, 2001.



18 Клубович, В.В. 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., Рубаник О.Е. // Сборник статей : Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» / УО «ВГТУ». Витебск, 2011. - С. 188-191.

19 Беляев, С.П. Влияние отжига на мартенситные превращения в биметаллическом композите "сталь-сплав TiNi", полученном сваркой взрывом / С. П. Беляев, В.В. Рубаник, Н.Н. Реснина, В.В. Рубаник мл., О.Е. Рубаник // Металловедение и термическая обработка металлов, 2010, N 9.- С. 30-34.

20 Хачин, В.Н. Никелид титана: структура и свойства / В.Н.Хачин, В.Г.Пушин, В.В.Кондратьев // М.: Наука, 1992. - 160 с.

21 Belyaev, S.P. Effect of annealing on martensitic transformations in “steel – TiNi alloy” explosion welded bimetallic composite / Belyaev S. P., Rubanik V. V., Resnina N. N., Rubanik V. V., Rubanik O. E. // Metal Science and Heat Treatment. Vol. 52, № 9-10, 2011. - P. 432-436.

22 Рубаник, В.В. Свойства биметаллического композита «сплав с памятью формы TiNi – сталь», полученного сваркой взрывом / В.В.Рубаник, С.П.Беляев, Н.Н.Реснина, В.В.Рубаник мл. Гл. 17. С. 411-432 // В кн. «Актуальные проблемы прочности» / Под общ. редакцией В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2010. – 435 с.

23 Klubovich, V.V. Generation of shape memory effect in Ti-Ni alloy by means of ultrasound / V.V. Klubovich, V.V.Rubanick, V.G.Dorodeiko, V.A.Likhachov, V.V.Rubanick, Jr. // Shape Memory and Superelastic Technologies: Engineering and Biomedical Applications: Proceedings II Intern. Conference, California, USA, 2–6 March 1997 / Ed. by A.Pelton, D.Hodgson, S.Russel, T.Duering. – Asilomar, California, 1997. – P. 59–64.

24 Беляев, С.П. Влияние предварительной деформации на функциональные свойства биметаллического композита «TiNi – сталь» / С.П. Беляев, В.В. Рубаник,

Н.Н. Реснина, В.В. Рубаник мл., И.В. Ломакин, О.Е. Рубаник // Вестник Тамбовского университета. Т. 15, выпуск 3, ч.2, 2010, Серия: Естественные и технические науки. – С. 1152-1155.

25 Чернавина, А.А. Исследование термомеханических условий наведения и характеристик эффектов памяти формы в никелиде титана /Чернавина А.А. // Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / МГИСиС.–М., 2010.– 25 с.

26 Рыклина, Е.П. Исследование термомеханических условий наведения и характеристик обратимого и одностороннего эффектов памяти формы в никелиде титана / Е.П. Рыклина, С.Д. Прокошкин, А.А. Чернавина, Н.Н. Перевощикова // Сб. тр. XLVI Междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности» / УО «ВГТУ». Витебск, Беларусь, 2007. Ч. 1. - С. 163-168.

27 Петров, А.А. Функциональные свойства никелида титана при термомеханических воздействиях, характерных для активных устройств / Петров А.А. // Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / НИИХ СПбГУ.– СПб., 2004.– 19 с.

28 Ohkata, I. The design of shape memory alloy actuators and their applications / I. Ohkata, Y. Suzuki // Shape Memory Materials: Ed. by K. Otsuka, C.M. Wayman, Cambridge University Press, Cambridge, 1998. - P. 240-266.

29 Беляев, С.П. Обратимая деформация биметаллической пластины «сталь-сплав TiNi» / С.П.Беляев, Н.Н.Реснина, В.В.Рубаник, В.В.Рубаник мл., И.В.Ломакин // Тез. докл. научно-технического семинара Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов, 26-28 окт. 2011. М: НИТУ, 2011. – С.64.

30 Belyaev, S. Functional properties of bimetal composite of “stainless steel – TiNi alloy”, produced by explosion welding / S. Belyaev, V. Rubanik, N. Resnina, V. Rubanik (jr), O. Rubanik, V. Borisov, I. Lomakin // Physics Procedia, 10, 2010. - P. 52-57.

31 Материалы с эффектом памяти формы: Справ изд.: В 4 т. / Под ред. В.А. Лихачева.– СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998.–Т. 4.–1998.–268 с.



32 Пряхин, С.С. О задаче изгиба биметаллической пластины с элементом из сплава с памятью формы / С.С.Пряхин, В.В.Рубаник мл. // Сб. статей: Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» / УО «ВГТУ». Витебск, 2011. - С. 92-95.

