

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УО «Витебский государственный технологический университет»

669.24.

УДК 621.9.02.048

№ ГР 20064372

Инв. № \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе УО «ВГТУ»

В.В. Пятов

2008 г.



**ОТЧЕТ**

о научно-исследовательской работе

по заданию ГПОФИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии 3.17»

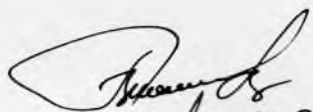
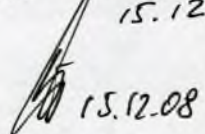
**«ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКИ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМОУПРУГИХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ, ИНИЦИИРОВАННЫХ МОЩНЫМ АКУСТИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ»**

(заключительный)

2008-г/б-346

Научный руководитель  
к.ф.-м.н.

Начальник НИС УО «ВГТУ»

  
15.12.2008.  
  
15.12.08

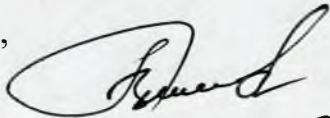
В.В. Рубаник

С.А. Беликов

Витебск 2008

## Список исполнителей

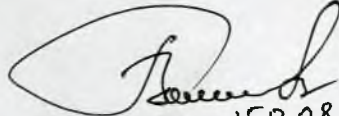
Руководитель темы,  
к.ф.-м.н.

  
15.12.08.

В.В. Рубаник (общее руководство,  
глава 3, 4)

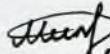
Исполнители:

д.т.н.

  
15.12.08

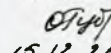
В.В. Рубаник (введение глава 3, 4,  
заключение)

аспирант

  
15.12.08

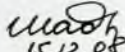
С.Н. Милокина (глава 2)

аспирант

  
15.12.2008


О.Е. Рубаник (глава 4)

аспирант

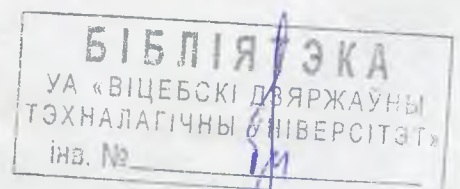
  
15.12.08

А.В. Шадурский (глава 1, 3)

нормоконтроль

  
15.12.08

А.В. Мясоедов



## Реферат

Отчет 55 с., 22 рис., 55 источников.

ПАМЯТЬ ФОРМЫ, УЛЬТРАЗВУК, ФАЗОВОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ, ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕ, НАГРЕВ.

Объектом исследования является сплав никелида титана эквиатомного состава, обладающий эффектом памяти формы.

Цель работы – установление закономерностей протекания термоупругих фазовых превращений, инициированных мощным ультразвуковым воздействием.

Исследован процесс тепловыделения в образцах никелида титана при ультразвуковом воздействии. Показано, что обработка материала локализованным акустическим воздействием вызывает постоянное распределение температуры по длине образцов резонансных размеров. Установлены закономерности протекания термоупругих фазовых превращений, инициированных мощным акустическим воздействием. Показано, что, изменяя параметры ультразвуковых колебаний в процессе инициирования фазового перехода возможно управление ходом фазового превращения в материале, скоростью его осуществления.

Предложена модель и проведено моделирование процессов ультразвукового нагрева волноводов из сплава с эффектом памяти формы.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки исполнительных ультразвуковых устройств нового типа, для которых требуется односторонний доступ к рабочему телу из материала с памятью формы.

## Содержание

	стр.
Введение	5
1 Анализ научной литературы по тематике НИР	6
2 Методики исследования	11
2.1 Методика исследований фазовых превращений в сплавах, обладающих эффектом памяти формы, методами дифференциальной сканирующей калориметрии	11
2.2 Экспериментальная установка по ультразвуковому инициированию ЭПФ	16
Методика измерения акустических параметров резонансных образцов материалов с памятью формы	19
3 Моделирование процесса теплопереноса в материалах с ЭПФ при ультразвуковом разогреве	20
Модели ультразвукового нагрева волноводных систем	20
3.1 Модель процесса переноса ультразвуковой энергии в сплавах на основе никелида титана, обладающих с эффектом памяти формы	21
3.2 Моделирование процесса переноса ультразвуковой энергии в сплавах на основе никелида титана	25
4 Ультразвуковое инициирование термоупругого фазового перехода	28
4.1 Исследование распределения температуры по длине TiNi волновода при ультразвуковом инициировании фазового перехода	28
4.2 Исследование кинетики ультразвукового разогрева TiNi волновода	31
4.3 Влияние амплитуды ультразвуковых колебаний на скорость разогрева TiNi волновода	36
4.4 Изменение акустических параметров системы при ультразвуковом инициировании фазового перехода в образцах TiNi	38
4.5 Анализ процесса теплопереноса, проходящего при ультразвуковом нагреве волновода из материала с памятью формы	40
5 Рекомендации по практическому использованию результатов исследований	43
Заключение	48
Список использованных источников	49

## Список использованных источников

- 1 Chang, L.C. Behavior of the elastic properties of AuCd // L.C. Chang, T.A. Read // Trans. Met. Soc. AIME.– 1951.– Vol. 191.– P. 47.
- 2 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.
- 3 Кулемин, А.В. Ультразвук и диффузия в металлах / А.В.Кулемин, М.: Металлургия, 1978.– 200 с.
- 4 Балалаев, Ю.Ф. Об ультразвуковом нагреве металлов / Ю.Ф.Балалаев, В.С.Постников //Физика и химия обработки материалов.– 1968.– № 2.– С. 117–119.
- 5 Постников, В.С. Внутреннее трение в металлах / В.С.Постников, М.: Изд-во Металлургия, 1969.– 332 с.
- 6 Лихачев, В.А. Эффект памяти формы / В.А. Лихачев, С.Л. Кузьмин, З.П. Каменцева // Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. - 216 с.
- 7 Mignogna, R.V. Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials / R.V.Mignogna, R.E.Green, Jr., J.C.Duke, Jr. et al. // J. Ultrasonic.– 1981.– № 7.– P. 159–163.
- 8 Балалаев, Ю.Ф. Зависимость структуры технического железа от ультразвукового высокотемпературного нагрева / Ю.Ф.Балалаев // МиТОМ.– 1964.– Т № 1.– С. 48–49.
- 9 Балалаев, Ю.Ф. Поведение границ зерен в железе при ультразвуковом высокотемпературном нагреве / Ю.Ф.Балалаев, С.З.Бокштейн // Процессы диффузии, структура и свойства металлов: Сб.ст.– М.: Машиностр., 1964.– С.113–116.
- 10 Балалаев, Ю.Ф. Ультразвуковой высокотемпературный нагрев и его применение для термической обработки при исследованиях металлов и сплавов / Ю.Ф.Балалаев, С.З.Бокштейн // ФММ.– 1963.– Т. 16, вып. 6.– С. 872–876.

11 Кириллов, С.А. Влияние ультразвуковых колебаний на пластические свойства материалов с памятью формы / С.А.Кириллов, В.В.Клубович, А.В.Козлов и др. // Материалы с эффектом памяти формы: Сб. докл. 1-го Рос.-Амер. семинара, СПб., 13-17 нояб. 1995 г.: В 3 ч.- СПб., 1995.- Ч. 1.- С. 81–84.

12 Ермаков, В.М. Связь физических свойств и структурных состояний, возникающих при термомеханической обработке в сплавах TiNi / В.М.Ермаков, В.И.Коломыцев, В.А.Лободюк, Л.Г.Хандрос // Металлофизика.- 1982.- Т. 4, № 6.- С. 23–30.

13 Сапожников, К.В. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс псевдоупругого деформирования монокристаллов Cu-Al-Ni / К.В.Сапожников, С.Б.Кустов, В.В.Ветров, С.А.Пульнев // Изв. РАН. Сер. Физ.-1997.-Т.61, № 2.-С.249–256.

14 Сапожников, К.В. Акустопластический эффект и внутреннее трение при деформировании мартенситных монокристаллов Cu-Al-Ni / К.В.Сапожников, С.Б.Кустов // Вестник Тамбовского Ун-та. Сер.: Естественные и технические науки.- 1998.- Т. 3, № 3.- С. 298–299.

15 Сапожников, К.В. Исследование акустопластического эффекта в монокристаллах на ультразвуковых частотах. Дис. ...канд. физ.-мат. наук: 01.04.07.- СПб., 1998.- 236 с.

16 Вьюненко, Ю.Н. Исследование внутреннего трения в никелиде титана / Ю.Н.Вьюненко, Б.С.Крылов, В.А.Лихачев и др. // ФММ.- 1980.- Т. 49, вып. 5.- С. 1032-1037.

17 Вьюненко, Ю.Н. Рассеяние энергии колебаний в материалах высокого демпфирования. Автореферат дис. ...канд. физ.-мат. наук: 01.02.04.- Ленинград, 1982.- 15 с.

18 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 / Edited by A.Pelton, D.Hodgson, S.Russel, T.Duerig.— Asilomar, California, 1997.— P. 59—64.

19 Рубаник, В.В. Инициирование эффекта памяти формы в сплавах Ti-Ni под действием ультразвуковых колебаний. Дис. ...канд. физ.-мат. наук: 01.04.07.— Минск., 2005.— 132 с.

20 Пат. 2413 С2 ВУ, МПК С 21D 8/00, С 22F 3/00. Способ инициирования эффекта памяти формы / В.В.Клубович, В.В.Рубаник, В.Г.Дородейко, В.В.Рубаник (мл.), Ю.В.Царенко. — № 960348; Заявл. 05.07.1996; Опубл. 30.09.1998 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.— 1998.— № 3 (18).— С. 176-177.

21 Rubanik, V.V. The ultrasounds initiation of SME / V.V.Rubanik, V.V.Klubovich, V.V.Rubanik, Jr. // J. de Phys.— 2003.— Vol. 112, № IV.— P. 249-251.

22 Рубаник, В.В. Формирование малых петель в TiNi при фазовом преращении за счет наложения ультразвука / В.В.Рубаник, В.В.Клубович, В.В.Рубаник (мл.) // XIV Петербургские чтения по проблемам прочности: Сб. тез., СПб., 12–14 марта 2003 г.— СПб., 2003.— С. 261-262.

23 Рубаник, В.В. Влияние ультразвука на деформационное поведение никелида титана / В.В.Рубаник, С.П.Беляев, А.Е.Волков, В.В.Рубаник (мл.), В.В.Сидоренко // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. естеств. и техн. науки.— 1998.— Т. 3, вып.3.— С. 265-266.

24 Пат. 4065 С2 ВУ, МПК В 01J 19/10, С 21D 1/04. Способ генерации реактивных напряжений в материалах с эффектом памяти формы / В.В.Рубаник, В.В.Рубаник (мл.), Ю.В.Царенко, А.Е.Волков, С.П.Беляев. — № 19980546; Заявл. 05.06.1998; Опубл. 30.09.2001 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.— 2001.— № 3 (30).— С. 104.

25 Клубович, В.В. Об изменении декремента затухания в никелиде титана под действием ультразвука / В.В.Клубович, В.В.Рубаник (мл.) // Физика

и техника ультразвука: Тез. докл. науч.-техн. конф., СПб., 9–11 июня 1997 г.- СПб., 1997.- С. 130-132.

26 Duerig, T.W. Ti-Ni Shape Memory Alloys / T.W.Duerig, A.R.Pelton // Materials Properties Handbook Titanium Alloys, 1994. – P. 1035-1048.

27 Гюнтер, В.Э. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения / В.Э.Гюнтер, В.Н.Ходоренко, Ю.Ф.Ясенчук, Т.Л.Чекалкин и др. // Томск: Изд-во МИЦ, 2006. - 296 с.

28 Чекалкин, Т.Л. Исследование знакопеременной деформации, внутреннего трения и демпфирующих свойств сплавов на основе никелида титана частотах. Автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук: 01.04.07.– Томск, 2007.– 23 с.

29 Клубович, В.В. Формовосстановление в материалах с термоупругим фазовым превращением / В.В.Клубович, В.В.Рубаник (мл.) // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения. Междун. сб. научн. тр. под ред. Н.Н. Огаркова, Магнитогорск, 2006. - С.10-12.

30 Rubanik Jr., V.V. Realization of SME at ultrasonic heating / V.V.Rubanik Jr., V.V.Rubanik, V.V.Klubovich // 7<sup>th</sup> European Symp. on Martensitic Transformations ESOMAT 2006: Abstracts.– Bochum/Germany, Sept. 10-15, 2006.– P.313.

31 Рубаник, О.Е. Тепловизионные исследования эффекта памяти формы инициированного ультразвуковым воздействием / О.Е. Рубаник // XXXIX научно-техническая конференция преподавателей и студентов университета: Тез. докл. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2006. – С. 67.

32 Эффект памяти формы в сплавах / Пер. с англ. под ред. В.А. Займовского.– М., 1979.– 472с.

33 Dautovich, D.P. Calorimetric study of a diffusionless phase transition in TiNi / D.P.Dautovich, Z.Melkvi, G.R.Purdy, C.V.Stager // J. Appl. Phys.– 1966.– Vol. 37, № 6.– P. 2513–2514.

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



35 Alliages à mémoire de forme, Norme française NF A51-080, 1991.

36 Милюкина, С.Н. Исследование термоупругих фазовых переходов методом дифференциальной сканирующей калориметрии // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы 3 Гомельской региональной конф. молодых ученых // ИММС НАН Беларуси. - Гомель, 2006. – С. 61-62.

37 Dorodeiko, V.G. Making intrauterine contraceptives from TiNi alloys / V.G. Dorodeiko, V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr., and S.N. Miljukina.// 7<sup>th</sup> European Symposium on Martensitic Transformations ESOMAT 2006: Abstracts. – Bochum/Germany, 2006. – P. 312.

38 Рубаник, В.В. Термообработка TiNi проволоки для контрацептивов / В.В.Рубаник, В.Г.Дородейко, В.В.Рубаник (мл.), С.Н.Милюкина // Фазовые превращения и прочность кристаллов: Тез. докл. Четвёртой междунар. конф. – Черногоровка, 2006. – С. 161-162.

39 Колтович В.А. Разработка ультразвуковой технологии и оборудования для изготовления прецизионных металлических лент, применяемых в электронной технике: Дис. ...канд. техн. наук: 05.27.07.– Минск, 1998.– 159 с.

40 Рубаник, В.В. Ультразвуковое инициирование термоупругих фазовых превращений / В.В.Рубаник, В.В.Рубаник (мл.) // Материалы XVIII Сессии Российского акустического общества, 11-15 сент. 2006 г. Таганрог. – Изд-во «ГЕОС», М., т.2, стр. 118-122.

41 Шадурский, А.В. Исследование механизма переноса энергии в материалах и сплавах, претерпевающих термоупругие фазовые превращения / А.В.Шадурский, В.В.Рубаник, В.В.Рубаник мл. / Актуальные проблемы прочности: XLVI Междунар. научная конфер. Н.Новгород, 1-5 июля 2008 г. Ч.1. – С.313-316.

42 Лыков, А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа. 1967.

43 Кузьменко, В.А. Рассеяние энергии в продольно-колеблющихся статически сжимаемых или растягиваемых металлических стержнях / В.А. Кузьменко, Я.И.Цимбалистый // Пробл. Прочности, 1975, № 5. - С.3-8.

44 Тяпунина, Н.А. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами. / Н.А.Тяпунина, Е.К.Наими, Г.М.Зиненкова // М.: Изд-во МГУ, 1999. - 238 с.

45 Шермергор, Т.Д. Физика микроэлектронных приборов. / Т.Д. Шермергор, В.П.Рязанский // Сб. научных трудов МИЭТ. М., 1982. - С.33.

46 Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В.А.Кузьменко.- Киев: Наук. думка, 1979. - 336 с.

47 Миротворский, В.С. Методы измерения внутреннего трения при интенсивных ультразвуковых колебаниях / В.С.Миротворский, Г.И.Погодин-Алексеев // М.: Машиностроение, 1970. – 48 с.

48 Рубаник, В.В. Моделирование процессов тепловыделения в TiNi сплавах при ультразвуковом воздействии / В.В.Рубаник, А.А.Шадурский, В.В. Рубаник (мл.) // XVII Петербургские чтения по проблемам прочности: сб. матер. конф., 10-12 апреля 2007, С.-Петербург, в 2 ч. – Ч.2. - С.283-285.

49 Рубаник, В.В. Моделирование механизма переноса тепла в никелиде титана при ультразвуковом нагреве / В.В.Рубаник, А.А.Шадурский, В.В. Рубаник (мл.) // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. научн. тр. VI междунар. НТК, 24-26 апреля 2007 г., в 3-х томах, Новополюцк, т.3.- С.231-234.

50 Рубаник, В.В. Процесс теплопереноса в никелиде титана при ультразвуковом воздействии / В.В.Рубаник, А.А.Шадурский, В.В. Рубаник (мл.) // Актуальные проблемы прочности: Тез. докл. 45 междунар. конф. Белгород, 25-28 сент. 2006.-С.162.

51 Рубаник, В.В. Влияние ультразвука на деформационное поведение TiNi сплавов / В.В.Рубаник, В.В.Рубаник (мл.) // Особенности структуры и свойств перспективных материалов / Под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск, Изд-во НТЛ, 2006. – Гл. 12. – С. 219-240.

52 Rubanik Jr., V.V. The influence of ultrasound on shape memory behavior / V.V.Rubanik Jr., V.V.Rubanik, V.V.Klubovich // Materials Science and Engineering A 481-482, 2008. – P. 620–622.

53 Клубович, В.В. Температурные поля в TiNi волноводах при ультразвуковом воздействии. / В.В.Клубович, В.В.Рубаник, В.В.Рубаник, О.Е. Рубаник // Вестник БрГТУ. Серия машиностроение.– Т. 4 (46), 2007. – Стр. 39-40.

54 Рубаник, В.В. Ультразвуковой нагрев волноводов из никелида титана / В.В.Рубаник, В.В.Клубович, В.В.Рубаник мл., В.А.Андреев, О.Е.Рубаник // Актуальные проблемы прочности: XLVI Междунар. научная конфер. Н.Новгород, 1-5 июля 2008 г. Ч.1. – С.316-319.

55 Рубаник, В.В. Термоупругие фазовые переходы, инициированные акустическим воздействием / В.В.Рубаник, В.В.Клубович, В.В.Рубаник мл., А.В.Шадурский, О.Е.Рубаник // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. матер. В 4 кн. 3 МНТК, Минск, 15-17 окт. 2008 года. Кн. 3. – С.139-143.

