

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Витебский государственный технологический университет  
(ВГТУ)

УДК 669.24'295

№ госрегистрации 19991298

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Проректор ВГТУ по научной работе

С.М.Литовский

" " \_\_\_\_\_ г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
"ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
ПРОЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА ПЛАСТИЧНОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ В  
Ti-Ni СПЛАВАХ В ПОЛЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ"  
(заключительный)

99-Г/Б-262

Начальник НИС

Руководитель НИР  
канд. техн. наук, с.н.с.

С.А.Беликов

В.В.Рубаник

Витебск 1999 г.



## РЕФЕРАТ

Отчет 58 с., 20 рис., 48 источников.

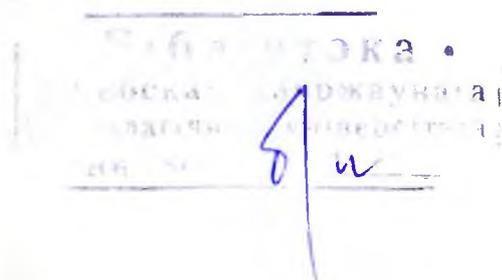
ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ, ПЛАСТИЧНОСТЬ ПРЕВРАЩЕНИЯ, УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ, МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДЕФОРМАЦИЯ, МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ.

Объектом исследования являются титан-никелевые сплавы, обладающие эффектом памяти формы.

Цель работы - комплексное изучение влияния ультразвуковых колебаний на пластичность превращения в TiNi сплаве.

В процессе работы проводились экспериментальные исследования деформационного поведения Ti-Ni сплавов в поле акустических колебаний, распределения температурных полей в TiNi образцах при ультразвуковом нагреве. На основании структурно-аналитической теории проведено моделирование фазовых превращений в поле акустических колебаний.

В результате исследований установлено, что основными факторами, оказывающими влияние на деформационное поведение материалов с эффектом памяти формы при ультразвуковом воздействии, являются переменные нагрузки и повышение температуры.



## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И КИНЕТИКУ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ TiNi СПЛАВОВ .....	11
1.1. Пластичность превращения при прямой мартенситной реакции в никелиде титана .....	11
1.2. Влияние ультразвуковых колебаний на характеристические температуры превращений в никелиде титана и кинетику пластичности превращения .....	15
2. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В TiNi ОБРАЗЦАХ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПОГЛОЩЕНИЕМ ЭНЕРГИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ .....	24
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ TiNi СПЛАВА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ .....	30
3.1. Математическая модель .....	30
3.2. Моделирование процесса сдвигового деформирования TiNi под действием температуры и переменных механических напряжений .....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	52

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие ведутся интенсивные исследования в области термоупругих мартенситных превращений, которые обуславливают целый ряд уникальных физических явлений, в частности, эффект памяти формы и пластичности превращения. Проявление эффекта деформационной памяти заключается в том, что деформированный материал способен восстанавливать исходную заданную форму при нагреве выше температуры фазового превращения  $A_f$ . Физика этого явления обусловлена термоупругим обратным мартенситным превращением  $M \rightarrow A$ . Осуществление прямого фазового превращения сопровождается снижением сопротивления деформированию, увеличением пластичности, возрастанием внутреннего трения и т.п. Собственно эти эффекты и лежат в основе всевозможных конструкций тепловых мартенситных двигателей и различных технических устройств.

Среди материалов претерпевающих термоупругие мартенситные превращения наибольший интерес представляют сплавы на основе никелида титана ( $TiNi$ ) имеющие высокие прочностные и пластические характеристики, высокую степень формовосстановления составляющую 95-100% после 6-8% деформации. Развиваемые при этом усилия достигают 500-1500 МПа, а напряжения обеспечивающие пластичность превращения составляют всего 200-300 МПа.

В связи с возрастающим практическим интересом к  $Ti-Ni$  сплавам проводится огромное количество исследований, как по способам получения сплава, так и изучению его свойств и физических явлений сопровождающих термоупругие фазовые превращения (1-3). Об интенсивности этих исследований свидетельствует огромное количество публикаций, проводимых конференций. Особенно интенсивно научные исследования ведутся в последние 10-15 лет в США, Японии, Китае и

России. Фундаментальные исследования этого феноменального явления проводятся, в частности, в НИИ математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета, Томске, Москве, с которыми налажены научные связи и ведутся совместные исследования.

Проявление эффекта памяти формы и пластичности превращения связано исключительно с температурным фактором и механическим напряжением. Причем нагрев может осуществляться как косвенно, так и непосредственно, например, за счет пропуска электрического тока через сплав обладающий ЭПФ. В последнее время появились экспериментальные работы в которых показано, что давление и температура являются равноэквивалентными стимулами для инициирования мартенситных реакций (4, 5), т.е. с помощью давления могут быть продуцированы те же механические эффекты, что и с помощью температуры.

В свете изложенного представляет интерес изучение влияния ультразвуковых колебаний на кинетику фазовых мартенситных превращений, которые обуславливают при определенных условиях не только нагрев материала, но и возникновение в нем значительных знакопеременных механических напряжений (6-13).

В единственной работе по влиянию УЗК на условия текучести при одноосном растяжении TiNi образцов выполненной Коломыцевым В.И., Козловым А.В. и др. в институте металлофизики НАН Украины (г.Киев) показано, что предел текучести под действием УЗК снижается (14). Т.е. сплав TiNi ведет себя так же как и обычные металлы при ультразвуковом воздействии. Отмечается, что ультразвуковые колебания ускоряют как обратное так и прямое мартенситное превращение. Однако вывод об ускорении прямого превращения исходя из известных механизмов ультразвукового воздействия, по нашему мнению, не однозначен. Действительно, УЗК при деформации обычных материалов

облегчают преодоление барьеров при движении дислокаций. В отличие от обычных материалов сплавы с памятью формы наряду с дислокационным обладают также другими специфическими механизмами деформации, такими как термоупругое мартенситное фазовое превращение или двойникование (при переходе от одной ориентации мартенсита к другой), осуществляемые посредством движения не дислокаций, а других носителей деформации - межфазных и двойниковых границ раздела (3). Закономерности деформирования материала по этим механизмам отличаются сложным характером зависимости соответствующего (условно, фазового) предела текучести от температуры, который при температурах внутри или вблизи интервала превращения ниже дислокационного предела текучести обеих фаз. Кроме того, различными являются дислокационные пределы текучести исходной и образующейся фаз, в связи с чем изменение фазового состава также влияет на напряжение течения материала.

Ввиду вышесказанного, можно ожидать, что влияние ультразвуковых колебаний на процесс пластического течения в сплавах с памятью формы при температурах вдали от интервала превращения будет подобно таковому в обычных материалах и может быть иным при температурах, близких к температурам превращения. Кроме того ультразвуковой нагрев должен замедлять протекание прямого фазового превращения.

Нужно отметить, что публикаций по влиянию УЗК на термоупругие мартенситные превращения, кроме приведенных выше, нами не обнаружено как в зарубежной так и отечественной литературе.

Нами впервые получены экспериментальные данные подтверждающие возможность инициирования ЭПФ с помощью только энергии ультразвуковых колебаний (15-20), а так же влияние УЗК на пластические свойства Ti-Ni проволоки при одноосном растяжении (21-27).

Более эффективное действие ультразвука по сравнению с традиционными способами нагрева, вероятно, обусловлено тем, что энергия УЗК поглощается преимущественно на неоднородностях кристаллической структуры (дислокации, границы зерен, точечные дефекты и др.), в то время, как поглощаемая тепловая энергия при нагреве током распределяется равномерно по всему объему. В результате можно предполагать, что УЗК должны способствовать инициированию фазовых превращений в большей мере, чем непосредственный нагрев, косвенный или прямой.

Совершенно не исследован процесс пластичности превращения под действием УЗК и не определена роль ультразвукового нагрева и собственно самих акустических колебаний в фазовых превращениях мартенситного типа. Хотя принципиальная возможность таких превращений под действием только УЗК нами показана (15-20).

Целью настоящих исследований является комплексное экспериментальное и теоретическое изучение влияния ультразвуковых колебаний на пластичность превращения в TiNi сплав и его механическое поведение. В частности, исследовано деформационное поведение TiNi в интервале  $M_s$ - $M_f$  в поле акустических колебаний, распределение температурных полей в TiNi образцах при ультразвуковом нагреве, на основании структурно-аналитической теории проведено моделирование фазовых превращений в поле акустических колебаний.

Научная новизна исследований состоит в установлении физических закономерностей влияния ультразвуковых колебаний на эффект пластичности превращения в TiNi. О влиянии же УЗК на пластичность превращения в настоящее время нет ни экспериментальных данных, ни теоретических предположений. Более того при волочении Ti-Ni проволоки с наложением УЗК нами установлено, что наряду со снижением усилия волочения, может наблюдаться его резкий рост, что приводит к

разрушению материала. Т.е. влияние УЗК на деформационное поведение Ti-Ni сплавов в отличие от обычных материалов не однозначно.

Поэтому результаты по исследованию эффекта пластичности превращения в поле акустических колебаний имеют как научный, так и практический интерес. Последнее обусловлено тем, что технология обработки TiNi сплавов очень трудоемка (28-30) и интенсификация ее с помощью УЗК является актуальной задачей.

В перспективе ставится задача с помощью мощных ультразвуковых колебаний предполагается влиять на кинетику мартенситных превращений. Это позволит выработать практические рекомендации по использованию УЗК в процессах пластического формоизменения TiNi сплавов, а так же при реализации самого эффекта пластичности превращения в исполнительных TiNi элементах различного назначения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сплавы с памятью формы на основе никелида титана. Фаткуллина Л.П. - Технология легких сплавов, 1990, № 4, с. 9-12.
2. Сплавы с эффектом памяти формы / К.Ооцука, К.Сумидзу, Ю.Судзуки и др./ Под ред. Фунакубо Х.: Пер. с японск. - М.: Металлургия, 1990. - 224 с.
3. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. - 216 с.
4. Лихачев В.А., Малинин В.Г., Овчаренко С.Я. Баромеханический эффект пластичности превращения и баромеханический эффект памяти формы // Механика прочности материалов с новыми функциональными свойствами. Рубежное, 1990. С. 183-188.
5. Лихачев В.А., Малинин В.Г., Овчаренко С.Я. Эффекты памяти формы, инициируемые всесторонним давлением // Физика прочности и пластичности металлов и сплавов. Самара, 1992. С. 229-230.
6. Blaha F., Langenecker B. Flastitatsuntersuchungen von Metallkristallen in Ultraschallfeld. Acta Met., 1959, 7, s.93-98.
7. Coffin L.F. Cyclic Strain-Softening Effects in Metals. Transactions of the ASM, 1967, 60, p.160-175.
8. Oelschlagel D. Die Verformung von Zinkkristallen in Ultraschalleinwirkung. Zs. Metallkunde, 1962, 53, s.367-377.
9. Oelschlagel D. Neuere Untersuchungen über die Ultraschallbeeinflussung der Kristallplastizität. Acta Phys. Austr., 1964, 18, s.175-179.
10. Дяченко Г.П. Исследование процесса вибрационного волочения. Канд. диссертация К., 1963, 183с.
11. Северденко В.П., Клубович В.В. Применение ультразвука в машиностроении, "Наука и техника", Минск, 1964.

12. Северденко В.П. и др. Дислокационная структура алюминия деформированного с ультразвуком. Изв. АН БССР, 1975, с.12-17.
13. Согришин Ю.П. Вибрационное деформирование металла. Metallovedenie i termoobrabotka metallov, 1959, № 1, с.55-57.
14. Влияние ультразвуковых колебаний на пластические свойства материалов с памятью формы / Кириллов С.А., Клубович В.В., Козлов А.В. и др. // Материалы с эффектом памяти формы: Сб. докл. 1-го Российско-Американского семинара - С.-Петербург, Ноябрь 1995. - Часть 1, с. 81-84.
15. Generation of Shape Memory Effect in TiNi Alloy by Means of Ultrasound. V.V.Klubovich, V.V.Rubanick, V.G.Dorodeiko et al. / Proceedings II International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies: Engineering and Biomedical Applications. - Asilomar, Pacific Grove, CA (USA), March, 1997 - P. 59-64.
16. Рубаник В.В. мл. Некоторые особенности кинетики мартенситных превращений TiNi сплавов в ультразвуковом поле // Международный научный симпозиум молодых научных работников. Зелена Гура, Польша, Апрель 1997. - Сб. докл. Том IV: Механика. - С.173-176.
17. Рубаник В.В. мл. Инициирование эффекта памяти формы в никелиде титана с помощью ультразвука. // Тез. докл. XXIX научно-технической конференции ВГТУ. - Витебск: ВГТУ, Май 1996. - с.17.
18. Инициирование эффекта памяти формы в никелиде титана с помощью ультразвука. В.В.Клубович, В.В.Рубаник, В.А.Лихачёв и др. // Материалы XXXII семинара "Актуальные проблемы прочности".-С.Петербург, Ноябрь 1996, - С.235-238.
19. Klubovich V.V., Rubanick V.V., Likhachov V.A. et al. Shape memory effect generation in "nitinol" by means of ultrasound / Proceedings

International Simposium "Acoustoelectronics, Frequency Control and Signal Generation. -Moscow, September 1996.- P.38-42.

20. Патент РБ № 2413 от 18.05.98. Способ инициирования эффекта памяти формы / Клубович В.В., Рубаник В.В., Дородейко В.Г., Рубаник В.В. мл., Царенко Ю.В.
21. Ti-Ni-wire deformation in ultrasound field. V.V.Rubanick, V.V.Klubovich, V.V.Rubanick Jr. // International workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Material Science and Engineering. - St.Petersburg, Russia, 1997. - P. D12.
22. Рубаник В.В. мл. Условие потери памяти формы при холодном волочении в титан-никелевой проволоке. // Сборник научных трудов ВГТУ. - Витебск. 1995. - С.123-125.
23. Рубаник В.В., Дородейко В.Г., Рубаник В.В. Исследование процесса волочения и термообработки Ti-Ni проволоки. // Производство и ремонт механизмов и машин в условиях конверсии. Тез. докл. конф. - Крым, 1995г. - С.75.
24. Клубович В.В., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл. Филимоненков А.О. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс волочения и свойства титан-никелевой проволоки. // Международная научно-техническая конференция "Ультразвуковая техника и техногия": Тез. докл. конф. - Минск, Октябрь 1995.- с.39.
25. Rubanik V.V., Dorodeiko V.G., Rubanik V.V. The influence of ultrasonic vibrations on drawing process of the wire of TiNi. // Proceeding of 1-st World Congress on Ultrasonics.- Berlin, September, 1995, -P45.
26. Некоторые особенности волочения титан-никелевой проволоки с наложением продольных ультразвуковых колебаний. // Материалы с эффектом памяти формы: Сб. докл. 1-го Российско-Американского

- семинара / Рубаник В.В., Дородейко В.Г., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. - С.-Петербург, Ноябрь 1995. - Часть 1, с.76-77.
27. Рубаник В.В. мл. Волочение проволоки из никелида титана с наложением продольных ультразвуковых колебаний. // Международный научный симпозиум молодых научных работников. Зелена Гура, Польша, Апрель 1996. - Сб. докл. Том 1: Механика, - с.61-65.
28. Некоторые особенности деформационного поведения сплавов с эффектом памяти формы на основе никелида титана / Бородай И.А., Кошеленко Л.С., Козлов В.А. и др. // Тез. докл. Всесоюзной конф. по мартенситным превр. в тв. т. - Киев, 1991. - С.258.
29. Miyazaki S., Otsuka K., Suzuki Y. Transformation pseudoelasticity and deformation behaviour in a Ti-50.6 at.% Ni alloy // Scripta Metallurgica, 1981. - Vol.15, №3. - P.287-292.
30. Условия потери памяти формы никелида-титана при пластической деформации / С.В.Щукин, Н.Г.Колбасников, С.Ю.Кондратьев и др. // В сб. : Функционально-механические свойства сплавов с мартенситным механизмом неупругости. - Ухта, 1992. - С.19.
31. Тихонов А.С., Герасимов А.П., Прохорова И.И. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении. - М.: Машиностроение, 1981. - 80с.
32. Деменков А.П., Лихачев В.А., Французов Н.С. Сверхпластичность (аномальная пластичность в металлах и сплавах) / АН СССР. Физ.-техн. ин-т.- Л.; 1972. - 70 с. - Препринт № 343.
33. Деменков А.П., Лихачев В.А., Французов Н.С. Природа сверхпластичности / АН СССР. Физ.-техн. ин-т.- Л.; 1972. - 56 с. - Препринт № 344.
34. Андронов И.Н., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А. и др. Деформирование металлов в условиях проявления пластичности превращения. Проблемы прочности, 1983. № 5, с.96-106.

35. Беляев С.П., Ерофеев Н.И., Кузьмин С.Л. и др. Термоциклическая ползучесть и долговечность никелида титана. - Л., 1985. - 16 с. - Деп. в ВИНТИ 30.05.85, № 3771-85.
36. Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Патрикеев Ю.И., Королев М.Н. Эффекты памяти формы в условиях реализации пластичности превращения. *Металлофизика*, 1985, т.7, № 3, с. 50-56.
37. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. - Новосибирск, 1985. 229 с.
38. Кузьмин С.Л., Лихачев В.А. Пластичность превращения в материалах с обратимыми мартенситными превращениями // *Физика и электроника твердого тела*. Вып. 2. Ижевск, 1977. С. 53-80.
39. Мордюк Н.С., Окраинец П.Н. Особенности влияния ультразвука на механические и структурные характеристики металлов. / ИМФ. - Киев; 1977. - 31 с. - Препринт № 77.
40. Рубаник В.В, Клубович В.В., Рубаник В.В. мл. Тепловизионные исследования обратного мартенситного превращения под действием ультразвуковых колебаний в TiNi // *Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов: XXXV семинар "Актуальные проблемы прочности"*. Псков, 1999. Ч. 2. С. 561-564.
41. Рубаник В.В, Клубович В.В., Рубаник В.В. мл. Тепловизионные исследования обратного мартенситного превращения под действием ультразвуковых колебаний в TiNi // *Матер. 2-й межд. научно-техн. конф. "Ультразвуковая техника и технология"*. Минск, 1999. - С. 97-101.
42. Rubanick V., Razov A., Rubanick V., Jr. Thermographic investigations of reverse martensitic transformation in TiNi under the action of ultrasound // *Proceedings of the International Symposium on - Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Industrial Applications*.

Edited by F.Trochu, V.Brailovski and A.Galibois. Quebec, Canada, 1999. - P.283-287.

43. Лихачев В.А., Малинин В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности. - СПб.: Наука, 1993. - 471 с.
44. Likhachev V.A. Theory of martensitic unelasticity of crystals // Journal de Physique IV. Colloque C1 suppl., 1996. - Vol.6. - P.321-333.
45. Лебедев А.Б. Внутреннее трение в процессе квазистатического деформирования кристаллов // ФТТ.- 1993.-Т.35, № 9.- С.2305-2341.
46. Рубаник В.В., Беляев С.П., Волков А.Е., Рубаник В.В. мл., Сидоренко В.В. Влияние ультразвука на деформационное поведение никелида титана // Вестн. Тамб. ун-та, 1998. Т. 3, № 3, с.265-267.
47. Беляев С.П., Волков А.Е., Евард М.Е. Микроскопическая деформация при мартенситных превращениях в сплавах с памятью формы типа никелида титана // Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела: Труды научной школы академика В.В.Новожилова. С-Пб. 1998. Вып. 1, с.222-233.
48. Беляев С.П., Вдовин Е.Д., Волков А.Е., Рубаник В.В., Сидоренко В.В., Рубаник В.В. мл. Моделирование акустопластического эффекта в никелиде титана // Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов: XXXV семинар "Актуальные проблемы прочности". Псков, 1999. С. 569-576.



Библиотека ВГТУ

