

PACS: 62.40.+i, 62.90.+k, 74.25.Ld, 81.30.kf

Н.Н. Белоусов¹, Ю.Н. Вьюненко²

ОСОБЕННОСТИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО И СВЕТОВОГО ЭФФЕКТОВ В УСЛОВИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

²ООО «Оптимикст ЛТД», Санкт-Петербург, РФ

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2016 года

Проведено инженерно-техническое усовершенствование ультразвуковой (УЗ) установки для осуществления инициирования теплового и светового эффектов в условиях комплексного влияния статического и динамического воздействий. Исследована амплитудная зависимость внутреннего трения сплава нитрида титана TiNi в исходном состоянии и после деформации 3-точечным изгибом. Найдена величина критической амплитуды ($\varepsilon_{cr} \geq 10^{-4}$), выше которой наблюдается интенсивный УЗ-нагрев. Обнаружен нелинейный и гистерезисный характер температурных зависимостей декремента колебаний δ и квадрата резонансной частоты f^2 . Установлена корреляция нелинейного поведения $\delta(T)$ и $f^2(T)$ с температурой мартенситного превращения. Исследован возврат деформации в продольных и кольцевых конструкциях из TiNi в условиях УЗ-инициирования обратимой памяти формы. Обнаружен кинетический характер возврата величин f^2 и δ . Изучены особенности УЗ-инициирования свечения в жидкости под действием мощного ультразвука в условиях интенсивной кавитации.

Ключевые слова: обратимая память формы, внутреннее трение, мощный ультразвук, критическая амплитуда, интенсивная кавитация

Введение

В последнее время представляет значительный интерес развитие ультразвуки больших интенсивностей колебаний $J \geq 0.1 \text{ W/cm}^2$, при которых начинают проявляться различные нелинейные эффекты (в том числе и теплофизические) как в металлах [1–5], так и в жидкостях [6–8]. В работах [9,10] теоретически показано инициирование нестационарного и нелинейного поведения теплофизических параметров при статической деформации в условиях вязкоупругого сжатия. В связи с этим целесообразно комплексное применение статических и динамических воздействий для усиления деформационного нагрева и управления теплофизическими параметрами веществ.

Среди широкого класса материалов, в которых могут быть реализованы нелинейные теплофизические эффекты (в различном их проявлении), наиболее перспективными являются материалы с комплексом функциональных свойств, в

первую очередь с эффектом памяти формы (ЭПФ). Известно, что в этих материалах в условиях теплового действия мощного ультразвука инициирован УЗ-эффект памяти формы [11,12], обусловленный УЗ-активацией термоупругого мартенситного превращения. В работах [13,14] рассмотрена возможность применения ЭПФ в кольцевых элементах TiNi.

Практический интерес представляет не только УЗ-иницирование ЭПФ, но и контролируемое управление его параметрами путем наложения динамической и статической нагрузок. Для этого требуется создание современных многофункциональных УЗ-установок с новыми инженерно-техническими решениями и с широкими научно-исследовательскими возможностями.

Цели работы – определить возможность инициирования теплового и светового эффектов в функциональных материалах и жидкостях в условиях УЗ-воздействия, установить инженерно-технические условия их реализации, исследовать основные характеристики проявления ЭПФ при УЗ-нагреве и возможность управления параметрами эффекта путем контролирования динамических и статических напряжений.

Материал, методы и методика эксперимента

Материал исследования – никелид титана марки ТН-1 (производитель ЗАО «Промышленный центр МАТЭК», Москва, РФ). При комнатной температуре материал находится в мартенситном состоянии. Температуры мартенситного превращения согласно сертификату $A_{in} \geq 310$ К, $A_f \geq 340$ К.

Для проведения исследований усовершенствована и компьютеризирована УЗ-установка [15–18] с целью ее многофункционального использования. УЗ-установка позволяет в широких пределах варьировать частоту колебаний ($f \approx 18\text{--}100$ kHz), мощность ультразвука ($W \approx 0.5\text{--}300$ W) и колебательную деформацию ($\varepsilon \approx 10^{-6}\text{--}5 \cdot 10^{-4}$). В зависимости от используемых пьезопреобразователей, диапазона частот и амплитуд деформаций установка может работать в режимах автогенератора и внешнего возбуждения. Величиной возбуждающего напряжения U_R определяются диапазоны амплитудно-независимого (АнЗВТ) и амплитудно-зависимого внутреннего трения (АЗВТ).

В условиях АнЗВТ при постоянном выходном напряжении U_R логарифмический декремент колебаний δ пьезопреобразователя пропорционален величине возбуждающего напряжения U . Величину δ измеряли методом составного вибратора ($\varepsilon = 10^{-6}$) с одновременной регистрацией резонансной частоты f ($\Delta f = \pm 10$ Hz). Чувствительность установки к относительным изменениям внутреннего трения равна отношению величины чувствительности усилителя следящей системы $\Delta U \leq 10$ μ V к величине напряжения $U \geq 10$ V, т.е. $\Delta U/U \sim 10^{-4}$. Относительные погрешности измерений: резонансной частоты пьезопреобразователей с учетом влияния закрепления $\Delta f/f_0 \sim 5 \cdot 10^{-4}$; собственной частоты образца с учетом отклонения от расчетных геометрических размеров $\Delta f/f_0 \sim 10^{-3}$; модуля упругости ($E \sim f^2$) $\Delta E/E_0 \sim 5 \cdot 10^{-3}$.

Компьютерное управление процессом осуществляли с помощью разработанного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и программы RTViewer3_V2. Выделенный акустический сигнал через согласующий усилитель подавали на АЦП. С помощью АЦП сигнал записывали по четырем дифференциальным каналам с частотой опроса 80 kHz и затем подавали на персональный компьютер. Программирование проводили в среде пакета разработки лабораторных виртуальных приборов LabVIEW Workbench. Обработку экспериментальных данных проводили в программных пакетах PowerGraph 3.2 и Origin 7.0.

Ультразвуковой нагрев осуществляли при $\varepsilon \approx 5 \cdot 10^{-4}$ путем заземления короткого конца образца плоскостью концентратора пьезовибратора. Концентратор размещали вблизи очага изгибной деформации образца и прижимали к его поверхности с различной силой $F = 20\text{--}10^3$ N. Температуру УЗ-нагрева измеряли хромель-алюмелевой термопарой ($\Delta T = \pm 1$ K), расположенной непосредственно под образцом в области действия концентратора. Для УЗ-нагрева использовали конические концентраторы с различными коэффициентами мультипликации ($K \approx 5\text{--}25$). Длину концентраторов L подбирали из условия возбуждения стоячей волны λ в резонансе при $L = n\lambda/2$.

Амплитуду колебаний концентратора в условиях резонанса акустической системы контролировали датчиком проходного типа, состоящим из двухсекционной катушки, помещенной в кольцевой магнит из сплава Co–Sm. Зазор между концом концентратора и катушкой составлял порядка 200 μm , что позволяло измерять максимальную амплитуду колебаний до 30 μm . Тарировку датчика амплитуды проводили при помощи оптического индикатора с точностью ± 0.25 μm . Погрешность измерения амплитуды колебаний не превышала $\pm 10\%$.

Статическую деформацию осуществляли методом трехточечного изгиба в реверсном устройстве деформационной машины 2167P-50 и оценивали стандартным способом по стреле прогиба с учетом геометрических размеров образца и расстояния между опорами. Возврат деформации в температурной области прямого фазового перехода определяли с помощью датчика часового типа с точностью $\Delta l = \pm 1$ μm . Для термоизоляции образца от окружающей среды и создания адиабатических условий УЗ-нагрева применяли органическую термовату.

Результаты исследования и их обсуждение

Нами предложена схема инициирования ЭПФ путем УЗ-нагрева образца в области амплитудной зависимости внутреннего трения в условиях комплексного влияния статической и динамической деформаций (рис. 1,а). В работах [11,12] УЗ-нагрев осуществлялся в пучностях стоячей волны вдоль образца длиной $L = n\lambda/2$, который свободно крепился к вибратору (рис. 1,б).

В образцах TiNi исследованы структура и характер распределения интерметаллидных включений методом РЭМ на Jeol JEM8490 LV (рис. 2,а) с параллельным изучением элементного состава в выделенных областях (рис. 2,б, таблица). Из таблицы видно, что элементный состав является достаточно однородным с хаотическим распределением интерметаллидных включений.

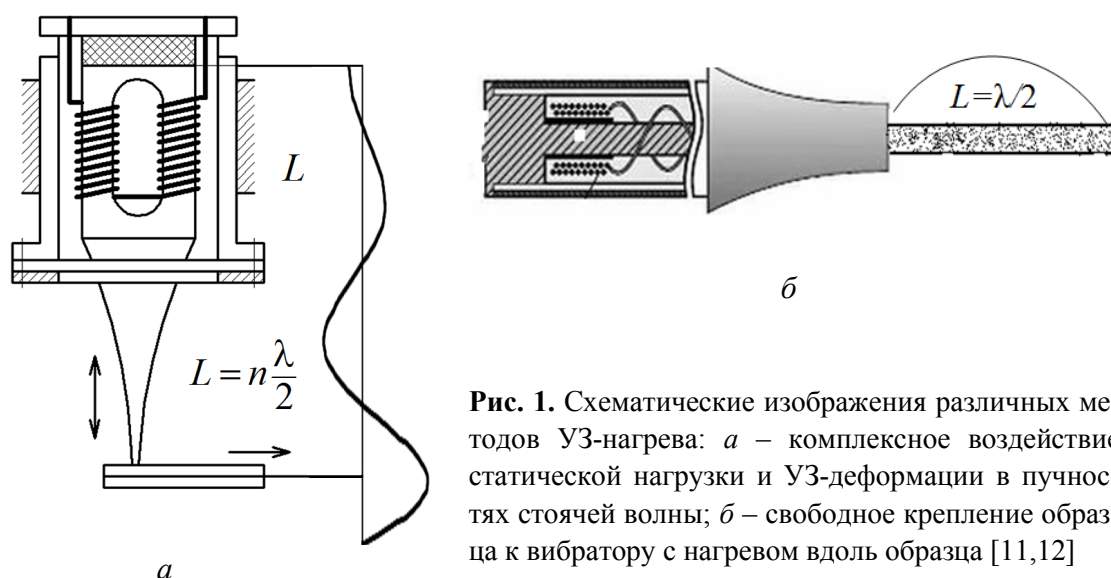


Рис. 1. Схематические изображения различных методов УЗ-нагрева: *a* – комплексное воздействие статической нагрузки и УЗ-деформации в пучностях стоячей волны; *б* – свободное крепление образца к вибратору с нагревом вдоль образца [11,12]

На рис. 3,*a* показаны возврат остаточной изгибной пластической деформации ($\varepsilon = 27\%$, $T = 270$ К) проволоочного образца TiNi в процессе УЗ-нагрева (кривая 1) и проявление эффекта обратной памяти формы при уменьшении температуры (кривая 2). По данным рис. 3,*a* определены значения следующих величин деформации: накопленной – $e_{acc} \approx 27\%$, обратимой – $e_{rev} \approx 14\%$, остаточной – $e_{res} \approx 13\%$, а также коэффициента степени возврата деформации $k = 0.5$. Амплитуда колебательной деформации выбрана исходя из зависимости $\delta(\varepsilon)$ (рис. 3,*б*, кривая 2), по которой определена критическая амплитуда начала АЗВТ ($\varepsilon_{cr} \geq 10^{-4}$).

Таблица

Элементный состав образцов TiNi в выделенных областях

Спектр	C	O	F	Ti	Ni
1	6.62	-0.21	1.59	41.50	50.50
2	6.75	-0.54	1.44	41.71	50.64
3	6.54	-0.58	1.43	41.87	50.74
4	6.53	-0.53	1.66	41.82	50.53
5	6.35	0.01	1.34	40.98	51.31
6	6.63	-0.23	1.38	41.35	50.87
7	6.90	-0.15	1.36	41.71	50.17
8	6.78	0.16	1.21	41.22	50.62
9	7.94	-0.30	1.38	41.37	49.61
10	7.99	-0.59	1.61	40.91	50.07
11	7.02	-0.56	1.82	41.21	50.50
12	7.11	-0.49	1.55	41.55	50.27
Среднее значение	6.93	-0.33	1.48	41.44	50.49
Стандартное отклонение	0.53	0.25	0.17	0.32	0.43

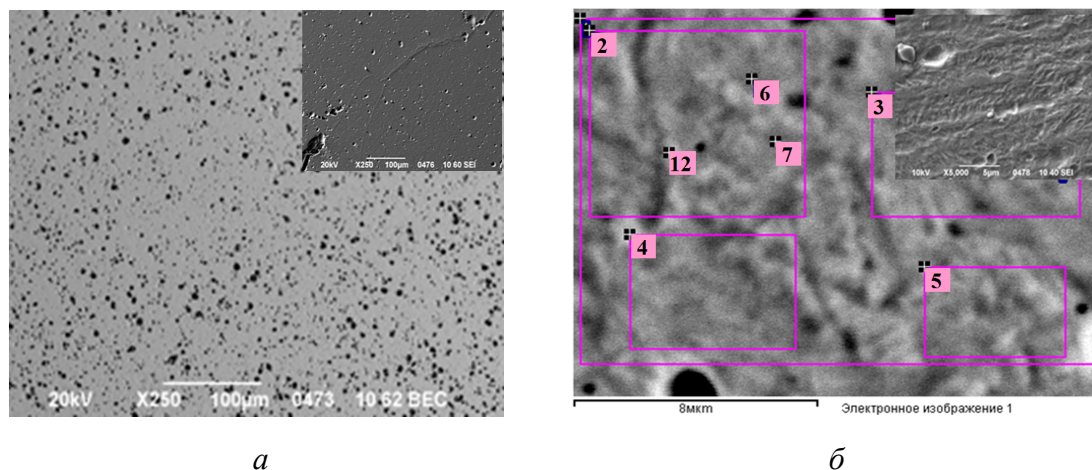


Рис. 2. РЭМ-структуры, полученные на Jeol JEM8490 LV методами обратных и вторичных (см. вставки) электронов исходных образцов TiNi: *а* – характер распределения интерметаллидных включений; *б* – выделенные области для определения элементного состава. Режимы и увеличения указаны на снимках

Характер изменения температуры в зависимости от времени воздействия активатора с амплитудой $\varepsilon \approx 5 \cdot 10^{-4}$ показан на рис. 3, *б*, кривая 1. Обнаружена корреляция между началом АЗВТ и интенсивностью УЗ-нагрева. Скорость изменения температуры $\Delta T/\Delta t$ вдоль образца при УЗ-нагреве составляет ~ 0.5 K/s.

На рис. 3, *в* представлены фотофрагменты, визуализирующие эксперимент по УЗ-инициированию ЭПФ при различных временах воздействия ультразвука.

После возврата деформации и частичного восстановления формы в образцах TiNi выявили достаточно высокий исходный уровень внутреннего трения. По нашему мнению, это связано с присутствием дисперсных интерметаллидных включений и микронапряжений вокруг них (см. рис. 1, *а*), а также с наличием межфазных и двойниковых границ в фазе мартенсита. Исследовали температурные зависимости декремента колебаний δ (рис. 4, *а*, кривая 1) и квадрата резонансной частоты f^2 (кривая 2).

В условиях увеличения температуры обнаружен немонотонный характер изменения δ и f^2 (рис. 4, *а*). Такое поведение этих зависимостей наблюдалось ранее в [19–21] и может быть связано с рассеянием энергии УЗ-волны границами раздела между мартенситом и матричной фазой. Кроме того, на зависимости $\delta(T)$ и $f^2(T)$ может оказывать влияние динамическая перестройка тонкой двойниковой структуры мартенсита в поле действия переменных полей напряжений УЗ-волны.

На температурных зависимостях декремента δ и квадрата частоты колебаний f^2 выявлено резкое уменьшение этих величин. Установлено, что температурный интервал таких изменений совпадает с областью обратного мартенситного превращения ($A_f = 348$ K). Это, вероятно, связано с началом необратимого смещения межфазных границ и процессом исчезновения пластин мартенсита и двойниковых границ из мартенситной структуры TiNi. Такие изменения пол-

ностью завершаются при переходе в аустенитное состояние ($T \geq 370$ К), что отражается на дальнейшем поведении $\delta(T)$ и $f^2(T)$.

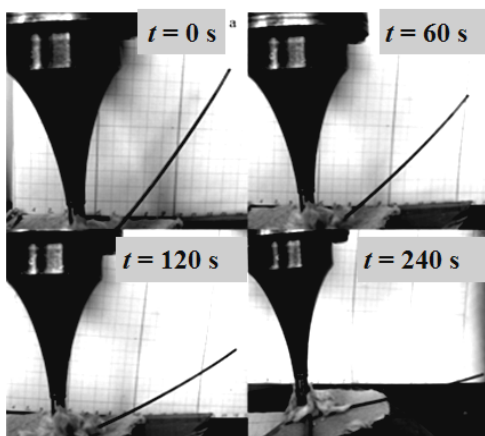
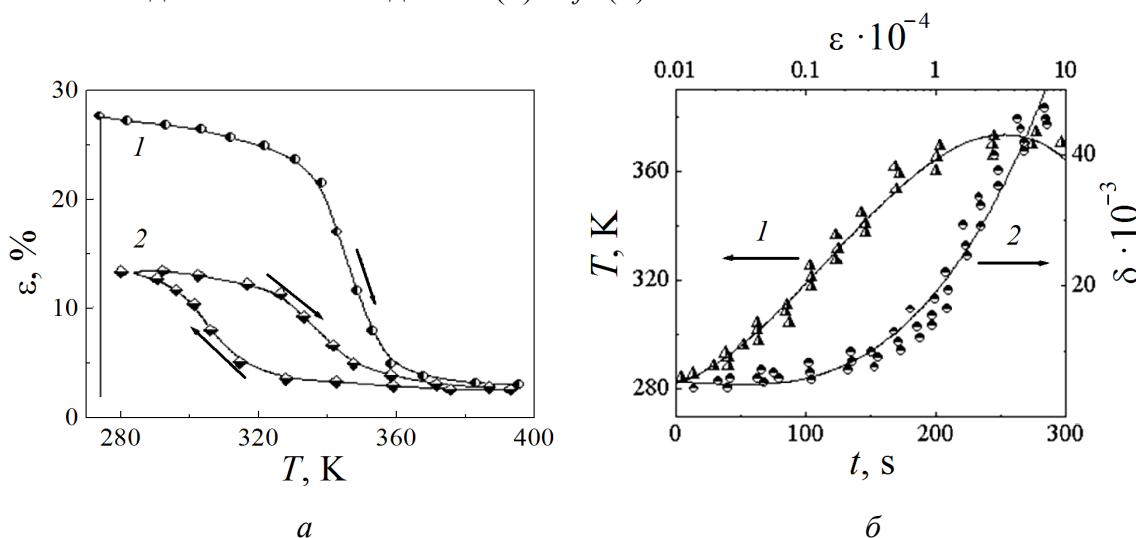


Рис. 3. Результаты эксперимента по УЗ-инициированию ЭПФ проволоочного образца TiNi: *a* – возврат изгибной деформации ε при УЗ-нагреве (кривая 1) и охлаждении (кривая 2); *б* – зависимости температуры T УЗ-нагрева от времени t (кривая 1) и декремента δ от амплитуды колебаний (кривая 2); *в* – фотофрагменты, визуализирующие проявление ЭПФ при различных временах УЗ-воздействия

в

При охлаждении образца TiNi обнаружен гистерезисный характер изменения $\delta(T)$ и $f^2(T)$, что может быть обусловлено необратимым смещением межфазных границ под действием как статических, так и динамических полей напряжений в условиях прямого фазового перехода. Особенно сильно это проявляется в изменении величины f^2 при уменьшении температуры (рис. 4,*a*, кривая 2). Изотермическая выдержка образца при $T = T_{\text{гоом}}$ приводит к временному возврату свойств $\delta(t)$ и $f^2(t)$ (рис. 4,*б*). Проявление возврата свидетельствует, во-первых, о кинетическом характере изменения упругих и неупругих свойств TiNi и, во-вторых, об их влиянии на обратимость памяти формы, которая также может иметь гистерезисный и кинетический характер.

Практический интерес представляют исследования возврата деформации формы в кольцеобразных элементах и конструкциях из TiNi [13,14] в различных условиях проявления ЭПФ. Нами реализованы условия УЗ-инициирования обрати-

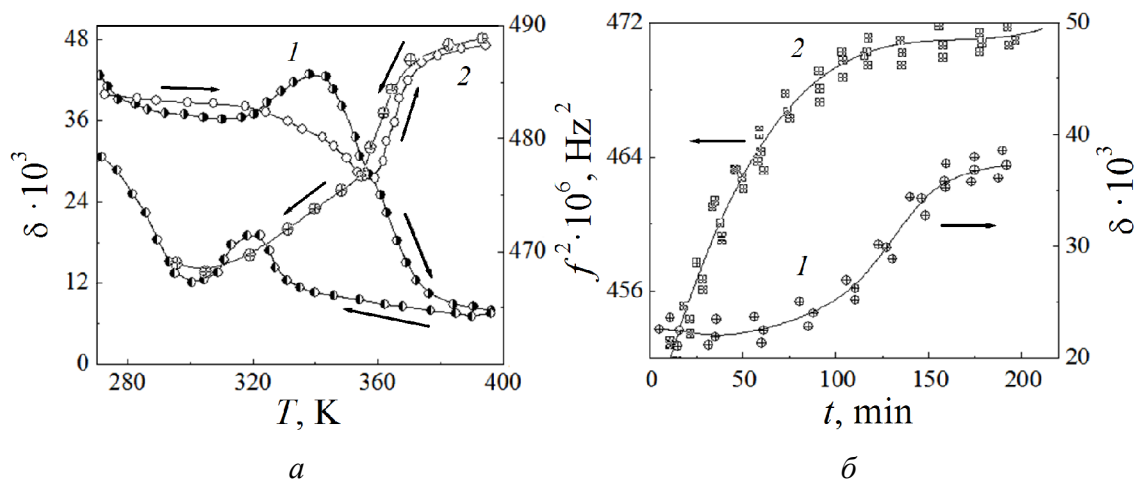


Рис. 4. Температурные (а) и временные (б) зависимости декремента колебаний δ (кривые 1) и квадрата резонансной частоты f^2 (кривые 2) в деформированных образцах TiNi

мой памяти формы (при $\epsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ и статической нагрузке $F = 300$ N) с регистрацией величины приводного усилия, создаваемого с помощью калиброванной пружины (рис. 5). Подобные конструкции из одного или нескольких колец, собранных в систему, могут являться силовыми элементами макроскопических приводных устройств [13,14] или микроэлементами системы MEMS [22].

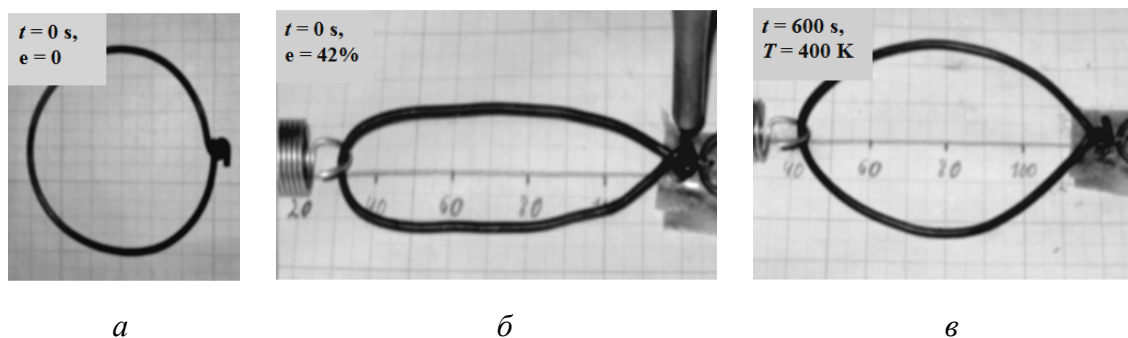


Рис. 5. Фотофрагменты, визуализирующие эксперимент по УЗ-инициированию ЭПФ кольцевого элемента из TiNi: а – исходное состояние; б – после деформации; в – после частичного восстановления формы

На рис. 6 показаны особенности возврата остаточной пластической деформации кольцевого элемента TiNi ($\epsilon = 42\%$, $T = 300$ K) при УЗ-нагреве (кривая 1) и обратимой памяти формы при охлаждении (кривая 2). Определены значения деформации: накопленной – $e_{acc} \approx 42\%$, обратимой – $e_{rev} \approx 9\%$, остаточной – $e_{res} \approx 22\%$, а также коэффициента $k = 0.2$. Зависимости температуры T (кривая 1) и растягивающего напряжения σ (кривая 2) от времени воздействия активатора представлены на рис. 7.

Незначительные изменения величины приводного усилия ($\sigma \geq 0.2$ МПа) в процессе инициирования ЭПФ обусловлены, в основном, слабым контактом вследствие непрочного механического сцепления концов кольцевого элемента и наличи-

ем люфта между ними. Осуществление физического контакта, например, путем применения сварки (ультразвуковой, холодной под давлением или диффузионной) позволит получить прочный контакт между концами кольцевого элемента и, вследствие этого, значительно увеличить приводное усилие. Это позволит применять кольцевые (пучковые) элементы в разномасштабных силовых приводных устройствах, включая актюаторы и миниатюрные устройства MEMS [22] с активацией ЭПФ методом УЗ-нагрева.

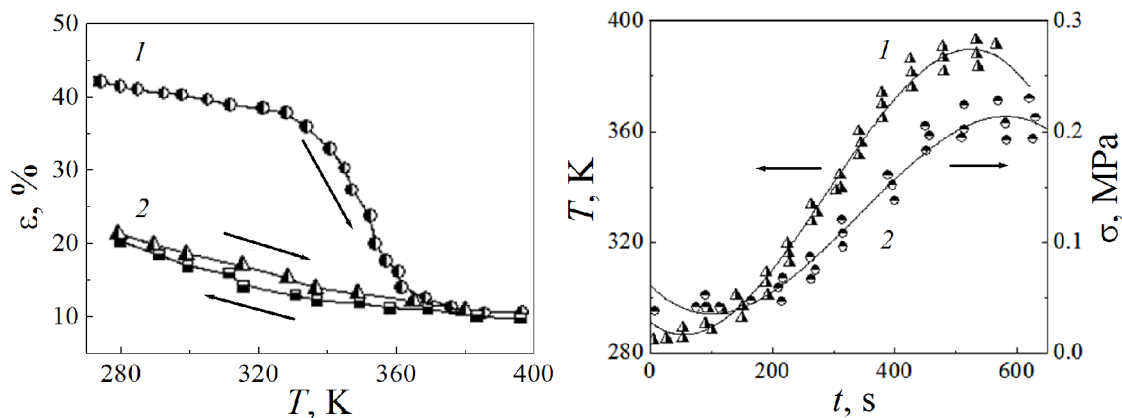


Рис. 6. Возврат деформации ε кольцевого элемента из TiNi при УЗ-нагреве (кривая 1) и охлаждении (кривая 2)

Рис. 7. Зависимости температуры T (кривая 1) и растягивающего напряжения σ (кривая 2) от времени УЗ-воздействия t

Проведены эксперименты в условиях многофакторного влияния параметров динамических и статических напряжений на характер УЗ-нагрева кольцевого элемента. Осуществляли контролируемое изменение амплитуды колебаний ($\varepsilon = 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$), силы прижатия вибратора ($F = 50 - 500$ N) и времени воздействия ($t = 10 - 3 \cdot 10^3$ s). При определенных условиях ($\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$, $F = 300$ N, $t = 100$ s) наблюдали разрушение участка механического сцепления кольцевого элемента в области непосредственного контакта с поверхностью активатора. Методом РЭМ на микроскопе Jeol JEM8490 LV проведено микрофрактографическое изучение поверхности излома (рис. 8). Сделано предположение, что в условиях комплексного влияния статического и динамического воздействий разрушение связано с признаками усталостного зарождения микротрещин непосредственно на поверхности металла вблизи интерметаллидных включений.

Исследованы экспериментально-технические возможности и оптимальные условия инициирования свечения жидкости при интенсивной кавитации под действием мощного ультразвука. С целью нахождения оптимальных условий для активации УЗ-кавитации при возбуждении стоячей сферической волны в жидкости использовали один или одновременно два вибратора, помещенных с разных сторон в прозрачную (для визуализации процесса) емкость с жидкостью. Обнаружили, что при мощности $W \geq 300$ W и частоте ультразвука $f_r \approx 26.5$ kHz помимо из-

менения кавитации в центре емкости появлялись одиночные вспышки от точечных источников слабого свечения голубоватого цвета.

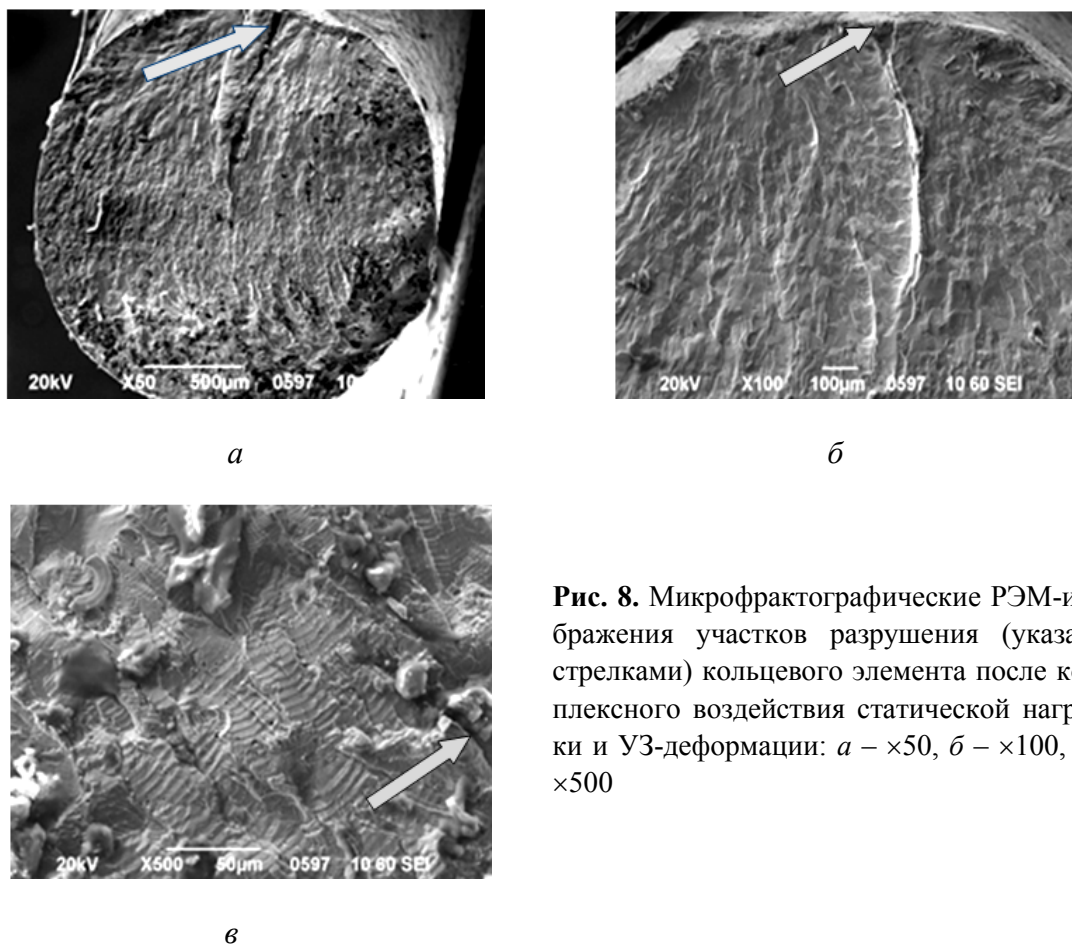


Рис. 8. Микрофрактографические РЭМ-изображения участков разрушения (указаны стрелками) кольцевого элемента после комплексного воздействия статической нагрузки и УЗ-деформации: *а* – $\times 50$, *б* – $\times 100$, *в* – $\times 500$

Для усиления УЗ-инициирования свечения изменяли химический состав и температуру жидкости, частоту и мощность излучения, использовали один или два вибратора с независимым изменением резонансной частоты (включая режимы резонанса и антрирезонанса). Установили, что понижение температуры дистиллированной воды ниже комнатной ($T \leq 10^\circ\text{C}$) и ее постоянная дегазация в процессе УЗ-облучения приводили к усилению свечения и его проявлению в других участках центральной зоны емкости. Возбуждение явления УЗ-свечения расширяет возможности УЗ-установки при инициировании нелинейных эффектов в жидкостях ($\epsilon \geq 5 \cdot 10^{-4}$) и интроскопии в металлах ($\epsilon \geq 10^{-6}$).

В литературе свечение в условиях УЗ-воздействия известно как сонолюминесценция [6]. В последнее время явление возникновения вспышки света при схлопывании кавитационных пузырьков, образованных в жидкости вследствие влияния мощной УЗ-волны, привлекает внимание многих ученых с целью более глубокого изучения не только самого явления сонолюминесценции, но и природы холодного термоядерного синтеза [7,8].

Выводы

1. Исследована амплитудная зависимость внутреннего трения TiNi ($A_{in} \geq 310$ К, $A_f \geq 340$ К) в исходном состоянии и после деформации 3-точечным изгибом; найдена критическая амплитуда ($\varepsilon_{cr} \geq 10^{-4}$), выше которой начинается область АЗВТ; показано, что деформация изгибом приводит к повышению ε_{cr} .

2. Проведено инициирование диссипации УЗ-энергии проволочными образцами TiNi; измерена зависимость изменения температуры образца от времени УЗ-воздействия и усилия прижатия концентратора; показано, что УЗ-нагрев протекает наиболее интенсивно в области АЗВТ при амплитуде колебательной деформации $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ и при силе прижатия в пределах $F \leq 300$ N.

3. Исследованы температурные зависимости декремента колебаний δ и квадрата резонансной частоты f^2 проволочных образцов TiNi; обнаружен нелинейный и гистерезисный характер в условиях увеличения и уменьшения температуры; установлена температурная корреляция нелинейного поведения с областью мартенситного превращения и обнаружен кинетический характер возврата свойств.

4. Обнаружен возврат деформации формы в кольцеобразных конструкциях из TiNi в условиях УЗ-инициирования обратимой памяти формы (при $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$), оценены скорость изменения температуры вдоль кольцевого элемента при УЗ-нагреве и величина приводного усилия.

5. Изучены особенности инициирования свечения в жидкости в условиях интенсивной кавитации под действием мощного ультразвука, установлены требования к жидкости ($T \leq 10^\circ\text{C}$, постоянная дегазация в процессе кавитации) и экспериментально-технические параметры УЗ-установки ($W \geq 300$ W, $f_r \approx 26.5$ kHz).

1. Л.Д. Розенберг, Физика и техника мощного ультразвука. Том 1. Источники мощного ультразвука, Наука, Москва (2012).
2. A. Puskar, The use of high-intensity ultrasonics, Elsevier Scientific Pub. Co, Amsterdam (1982).
3. Л. Бергман, Ультразвук и его применение в науке и технике, Изд-во иностр. лит., Москва (1957).
4. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 1. Источники мощного ультразвука, Л.Д. Розенберг (ред.), Наука, Москва (1967).
5. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 3. Физические основы ультразвуковой технологии, Л.Д. Розенберг (ред.), Наука, Москва (1970).
6. W.B. McNamara, III, Yu.T. Didenko, K.S. Suslicki, Nature **401**, 772 (1999).
7. O. Baghdassarian, H.C. Chu, B. Tabbert, G.A. Williams, Phys. Rev. Lett. **86**, 4934 (2001).
8. K. Yasui, Phys. Rev. Lett. **83**, 4297 (1999).
9. Н.Н. Белоусов, И.Р. Венгеров, Е.Г. Пашинская, ФТВД **17**, № 3, 101 (2007).
10. Н.Н. Белоусов, И.Р. Венгеров, ФТВД **17**, № 4, 64 (2007).
11. В.В. Клубович, В.В. Рубаник, В.А. Лихачев, В.В. Рубаник (мл.), В.Г. Дородейко, Материалы XXXII семинара «Актуальные проблемы прочности», С-Петербург (1997), с. 235.
12. В.В. Рубаник, В.В. Клубович, В.В. Рубаник (мл.), Материалы XXXV семинара «Актуальные проблемы прочности», Псков (1999), ч. 2, с. 561–564.

13. Ю.Н. Вьюненко, Мат. Междун. науч. симпозиума «Перспективные материалы и технологии», УО «ВГТУ», Витебск (2011), с. 182–184.
14. Ю.Н. Вьюненко, Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки **21**, 791 (2016).
15. В.Н. Варюхин, А.В. Резников, Н.Н. Белоусов, ФММ **62**, 1221 (1986).
16. Н.Н. Белоусов, В.Н. Варюхин, О.И. Дацко, УФЖ **34**, 1564 (1989).
17. Н.Н. Белоусов, В.Н. Варюхин, О.И. Дацко, Ф.Ф. Лаврентьев, ФММ **68**, 799 (1989).
18. Н.Н. Белоусов, В.Н. Варюхин, О.И. Дацко, Ф.Ф. Лаврентьев, ФММ **68**, 1016 (1989).
19. В.Н. Варюхин, Н.Н. Белоусов, Е.Г. Пашинская, ФТВД **8**, № 2, 21 (1998).
20. В.Н. Варюхин, Н.Н. Белоусов, Е.Г. Пашинская, ФТВД **9**, № 1, 12 (1999).
21. В.Н. Варюхин, Н.Н. Белоусов, ФТВД **14**, № 3, 119 (2004).
22. Н.М. Лавриненко, Н.Н. Белоусов, ФТВД **14**, № 4, 125 (2004).

N.N. Belousov, Yu.N. V'yunenko

PECULIARITIES OF INITIATING OF THERMAL AND LIGHT EFFECTS IN THE CONDITIONS OF ULTRASOUND ACTION

Engineering and technical improvement of ultrasound (US) equipment for implementing of initiating thermal and light effects in the conditions of complex influence of static and dynamic effects was performed. The amplitude dependence of internal friction of the TiNi alloy in the initial state and after deformation by 3-point bending was studied. The value of the critical amplitude ($\varepsilon_{cr} \geq 10^{-4}$) was found, above which an intense US-heating occurred. Nonlinear and hysteretic behavior of the temperature dependences of the decrement of vibrations δ and the square of the resonant frequency f^2 was discovered. A correlation of the nonlinear behavior of $\delta(T)$ and $f^2(T)$ with the temperature of the martensitic transformation was established. Returning of the deformation in the longitudinal and circumferential structures of TiNi in the conditions of US-initiation of the reversible shape memory was investigated. The kinetic nature of the returning of f^2 and δ was discovered. Peculiarities of US-initiation of the glow in the liquid under the action of powerful ultrasound in the conditions of intense cavitation were studied.

Keywords: reversible shape memory, internal friction, powerful ultrasound, critical amplitude, intense cavitation

Fig. 1. Schematic images of different methods of US-heating: *a* – complex influence of static load and US-deformation in the antinodes of standing wave; *b* – free fastening of sample to the vibrator with heating along a sample [11,12]

Fig. 2. SEM-structure got on Jeol JEM8490 LV by the methods of reverse and secondary (see inserts) electrons of the initial samples of TiNi: *a* – character of distribution of the intermetallic inclusions; *b* – distinguished areas for determination of the element composition. The modes and magnifications are indicated on the images

Fig. 3. Results of experiment on US-initiation of shape memory effect (SME) in wire samples of TiNi: *a* – returning of flexural deformation ε at US-heating (curve 1) and cooling (curve 2); *b* – time dependences of the temperatures $T(t)$ of US-heating (curve 1) and vibration amplitude dependences of decrements δ (curve 2); *c* – photofragments displaying SME at varied time of US-acting

Fig. 4. Temperature (*a*) and temporal (*b*) dependences of decrements of vibrations δ (curves 1) and square of the resonant frequency f^2 (curves 2) in the deformed samples of TiNi

Fig. 5. Photofragments visualizing an experiment on US-initiation of SME in a circular element of TiNi: *a* – the initial state; *b* – after deformation; *c* – after partial renewal of form

Fig. 6. Returning of deformation ε of a circular element of TiNi at US-heating (curve 1) and cooling (curve 2)

Fig. 7. Dependencies of temperature T (curve 1) and stretching tension σ (curve 2) on the time of US-action t

Fig. 8. Microfractographic SEM-images of the fracture areas of a circular element (indicated by pointers), after complex influence of static load and US-deformation: *a* – $\times 50$, *b* – $\times 100$, *c* – $\times 500$