

способствует внедрению частиц между волокнами, что увеличивает срок службы инструмента, но за счет острых кромок абразивного порошка происходит разрыв некоторых отдельных нитей.

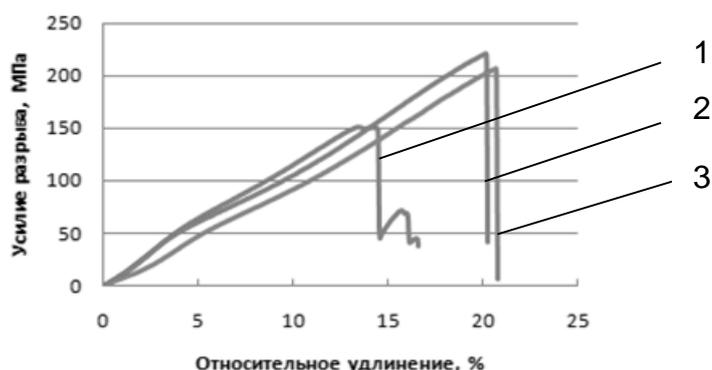


Рисунок 4 – Диаграмма растяжения абразивного инструмента: 1 – исходный; 2 – обработанный абразивным составом без применения УЗК; 3 – обработанный абразивным составом с применением УЗК

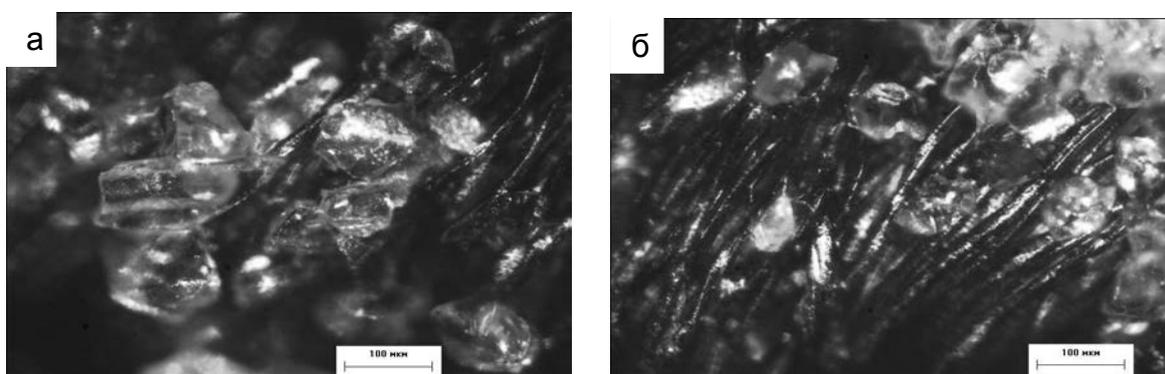


Рисунок 5 – Микроструктура абразивного шнура: а – обработанный абразивным составом без применения УЗК; б – обработанный абразивным составом с применением УЗК

Применение данных типов шлифовальных инструментов на эластичной основе обеспечивает чистоту поверхности обрабатываемой детали на уровне 0,32–0,160 Ra, 9–10 класс чистоты поверхности.

#### Список использованных источников

1. Балдев Р., Ранджердран, В., Паланичами, П. Применение ультразвука. – М.: Техносфера, 2006.
2. Кардашев, Г. А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г. А. Кардашев. – М.: Химия, 1990.

УДК 621.793.184+539.216.2

## ЗАДАНИЕ ФОРМЫ ИЗДЕЛИЯМ С ЭПФ ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЯ

**Урбан В.И., асп., Рубаник В.В., д.т.н.,  
Рубаник В.В. (мл.), д.т.н., Багрец Д.А., н.с.**

*Институт технической акустики НАН Беларуси,  
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. В статье рассмотрено задание формы проволочного образца из никелида титана (TiNi) методом вакуумно-дугового осаждения нитрида циркония (ZrN). Проанализированы результаты расчетов параметров задания формы и кинетика

*термоупругих мартенситных превращений. Определены характеристические температуры фазовых переходов. Описан технический режим осаждения. Для анализа использовались «методика определения параметров формовосстановления при наведении изгибных деформаций» и дифференциально-сканирующая калориметрия.*

**Ключевые слова:** нитрид циркония, ионно-плазменное осаждение, тонкие пленки, никелид титана, дифференциально-сканирующая калориметрия, деформации, эффект памяти формы.

Объект исследования – проволока из никелида титана (состава Ti-50,8 ат.% Ni) диаметром 0,5 мм.

Цель – исследовать параметры задания формы, кинетику термоупругих мартенситных превращений и характеристические температуры после осаждения на образец покрытия ZrN ионно-плазменным методом.

Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) часто относят к так называемым интеллектуальным материалам, позволяющим создавать принципиально новые конструкции и технологии в разных отраслях машиностроения: авиакосмической и ракетной техники, приборостроения, энергетики, медицины и др. Наибольший практический интерес представляют сплавы на основе никелида титана Ti-Ni, поскольку наряду с рекордными характеристиками ЭПФ они обладают высокой коррозионной стойкостью и биосовместимостью [1].

Метод вакуумно-дугового осаждения за счет ионной бомбардировки обеспечивает нагрев обрабатываемой поверхности, что легло в основу разработанного в «ИТА НАН Беларуси» совместно с ЗАО «Медицинское предприятие Симуург» (г. Витебск, Беларусь) способа задания формы изделиям из TiNi сплава с одновременным нанесением биоинертного покрытия нитрида титана [2]. В стоматологии наряду с покрытиями нитрида титана используют покрытия на основе циркония. Свойства покрытий из нитрида циркония аналогичны нитриду титана, но отличаются от последнего более высокой стойкостью к воздействию биологических сред, лучшей биосовместимостью и отсутствием аллергических реакций. Поэтому использование покрытий из нитрида циркония на изделиях из никелида титана перспективно.

В данной работе проволоочный образец из никелида титана (Ti-50,8 ат.% Ni) диаметром 0,5 мм в форме дуги закреплялся на оснастке, затем помещался в вакуумную камеру установки УВНИПА-1-001. Покрытие ZrN осаждалось прямым потоком.

Технический режим осаждения состоял из следующих этапов:

- 1) ионно-лучевая очистка при потенциале смещения – 4 кВ в течение 16 минут;
- 2) ионная бомбардировка при потенциале смещения – 1 кВ в течение 7 минут;
- 3) осаждение подслоя циркония при потенциале смещения – 60 В и токе дуги 90 А в течение 2 минут;
- 4) осаждение ZrN при потенциале смещения – 60 В, токе дуги 90 А и давлении  $1.5 \cdot 10^{-2}$  Па в течение 13 минут.

Температура во время процесса осаждения варьировалась от 400 до 500 °С. Толщина покрытия составила 1 мкм.

В качестве методики определения заданных деформаций использовалась «методика определения параметров формовосстановления при наведении изгибных деформаций» [3]. Полную наводимую деформацию  $\varepsilon_t$  определяли по формуле:

$$\varepsilon_t = \frac{d}{D} \times 100 \%$$

где  $d$  – диаметр проволоки,  $D$  – диаметр цилиндра, вокруг которого огибалась проволока. Остаточную деформацию после снятия нагрузки  $\varepsilon_i$  определяли по формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{d}{D_1} \times 100 \%$$

где  $D_1$  – диаметр полуокружности дуги после снятия нагрузки.

После снятия образца с оправки определяли значения наведенной деформации  $\varepsilon_i$  и рассчитывали упругую деформацию [3]:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_t - \varepsilon_i,$$

где  $\varepsilon_t$  – полная наводимая деформация,  $\varepsilon_y$  – упругая деформация, восстанавливаемая после снятия нагрузки (%),  $\varepsilon_i$  – остаточная деформация после снятия нагрузки (%). Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица 1 – Результаты расчетов деформаций образца проволоки TiNi после осаждения покрытия ZrN

$\varepsilon_t = 1.25 \%$	$\varepsilon_i = 1.24 \%$	$\varepsilon_y = 0.01 \%$
---------------------------	---------------------------	---------------------------

Полная наводимая деформация  $\varepsilon_t$  взята из усредненной величины типичной наводимой деформации для ортодонтической сверхэластичной дуги из сплава никелида титана (Ti-50,8 ат.% Ni). Исходя из того, что в результате расчетов упругая деформация  $\varepsilon_y = 0.01 \%$ , можно сделать вывод, что в процессе осаждения покрытия ZrN наводимая нами деформация задалась.

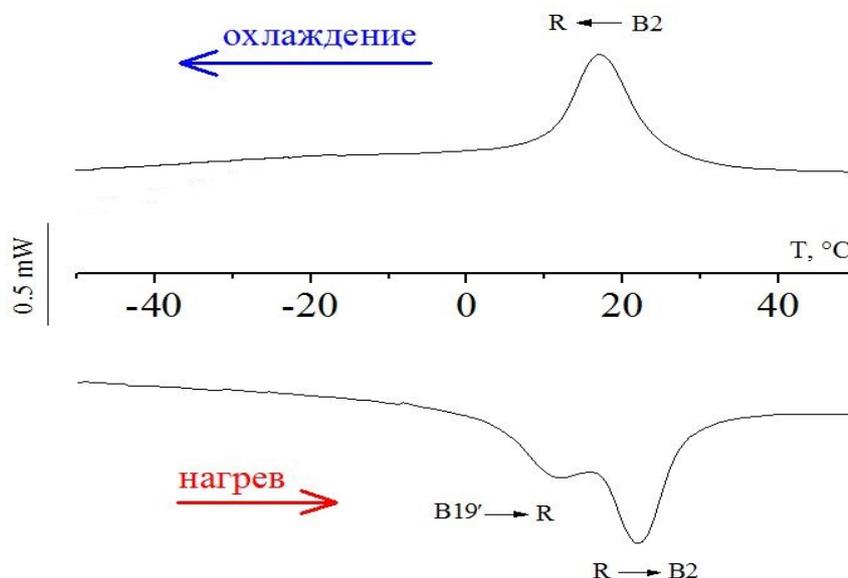


Рисунок 1 – Кривые ДСК образца проволоки TiNi после осаждения покрытия ZrN

Исследования характеристических температур и кинетики фазовых переходов проводили на дифференциальном сканирующем калориметре DSC822e (Mettler Toledo, Швейцария); в интервале температур от  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , скорость охлаждения и нагрева образцов составляла  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ .

Проанализировав результаты дифференциально-сканирующей калориметрии, можно сказать, что мартенситные превращения реализуются по схеме  $B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$ . При нагреве обратное мартенситное превращение происходит в две стадии по схеме:  $B19' \rightarrow R \rightarrow B2$  с характеристическими температурами  $A_n' = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $A_k' = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $A_n = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $A_k = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ . При охлаждении образца в данном диапазоне температур от  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдается только один завершённый переход прямого мартенситного превращения  $B2 \rightarrow R$  с характеристическими температурами  $M_n' = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $M_k' = 11 \text{ }^\circ\text{C}$ . Прямой мартенситный фазовый переход  $R \rightarrow B19'$  размыт, что затрудняет определение его характеристических температур.

Таким образом можно сделать следующие выводы:

- в результате расчётов была получена упругая деформация  $\varepsilon_y$ , равная  $0.01 \%$ , следовательно, в процессе осаждения покрытия ZrN наводимая нами деформация задалась;
- обратное мартенситное превращение происходит в две стадии по схеме:  $B19' \rightarrow R \rightarrow B2$  с характеристическими температурами  $A_n' = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $A_k' = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $A_n = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $A_k = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- в данном диапазоне температур от  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдается только один завершённый переход прямого мартенситного превращения  $B2 \rightarrow R$  с характеристическими температурами  $M_n' = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $M_k' = 11 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Список использованных источников

1. Хмелевская, И. Ю. Сплавы с эффектом памяти формы и их применение в медицине и технике // Современные проблемы металловедения. – М. – 2009. – С. 8–12.
2. Способ изготовления биоинертного изделия из материала с эффектом памяти формы на основе никелида титана: пат. 19507 Респ. Беларусь, МПК А 61F 2/86, А 61F 2/94 / В.

- В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., Д. А. Багрец, В. Г. Дородейко; заявители: ГНУ «ИТА НАН Беларуси», ЗАО «Медицинское предпр. Сатург». – № а 20130042; опубл. 30.10.15 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 5. – С. 43.
3. Shape memory alloys : fundamentals, modeling and applications / V. Brailovski, S. Prokoshkin, P. Terriault and F. Trochu. – Montreal: ETS Publ., 2003. – 844 p.

УДК 621.9.048.6+669-154:534.8

## КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЧУГУНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

**Савицкий В.О., м.н.с., Луцко В.Ф., с.н.с., Рубаник В.В., д.т.н.**

*Институт технической акустики НАН Беларуси,  
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. В статье рассмотрено влияние ультразвуковой обработки расплавленного чугуна на его структуру.

Ключевые слова: чугун, ультразвуковая обработка, расплав, графит.

Ультразвуковая обработка металлов и сплавов является одним из наиболее эффективных способов улучшения их физико-механических и эксплуатационных свойств [1–3]. Вводимые в расплав ультразвуковые колебания интенсифицируют процесс дегазации, способствуют дополнительному перемешиванию расплава, препятствуют возникновению дендритной ликвации и концентрации неметаллических включений на границах зерен, что положительно влияет на формирование однородной структуры металла в процессе кристаллизации. Наряду с этим, мощный ультразвук позволяет в процессе модифицирования вводить в металл различные композитные элементы и тугоплавкие лигатуры, воздействуя непосредственно на кристаллическую решетку [4–6].

Ультразвук повышает механические свойства затвердевших расплавов и намного улучшает способность металла к пластической деформации. Воздействуя на фронт кристаллизации силуминов, ультразвуковая волна разрушает дендриты, способствует их измельчению. Обработка расплава ультразвуком приводит к формированию газовых зародышей, их коагуляции, что ускоряет процесс дегазации. В результате обработка расплавов силуминов при кристаллизации позволяет измельчить эвтектику, снизить газовую пористость слитков и повысить предел их прочности на разрыв на 20...40 % [7]. Чугун, например, становится прочнее, сопротивление разрыву возрастает более чем в три раза. К тому же после такой операции металл почти не поддается коррозии. Важно, что обработанный таким образом чугун приобретает свойства стали, а по некоторым данным даже превосходит ее [8].

Для исследования влияния воздействия ультразвуковых колебаний на структуру и свойства кристаллизующегося металла в ИТА НАН Беларуси была создана экспериментальная установка, основные узлы которой: ультразвуковой генератор и акустическая система, пневматический пресс, литейная оснастка и компрессор (рис. 1).

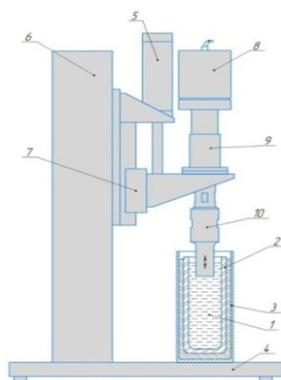


Рисунок 1 – Схема ввода ультразвуковых колебаний в кристаллизующий расплав (а) и вид экспериментальной установки (б): 1 – расплав, 2 – кокиль, 3 – стакан, 4 – основание, 5 – пневмоцилиндр, 6 – стойка, 7 – механизм перемещения, 8 – пьезоэлектрический преобразователь, 9 – бустер, 10 – излучатель