

**Рис. 1.** Зависимость распределения термокинетической ЭДС по длине образца для проволоки диаметром 0,48 мм (а) и 0,22 мм (б)  
(1, 2, 3 – первый, второй и третий циклы испытаний)

Таким образом, впервые установлено, что движение границы раздела фаз в образцах никелида титана вызывает возникновение постоянной по величине и направлению электродвижущей силы. Причиной возникновения этого явления, возможно, является наличие контактной разности потенциалов между участками TiNi находящимися в разных фазовых состояниях (аустенит или мартенсит) нагретого и ненагретых участков проволоки.

#### Список литературы

1. В.Л. Шушкевич, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл. Термоэлектронные явления в TiNi // Сборник материалов XLIII международной конференции «Актуальные проблемы прочности», Витебск, 27 сент. - 1 окт. 2004 г.: в 2 ч. Витебск, 2004. Ч.1. С. 345-346.
2. Е.Ф. Фурмаков Электрический ток, вызванный движением поверхности раздела фаз в металле // Фундаментальные проблемы естествознания. Санкт-Петербург, 1999. Вып. 21. С. 377-378.

### ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЗАДАНИЕ ПАМЯТИ ФОРМЫ В НИКЕЛИДЕ ТИТАНА

Рубаник В. В., Рубаник В. В. мл., \*Дорудейко В. Г., Милюкина С. Н.

*Институт технической акустики НАН Беларуси, ВГТУ, Витебск, Беларусь,*

*\*Медицинское предприятие «Симург»*

*s.niko@tut.by*

Использование сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) для изготовления различных изделий предполагает необходимый этап обработки материала с целью задания ему способности к восстановлению формы. Обычно такая обработка представляет собой длительные отжижки в заневоленном состоянии при высоких температурах (400÷550°C). В работе [1] показано, что использование низкотемпературной обработки (150÷250°C) перспективно для задания формы и способствует стабильному запоминанию

нию наведённой деформации. При наведении эффектов памяти формы также важную роль играют температура, степень деформации и время выдержки под нагрузкой [2], влияние которых на функциональные свойства пока ещё не достаточно изучены. В связи с этим, целью исследований в данной работе было систематическое изучение влияния условий деформирования и низкотемпературной обработки на запоминаемую деформацию.

### Материалы и методы исследования

При проведении исследований использовали проволоочные образцы Ti-50,4ат.%Ni диаметром 0,65 мм, которые подвергали предварительному рекристаллизационному отжигу при температуре 700°C в течение 30 минут с последующей закалкой в воде со льдом для устранения влияния предыстории. После чего в материале при охлаждении и нагревании через интервал мартенситных превращений реализовывалось одностадийное превращение B2 $\leftrightarrow$ B19'. Характеристические температуры, измеренные методом дифференциальной сканирующей калориметрии, составляли:  $M_H = 30^\circ\text{C}$ ,  $M_K = 14^\circ\text{C}$ ,  $A_H = 41^\circ\text{C}$ ,  $A_K = 57^\circ\text{C}$ .

Температуры мартенситных превращений при восстановлении формы определяли термомеханическим методом. Наведение деформации осуществляли двумя методами: изгибом на цилиндрической оправке и кручением. Образцам задавали деформацию при температуре 20°C, нагревали в заневоленном состоянии до температур, не превышающих 250°C, выдерживали в течение различных промежутков времени и охлаждали до 0°C. Затем образец освобождали и измеряли значения наведённой деформации  $\varepsilon_i$  ( $\gamma_i$ ); после чего нагревали выше температуры восстановления формы  $A_K$  и фиксировали остаточную деформацию  $\varepsilon_A$  ( $\gamma_A$ ). Далее образцы термоциклировали в интервале от 0°C до  $A_K$ . При температуре 0°C фиксировали деформацию в мартенситном состоянии  $\varepsilon_M$  ( $\gamma_M$ ).

### Результаты экспериментов

Влияние температуры выдержки материала в заневоленном состоянии на параметры ЭПФ и ОЭПФ показано на рис. 1. Наводимая изгибом деформация составляла 4,5%, время выдержки образца при указанных температурах 0,1 ч.

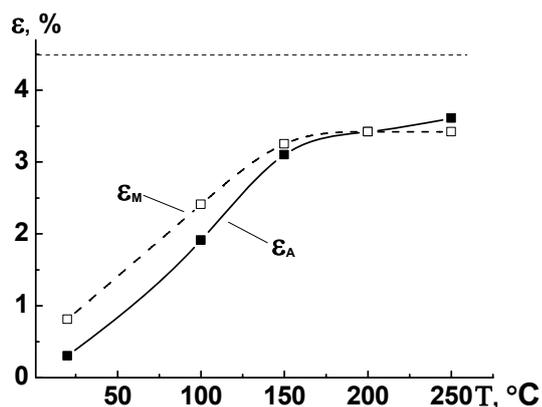


Рис. 1. Зависимость деформаций  $\varepsilon_A$  и  $\varepsilon_M$  от температуры выдержки.

Значения приобретаемых деформаций зависят от температуры выдержки некоторым нелинейным образом. Увеличение температуры сопровождается ростом  $\varepsilon_A$  и  $\varepsilon_M$ , причём наиболее интенсивно значения деформаций повышаются при температурах до 150°C, затем их рост резко замедляется. При температуре отжига 200°C обратимая деформация составляет 0%, а при 250°C меняет знак.

Последующее термоциклирование через интервал мартенситных превращений показало, что значения приобретённых деформаций стабильны после обработки при 200°C и 250°C, а при более низких температурах уменьшаются с числом термоциклов.

Влияние времени выдержки на остаточную деформацию в исследуемых температурных режимах очень мало – при увеличении времени от 0,1 ч до 10 ч значения  $\varepsilon_A$  увеличиваются лишь на 0,2% (рис. 2).

Поскольку за столь кратковременные выдержки при температурах до 250°C структурные изменения в материале практически не происходят, возможно, наблюдаемые деформационные эффекты связаны с релаксацией внутренних напряжений, в ре-

в результате перераспределения дефектов и перемещения их в новые, более устойчивые состояния. Проанализировав полученные данные, можно предположить, что в данном случае наиболее интенсивная релаксация осуществляется при нагреве напряжённого материала выше температуры  $A_{\kappa}^{\sigma}$ . Чтобы проверить данное предположение, необходимо определить значение  $A_{\kappa}^{\sigma}$  для заневоленного образца.

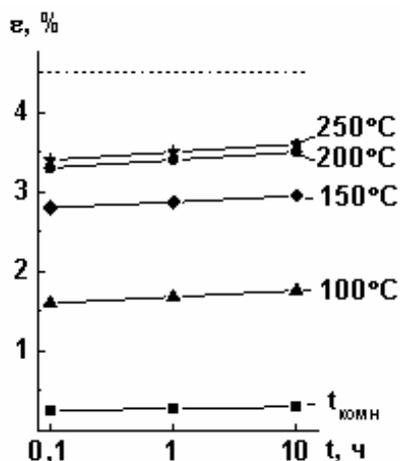


Рис. 2. Зависимость остаточной деформации  $\varepsilon_A$  от времени выдержки

Для этого образцы в мартенситном состоянии кручением на 4,5%, нагружали и нагревали под постоянным напряжением до температуры окончания восстановления деформации. При охлаждении, чтобы исключить накопление деформации за счёт пластичности превращения при прямом переходе, деформацию образца ограничивали. Значения действующих напряжений варьировали до 300 МПа.

Кинетика формовосстановления существенно зависит от приложенных напряжений, так как они повышают температуры мартенситных переходов. С увеличением напряжений уменьшается наклон линий  $A_{\text{H}} \div A_{\text{K}}$  и  $M_{\text{H}} \div M_{\text{K}}$  и увеличивается температурный интервал формовосстановления (рис. 3). Наибольшее влияние напряжения оказывают на параметры обратного перехода, главным образом, на температуру  $A_{\kappa}^{\sigma}$  (рис. 4). Значения восстанавливаемой деформации уменьшаются с ростом прикладываемых напряжений и при нагрузке  $\sim 300$  МПа уже не наблюдается изменение деформации.

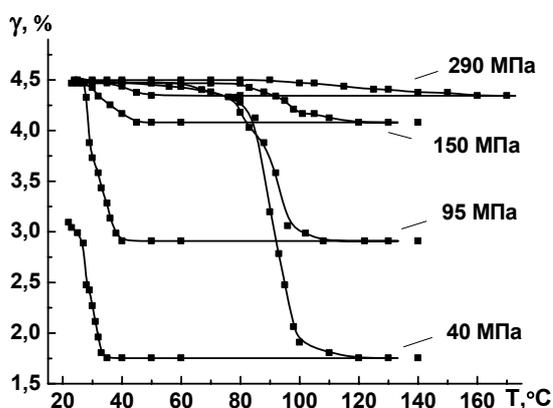


Рис. 3. Зависимости деформации от температуры под постоянным напряжением.

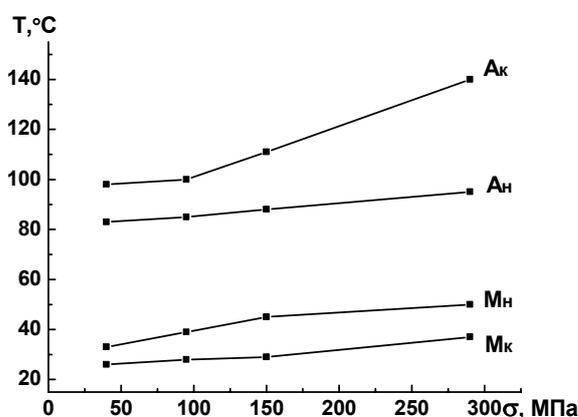


Рис. 4. Температуры мартенситных превращений в напряжённом материале.

Таким образом, при нагреве заневоленного образца обратный переход в нём заканчивается при температуре  $\sim 150^{\circ}\text{C}$ , что соответствует точке перегиба на графике зависимости приобретаемых деформаций от температуры выдержки.

Проведенные дополнительные эксперименты показали, что увеличение наводимой деформации до 15% и последующий нагрев под напряжением 500 МПа приводит к увеличению  $A_{\kappa}^{\sigma}$  до  $160^{\circ}\text{C}$ . Поэтому для дальнейших исследований была выбрана температура обработки  $200^{\circ}\text{C}$ , при которой даже при больших деформациях напряжённый материал находится в аустенитном состоянии.

Влияние степени наводимой деформации на параметры формовосстановления после выдержки при комнатной температуре и  $200^{\circ}\text{C}$  в течение 5 минут показано на рис. 5.

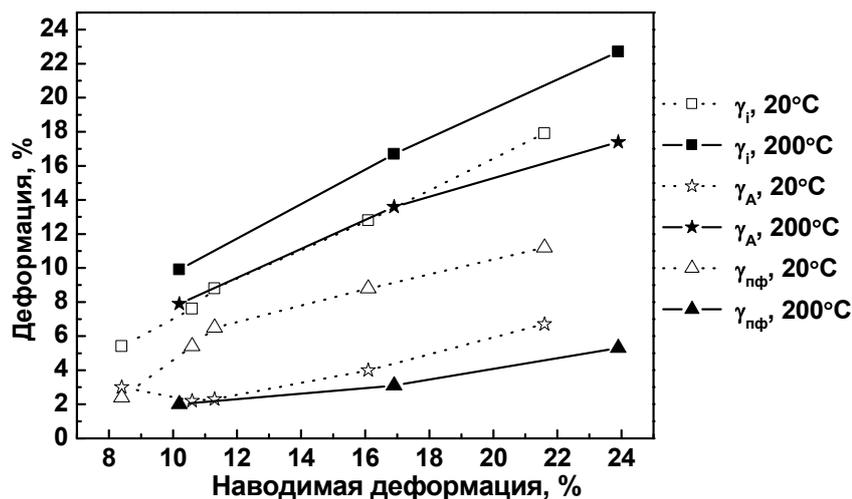


Рис. 5. Параметры формовосстановления в зависимости от наводимой деформации после выдержки при комнатной температуре и 200°C.

После обработки наведённая деформация совпадает с наводимой, в то время как без обработки имеет место упругий возврат до 4%. Остаточная деформация в аустените в результате выдержки при 200°C также значительно возрастает и составляет 77÷80% от наводимой для деформаций до 20%. При больших степенях деформации значения  $\gamma_A$  снижаются. Из представленных на рисунке данных видно, что в результате вышеуказанной обработки подавляется эффект памяти формы, и восстанавливаемая при нагреве деформация составляет всего ~20% от наводимой. Вероятно, такое поведение материала связано с активными релаксационными процессами, протекающими при нагреве завановленного материала выше  $A_{к^{\sigma}}$ .

Анализ представленных данных показывает, что термообработка при температурах 150÷250°C даже в течение нескольких минут способствует стабильному закреплению формы (до 80%). Для применения этих режимов обработки в практических целях необходимы данные о новых, приобретённых характеристиках ЭПФ, т.е. если образец снова испытает деформацию, то каковы будут характеристики формовосстановления при реализации эффекта памяти формы. Проведение таких экспериментов является дальнейшим направлением исследований.

### Заключение

Нагрев в зановоленном состоянии материала, продеформированного в мартенситной фазе, выше  $A_{к^{\sigma}}$  приводит к изменению его характеристик формовосстановления, которые зависят от температуры нагрева и степени наводимой деформации. Кратковременные выдержки при температурах 200÷250°C можно использовать для закрепления формы образца вследствие уменьшения восстанавливаемой деформации при последующем нагреве через интервал мартенситных превращений, т.е. имеет место подавление эффекта памяти формы.

1. Рубаник В.В. (мл.), Рубаник В.В., Милюкина С.Н. Задание формы в TiNi проволоке низкотемпературной обработкой / Межд. симпозиум «Перспективные материалы и технологии»: сб. тез. – Витебск, 2009.
2. Рыклина Е.П., Прокошкин С.Д., Чернавина А.А., Перевощикова Н.Н. Исследование термомеханических условий наведения и характеристик обратимого и одностороннего эффектов памяти формы в никелиде титана. XLVI Межд. конф. «Актуальные проблемы прочности»: сб. матер. – Витебск, 2007 – С.163-168.