

тического скольжения ($10\bar{1}0$) является плоскостью спайности [3]. Это, естественно, облегчает раскрытие трещины и ее распространение. Наблюдаемая на рис. 2 ступенчатая траектория трещины, очевидно, обусловлена распространением трещины посредством ее перехода из одной плоскости призмы в другую.

Настоящим исследованием показано, что низкочастотные вибрационные механические колебания изменяют структурное состояние монокристаллов рубина, вызывают образование и развитие двойников, увеличение плотности призматических дислокаций и зарождение трещин. В работе измерена скорость движения двойниковых границ и оценены локальные внутренние сдвиговые напряжения. Обнаружено образование областей аккомодации.

УДК 539.3

ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ПАМЯТИ ФОРМЫ В СПЛАВЕ TiNi ПОСЛЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ОТЖИГА

© С.П. Беляев, А.Е. Волков, И.В. Иночкина

Россия, С.-Петербург, НИИ математики и механики Государственного университета

Belyaev S.P., Volkov A.E., Inochkina I.V. The change of shape memory effect in TiNi after plastic straining and annealing. A study of tensile plastic deformation and annealing influence on shape memory characteristics of TiNi specimens tested in torsion shows that the strain accumulated in cooling under a constant torque varies non-monotonously: grows for small preliminary strains under 2 % and then significantly decreases. All characteristic temperatures of the thermo-mechanical hysteresis slightly decrease. The initial parameters can be partially reversed by an annealing, mostly efficient at 823 K.

Известно довольно много экспериментальных данных о влиянии предварительной термомеханической обработки на свойства сплавов, проявляющих эффект памяти формы, к числу которых относится и никелид титана [1–6]. Варьируя температуру и способ задания предварительной деформации, можно добиться как улучшения эффекта памяти формы, так и полного его подавления [1–3]. Пластическая деформация всегда имеет место при изготовлении рабочих элементов из сплавов на основе никелида титана и при аварийных режимах их работы, поэтому изучение, в первую очередь, ее влияния на свойства материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) представляется особенно актуальным. Анализ известных авторам данных не позволяет дать однозначного ответа на вопрос о том, как меняются свойства сплавов при пластической деформации, поскольку их изучают при различных условиях эксперимента: способах задания предварительной деформации, температуре деформирования, предварительной обработке и т. д. Кроме того, в силу разных причин, исследователи не всегда имеют возможность отделять пластическую деформацию от общей предварительной. Так, в работе [3] показана немонотонная зависимость величины эффекта памяти формы (SME values) от предварительной пластической деформации ϵ_0 , заданной растяжением в мартенситной фазе материала. Кривые имеют максимум при $\epsilon_0 = 7\%$. Влияние предварительной пластической деформации на харак-

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоногова Е.К., Исаенко Ю.Ж., Шевкунов С.В. Корунд с титаном – высокоэффективный материал для перенастраиваемых лазеров. Обзоры по электронной технике. Серия II. Лазерная техника и оптико-электроника. 1988. Вып. 1 (1344). С. 21.
2. Козловская Е.П. Пластическая деформация кристаллов рубина и лейкосапфира при высоких температурах: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Институт кристаллографии, 1971. С. 25.
3. Класен-Неклюдова М.В. Рубин, сапфир. М.: Наука, 1974.
4. Вайнберг Д.В., Писаренко Г.С. Механические колебания и их роль в технике. М.: Наука, 1965. С. 276.
5. Lavrentev F.F. Work hardening in crystals with forest dislocations // Mat. Sci and Tech. 1980. V. 18. P. 107-127.
6. Розанский В.Н. О механизме развития зародышевых трещин в кристаллах при их пластической деформации // ДАН СССР. 1958. Т. 123. № 4. С. 648-651.

теристические температуры носит также немонотонный характер [2]: минимум приходится на 6 % деформации. Если материал предварительно продеформирован прокаткой, эти зависимости носят еще более сложный характер [1].

В предыдущих исследованиях авторы настоящей работы изучали изменение температур превращения и величины накапливаемой деформации (пластичности превращения) в условиях кручения при охлаждении после растяжения в аустенитном состоянии [4]. Обнаруженный немонотонный характер зависимостей свидетельствует о сложности и многофакторности влияния пластической деформации на свойства сплавов с эффектом памяти формы, выяснение которых требует дополнительного исследования.

Целью данной работы являлось изучение влияния предварительной пластической деформации на изменение характеристических температур превращения, способность деформированного материала к накоплению деформации при прямом превращении, а также влияние температуры отжига на восстановление свойств деформированных сплавов. Исследования проводили на цилиндрических образцах из сплава ТН-1 с диаметром и длиной рабочей части 4 и 30 мм соответственно. Предварительно они были отожжены в течение 15 минут при 1073 К, охлаждены на воздухе, затем в течение 2 часов выдержаны при 773 К, после чего охлаждены с печью. Образцы изготовлены из одного

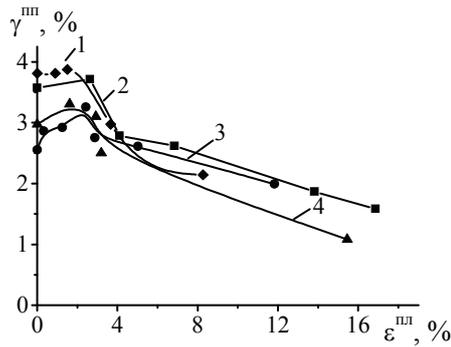
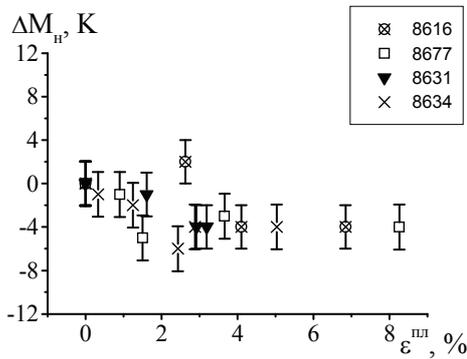
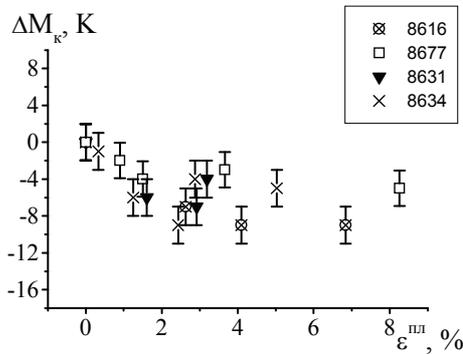


Рис. 1. Зависимость максимальной деформации, накапливаемой при охлаждении под напряжением $\tau = 20$ МПа, от предварительной пластической деформации для образцов №№ 8677 (1), 8616 (2), 8634 (3), 8631 (4) из сплава TiNi



а)



б)

Рис. 2. Зависимость изменения характеристических температур сплава TiNi от предварительной пластической деформации для 4-х образцов

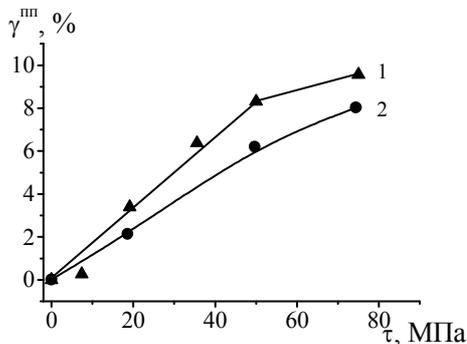
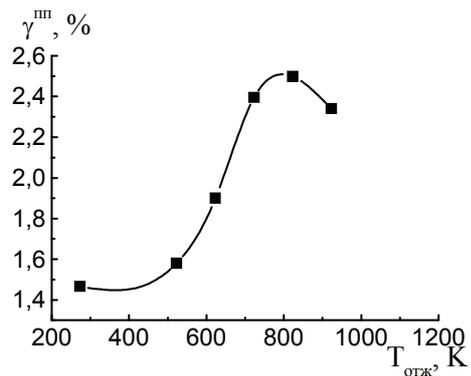
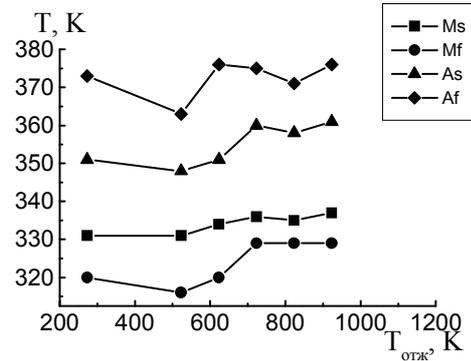


Рис. 3. Зависимость деформации, обусловленной пластичностью прямого мартенситного превращения, от приложенного напряжения до (1) и после (2) деформации растяжением на 8 %



а)



б)

Рис. 4. Зависимости максимальной деформации, накапливаемой при охлаждении под напряжением $\tau = 20$ МПа, и температур превращения от температуры отжига

прута, но отличались по свойствам, поэтому имел место статистический разброс характеристических температур, которые были определены по результатам дифференциального термического анализа: $M_n = 332 \pm 3$ К, $M_k = 324 \pm 3$ К, $A_n = 352 \pm 3$ К, $A_k = 372 \pm 3$ К. Пластическую деформацию задавали при 620 К в следующей последовательности: нагрев, нагружение, разгрузка, охлаждение, после чего следовал термоцикл в свободном от напряжений состоянии. Остаточную пластическую деформацию измеряли при комнатной температуре. Затем тот же образец испытывали в режиме кручения, реализуя эффект пластичности превращения при $\tau = 20$ и памяти формы при $\tau = 0$ МПа.

На рис. 1 представлены графики зависимости деформации пластичности превращения при кручении γ^{pl} от предварительной пластической деформации растяжением ϵ^{pl} . Эта зависимость имеет максимум при $\epsilon^{pl} = 2 \div 3$ %. Дальнейший рост пластической деформации приводит к падению γ^{pl} .

Возможно, что рост деформации пластичности превращения при небольших значениях ϵ^{pl} связан с формированием полей внутренних напряжений (с доминирующей компонентой осевого напряжения σ), которые благоприятствуют росту γ^{pl} . Однако дальнейший рост пластической деформации приводит к «засорению» материала дефектами. Этот процесс становится преобладающим и снижает роль внешней нагрузки как ориентирующего фактора приложенных напряжений. На графике видно падение деформации γ^{pl} в 1,5 ÷ 2 раза с ростом предварительной пластической деформации от

2 до 9 %. На рис. 2 представлены суммарные для 4-х образцов зависимости ΔM_n , ΔM_k от ε^{pl} . Как видно, имеет место снижение этих температур с ростом предварительной пластической деформации, вызванное, очевидно, увеличением количества дефектов и соответственным ростом внутренних напряжений в материале. Подобное же поведение характерно и для температур обратного мартенситного перехода.

На одном из образцов порядок задания пластической деформации оставался тот же, но в режиме кручения изучали зависимость деформации пластичности превращения γ^{pl} от приложенного касательного напряжения (рис. 3). Как видно на рисунке, эта зависимость линейна до $\tau = 50$ МПа. Известны наблюдения как нелинейной, начиная с $\tau = 50$ МПа [6], так и линейной зависимости при напряжении до 150 МПа [7]. Отметим, что качественно вид кривой сохраняется и для деформированного образца, однако происходит снижение общего уровня накапливаемой деформации γ^{pl} .

Как видно на рис. 2, 3, пластическая деформация частично подавляет способность материала накапливать деформацию γ^{pl} и приводит к снижению температур превращения.

Насколько возможно восстановить эти свойства, должен был ответить эксперимент по изохронному отжигу. Образец предварительно продеформировали растяжением на 8 %. Эффекты пластичности превращения и памяти формы исследовали в режиме кручения. Температуру отжига варьировали от 523 до 923 К, время выдержки было постоянным – 20 минут. В результате отжига свойства материала частично восстановились. Как видно из рис. 4а, наиболее интенсивно этот процесс происходит при температуре 823 К. Дальнейшее повышение $T_{отж}$ приводит к снижению деформации пластичности превращения. На рис. 4б представлена кинетика изменения характеристических температур превращения в зависимости от температуры отжига. Практически полное восстановление свойств

происходит после отжига при 723 К. По некоторым данным [8], именно в области этой температуры в TiNi происходят процессы рекристаллизации, которые, как известно, сопровождаются резким снижением плотности дефектов и полным устранением последствий пластического деформирования. По-видимому, это и наблюдается в данном эксперименте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гюнтер В.Э., Малеткина Т.Ю., Клопотов А.А. Влияние деформации и внешней нагрузки на характеристики мартенситных превращений и эффекты памяти формы в сплавах на основе никелида титана // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39. № 2. С. 175-181.
2. Гюнтер В.Э., Малеткина Т.Ю. Влияние деформации на характеристики эффекта памяти формы в сплавах на основе TiNi // Исследование, разработка и применение сплавов с памятью формы в медицине. 1994. Вып. 1. С. 1-6.
3. Kovneristy Yu.K., Fedorov S.G., Matlakhova L.A. The influence of plastic deformation on the structure, shape memory effect and other properties of TiNi alloy // Proceeding of the International Symposium on Shape Memory Alloys. September 6-9. 1986. Guilin (China), 1986. P. 175-180.
4. Волков А.Е., Иночкина И.В. Влияние пластической деформации на характеристики памяти формы никелида титана // Матер. XXXV семинара «Актуальные проблемы прочности». Ч. 2. Псков, 13-18 сент. 1999. Псков, 1999. С. 619-622.
5. Ермолаев В.А., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Шиманский С.Р., Помыткин В.П. Влияние деформации и отжига на эффекты памяти формы и демпфирование в сплаве TiNiCu // Изв. вузов. Цвет. мет. 1985. № 1. С. 108-112.
6. Лихачев В.А., Шиманский С.Р. Исследование механических свойств и реактивных напряжений в сплаве ТН-1К // Деп. рук. Ред. журн. Вест. ЛГУ. Мат., мех., астроном. Л., 1984. Депонирована в ВИНТИ 10.12.84. № 7866.
7. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 216 с.
8. Saburi T. Ti-Ni shape memory alloys // Shape Memory Materials / Ed. by K. Otsuka, C.M. Wayman. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. P. 49-96.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 99-01-00987).

УДК 548.571

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ ДИСЛОКАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА – ЛЕ ШАТЕЛЬЕ

© М.А. Лебедин, Л.Р. Дунин-Барковский

Россия, Черногловка, Институт физики твердого тела РАН

Lebyodkin M.A., Dunin-Barkovsky L.R. Investigation of collective dislocation processes under conditions of the Portevin – Le Chatelier effect. The statistical and dynamic features of the Portevin – Le Chatelier plastic instabilities in Al-Mg alloys are investigated experimentally and by computer simulation. The data obtained demonstrate that spatial coupling in the homogeneously deformed crystal stems from plastic strain incompatibilities. Consequently, the flow stress is one important parameter governing the complex spatio-temporal behaviour of the phenomenon investigated.

В последнее время явление пластической неустойчивости интенсивно исследуется с точки зрения самоорганизации в нелинейных системах вдали от равновесия. Эффект Портевена – Ле Шателье (ПЛШ), наблюдаемый в сплавах, характеризуется сложным поведени-

ем во времени (скачкообразные кривые деформации) и пространстве (возникновение неподвижных или расширяющихся зон локализации деформации). На примере этого эффекта ясно, что выяснение природы пространственной связи в неоднородно деформируе-