

БОЛЬШИЕ ОБРАТИМЫЕ НЕУПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА: УСЛОВИЯ ПРОЯВЛЕНИЯ И МЕХАНИЗМЫ РЕАЛИЗАЦИИ**Жапова Д.Ю., Тимкин В.Н., Лотков А.И.***Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия,
dorzh@ispms.tsc.ru*

В сплавах на основе TiNi наиболее важным функциональным свойством является способность накапливать и возвращать большие по величине неупругие деформации: это известные эффекты памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичности. Эти эффекты обусловлены реализацией термоупругих мартенситных превращений (МП) $B2 \leftrightarrow R$, $B2 \leftrightarrow B19'$ и $B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$, где $B2$ – высокотемпературная фаза, упорядоченная по типу CsCl, R и $B19'$ – мартенситные фазы с ромбоэдрической и моноклинной структурами, соответственно. При отсутствии внешних и ярко выраженных внутренних напряжений, в силу статистического характера зарождения и роста кристаллов мартенситной фазы, вероятность реализации разных вариантов сдвига в кристаллической решётке высокотемпературной $B2$ фазе одинакова. В этом случае вследствие самоаккомодационного процесса формирования мартенситных доменов макроскопической деформации образцов не наблюдается (исключая объёмный эффект превращения). Согласно расчётам в [1], в случае растяжения монокристаллов TiNi и $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$ (ат.%) с ориентацией $[123]$ величина максимально возможной обратимой деформации при МП $B2 \leftrightarrow B19'$ составляет 10.5% и 9.9%, соответственно.

В [2] показано, что в закаленных двойных сплавах на основе TiNi из области температур гомогенности $B2$ фазы с содержанием никеля от 49.7 до 51.1 ат.% наблюдается только МП $B2 \leftrightarrow B19'$. В [2] были проведены рентгенографические исследования параметров решетки в полученных сплавах: рассчитано, что максимальная неупругая деформация решетки уменьшается от 11.8% до 10.4% в монокристаллах и от 10.9% до 9.7% в поликристаллических образцах при изменении концентрации атомов никеля от 49.7% до 51.1%

Вместе с тем, в недавних работах [3-6] была экспериментально обнаружена возможность наблюдения неупругой деформации, превышающей кристаллографический ресурс мартенситной деформации (КРМД), характерный для двойных сплавов на основе никелида титана. Так, в работах [3] показано, что при деформировании изгибом образцов сплава $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ (ат.%) ЭПФ достигается величина, равная 14.5%. Авторы работ [3-5] связывают формирование упрочнённой нанокристаллической, субмикрокристаллической и микрокристаллической структуры после аморфизации при прокатке при комнатной температуре и последующего рекристаллизационного отжига в течение 1 часа при температурах 523+623 К с наблюдением больших величин неупругих деформаций: 14.8% [3], 17.9% [4] и 17.8% [5]. При увеличении размера рекристаллизованных при 973К зёрен до 9 мкм в образцах при испытаниях изгибом наблюдали снижение величины полной обратимой деформации до 7,9%. Отметим, что пластическая деформация при этом составляла около половины от общей ($\epsilon=15,7\%$) заданной образцам деформации [4].

В [6] были выполнены исследования накопления и возврата суммарной неупругой деформации (ЭПФ и сверхэластичности) на образцах сплава $Ti_{49.1}Ni_{50.9}$ (ат.%) с нанокристаллической структурой (средний размер зерна ~86 нм) при кручении и изгибе образцов в циклах «нагружение-разгрузка» с последующим нагревом разгруженных образцов через интервал обратных МП. Обнаружено, что при циклическом изгибе образцов с увеличивающейся деформацией при каждом последующем цикле можно сформировать неупругую деформацию, величина которой достигает 12%. При этом максимальная заданная величина общей деформации составляла 20.2%. А в случае, когда образцам сразу задавали общую деформацию, равную 20.2%, величина суммарной неупругой деформации достигала $\epsilon=16,4\%$.

В экспериментах методом кручения образцов в [6] на образцах сплава того же состава наблюдали ещё более высокие неупругие деформации, достигающие 25%. Для сопоставления деформации кручением с деформацией изгибом был использован

алгоритм пересчёта деформации кручением в деформацию растяжением (по Мизесу) [6]. Оказалось, что суммарная неупругая деформация образцов растяжением составляет 18,0% (кристаллографический ресурс деформации кристаллической решётки при МП в этом сплаве составляет 9,7% [2]).

В [7] были выполнены исследования по заданию и возврату неупругих деформаций в крупнозернистых и микроструктурных образцах сплава $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$ (ат.%) после тёплой (723K) прокатки в ручьевых вальцах. Было установлено, что максимальная величина суммарной обратимой деформации образцов кручением достигает 19.1%. С использованием алгоритма пересчета деформации образцов кручением в деформацию растяжением показано, что независимо от среднего размера зерна величина суммарной обратимой деформации образцов растяжением составляет 16.0%. Такая величина обратимой деформации достигается при условии задания общей деформации образцам кручением от 25% до 40%; при этом величина пластической деформации составляет 8÷20% (соответствующие пересчитанные деформации кручением в деформации растяжением составляли: общая заданная деформация от 16% до 28%, пластическая деформация – 5÷12%).

В [8] наблюдали суммарную неупругую деформацию кручением от 15.9% до 18.3% как в крупнозернистых, так и в субмикроструктурных образцах сплава $Ti_{49.8}Ni_{50.2}$ (ат.%). Так как образцы сплава $Ti_{49.8}Ni_{50.2}$ (ат.%) обладают большей пластичностью, чем образцы сплава $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$ (ат.%), то интервал заданных деформаций в цикле и пластических деформаций, соответствующих максимальной величине обратимой деформации, находится в более широких пределах. И составляет 30÷48 % общей заданной образцам деформации кручением и 10÷29% пластической деформации (пересчитанная деформация кручением в деформацию растяжением: общая деформация – 20÷35%, пластическая деформация – 6÷19%).

Отметим, что в [7, 8] наиболее высокие значения неупругой деформации наблюдали в крупнозернистых образцах с развитой дислокационной структурой и после формирования измельченной микроструктурной [7] и субмикроструктурной [8] структуры. На промежуточных этапах деформирования, когда в образцах двойных сплавов на основе TiNi с содержанием никеля 50.2 и 50.8 ат.% формируется измельченная зёрненно-субзёрненная структура, величина суммарной неупругой деформации снижается на 2-3% (при деформации образцов кручением). После формирования измельченной зёрненной структуры с развитыми большеугловыми границами, величина суммарной неупругой деформации возвращается к значениям, наблюдаемым в исходных образцах, и даже превышает их [7, 8].

Таким образом, можно заключить, что превышение кристаллографического ресурса мартенситной деформации наблюдается как в наноструктурных, субмикроструктурных и микроструктурных образцах, так и в крупнозернистых образцах двойных сплавов на основе TiNi и величина этого превышения зависит не от размера зёрен или состава сплава, а от степени упрочнения образцов (вследствие измельчения зёрненной структуры или формирования развитой дислокационной структуры в крупнозернистых образцах).

В циклах изотермического нагружения и разгрузки при 295K образцов двойных сплавов на основе TiNi с содержанием атомов Ni 50.2, 50.8 и 50.9 (ат.%) и последующего их нагрева через температурный интервал МП максимальная величина суммарной возвращаемой неупругой деформации (ЭПФ и сверхэластичность), заданной образцам кручением, составляет ~19%, а при растяжении и/или изгибе ~16%. Эта максимальная величина суммарной возвращаемой деформации достигается при общей заданной деформации кручением от 24 до 40 %, включающей 8-20 % пластической деформации (при пересчете деформации кручением в деформацию растяжением 16-28% и 4-12%, соответственно).

Работа поддержана Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 года, направление III.23.2.

Список литературы:

1. Ильин, А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах / А.А. Ильин – М.: Наука, 1994. 304 с.
2. Прокошкин С.Д., Коротцкий А.В., Браиловский В., Инаекян К.Э., Дубинский С.М. Кристаллическая решетка мартенсита и ресурс обратимой деформации термически и термомеханически обработанных сплавов Ti-Ni с памятью формы // Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т.112. – №2. – С.180-198.
3. Рыклина Е.П., Прокошкин С.Д., Чернавина А.А. Особенности реализации аномально высоких эффектов памяти формы в термомеханически обработанных сплавах Ti-Ni // Материаловедение. – 2012. – №11. – С.23-30.
4. Рыклина Е.П., Прокошкин С.Д., Крейцберг А.Ю. Возможности достижения предельно высоких эффектов памяти формы в сплаве Ti-50.0 ат.% Ni в различных структурных состояниях аустенита // Известия РАН. Серия физическая. – 2013. – Т.77. – №11. – С.1644-1652.
5. Рыклина Е.П., Прокошкин С.Д., Крейцберг А.Ю. Возможности достижения аномально высоких параметров ЭПФ сплава Ti-50.7 ат.% Ni в различных структурных состояниях аустенита // Известия РАН. Серия физическая. – 2013. – Т.77. – №11. – С.1653-1663.
6. Grishkov V.N., Lotkov A.I., Baturin A.A., Timkin V.N., Zhapova D.Yu. Comparative analysis of inelastic strain recovery and plastic deformation in a $Ti_{49.1}Ni_{50.9}$ (at.%) alloy under torsion and bending // AIP Conference Proceedings. – 2015. V.1683. – P.020067-1–020067-5. doi: 10.1063/1.4932757.
7. Lotkov A., Zhapova D., Grishkov V., Cherniavsky A. and Timkin V. Effect of warm rolling on the martensite transformation temperatures, shape memory effect, and superelasticity in $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$ (at.%) alloy // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V.1783. – P. 020137-1-020137-4. doi: 10.1063/1.4966430
8. Lotkov A., Grishkov V., Zhapova D., Timkin V., Baturin A., Kashin O. Superelasticity and shape memory effect after warm abc-pressing of TiNi-based alloy // Materials Today: Proceedings. – 2017. – Vol.4. – P.4814-4818.