ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/275

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТОК НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И НЕУПРУГОСТЬ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА Ti-50,9 ат. % Ni

Полетика Т.М., Гирсова Н.В., Гирсова С.Л., Гришков В.Н., Лотков А.И.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Нанокристаллические (НК) богатые Ni двойные сплавы TiNi, подверженные старению с выпадением дисперсных частиц метастабильной фазы Ti_3Ni_4 , в последнее время привлекают большое внимание благодаря повышенным функциональным свойствам [1]. В то же время недостаточно изученными остаются закономерности образования и роста когерентных частиц Ti_3Ni_4 в условиях наноструктурного состояния материала, а также их влияния на эволюцию микроструктуры и мартенситные превращения. В настоящей работе представлены результаты исследований морфологии и распределения частиц Ti_3Ni_4 в НК сплаве TiNi после термообработок. Изучена взаимосвязь эволюции системы частиц с дислокационными превращениями, реализуемыми в процессе отжигов НК сплава TiNi, а также с мартенситными превращениями и особенностями неупругого поведения.

Для исследований использовали образцы сплава Ti-50,9 ат. % Ni, вырезанные из трубок с внешним диаметром 1,63 мм. В исходном состоянии в B2 фазе сплав Ti-50,9 ат. % Ni имел неоднородную зеренно/субзеренную структуру, характерную для НК материалов после большой деформации прокаткой [2]. Структура включает бездислокационные нанозерна и субмикронных и микронных размеров области слабаразориентированных (до 2°) субзерен, занятых преимущественно сетчатой дислокационной структурой. Средний размер зерен/субзерен составлял 70 нм. Образцы отжигали при температурах $300^\circ\text{C} \div 500^\circ\text{C}$ с выдержкой 1 час. Характеристические температуры мартенситных превращений определяли по температурной зависимости электросопротивления. Установлено, что как в исходном материале и после отжигов наблюдаются ступенчатые мартенситные превращения $B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$ (Таблица). Структурные исследования проводили методом просвечивающей электронной микроскопии ПЭМ) на микроскопе JEM 2100 (JEOL) в ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН. Диаграммы нагружения-разгрузки при растяжении образцов получали при комнатной температуре со скоростью $4 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ на испытательной машине

Таблица 1. Температуры мартенситных превращений и характеристик неупругости

Т отжига	$T_R, ^\circ\text{C}$	$M_s, ^\circ\text{C}$	$M_f, ^\circ\text{C}$	$A_s, ^\circ\text{C}$	$A_f, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{кр}, \text{МПа}$	$\varepsilon_c, \%$	$\varepsilon_{ост}, \%$
исходный	7	-67	-130	-35	-14	440	12	0,1
300 $^\circ\text{C}$	34	-42	-152	-6	3	380	8,5	0,3
400 $^\circ\text{C}$	39	-29	-78	6	26	260	6,5	6,5
500 $^\circ\text{C}$	15	-29	-69	-1	10	270	8,7	5,5

Установлено, что низкотемпературное старение при 300°C развивается неоднородно по объему НК материала. В субзеренной структуре происходит образование предвыделений и высокодисперсных когерентных частиц Ti_3Ni_4 сферической формы размером 3-5 нм, характерные рефлексы типа $1/7 \langle 321 \rangle_{B2}$ от которых присутствуют на электронограммах. В нанозернах обнаружить эффектов старения не удалось. Частицы Ti_3Ni_4 выделяются преимущественно на дислокациях, что способствует их блокировке при деформации и эффективному упрочнению B2-аустенита. Сплав после отжига при 300°C демонстрирует сверхэластичное поведение. Кривая нагружения-разгрузки имеет «флагообразную» форму с уровнем критических напряжений 380 МПа, широким (до 200 МПа) гистерезисом и остаточной деформацией менее 0,3%. Структурная неоднородность исследуемого НК материала, обуславливает развитие под нагрузкой как $R \leftrightarrow B19'$, так и $B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$ мартенситных превращений, величина суммарной неупругой деформации составляет 8,5%.

Процессы возврата и полигонизации субструктуры при 400°C сопровождаются уходом дислокаций в субграницы, которые сохраняют «неравновесный» характер, что характеризует «размытие» ЭМ изображения малоугловых границ [3]. Одновременно в субструктуре

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

интенсивно реализуется старение. Установлено, что когерентные выделения Ti_3Ni_4 размером $5 \div 20$ нм имеют близкую к линзовидной форму. Частицы зарождаются в области дислокационных субграниц и образуют строчки, либо выстроены в ряды, свидетельствующие об автокаталитическом характере зарождения [4]. В нанозернах выделения Ti_3Ni_4 и R-фаза не обнаружены. После отжига при $400^\circ C$ исследуемый сплав находится в двухфазном B2+R состоянии. В субструктуре преобладает механизм зарождения R-мартенсита от межфазных границ частица/матрица, дислокаций и дислокационных границ. При этом для формирующейся R-фазы характерны несовершенная морфология, диспергирование, некристаллографичность. Нагружение материала приводит к неоднородному по объему развитию $B2 \leftrightarrow R$, $R \leftrightarrow B19'$, $B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$ превращений. Деформация при $T < T_R$ не обеспечивает формовосстановление образцов при разгрузке. Кривая нагружения-разгрузки характеризуется снижением уровня критических и остаточной деформацией 5,5%.

Отжиг при $500^\circ C$ обеспечивает процесс рекристаллизации НК сплава TiNi. Механизмом рекристаллизации в субзеренной структуре является процесс коалесценции, который контролируется растворением Ti_3Ni_4 , закрепляющих субграницы [5]. Показано, что миграция малоугловых границ субзерен становится возможной после реализации в границах процесса возврата с формированием упорядоченных дислокационных сеток и растворения частиц Ti_3Ni_4 . Формируются свободные от дислокаций зерна с большеугловыми границами и размерами до 200 нм. Коагуляция некогерентных выделений Ti_3Ni_4 размером до 100 нм происходит на формирующихся равновесных границах и в стыках зерен/субзерен. Укрупнение частиц фазы Ti_3Ni_4 и рост зерен при рекристаллизации снижает эффективность упрочнения B2-аустенита. Реализуется последовательность мартенситных превращений $B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$. Кривая деформации демонстрирует остаточную деформацию 5,5%.

Обсуждаются механизмы взаимосвязи процессов эволюции дислокационной структуры и системы частиц Ti_3Ni_4 в процессе термообработок и их влияние на закономерности эволюции СЭ и ЭФП.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2018-2020 годы, 23.2.3

1. Elahinia M.H., Hashemi M., Tabesh M., Bhaduri S. // Prog. Mater. Sci. 2012. V. 57. P. 911–946.
2. Prokoshkin S., Brailovski V., Dubinskiy S., Inaekyan K, Kreitchberg A. // Shape Mem. Alloys. Shape Mem. and Superelasticity. 2016. V. 2. P. 12-17.
3. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. //Prog. Mater. Sci. 2000. V. 45. P. 103–189.
4. Khalil-Allafi J, Dlouhý A, Eggeler G. // Acta Mater. 2002. V. 50. P. 4255-4274.
5. Полетика Т.М., Гирсова С.Л., Лотков А.И., Круковский К.В. // Письма в ЖТФ, 2018, Т. 44. В. 24. С. 3-10