

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ

Пушин В.Г., Куранова Н.Н.

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия, E-mail: pushin@imp.uran.ru

Разработка перспективных конструкционных и функциональных материалов и прорывных технологий их создания с заданными физическими, механическими, химическими и эксплуатационными характеристиками является одной из важнейших приоритетных проблем современного материаловедения.

Как известно, сплавы с термоупругими мартенситными превращениями (ТМП) и обусловленными ими эффектами памяти формы (ЭПФ) обладают необычными и подчас уникальными физико-механическими свойствами, особенно в монокристаллическом состоянии. Но лишь бинарные поликристаллические сплавы на основе никелида титана с ЭПФ находят широкое практическое использование, и, прежде всего, в ответственных устройствах и изделиях для техники и медицины. Однако даже и эти сплавы в обычном поликристаллическом литом состоянии и после тех или иных традиционных термических (ТО) и термомеханических обработок (ТМО) далеко не всегда обеспечивают требуемые на практике эксплуатационные характеристики. Для сплавов на основе TiNi требуется повышение предела текучести в 1,5-2 раза при сохранении ЭПФ и пластичности, что особенно важно для повышения величины обратимого формоизменения. Исследования показывают, что ресурсы улучшения физико-механических свойств данных сплавов с ТМП традиционными технологиями в значительной степени исчерпаны. Существенным недостатком других цветных сплавов с ЭПФ является их хрупкость, что не позволяет обеспечить свойства, присущие их монокристаллам. Данное обстоятельство стимулирует разработку методов получения новых материалов с ЭПФ с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами, которые, на наш взгляд, могут быть обеспечены созданием в сплавах мелкозернистых (МЗ) и ультрамелкозернистых (УМЗ) состояний исходной аустенитной фазы.

В настоящей работе представлен обзор современного состояния и ключевых проблем, ограничивающих и сдерживающих разработку, ресурсные возможности и широкое практическое использование интеллектуальных сплавов с термоупругими мартенситными превращениями (ТМП). Анализируются присущие им необычные эффекты: ярко выраженные предмартенситные явления, размягчение упругих модулей и варибельность их анизотропии, уникальные эффекты памяти формы (ЭПФ), в зависимости от температуры, давления, магнитного поля, эффекты сверхупругости и деформации превращения под нагрузкой (при прямом превращении) и ее снятии (при обратном превращении).

Предложена классификация практически важных сплавов, обсуждаются термодинамика и кинетика ТМП, природа и структурные механизмы формирования предпереходных явлений и их роль в реализации ТМП. Анализируются принципы многокомпонентного легирования, особенности структуры, методы получения и физико-механические свойства сплавов, включая прочностные и, особенно, пластические характеристики. Приведены примеры фазовых диаграмм магнитных и мартенситных превращений в ряде практически важных бинарных и многокомпонентных сплавов, синтезированных по разным схемам.

Рассмотрено как метод эффективной модификации структурно-фазового состояния влияние сверхбыстрой закалки, пластической деформации и термических обработок на субструктуру и измельчение зерна сплавов (вплоть до аморфизации в ряде сплавов на основе никелида титана). Обнаружено деформационно индуцированное атомное разупорядочение с образованием нанокристаллической структуры и аморфизация, а также последующее восстановление дальнего порядка при низкотемпературном отжиге в условиях сохранения наноструктурного состояния аустенита и его свойств. На ряде примеров показано, что сплавы с ЭПФ в МЗ и УМЗ состоянии испытывают, как правило, практически те же ТМП, что и крупнозернистые прототипы. Установлено, что при этом по мере измельчения зерен могут быть

реализованы полипакетные, монопакетные двойникованные или монокристаллические структуры мартенсита в зависимости от размера зерен.

На рисунке 1 приведены типичная структура пакетного B19'-мартенсита и механические свойства сплавов квазибинарной системы $Ti_{50}Ni_{50-x}Cu_x$ ($x \leq 25$ ат.%), которые предварительно были подвергнуты специальной термо-механической обработке, обеспечившей за счет высокотемпературной рекристаллизации формирование в сплавах МЗ структуры (размер зерна менее 50 мкм) и, как следствие, повышение их пластичности по сравнению с исходным нерекристаллизованным состоянием.

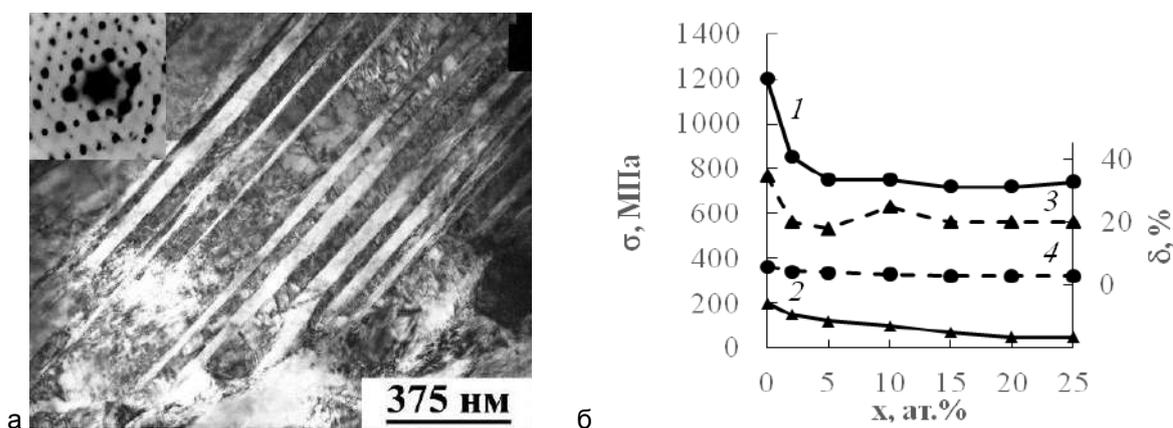


Рисунок 1 – Типичная микроструктура пакетного B19'-мартенсита (а) и механические свойства (б) МЗ сплавов $Ti_{50}Ni_{50-x}Cu_x$ ($x \leq 25$ ат.%) (кривая 1 – σ_B , кривая 2 – σ_M , кривая 3 – δ , кривая 4 – ϵ_{rev})

Прочные и пластичные объемные УМЗ сплавы с ЭПФ позволяет получить и метод мегапластической деформации равноканальным угловым прессованием (РКУП) по разным режимам (рис. 2). Для получения высокопрочных тонкомерных протяженных УМЗ лент со средне- и высокотемпературными ЭПФ на основе многокомпонентных, легированных Cu, Hf и Zr сплавов никелида титана эффективной является быстрая закалка спиннингованием струи расплава (БЗР).

По сравнению с МЗ прототипами (средний размер зерна менее 30-50 мкм в зависимости от методов синтеза) объемные (после РКУП) и длинномерные (после БЗР) УМЗ-сплавы никелида титана (рис. 3) имеют существенные преимущества: более высокие прочностные свойства в широком интервале температур, комплекс достаточно узкогистерезисных ЭПФ и сверхэластичности (СЭ). Все МЗ и УМЗ сплавы никелида титана отличает удовлетворительная пластичность (удлинение до 10-15 %, сужение до 50-70 %).

В ряде важных технически и социально значимых направлений нитинол необходим в виде прутков, полос, проволоки, ленты различных типоразмеров. Поэтому как способ дальнейшего улучшения механических характеристик УМЗ-сплавов TiNi с ЭПФ были разработаны сочетанные способы обработки, комбинирующие деформационно-термические воздействия, в том числе и формообразующие, например многопроходную холодную или теплую прокатку или волочение.

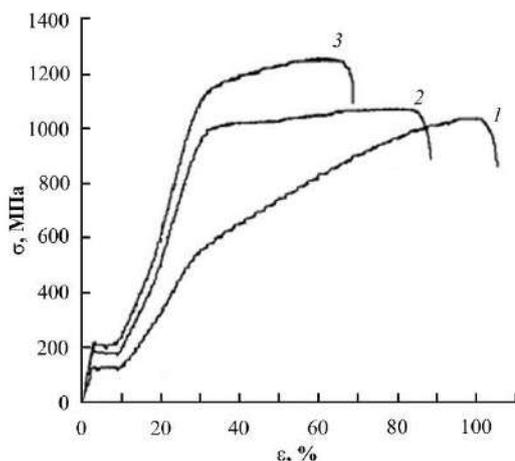


Рисунок 2 – Инженерные кривые напряжение-деформация при растяжении МЗ и УМЗ сплава TiNi (кривая 1 – закаленное МЗ состояние, 2, 3 – РКУП – состояние (2 – продольное направление, 3 – поперечное направление))

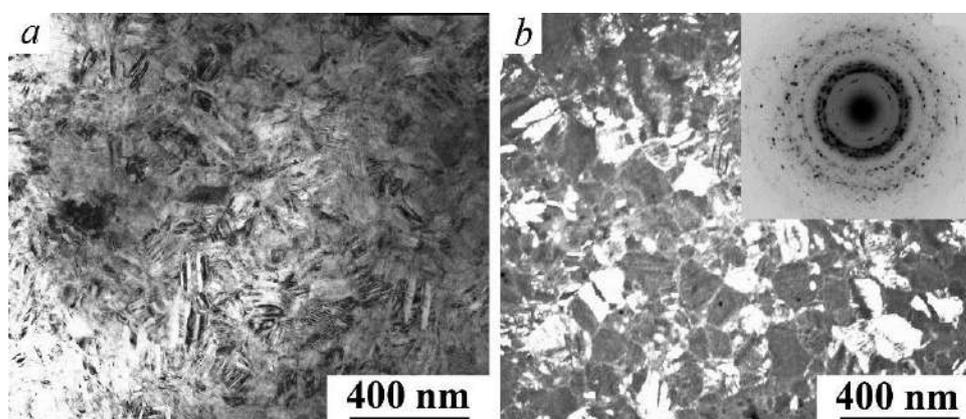


Рисунок 3 – Светло- (a) и темнопольные (b) ПЭМ изображения и микроэлектроннограмма (на вставке) сплава $Ni_{50}Ti_{32}Hf_{18}$ после отжига 823 K, 10 мин (a, b)

Подчеркивается важное влияние размера зерна на критические температуры ТМП и, как следствие, на обусловленные ими ЭПФ, а также прочность и, особенно, пластичность сплавов. Обращено внимание на природу хрупкости и критическую роль конкурирующих с ТМП фазовых превращений при синтезе сплавов (выплавке и последующем термическом или термомеханическом переделе слитков). Сделан вывод о возможности существенного пластифицирования интерметаллических сплавов с ТМП за счет оптимизации химического состава, мелкой и ультрамелкой зеренно-субзеренной структуры.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ №15-12-10014.