

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА TiNi С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Сергеева А. Е.¹, Дзидзигури Э. Л.², Угурчиев У. Х.^{1,3}, Столяров В. В.^{1,3}

¹Московский государственный индустриальный университет

²Московский институт стали и сплавов

³Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
ser-na@inbox.ru

Эффект памяти формы (ЭПФ) и его характеристики (обратимая деформация, реактивное напряжение) могут быть заметно повышены за счет измельчения структуры до нано- или субмикронного уровня [1]. Поэтому различные виды термомеханической обработки (ТМО), приводящие к структурному измельчению, могут служить потенциалом для практического применения. Одним из новых подходов в этом направлении является метод электропластической деформации (ЭПД) [2]. ЭПД рассматривается как возможный способ получения наноструктуры в объемных длинномерных изделиях тонкого сечения. Цель данной работы – исследование структурных особенностей и термической стабильности сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$, подвергнутого электропластической деформации, в крупнозернистом (КЗ) и ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях.

Материал и методика исследований

Материалом исследования служил сплав $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ застехиометрического состава в форме пластин размером $1,8 \times 6 \times 150 \text{ мм}^3$. Исследовались два структурных состояния: 1) УМЗ, полученное методом равноканального углового прессования (РКУП) и последующей термомеханической обработкой; 2) КЗ, полученное из первого состояния отжигом при 700°C 1 ч и последующим охлаждением в воде. Плоская прокатка проводилась при плотности однополярного импульсного тока $j = 84 \text{ А/мм}^2$, с постоянными значениями длительности импульса $80 \times 10^{-6} \text{ с}$ и скважности 12,5. Микроструктуру сплава исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре ДРОН-4 и на тонких фольгах в просвечивающем микроскопе JEM-100С.

Экспериментальные результаты

Данные рентгеноструктурного анализа (рис. 1а, б) показывают, что ЭПД приводит к сильному уширению и снижению интенсивности линий (101) и (112) аустенитной фазы В2. Это может свидетельствовать об измельчении структуры и ее одновременной частичной аморфизации. Отсутствие отражений от других плоскостей связано с наследованием кристаллографической текстуры от предварительной обработки и ее усилением в процессе ЭПД.

Микроструктурные исследования КЗ и УМЗ сплава TiNi показали, что в результате ЭПД ($\epsilon \approx 0,8$) в обоих состояниях формируется смешанная аморфно-нанокристаллическая структура с различным соотношением фаз (рис. 2), что согласуется с данными РСА, в частности, для КЗ состояния. Различная интенсивность первого кольца на электроннограммах может свидетельствовать о различной стадии аморфизации сплава или

степени его наноструктурирования. Качественно можно считать, что объемная доля аморфной фазы после ЭПД в УМЗ сплаве заметно больше, чем в КЗ состоянии.

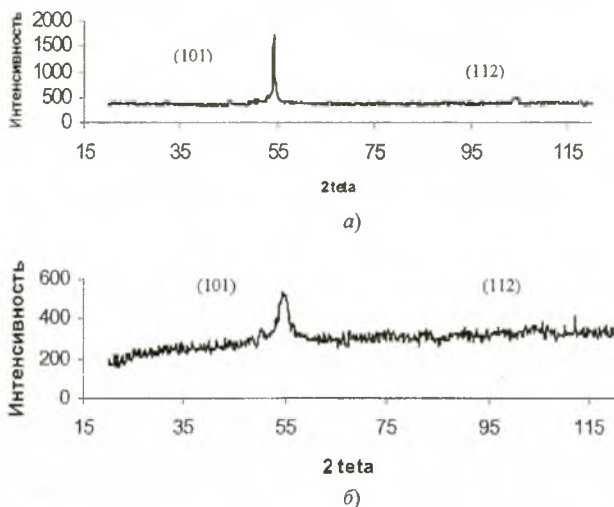


Рис.1. Дифрактограммы КЗ сплава TiNi до (а) и после ЭПД (б)

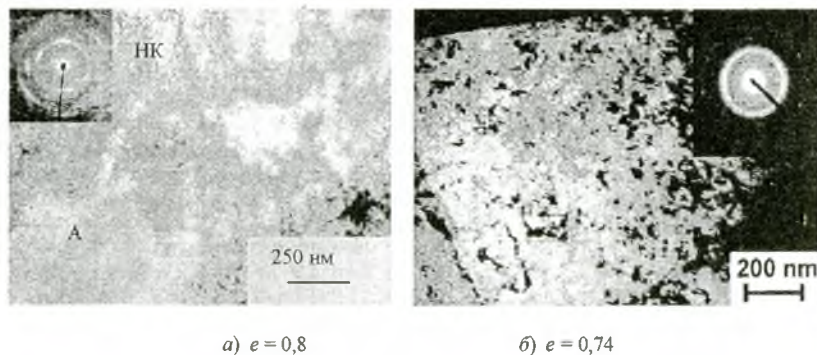


Рис. 2. Микроструктура КЗ (а) и УМЗ (б) сплава TiNi после ЭПД [3]

Последеформационный отжиг при температуре 400 °С в течение 1 часа приводит к частичной кристаллизации аморфных областей (рис.3) и слабому росту зерен, средний размер которых не превышает 100 нм. Сравнение микроструктур после отжига (рис.3а и 3б) позволяет заключить о возможности получения методом ЭПД близких наноструктурных состояний в исходных сплавах с КЗ и УМЗ структурой.

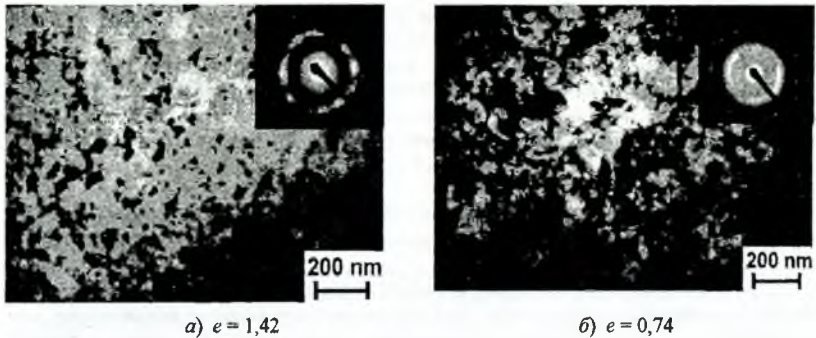


Рис. 3. Микроструктура КЗ (а) и УМЗ (б) сплава TiNi после ЭПД и отжига при 400 °С 1 час.

С целью определения термической стабильности полученных структур и влияния на них структурного состояния и степени деформации были проведены изохрональные отжиги с шагом 100°С и выдержкой 1 час для исходного КЗ и УМЗ состояния, подвергнутого прокатке с током и без тока.

Вид кривых приближенно соответствует классическим кривым зависимости микротвердости от температуры отжига для наклепанных материалов – S-образная кривая уменьшения микротвердости с увеличением температуры отжига, что объясняется процессами начала рекристаллизации и роста зерен.

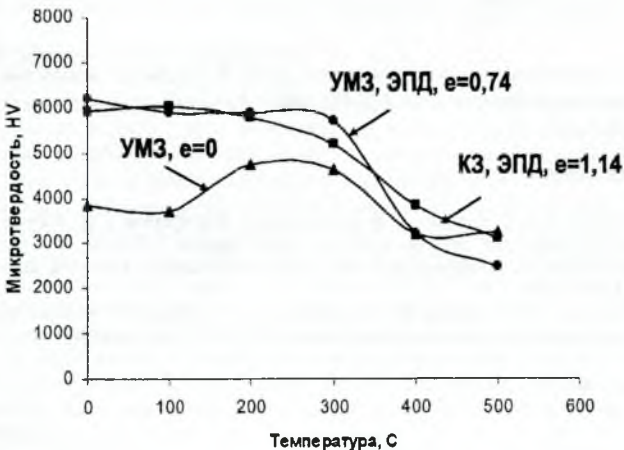


Рис. 4. Зависимость микротвердости исходного КЗ и УМЗ никелида титана, подвергнутого прокатке с током от температуры отжига.

Из графика видно, что для УМЗ образца без прокатки ($e = 0$) характерно заметное повышение твердости в интервале температур с 200 до 300 °С. Данный эффект связан с типичным для застехиометрических составов процессом старения, когда из пересыщенного твердого раствора никеля в TiNi в данном диапазоне температур начинают выделяться частицы вторичной фазы. Они являются препятствиями на пути движения дислокаций и тем самым обуславливают повышение твердости, что позволяет сделать предположение о прохождении процессов старения, в результате которых и повышается твердость. А для прокатанных образцов повышения твердости с увеличением температуры не наблюдается.

Можно сделать вывод, что ток подавляет процессы старения и повышает деформируемость образца при прохождении теплового эффекта, препятствует выделению частиц вторичной фазы.

При сравнении кривых с разной степенью деформации ($e = 0,74$ и $e = 1,14$) видно, что падение твердости для кривой с $e = 1,14$ проходит при меньших температурах, чем для кривой с $e = 0,74$, т.е. более деформационно упрочненной. Это свидетельствует о том, что начало процесса рекристаллизации сдвигается в область более низких температур.

Заключение

Показано, что ЭПД крупнозернистого сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ и последующий отжиг формируют в нем однородную нанокристаллическую структуру с размером зерен менее 50 нм. ЭПД УМЗ сплава способствует дополнительному измельчению структуры со средним размером зерен 10-20 нм и в некоторых случаях аморфизации. Оценка термической стабильности полученных структурных состояний показала, что наноструктура сохраняется при значительном нагреве (до 450 °С). Сделан вывод о том, что обработка импульсным током приводит к подавлению процессов старения в сплаве $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ при нагреве.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям, госконтракты 02.513.11.307 и 02.513.11.3137

Список литературы

1. В.В. Столяров, Е.А. Прокофьев, С.Д. Прокошкин, С.В. Добаткин и др. Структурные особенности, механические свойства и эффект памяти формы в сплавах TiNi, подвергнутых равноканальному угловому прессованию, ж. Физика металлов и металловедение, том 100, №6, с. 91-102, 2005.
2. В.В. Столяров, У.Х. Угурчиев, И.Б. Трубицына, С.Д. Прокошкин, Е.А. Прокофьев, Интенсивная электропластическая деформация сплава TiNi, ФТВД, 4, 16 (2006) 48-51.