

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ НИКЕЛЯ ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Царенко Ю.В.^{*}, Рубаник В.В.^{*}, Назарова А.А.^{**}, Мулюков Р.Р.^{**}, Назаров А.А.^{**}

^{*}Институт технической акустики НАН Беларуси, г.Витебск, Беларусь

^{**}Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г.Уфа, Россия
ita@vitebsk.by

Методы интенсивной пластической деформации (ИПД) широко применяются для получения в материалах ультрамелкозернистой (УМЗ) и нанокристаллической (НК) структуры. Такие материалы обладают рядом уникальных свойств, таких, как высокая прочность, твердость, износостойкость. Однако из-за высоких внутренних напряжений, источниками которых являются неравновесные границы зерен их структура является также сильно неравновесной. Поэтому материалы, подвергнутые ИПД, обычно теряют пластичность и являются неустойчивыми к температурному воздействию. Повысить пластичность и термостабильность можно путем отжига, но он сопровождается нежелательным ростом зерен. Одним из путей решения данной проблемы является поиск альтернативных способов воздействия на материал с целью уравновесить его структуру, при этом значительно не снизив эффект упрочнения, вызванный пластической деформацией. Перспективным методом в этом отношении является ультразвуковая обработка (УЗО).

Целью данной работы являлось исследование влияния УЗО на механические свойства образцов никеля, полученного равноканальным угловым прессованием (РКУП), и, на основании полученных результатов, приблизиться к пониманию механизмов воздействия ультразвука на структуру и свойства УМЗ и НК материалов, полученных деформационными методами.

Структура никеля, полученного в результате РКУП (рис. 1, а) является неравноосной, зерна вытянуты вдоль направления деформации, их средний размер в продольном сечении составляет 600 нм, а в поперечном – 175 нм. На картине микродифракции, снятой с площади 0,5 мкм², присутствует большое число рефлексов, расположенных по окружности и размытых в азимутальном направлении. Это свидетельствует о том, что в рассматриваемую область попало большое число сильно разориентированных зерен и о высоких внутренних напряжениях. Во внутренних объемах зерен можно наблюдать контуры экстинкции, подтверждающие наличие искажений решетки, а также небольшое число дефектов (линии выхода дислокаций). Границы зерен определяются достаточно четко. Наряду с вытянутыми зернами в структуре также встречаются участки с мелкими равноосными зернами размером порядка 100 нм. В целом данную структуру можно охарактеризовать как неравновесную.

В результате отжигов, проведенных после РКУП, была определена температура, при которой в деформированных образцах проходит первичная рекристаллизация, и структура состоит из равноосных зерен, укрупнившихся относительно деформированного состояния. Рост зерен в никеле проходит по так называемому аномальному механизму, при котором в мелкозернистой матрице вырастают отдельные крупные зерна. В нашем случае аномальный рост завершается до температуры отжига 350°C (рис. 1, б). Средний размер зерен при этой температуре составляет около 1,7 мкм. Внутренние объемы равноосных зерен практически свободны от дислокаций.

В результате ультразвуковой обработки образцов, проведенной после РКУП, структура никеля изменяется (рис. 1, в). Как и после РКУП, зерна вытянуты вдоль направления первоначальной деформации. Однако их средний размер в продольном сечении составляет около 500 нм, а в поперечном сечении остался тем же. Заметным также является увеличение внутризеренных дислокационных образований. Уменьшение продольного размера зерен можно объяснить образованием малоугловых дислокационных стенок внутри зерен,

то есть «дроблением» структуры в процессе УЗО. В то же время, на картине микрофракции, снятой с той же площади, что и для структуры, полученной РКУП, видно, что рефлексы уже не имеют азимутального размытия, что может свидетельствовать об отсутствии сильных искажений решетки, то есть о равновесных конфигурациях образовавшихся дислокационных стенок и скоплений.

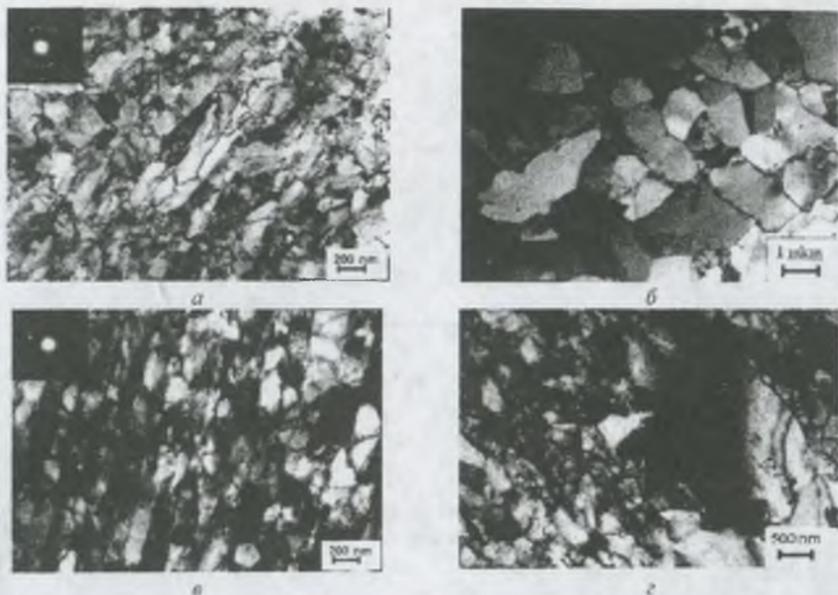


Рис. 1. Микроструктура никеля в состояниях: а – после РКУП (12 проходов), б – после РКУП и последующего отжига при температуре 350°C, в – после РКУП и УЗО с амплитудой напряжений 40 МПа, г – после РКУП, УЗО и отжига при 350°C

Последующий отжиг образцов при 350°C, проведенный после УЗО, приводит к образованию бимодальной структуры (рис. 1, г). При этой температуре происходит аномальный рост зерен: в мелкозернистой матрице со средними размерами зерен в продольном и поперечном сечениях 500 и 200 нм соответственно, отдельные зерна вырастают до 1.5 мкм. То есть, при данной температуре первичная рекристаллизация еще не завершена. По этим, хотя и неполным, данным можно судить о повышении термической стабильности никеля, подвергнутого РКУП.

Результаты механических испытаний образцов никеля после РКУП до и после УЗО (рис. 2, таблица 1) показали, что вместо ожидаемого роста пластичности благодаря УЗО, наблюдается обратный эффект – пластичность материала падает, хотя и имеет оптимальное значение, а предел текучести растет почти на 200 МПа по сравнению с деформированным состоянием. То есть, УЗО способствовала еще большему упрочнению никеля (известно, что ИПД также оказывает сильное упрочняющее воздействие на материалы). При этом УЗО практически не повлияла на значение предела прочности, что может свидетельствовать о поверхностном эффекте, т.е. упрочнении поверхностных слоев.

Установлено, что микротвердость на поверхности озвученных образцов выше, чем в образцах, не подвергнутых УЗО, а с увеличением расстояния от поверхности вглубь образца значения микротвердости практически одинаковы. Такой же эффект был целенаправленно получен в работе [2]. По-видимому, в нашем случае, ультразвуковое воздей-

ствию были подвергнуты в основном только поверхностные слои образцов, то есть имела место поверхностная УЗО. Причиной тому являлось то, что образцы никеля, не были закреплены в волноводной системе в процессе обработки, то есть не являются частью замкнутой волноводной системы.

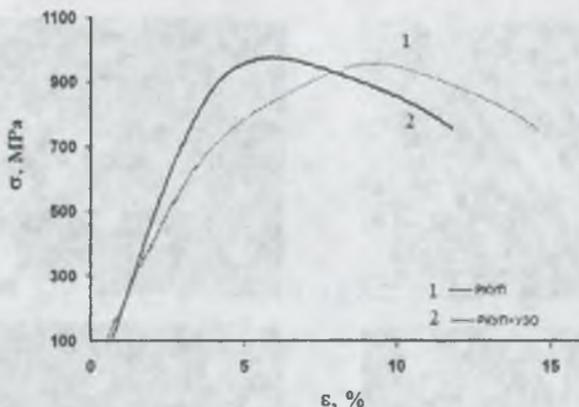


Рис. 2. Кривые растяжения никеля после РКУП и после РКУП и УЗО

Таблица 1. Результаты механических испытаний образцов никеля в состояниях после РКУП и последующей УЗО

Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_p , %	δ , %
РКУП	528	968	5.8	14.6
РКУП+УЗО	718	975	2.5	11.7

Таким образом, можно констатировать, что с помощью ультразвукового воздействия на поверхность объемных образцов никеля, полученных методом РКУП, можно существенно влиять на их микроструктуру, механические свойства, а также термическую стабильность.

Список литературы

1. Тяпунина Н.А., Бушуева Г.В., Силис М.И., Подсобляев Д.С., Лихущин Ю.Б., Богуненко В.Ю. Поперечное скольжение дислокации в ультразвуковом поле и влияние на этот процесс амплитуды и частоты ультразвука, ориентации образца и коэффициента динамической вязкости //ФТТ. 2003. Т.45. Вып.5. С.836-841.
2. Назарова А.А., Мулюков Р.Р., Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Назаров А.А. Влияние ультразвуковых колебаний на структуру и свойства ультрамелкозернистого никеля. //ФММ. т. 110 № 6, 2010. С.628-643.