

ЭВОЛЮЦИЯ НАНОСТРУКТУРЫ СПЛАВА Zr1Nb ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ПОЛЗУЧЕСТИ В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР 300-700 К

Соколенко В.И., Карасева Е.В., Мац А.В., Савчук Е.С., Фролов В.А.

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

ул.Академическая, 1, г.Харьков, 61108, Украина

E-mail: vsokol@kipt.kharkov.ua.

Для релаксации напряжений неравновесной структуры наноматериалов, полученных методами ИПД, обычно используют термообработки, эффективность которых, с точки зрения снятия внутренних напряжений, возрастает с увеличением температуры. Однако с повышением температуры отжига возрастает вероятность существенного укрупнения зерен, что может привести к потере преимуществ наноструктурного состояния [1].

Одним из перспективных методов улучшения свойств наноструктурных материалов является ультразвуковое воздействие (УЗВ). Ультразвуковая волна, проходя через материал, взаимодействует с дефектами разного типа и вызывает изменения в структуре, которые зависят от параметров ультразвука, главным образом, от его мощности. Варьируя параметры УЗВ, можно получать в материале структуру, имеющую необходимые свойства [2].

В работе исследовали сплав Zr1Nb в наноструктурном состоянии, полученном методом комбинированной прокатки при 77–300 К, величина истинной деформации $\varepsilon \sim 3,9$ (МО-1). С целью влияния на наноструктуру и свойства сплава Zr1Nb были проведены термообработки в области температур 500–870 К, $t=1$ ч (МТО) и УЗВ при $T=300$ К в режиме $f=20$ кГц, $\sigma_{\text{УЗВ}}=80$ МПа, $t=10$ мин (МО-2). УЗВ в таком режиме производит разупрочняющее действие на деформированный материал [2,3].

После различных воздействий образцы сплава Zr1Nb испытывали в условиях ползучести при $T=300$ –700 К. Анализ полученных результатов показывает, что отжиги в области температур 500–800 К (МТО-1, МТО-2, МТО-3, МТО-4) практически не приводят к изменению механических характеристик материала по сравнению с исходным состоянием (рис.1) и только после отжига при 870 К (МТО-5) наблюдается снижение прочностных характеристик и увеличение пластичности на ~ 20 %.

В результате ультразвуковой обработки (МО-2) прочностные характеристики материала снизились на ~ 15 % по сравнению с прокатанными образцами (рис.1, кр.5), при этом пластичность увеличилась на ~ 16 %.

Структурные исследования показали, что после комбинированной прокатки на величину истинной деформации $\varepsilon \sim 3,9$ в сплаве Zr1Nb формируется наноструктура с размером зерна ~ 60 нм. Плотность дислокаций в теле зерен составляет $\sim 3,4 \times 10^{10}$ см⁻². Основная масса дислокаций концентрируется у границ зерен и тройных стыков. Резкая неоднородность контраста на электронно-микроскопических изображениях свидетельствует о высоком уровне внутренних напряжений и наличии пиковых напряжений в стыках границ (рис.2а).

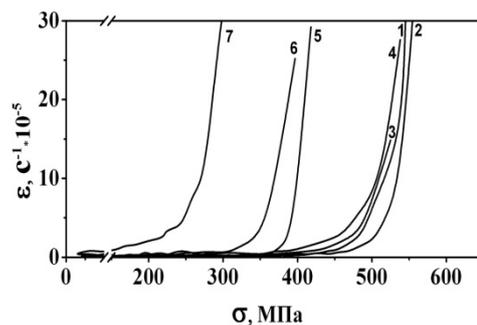


Рисунок 1- Зависимости скорости ползучести при $T=700$ К от приложенного напряжения после воздействий: 1 – МО-1; 2 – МТО-1 (500 К); 3 – МТО-2 (570 К); 4 – МТО-3 (720 К); 5 – МО-2; 6 – МТО-4 (800 К); 7 – МТО-5 (870 К).

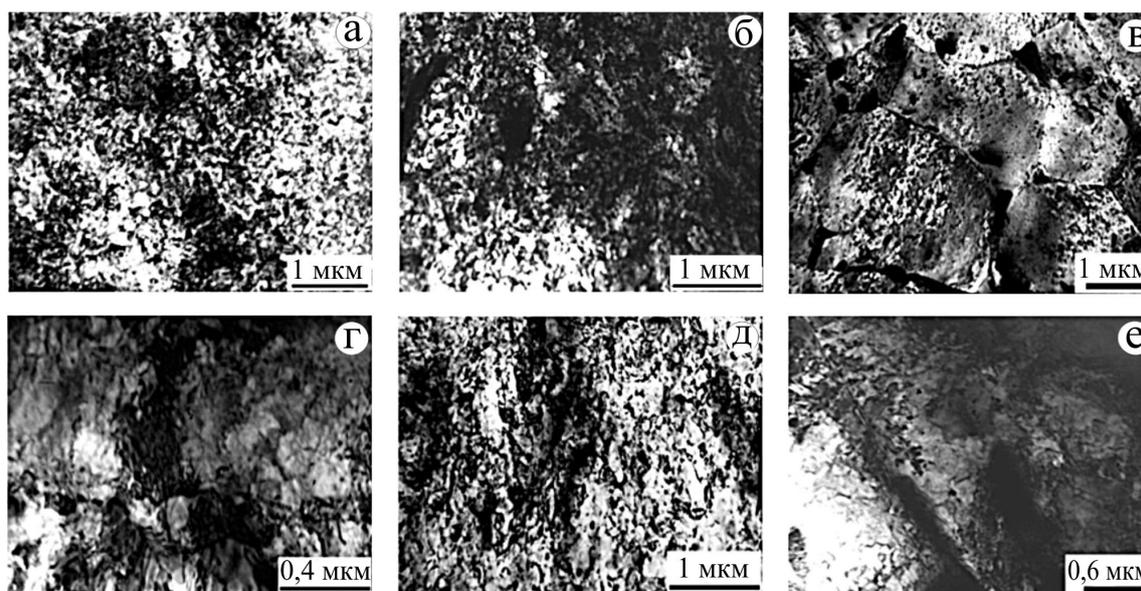


Рисунок 2- Структура сплава Zr1Nb после воздействий: а) МО-1; б) МТО-5; в) МО-2; г) МО-1+ ползучесть при 700 К($\sigma \approx 0,9\sigma_B$); д) МТО-5 + ползучесть при 700 К($\sigma \approx 0,9\sigma_B$); е) МО-2 + ползучесть при 700 К($\sigma \approx 0,9\sigma_R$).

Отжиги наноструктурного сплава Zr1Nb в интервале температур 500–570 К не вызывают заметного изменения характера структуры. Все ее особенности, свойственные наноструктурному состоянию сохраняются. После отжигов при 720–800 К наблюдаются структурные изменения, свидетельствующие о процессах возврата в границах зерен. После отжига при 870 К первичная рекристаллизация охватывает весь объем материала (рис.2б). Происходит формирование новых зерен размером до 1 мкм. Зерна имеют равноосную форму, при этом изменяется внутризеренная структура и структура их границ. Плотность дислокаций внутри зерен не превышает $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$.

Воздействие ультразвука с амплитудой касательных напряжений 80 МПа не изменяет морфологию исходной деформационной наноструктуры сплава Zr1Nb (рис.2в), но она становится более равновесной и однородной, возрастает количество зерен размером 60 нм, при этом средний размер зерен несколько увеличивается – до 67 нм (рис.3). Это связано с уменьшением числа фрагментов с малоугловыми границами по сравнению с деформированным состоянием. Границы зерен становятся более ровными и тонкими, углы в тройных стыках зерен приближаются к равновесным, уменьшается плотность дефектов внутри зерен.

Известно, что в процессе ультразвукового воздействия генерируется большое число вакансий, что стимулирует неконсервативное скольжение [2,3]. При этом диссипация энергии ультразвуковых колебаний происходит, в основном, на границах раздела, что приводит к формированию более равновесного состояния структуры границ, а также к локальным разогревам, снижению уровня локальных напряжений и активизации работы источников дислокаций. Действие всех вышеперечисленных факторов вызывает активное перемещение, взаимодействие и

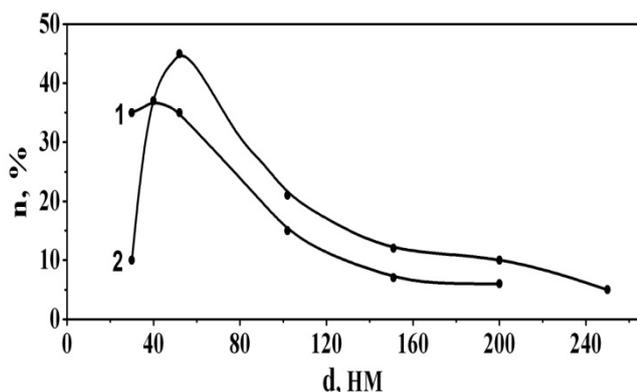


Рисунок 3- Спектры распределения по размерам зерен образцов сплава Zr1Nb после воздействий: 1 – МО-1; 2 – МО-2.

аннигиляцию дислокаций на границах зерен. Границы зерен становятся более равновесными, уменьшается уровень дальнедействующих напряжений, что приводит к снижению характеристик прочности сплава (рис.1, кр.5).

Проведенные структурные исследования показали, что наноструктура, созданная ИПД прокаткой, оказалась неустойчивой к последующему механико-термическому воздействию в условиях ползучести при 700 К (рис.2г). Большинство границ разрушилось и на их месте сформировались дислокационные границы полигонального типа. Размеры полигонов колеблются в пределах 50-150 нм. Трансформация исходной структуры происходит вследствие активизации процессов возврата за счет переползания дислокаций у границ зерен, а также процессов генерации и аннигиляции дислокаций на границах, что приводит к их рассыпанию [3,4].

Полностью рекристаллизованная после отжига при 870 К структура также оказалась неустойчивой в условиях ползучести при 700 К. Границы зерен разрушились, образовались скопления дислокаций с тенденцией к образованию ячеистой структуры (рис.2д).

Действие растягивающих напряжений в условиях ползучести при 700 К на сплав, обработанный ультразвуком, приводит к перестройке структуры и развитию динамической рекристаллизации (рис.2е). Средний размер рекристаллизованных зерен составляет 100 нм. Релаксация напряжений происходит вследствие перестройки структуры таким образом, что стадия полигонизации отсутствует. Развивается динамическая рекристаллизация и формируется новая рекристаллизационная наноструктура, более приспособленная к новым условиям деформирования и обеспечивающая высокие сопротивление ползучести и уровень прочностных характеристик с сохранением достаточного запаса пластичности, т.е. с более высоким уровнем термомеханической устойчивости.

Таким образом, термообработки наноструктурного сплава Zr1Nb, которые обеспечивают повышение пластичности, качественно изменяют структуру сплава, разрушая наноструктурное состояние, что приводит к снижению механических характеристик и степени устойчивости материала к последующей деформации в процессе ползучести при температуре 700 К.

Ультразвуковая обработка наноструктурного сплава Zr1Nb приводит к снижению уровня внутренних напряжений вследствие формирования более равновесной структуры границ без заметного роста зерен. В процессе последующей деформации в условиях ползучести при 700 К происходит релаксация внутренних напряжений вследствие динамической рекристаллизации и образование новой стабильной наноструктуры, что приводит к заметному повышению термомеханической устойчивости материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.З. Валиев, И.В. Александров Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. Москва: Логос. 2000, 271 с.
2. А.В. Мац, В.М. Нетесов, В.И. Соколенко Ультразвуковое воздействие на наноструктуру сплава Zr-2,5%Nb // ВАНТ. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». – 2011, v.74, №4, p.108 – 110.
3. V.I. Sokolenko, V.M. Gorbatenko, E.V. Karaseva, A.V. Mats, E.S. Savchuk, V.A.Frolov. Ultrasound influence on creep nanostructured Zr // Problems of atomic science and technology. Series: "Vacuum, Pure materials, Superconductors". 2016, V.101, №1, p.41-44.
4. E.V. Karaseva, A.V. Matz, V.I. Sokolenko, V.A. Frolov Effect of structural instability on creep of zirconium subjected to severe plastic deformation // Problems of atomic science and technology. Series: "Vacuum, Pure materials, Superconductors". 2014, V.89, №1, p.106-109.