

УДК 539.382 539.375

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА Zr-1Nb

© И.П. Мишин, Г.П. Грабовецкая, И.П. Чернов, Е.Н. Степанова, К.А. Просолов, Д.Ю. Булышко

Ключевые слова: субмикрокристаллическая структура; упрочнение; локализация деформации; разрушение. Изучено деформационное поведение и характер разрушения сплава Zr-1Nb в мелко- и субмикрокристаллическом состояниях в условиях растяжения при температуре 293 К. Установлено, что формирование субмикрокристаллической структуры приводит к повышению склонности сплава к локализации пластической деформации и изменению вида зависимости коэффициента деформационного упрочнения от деформации.

Эффективным способом повышения прочностных свойств металлических поликристаллов при невысоких гомологических температурах является измельчение зерна до субмикронных размеров (размер зерна менее 1 мкм). Большая протяженность и часто неравновесное состояние границ зерен, которые являются не только дополнительным сопротивлением сдвигу, но и играют определяющую роль в процессах образования концентраторов напряжения и зарождения различных видов деформационных дефектов, могут вносить существенные коррективы в развитие процессов деформации и разрушения в таких материалах. В работе проведены сравнительные исследования развития деформационных процессов и разрушения в сплаве Zr-1Nb в мелкозернистом и субмикрокристаллическом состояниях при температуре 293 К.

Исследуемый циркониевый сплав Zr-1Nb (марка Э110) в состоянии поставки имеет мелкозернистую неравноосную структуру с размером зерен 3–5 мкм в поперечном и 6–10 мкм в продольном сечениях. Методами рентгеноструктурного анализа было установлено, что в сплаве кроме основной фазы Zr_{α} присутствует некоторое количество фаз Nb(Zr), Zr_{β} и твердого раствора на основе фазы Zr_{α} . Вторичные фазы в виде частиц наблюдаются в объеме и на границах зерен. Размеры этих частиц изменяются от нескольких десятков нанометров до нескольких микрон. Субмикрокристаллическая структура в сплаве была получена методом прессования со сменой оси деформации с постепенным понижением температуры в интервале 873–573 К. Методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа установлено, что указанный метод позволяет сформировать в сплаве Zr-1Nb однофазную (твердый раствор на основе фазы Zr_{α} с ГПУ решеткой) субмикрокристаллическую структуру (рис. 1). На электроннограммах такой структуры, снятой с площади 1,2 мкм², наблюдается значительное количество рефлексов, равномерно расположенных по окружности, что свидетельствует о наличии в структуре большого числа элементов зеренно-субзеренной структуры в единице объема и существенной разориентации между ними. Основная масса элементов такой структуры имеет размеры (0,2–0,6) мкм, а средний размер элементов, опреде-

ленный по темнопольному изображению, составляет $0,42 \pm 0,12$ мкм.

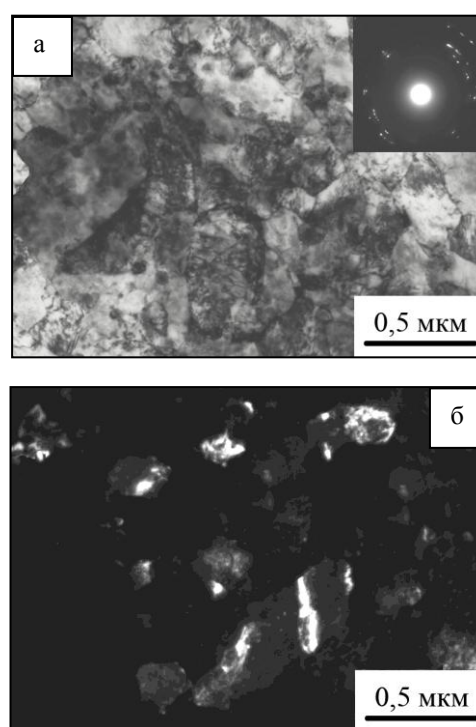


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структура субмикрокристаллического сплава Zr-1Nb: а – светлое поле; б – темное поле

Типичные кривые течения при растяжении сплава Zr-1Nb в мелкозернистом и субмикрокристаллическом состояниях при температуре 293 К, в координатах «истинное напряжение – истинная деформация» представлены на рис. 2а. Видно, что на кривой течения сплава Zr-1Nb в мелкозернистом состоянии длинная стадия деформационного упрочнения сменяется короткой стадией падающего напряжения. Для кривой течения сплава Zr-1Nb в субмикрокристаллическом состоянии характерно наличие короткой стадии деформационного

упрочнения, за которой следует длинная стадия падающего напряжения. Расчет зависимости коэффициента деформационного упрочнения ($\theta = d\sigma/d\varepsilon_{ист.}$) от истинной деформации для исследуемого сплава в обоих состояниях показал, что формирование субмикроструктуры в сплаве приводит не только к уменьшению длительности стадии деформационного упрочнения, но и изменяет ее характер (рис. 2б). На стадии деформационного упрочнения сплава в мелкозернистом состоянии наблюдаются четыре участка с различными коэффициентами деформационного упрочнения. В то же время на стадии деформационного упрочнения сплава в субмикроструктурном состоянии таких участков только два.

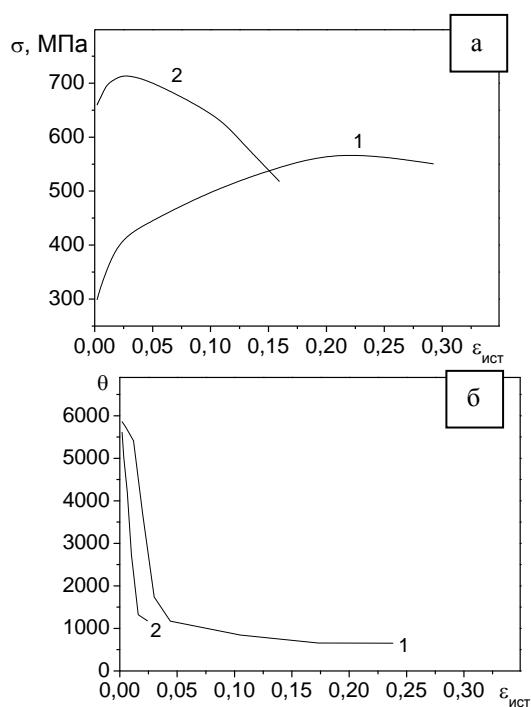


Рис. 2. Кривые растяжения (а) и зависимость коэффициента деформационного упрочнения от истинной деформации (б) сплава Zr-1Nb в мелкозернистом (1) и субмикроструктурном (2) состояниях

Таблица 1
Механические свойства мелкозернистого (МЗ) и субмикроструктурного (СМК) сплава Zr-1Nb при комнатной температуре

Материал	Микротвердость, ГПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Деформация до разрушения, %
МЗ Zr-1Nb	1,3	300	450	34
СМК Zr-1Nb	2,2	650	700	17

В табл. 1 представлены результаты испытаний на растяжение при комнатной температуре сплава Zr-1Nb в обоих состояниях. Из табл. 1 видно, что формирование субмикроструктуры приводит к существенному в 1,5–2 раза повышению прочностных характеристик сплава Zr-1Nb. При этом деформация до разрушения снижается в 2 раза.

При изучении распределения деформации по длине рабочей части образцов было установлено, что сплав в обоих состояниях в той или иной степени проявляет склонность к локализации деформации на макроуровне. В субмикроструктурном сплаве Zr-1Nb локализация деформации на макроуровне при комнатной температуре проявляется в развитии одной полосы локализованной деформации шириной $\sim 0,5$ мм, которая располагается под углом, близким к 60° , к оси растяжения. Появление макрополосы локализованной деформации на кривой течения соответствует началу стадии падающего напряжения. Развитие одной или двух макрополосы локализованной деформации является типичным для субмикроструктурных металлических материалов, полученных с использованием методов интенсивной пластической деформации. Разрушение образцов субмикроструктурного сплава происходит отрывом вдоль макрополосы локализованной деформации. В мелкозернистом сплаве Zr-1Nb локализация деформации на макроуровне происходит путем образования шейки, а разрушение – отрывом вдоль плоскости практически перпендикулярной направлению нагрузки.

Исследование фрактограмм разрушения показало, что поверхность разрушения сплава Zr-1Nb в мелкозернистом и субмикроструктурном состояниях имеет вид вязкого чашечного излома. Однако размер чашек сплава Zr-1Nb в мелкозернистом состоянии существенно больше по сравнению с субмикроструктурным состоянием. Общей характерной особенностью поверхностей разрушения мелкозернистого и субмикроструктурного сплава Zr-1Nb является наличие пор. Плотность пор на поверхности разрушения сплава увеличивается, а их размер уменьшается с уменьшением среднего размера элементов зерно-субзерненной структуры.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-31027_мол_а).

Поступила в редакцию 10 апреля 2013 г.

Mishin I.P., Grabovetskaya G.P., Chernov I.P., Stepanova E.N., Prosolov K.A., Bulyanko D.Y. DEFORMATION BEHAVIOR AND DESTRUCTION OF SUBMICROCRYSTALLINE ALLOY Zr-1Nb

Deformation behavior and character of destruction in tension at the temperature 293 K of small and submicrocrystalline alloy Zr-1Nb are studied. It is established that the formation of a submicrocrystalline structure increases the localization of plastic deformation of the alloy and change the form of the dependence of the strain hardening on the stress-strain dependence.

Key words: submicrocrystalline structure; strengthening; localization of deformation; fracture.