

Раздел четвертый

ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВНЕШНИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

УДК 621.789

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА НАНОСТРУКТУРУ СПЛАВА Zr-2,5%Nb

А.В. Мац, В.М. Нетесов, В.И. Соколенко

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина, E-mail: vsokol@kipt.kharkov.ua*

Исследовано влияние ультразвукового воздействия на наноструктуру деформационного происхождения в сплаве Zr-2,5%Nb. Наноструктурное состояние было получено путем комбинированной прокатки при 300 и 100 К на 96 %. С помощью электронной микроскопии определены плотность дислокаций в теле нанозерен, объемная концентрация граничной фазы, оценен уровень напряжений II рода, а также изменение этих характеристик в результате наложения ультразвуковых колебаний с амплитудой напряжений 85 и 200 МПа. Наблюдаемые эффекты связываются с микросдвиговой релаксацией в области концентраторов напряжений при относительно малых амплитудах УЗ-колебаний и разрушением исходной наноструктуры и формированием новой, более равновесной, в результате интенсификации взаимодействия полей внутренних напряжений при больших амплитудах. Отмечено, что ультразвуковая деформация наноструктуры приводит, в итоге, к реализации процессов динамического возврата с сохранением наноструктурной морфологии. При этом происходит снижение уровня и выравнивание спектра внутренних напряжений, а также повышение однородности структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования влияния ультразвукового (УЗ) облучения на структуру и свойства кристаллических материалов, несмотря на отсутствие единой теории взаимодействия ультразвука с кристаллической решеткой, основывались на представлениях о макро- и микропластическом течении, инициируемом осциллирующим полем напряжением [1-3]. Эффекты упрочнения или разупрочнения связывались с процессами трансформации дефектной структуры в результате перераспределения, генерирования и аннигиляции линейных и точечных дефектов, протекающими с различной интенсивностью в конкретных структурных элементах. Такими структурными элементами пластического течения могут быть зерна, фрагменты, ячейки, приграничные (аккомодационные) зоны, собственно границы различного характера, т.е. как кристаллическая, так и граничная фаза материала. Таким образом, для углубления представлений о процессах и механизмах структурообразования при УЗ-воздействии следует учитывать, наряду с типом кристаллической решетки, энергией дефекта упаковки, условиями УЗ-деформирования, такой фактор, как характер подвергаемой воздействию структуры, включая поля внутренних напряжений.

В настоящей работе исследовалось влияние различных режимов УЗ-воздействия на кинетику самоорганизации субмелкозернистого структурного состояния, полученного в сплаве Zr-2,5%Nb в результате больших пластических деформаций прокаткой, и проводится анализ экспериментальных данных.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Заготовки для деформации прокаткой были вырезаны из промышленной канальной трубы (сплав Zr-2,5%Nb), аналогичной используемым в тепловых реакторах. Дробная комбинированная прокатка осуществлялась попеременно при 300 и 100 К. Конечная степень деформации составила 96 %. Часть прокатанных образцов подвергалась УЗ-воздействию ($f=20$ кГц) при 300 К. Амплитуда касательных УЗ-напряжений $\sigma_{УЗ}$ составляла 85 и 200 МПа, продолжительность – до 10 мин. Контроль эволюции структуры осуществлялся электронно-микроскопически (ЭМВ-100БР), изменение упрочнения определяли измерением микротвердости (ПМТ-3).

Следует отметить, что высокий уровень запасенной энергии деформации определил диапазон акустических напряжений, а также длительность обработки – максимальная эффективность УЗ-воздействия характерна для сравнительно небольших экспозиций [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены зависимости микротвердости $H_{ц}$ от продолжительности УЗ-воздействия $\tau_{УЗ}$ при заданных амплитудах. Монотонное снижение $H_{ц}$ с увеличением $\tau_{УЗ}$ при $\sigma_{УЗ}=85$ МПа свидетельствует об ультразвуковой релаксации с уменьшением уровня внутренних напряжений в кристаллической решетке путем микросдвиговой деформации без массового размножения дислокаций [2]. Немонотонный

характер изменения H_{μ} при повышении амплитуды ультразвуковых напряжений до 200 МПа следует связать трансформацией субструктуры, сопровождающейся массовой генерацией линейных и точечных дефектов, проявлением структурных неустойчивостей.

Электронно-микроскопические исследования позволили выявить специфику структурных изменений после УЗ-воздействия в деформированном сплаве.

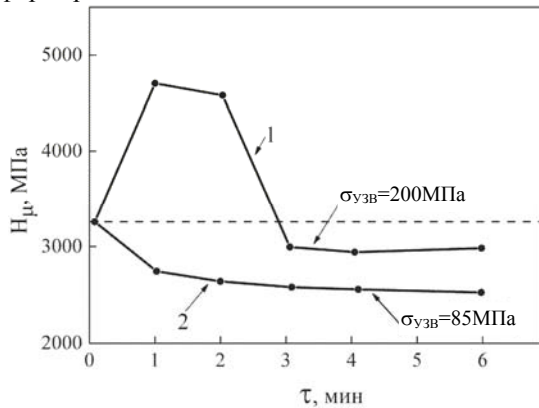


Рис. 1. Зависимость H_{μ} сплава Zr-2,5%Nb, деформированного прокаткой на 96 %, от экспозиции УЗ-воздействия для $\sigma_{УЗВ}=200$ (1) и 85 МПа (2). Штриховая линия соответствует значению H_{μ} деформированного образца

В результате комбинированной деформации прокаткой сформирована субмелкозернистая структура (рис. 2) со средним размером субзерен $d=94$ нм и достаточно высокой объемной концентрацией граничной фазы $C_V^{sp}=4,69 \cdot 10^{-2}$.

Отмечается широтой разброс числа свободных дислокаций в субзернах (максимальная плотность дислокаций N_d достигает $1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) и значительный (≈ 4 МПа) уровень внутренних напряжений. Напряжения рассчитывались по стреле прогиба отдельно стоящих дислокаций и их можно отнести к напряжениям II рода, величина, масштаб и направление которых в нашем случае определяются не только плотностью и характером распределения дислокаций, но и состоянием границ. Морфология структуры, масштабный фактор субзерен, характер их распределения по размерам дают основание характеризовать состояние кристаллической решетки сплава как наноструктурированное. Формирование нанофрагментной достаточно однородной конфигурации замкнутых и частично незамкнутых границ дислокационно-дисклинационного происхождения обеспечивается высокой интенсивностью дефектонакопления, что связано с действием достаточного числа кристаллографических систем скольжения и подавлением динамических возвратных процессов в условиях деформации прокаткой.

В результате ультразвукового воздействия с амплитудой 85 МПа процесс релаксации обусловлен рядом факторов. Так, при высокочастотном знакопеременном нагружении генерируется

большое число вакансий [4], стимулирующих неконсервативное скольжение.

Кроме того, преимущественная диссипация колебательной энергии на границах раздела, тем более на оборванных или незамкнутых границах, может приводить к локальному повышению температуры в этих участках. В результате будет происходить снижение напряжения работы источников дислокаций и уменьшение эффективности концентраторов внутренних напряжений.

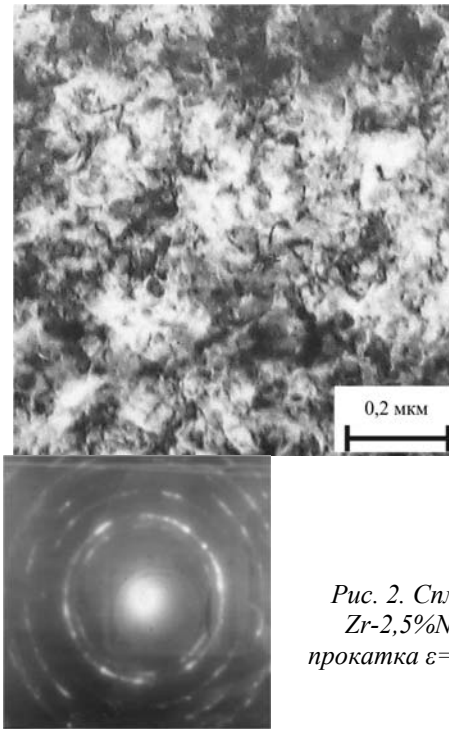


Рис. 2. Сплав Zr-2,5%Nb, прокатка $\varepsilon=96$ %

Указанные факторы способствуют эффективному перемещению, взаимодействию и аннигиляции граничных и свободных дислокаций с образованием новых границ, типа ячеистых, смыканием старых границ, о чем свидетельствует рост C_V^{sp} до $15 \cdot 10^{-2}$. Выравнивание и снижение фона внутренних напряжений аналогично эффекту динамического возврата. На стадии слабой зависимости $H_{\mu}(\tau)$ средний размер субзерен уменьшается до 78 нм, а величина внутренних напряжений снижается до 0,1 МПа.

Наложение ультразвука с амплитудой напряжений 200 МПа приводит к отрыву дислокаций от точек закрепления и генерации новых дислокаций. При малых экспозициях с максимальным упрочнением средний размер субзерен уменьшается до 61 нм, увеличивается общее количество границ ($C_V^{sp}=5,65 \cdot 10^{-2}$). Образование новых границ, смыкание старых конфигураций является результатом перераспределения дислокаций внутри зерен (N_d снижается до $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$). Процессы перераспределения граничных дислокаций и взаимодействие их с решеточными приводят к «огрублению» границ, увеличению абсолютных значений (до 8 МПа) и масштаба действия внутренних

напряжений. С увеличением продолжительности УЗ-воздействия такое структурное состояние становится неустойчивым, о чем свидетельствует частичное (в определенных объемах) разрушение старой и формирование новой, также нанозернистой ($d = 98$ нм), структуры с более равновесными, без дальнедействующих напряжений, границами и сравнительно низкой, не превышающей $1,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, плотностью решеточных дислокаций. Этим процессам соответствует стадия резко выраженного разупрочнения на зависимости $H_u(\tau)$ (см. рис.1).

Необходимо указать наиболее вероятные причины неустойчивости исходной деформационной наноструктуры при наложении ультразвука, т.е. изменение схемы нагружения по сравнению с прокаткой.

1. Структура с наиболее упорядоченными и равновесными границами оказывается неустойчивой и «рассыпается» при условии, что сдвиговая компонента напряжений, действующая со стороны вновь созданных под действием ультразвука неупорядоченных дислокационных конфигураций (оборванных границ, скоплений одноименных дислокаций, т.е. образований с дальнедействующими напряжениями преимущественного направления), превышает напряжение связи дислокаций в упорядоченных границах.

2. Следует учитывать склонность цирконий-ниобиевых сплавов к аллотропным превращениям эвтектоидного характера и связанную с этим дополнительную сдвиговую неустойчивость решетки. Вероятность таких локальных превращений увеличивается в связи с резким ростом коэффициентов восходящей и дрейфовой диффузии атомов Nb в условиях больших деформаций и скопления их на границах. В результате в микрообъемах с разрушающейся структурой прокатки формируется новая структура, устойчивая к ультразвуковой деформации, более однородная по

распределению напряжений, дефектов, размеров субзерен.

ВЫВОДЫ

1. Изучено влияние УЗ-воздействия на наноструктуру деформационного происхождения сплава Zr-2,5%Nb.

2. Выявлены эффекты ультразвуковой релаксации, а также структурной неустойчивости при наложении высокочастотных напряжений 85 и 200 МПа соответственно.

3. Показано, что наложение ультразвуковой деформации на наноструктуру деформационного происхождения в итоге приводит к реализации специфических процессов динамического возврата и существенному снижению уровня внутренних напряжений при сохранении наноструктурной морфологии и повышении общей однородности структуры.

4. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в результате интенсивной пластической деформации и последующего ультразвукового воздействия в циркониевых сплавах можно формировать наноструктурное состояние с широким спектром структурных параметров, определяющих их физико-механические свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Кулемин. *Ультразвук и диффузия в металлах*. М.: «Металлургия», 1978, 198 с.
2. В.К. Аксенов, О.И. Волчок. Структурные изменения в никеле после ультразвукового воздействия с допороговыми амплитудами в жидком гелии // *ФТТ*. 1982, т. 24, в. 10, с. 3125-3128.
3. В.К. Аксенов, И.Ф. Борисова, О.И. Волчок, А.Л. Донде. Влияние ультразвукового воздействия на термическое разупрочнение деформированного циркония // *УФЖ*. 1989, т. 34, №9, с. 1415-1417.
4. В.Ф. Белостоцкий, И.Г. Полоцкий. Размножение дислокаций и вакансий в никеле и молибдене при облучении ультразвуком // *Металлофизика*. Киев: «Наукова думка», 1976, №63, с. 81-89.

Статья поступила в редакцию 25.06.2011 г.

УЛЬТРАЗВУКОВА ДІЯ НА НАНОСТРУКТУРУ СПЛАВУ Zr-2,5%Nb

А.В. Мац, В.М. Нетесов, В.І. Соколенко

Досліджений вплив ультразвукової дії на наноструктуру деформаційного походження в сплаві Zr-2,5%Nb. Наноструктурний стан гратки було одержано шляхом комбінованої прокатки при 300 і 100 К на 96 %. За допомогою електронної мікроскопії визначені щільність дислокацій в тілі нанозерен, об'ємна концентрація граничної фази, оцінений рівень напружень II роду, а також зміна цих характеристик у результаті накладення ультразвукових коливань з амплітудою напружень 85 і 200 МПа. Спостережувані ефекти зв'язуються з мікросузовою релаксацією в області концентраторів напружень при відносно малих амплітудах УЗ-коливань і руйнуванням вихідної наноструктури і формуванням нової, більш рівноважної, у результаті інтенсифікації взаємодії полів внутрішніх напружень при великих амплітудах. Відмічено, що ультразвукова деформація наноструктури приводить у результаті до реалізації процесів динамічного повернення із збереженням наноструктурної морфології. При цьому відбувається зниження рівня і вирівнювання спектру внутрішніх напружень, а також підвищення однорідності структури.

ULTRASONIC INFLUENCE ON NANOSTRUCTURE IN Zr-2.5%Nb ALLOY

A.V. Mats, V.M. Netesov, V.I. Sokolenko

It was investigated the influence of ultrasonic action on nanostructure of deformation origin in the alloy of Zr-2,5% Nb. The nanostructure state was obtained by the combined rolling at 300 and 100 K on 96%. By means of electronic microscopy there were evaluated density of dislocations in the body of nanograins and volume concentration of grane phase, the level of stresses of 2-nd kind, and also change of these characteristics as a result of action of ultrasonic vibrations with stresses amplitude 85 and 200 MPa. The looked after effects are due to microshear relaxation in area of stress concentrators at relative low amplitudes of ultrasonic vibrations and by destruction of initial nanostructure and forming the new, more equilibrium, as a result of intensification of interaction of the fields of internal stresses, at large amplitudes. It is marked that ultrasonic deformation of nanostructure results, in the total, in realization of dynamic recovery processes with maintenance of nanostructure morphology. Thus there are a decrease of internal stresses level and smoothing of its spectrum, and also increase of structure homogeneity.