

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ДЕФОРМИРОВАННОМ ГАФНИИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.В. Мац, В.М. Нетёсов, В.И. Соколенко, К.В. Ковтун

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: vsokol@kipt.kharkov.ua

Исследованы механические свойства поликристаллического гафния марки ГФЭ-1, деформированного прокаткой на 18...70 % при 300 К. Обнаружен немонотонный ход зависимостей пределов пропорциональности, текучести и прочности от степени прокатки. В результате ультразвукового воздействия с амплитудами напряжений, сравнимыми с пределами текучести, выявлены эффекты упрочнения материала в отожженном состоянии и разупрочнения - в деформированном, что связано, соответственно, с генерацией дефектов и релаксацией внутренних напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование взаимосвязи структуры и физико-механических свойств гафния как перспективного реакторного материала имеет важное фундаментальное и прикладное значение. Согласно литературным данным [1-3] для формирования в гафнии дислокационных структур, обладающих определёнными свойствами, эффективными являются обработки, включающие в себя пластическую деформацию и отжиг. Одним из возможных способов направленного изменения структуры и свойств кристаллических материалов является ультразвуковое воздействие (УЗВ) [4]. Наиболее значительный эффект субструктурного упрочнения материалов наблюдается при сочетании предварительной пластической деформации и УЗВ. Так, например, в результате холодной деформации с последующим УЗВ достигается существенное повышение сопротивления ползучести сплавов на основе никеля [5]. Результаты исследований Нf в этом направлении нам неизвестны.

Основная цель настоящей работы заключалась в изучении влияния УЗВ на механические свойства деформированного гафния.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Исследовался отожжённый в вакууме $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па при 1123 К в течение 1 ч поликристаллический гафний марки ГФЭ-1 со средним размером зерна 30 мкм. Образцы для механических испытаний изготавливались из исходного (отожжённого) и подвергнутого ступенчатой прокатке при 300 К на различные степени материала. Максимальная степень деформации составляла $\epsilon=70\%$. Ультразвуковой обработке подвергалась рабочая часть образцов длиной 16 мм. Для достижения надежного акустического контакта образец прижимался к концентратору ультразвуковых колебаний с помощью специальной накидной гайки. Частота ультразвуковых колебаний составляла 20 кГц, максимальная амплитуда переменных механических напряжений соответствовала пределу текучести исходных и деформированных на различные степени образцов. Продолжительность УЗВ составляла 5 мин, что соответствует экспериментально определенной экспозиции для

достижения максимального эффекта упрочнения ряда материалов при озвучивании [4]. Для предотвращения нагрева при УЗВ образцы охлаждались в проточной воде. Механические свойства образцов определялись в условиях одноосного растяжения при комнатной температуре на разрывной машине со скоростью нагружения $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, микротвёрдость измерялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 г.

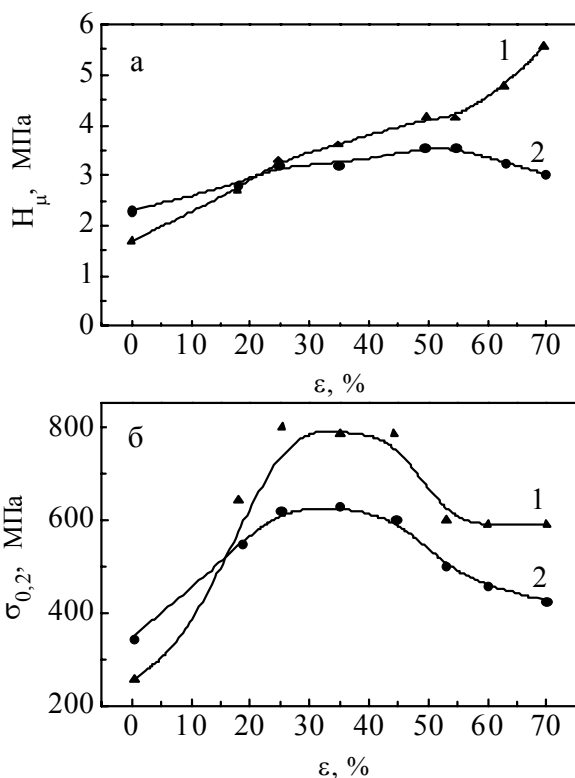
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке приведены зависимости микротвёрдости H_{μ} (а) и предела текучести $\sigma_{0,2}$ (б) гафния от степени деформации прокаткой до и после УЗВ. Из рисунка, а видно, что увеличение степени деформации приводит к монотонному росту H_{μ} , что свидетельствует о повышении с деформацией плотности дефектов и общего уровня внутренних напряжений в кристаллической решетке гафния. Деформационная зависимость предела текучести имеет немонотонный характер. После прокатки на 18 % наблюдается повышение $\sigma_{0,2}$. В интервале степеней обжатия 25...45 % происходит насыщение $\sigma_{0,2}$. Дальнейшее увеличение ϵ приводит к снижению предела текучести гафния. Зависимости предела пропорциональности и предела прочности от степени деформации при прокатке имеют аналогичный вид. Следует отметить, что подобный характер изменения прочностных свойств с повышением степени деформации прокаткой наблюдался ранее для йодидного гафния [2].

Деформация прокаткой приводит к резкому снижению пластичности гафния при испытаниях в условиях одноосного растяжения. Если у исходного материала равномерное удлинение составляет $\delta \sim 20\%$, то у прокатанного до $\epsilon > 30\%$ величина δ не превышает 3%. У образцов, прокатанных на $\epsilon > 50\%$, пластичность практически отсутствует.

В рамках существующих представлений характер зависимости прочностных свойств гафния от степени деформации определяется особенностями самоорганизации дефектной структуры в процессе прокатки.

Рост величины $\sigma_{0,2}$ после начальных этапов деформации прокаткой следует связать с высокой интенсивностью процессов накопления дефектов во всех системах скольжения.



Зависимость микротвердости (а) и предела текучести (б) гафния от степени прокатки до (кривая 1) и после (кривая 2) ультразвуковой обработки

Достаточно высокий уровень поперечного скольжения и аннигиляции дислокаций при усиливающемся междислокационном взаимодействии обуславливают равновесие процессов упрочнения и динамического возврата в области $\epsilon=25 \dots 45$ %. Наблюдаемое снижение характеристик прочности, отсутствие пластичности у образцов с $\epsilon > 50$ % – следствие высокой степени их дефектности, блокировки дефектами источников дислокаций, образования мощных барьеров для подвижных дислокаций, являющихся потенциальными местами зарождения микротрещин при приложении внешних растягивающих нагрузок.

Машинные кривые растяжения прокатанных образцов, у которых наблюдается равномерная деформация, состоят из нескольких участков. Начальный участок кривой, связанный с резким упрочнением материала, сменяется областью пластического течения с нулевым коэффициентом деформационного упрочнения вплоть до начала макролокализации деформации. Удлинение за счёт шейки может достигать ~ 8 %. Такой характер деформационных кривых может быть обусловлен трансформацией структуры, связанной с действием нескольких механизмов. Во-первых, быстрым исчерпанием трансляционной моды в первичных системах скольжения и активизацией дислокаций во вторичных системах. Наличие участка с нулевым коэффициентом деформационного упрочнения указывает на то, что скорость релаксации приложенных напряжений пропорциональна скорости генерации новых дислокаций в этих системах. При этом области пересечения первичных и вторичных полос скольжения могут

являться местами микролокализации деформации. Во-вторых, разрушением дислокационной структуры, сформированной в материале при прокатке, в силу её неустойчивости при изменении геометрии нагружения. Нулевой и даже отрицательный коэффициент деформационного упрочнения металла связывается также с «каналированием» свежих дислокаций [6].

Рассмотрим эффекты ультразвукового воздействия. Известно [4], что высокочастотное динамическое нагружение при УЗВ заметно трансформирует дислокационную структуру. Причем, эффективность обработки зависит как от мощности воздействия, так и от исходного структурного состояния металла.

Учитывая высокий уровень приложенных напряжений, можно полагать, что действие ультразвука активизирует в отожжённом гафнии процессы генерации вакансий и их комплексов, отрыва дислокаций от относительно слабых мест закрепления и, как следствие, формирование субструктуры с более высокими прочностными характеристиками (см. рисунок).

Снижение $\sigma_{0,2}$ и H_{μ} деформированных образцов после УЗВ следует связать с эволюцией структуры, сопровождающейся локальным течением в местах концентрации напряжений. Сосредоточенная пластическая деформация в данном случае приводит к активизации переползания дислокаций, их скольжения, облегчённого в результате низкой сдвиговой устойчивости и достаточно высокой манёвренности дислокаций, что типично для металлов, характеризующихся полиморфным превращением и имеющих высокую энергию дефекта упаковки [7]. Эффекты микропластичности в этом случае можно классифицировать как релаксационные процессы, предопределяющие протекание динамического возврата с уменьшением стартовых напряжений, что приводит к понижению прочностных свойств прокатанного гафния. Подтверждением этого является наблюдаемое изменение характера деформационных кривых образцов, прокатанных на большие степени ($\epsilon > 50$ %). Даже у образцов, деформированных на 70 % и подвергнутых УЗВ, при растяжении наблюдается упрочнение и появляется пластичность, о чем свидетельствует величина удлинения $\delta \sim 2$ %. Следует отметить также отсутствие области локализации течения при испытаниях озвученных образцов, что характерно для материалов с более равномерным распределением дефектов в кристаллической решётке. Таким образом, воздействие ультразвука на неравновесную дефектную структуру гафния можно классифицировать как релаксационное, вызывающее перераспределение дислокаций и формирование более равномерной структуры, обеспечивающей снижение прочностных свойств и пластификацию гафния.

ВЫВОДЫ

Исследовано влияние деформации прокаткой до 70 % при комнатной температуре и последующего ультразвукового воздействия с амплитудами напряжений, сравнимыми с пределом текучести, на механические свойства поликристаллического гафния

марки ГФЕ-1. Обнаружен немонотонный характер зависимости прочностных свойств от степени прокатки. Выявлены эффекты разупрочнения и пластификации предварительно деформированного гафния после УЗВ, связанные с релаксацией внутренних напряжений.

Рассматриваются механизмы самоорганизации дефектной структуры при холодной деформации металла и в процессе ультразвукового воздействия в различных структурных состояниях.

ЛИТЕРАТУРА

1. П.В. Шебалдов, А.Н. Иванов, Д.Л. Крысанов, О.В. Богданов и др. Структура и свойства кальций-термического гафния в зависимости от режимов холодной деформации и термообработки // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Материаловедение и новые материалы»*. 1991, в.2(42), с.22-27.

2. О.В. Бочаров, В.А. Зудилин, Н.Г. Решетников, А.В. Кукушкин, И.В. Голиков. Структура и механические свойства холоднодеформированного и отожжённого йодидного гафния // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Материаловедение и новые материалы»*. 1991, в.2(42), с.27-30.

3. Р.В. Ажажа, С.А. Беспалов, П.Ю. Волосевич и др. Влияние горячей пластической деформации в интервале дорекристаллизационных температур на структуру и твёрдость гафния ГФЭ-1 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2007, №4, с.128-132.

4. *Ультразвуковые колебания и их влияние на механические характеристики конструкционных материалов*: Сборник / Под ред. В.А. Кузьменко. К: «Наукова думка», 1986.

5. Л.В. Демченко, Г.Я. Козырский, В.А. Кононенко, Н.С. Мордюк. К вопросу о природе воздействия ультразвука на высокотемпературную ползучесть твердых растворов на основе никеля // *Металлофизика*. 1976, в. 63, с.51-54.

6. Е.Э. Засимчук, С.И. Селицер. Механическая неустойчивость дислокационной ячеистой структуры // *Металлофизика*. 1982, т.4, №6, с.75-80.

7. Дж. Мартин, Р. Доэрти. *Стабильность микроструктуры металлических систем*. М.: «Атомиздат», 1978, 280 с.

Статья поступила в редакцию 20.11.2008 г.

РЕЛАКСАЦІЙНІ ЕФЕКТИ У ДЕФОРМОВАНОМУ ГАФНІЇ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВІЙ ДІЇ

О.В. Мац, В.М. Нетьосов, В.І. Соколенко, К.В. Ковтун

Досліджено механічні властивості полікристалічного гафнію марки ГФЕ-1, деформованого прокаткою на 18...70 % при 300 К. Виявлено немонотонний хід залежностей межі пропорційності, текучості і міцності від ступеня прокатки. В результаті ультразвукової дії з амплітудами напруги, порівнянними з межами текучості, виявлені ефекти зміцнення матеріалу у відпаленому стані, і розміцнення - у деформованому, що пов'язано, відповідно, з генерацією дефектів і релаксацією внутрішніх напружень.

RELAXATION EFFECTS IN THE STRAINED HAFNIUM AT AN ULTRASONIC ACTION

O.V. Mats, V.M. Netesov, V.I. Sokolenko, K.V. Kovtun

Mechanical properties of polycrystalline GFE-1 hafnium strained by rolling at 300 K with a degrees $\epsilon=18...70\%$ were studied. The non-monotone dependence of proportional limit, yield strength and ultimate strength from the degree of rolling was found out. As a result of ultrasonic action with amplitudes of stresses, comparable with the yield strength, the effects of work-hardening of material are discovered in an anneal state and softening - in deformed, that caused by generation of defects and relaxation of internal stresses, accordingly.