

УДК 539.211

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕДИ М1 ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Н.В. Камышанченко, В.А. Беленко

г. Белгород, Белгородский государственный университет

И.М. Неклюдов, В.Б. Юферов

г. Харьков, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния мощных импульсных электронных пучков на структуру и свойства меди М1. Установлено значительное влияние импульсного облучения ускоренными электронами на структуру и твердость поверхности, а также на механические характеристики медных образцов. Структурные изменения на поверхности меди и изменение механических свойств зависят от числа импульсов облучения.

В последние годы все больший интерес проявляется к нетрадиционным методам обработки материалов. В связи с этим интенсивно ведутся исследования изменения структурно-фазового состояния и свойств металлов и сплавов под воздействием концентрированных потоков энергии (КПЭ): ионные, плазменные и электронные пучки, лазерное и высокочастотное излучение [1, 2].

Применение импульсных высокоплотных потоков частиц и энергии на уровне мощностей $10^5 \dots 10^9$ Вт/см² и потоков энергии 1..100 Дж/см² и выше позволяет проводить направленное изменение свойств материалов за очень короткое время. Все виды импульсного облучения приводят к сверхбыстрому (до 10^{12} К/с) нагреву с последующим (до 10^9 К/с) охлаждением. Такие огромные скорости изменения температурного режима приповерхностных слоев материала приводят к структурно-фазовым изменениям, модификации дефектной структуры и к изменению свойств облученного материала. Ионное и плазменное облучение, кроме того, вследствие внедрения ионов в материал мишени, приводит к изменению состава материала и к образованию специфических поверхностных структур [3-5].

Для модификации структуры поверхностей используют пучки электронов с энергиями от десятков до сотен КэВ, с глубиной модифицированного слоя от 5 до 500 мкм и энерговыделениями 5-50 Дж/см². При этом скорость нагрева для наносекундных пучков

может достигать 10^9 К/с, а для микросекундных пучков – 10^6 - 10^8 К/с и меньше. Скорость охлаждения может достигать величин 10^8 К/с [6].

Исследование образцов стали X18H10T после импульсного облучения ускоренными электронами, показало существенное изменение структуры приповерхностных слоев и значительное изменение микротвердости поверхности. Причем эффект влияния определяется величинами мощности и энергии пучка и временем воздействия [4].

В данной работе исследовалось влияние облучения импульсами ускоренных электронов на структуру и свойства меди М1. Облучение проводилось на импульсном электронном ускорителе ННЦ ХФТИ с энергией электронов до 300 кэВ и плотностью мощности $\sim 10^{11}$ Вт/см², при длительности импульса до 1,5 мкс. Число импульсов изменялось от 1 до 20 на каждую сторону образца. Образцы для механических испытаний высекались из фольги толщиной 0,47 мм. Перед воздействием ускоренными электронами образцы меди М1 отжигались в вакууме $\sim 10^{-5}$ мм рт. ст., при температуре 1000°C в течение получаса.

Исходные образцы меди имели крупнозернистую, рекристаллизованную структуру после деформации и отжига (рис. 1, а). Средний размер зерна примерно равен 250 мкм.

Металлографические исследования образцов меди М1, подвергнутых импульсно-

му воздействию ускоренных электронов (рис.1), показали, что в результате облучения происходят значительные структурные изменения поверхности. Даже после одного импульса на поверхности заметны следы испарения металла по мелким фрагментам субструктуры (рис. 1,б). Дальнейшее увеличение дозы облучения (10 импульсов) приводит к значительному испарению по грубым каналам, представляющим собой объединенные фрагменты неоднородности структуры. Кроме того, в результате возникающих (в процессе сверхбыстрого многократного нагрева и охлаждения меди) термонапряжений появляются линии скольжения двух систем (рис. 1, в). После 20 импульсов облучения вся поверхность меди, по-видимому, испытывала поверхностное оплавление с мгновенным затвердеванием, о чем свидетельствуют очень тонкие (чистые) границы новых зерен со следами скольжения в пределах зерен, а также сильная сглаженность теней от каналов испарения, хотя во многих местах

они еще значительны на поверхности после облучения (рис. 1, г).

Механические испытания исходных и облученных образцов меди М1 проводились при комнатной температуре на разрывной установке 1246Р-2/2300 НИКИМП. Скорость растяжения составляла 2 мм/мин. Типичные кривые растяжения медных образцов приведены на рис. 2. Результаты механических испытаний и данные измерения микротвердости (полученные с помощью ПМТ-3) приведены в табл. 1.

Приведенные в табл.1 данные показывают, что облучение меди импульсами ускоренных электронов приводит к изменениям прочностных характеристик, пластичности и микротвердости. В частности, воздействие большим числом импульсов (10, 20) приводит к значительному увеличению предела текучести меди (\approx на 50 %), к увеличению предела прочности (на 7 %) при незначительном снижении пластичности (в среднем на 6 %). Это можно объяснить тем, что



а



б



в



г

Р и с. 1. Структура поверхности меди М1 после импульсного облучения пучками электронов (X100): а) исходная структура; б) после 1 импульса облучения; в) после 10 импульсов; г) после 20 импульсов.

при воздействии на металлы концентрированными потоками энергии обычно в приповерхностных слоях формируется упрочненный, дефектный слой с высокой плотностью дислокаций и упорядоченной ячеистой структурой, который блокирует движение и выход дислокаций при деформировании металла. Кроме того, под действием термо- и структурных напряжений образуется повышенная плотность дислокаций на глубинах, во много раз превышающих толщину модифицированного слоя [5].

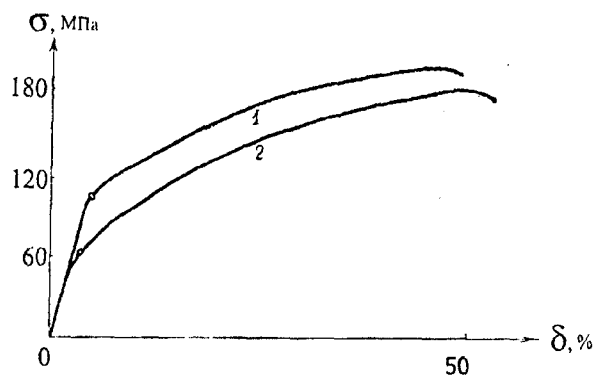


Рис. 2. Кривые растяжения образцов меди М1: 1 – облученный материал (20 импульсов), 2 – необлученный материал.

Таблица 1

Значения механических характеристик и микротвердости исходных и облученных образцов меди М1

Режим облучения	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_a , МПа	δ , %	$H\mu$, кг/мм ²
Без облучения	61	167	49	60
1 импульс с каждой стороны	55	182	63	73
5 импульсов с каждой стороны	118	176	36	76
10 импульсов с каждой стороны	88	179	47	70
20 импульсов с каждой стороны	94	179	45	76

После облучения медных образцов одним импульсом наблюдается испарение с поверхности металла по мелким фрагментам субструктуры (возможно по ямкам дислокаций, обогащенным примесными атомами) (рис. 1,б). Вероятно, это приводит к отжигу

дефектов и, как следствие, к незначительному снижению предела текучести (на 10 %) и увеличению относительного удлинения меди (на 29 %).

Исследование микротвердости поверхности исходных и облученных образцов меди показало, что после облучения значение микротвердости меди увеличивается в среднем на 25 %.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о значительном влиянии импульсного облучения ускоренными электронами на структуру и твердость поверхности, а также на механические характеристики медных образцов. Причем структурные изменения на поверхности меди и изменение механических свойств зависят от числа импульсов облучения.

Библиографический список

1. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И., Ротштейн В.П., Лебедева Н.И. Низкоэнергетический импульсный электронный пучок большой плотности для поверхностного нагрева // ДАН СССР.– Т.253.– №6.– С.1383-1386.
2. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы / Под. ред. Н.И. Рыкалина. – М.: Наука, 1985.
3. Неклюдов И.М., Камышанченко Н.В., Шевченко С.В., Рыбалко В.Ф. и др. Исследование воздействия сгустков водородной плазмы на механические характеристики высокопроводной меди // Научные ведомости БГУ. – 1998. – №1(6). – С.54-67.
4. Неклюдов И.М., Камышанченко Н.В., Юферов В.Б., Рыбальченко Н.Д. и др. Влияние воздействия мощных импульсных пучков электронов на структуру и твердость поверхности стали Х18Н10Т // Научные ведомости БГУ. – 2000. – № 10(1). – С. 45-49.
5. Калинин Б.А., Польский В.И., Якушин В.Н. и др. Радиационная повреждаемость и модификация материалов при воздействии импульсных потоков плазмы // ФиХОМ.– 1991.– №2.–С.20-30.
6. Юферов В.Б., Скибенко В.И., Сороковой Л.Г. и др. О возможности использования комплекса импульсного электронного ускорителя для модификации поверхностно-объемных свойств различных материалов // ВАНТ. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1997.– Вып.1(65)–2 (66). – С. 197-198.

ПОДАВЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ МЕДИ, ЛЕГИРОВАННОЙ ИТТРИЕМ, ЗА СЧЕТ ЭФФЕКТА УСИЛЕНИЯ РЕКОМБИНАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ПРИМЕСНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Н.В. Камышанченко, И.А. Беленко

г. Белгород, Белгородский государственный университет

И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин

г. Харьков, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

Чистая медь и ее сплавы находят широкое использование в электронной, ускорительной, электровакуумной и других отраслях техники. Высокие электро- и теплопроводность меди являются основным преимуществом среди других материалов. В последнее время особый интерес к меди и ее сплавам возник в связи с перспективностью их использования в качестве материалов термоядерного реактора [1]. Целью настоящего исследования было изучение радиационной стойкости сплава медь-иттрий, обладающего высокими электрическими и прочностными свойствами [2]. Установлены зависимости степени радиационного набухания микролегированной меди от дозы ее облучения высокоэнергетичными ионами Cr, показывающие, что за счет уменьшения пересыщенности по радиационным дефектам (вследствие усиления их рекомбинации на примесных комплексах) имеет место эффект полного подавления радиационного набухания меди вплоть до дозы облучения 40 смещений на атом (с.н.а) при оптимальной величине концентрации микролегирующей добавки.

Введение. К наиболее интересным и сложным физическим явлениям, существенно ограничивающим работоспособность конструкционных материалов, относится радиационное набухание – увеличение объема и уменьшение плотности облучаемого материала за счет образования и роста многочисленных вакансионных и газовых пор. Избыток вакансий в облучаемом материале возникает из-за неравенства сил взаимодействия между атомами и вакансиями с дефектами кристаллического строения, в частности с дислокациями.

Интерес к явлению радиационного набухания объясняется опасностью последствий, обусловленных изменением геометрических размеров и свойств элементов конструкции активной зоны атомных реакторов. Открытие явления радиационного набухания заставило пересмотреть сроки создания новых конструкционных материалов, режимы эксплуатации реакторов. Кроме того, исследования радиационного набухания позволяют получить информацию о взаимодействии точечных дефектов с дислокациями, примесями, порами, когерентными и некогерентными границами, о перераспределении точечных дефектов в поле однородно и неоднородно распределенных стоков различной эффективности.

Одним из перспективных способов повышения радиационной стойкости конструкци-

онных материалов ядерной энергетики в настоящее время является микролегирование [3]. Установлено, что добавки редкоземельных элементов [4] значительно понижают вакансионное набухание материалов.

Материалы и методика. В качестве базового материала была использована медь, выплавленная в вакуумной электроннолучевой печи, чистотой 99,99 %. Легирование проводилось во время индукционной плавки. Концентрация иттрия составляла 0,01 и 0,02 вес. %.

Для исследования радиационного набухания образцы чистой (МВЭ) и микролегированной меди (ММВ), предварительно деформированные на 50% и отожженные при 800 °С в течение 30 мин, облучались ионами хрома с энергией 2 МэВ при температуре 380 °С на ускорителе ННЦ ХФТИ "УТИ-2". Флюенс ионов был постоянным в процессе облучения и составлял $2 \cdot 10^{17}$ ион/(м²·с). Интегральная зона изменялась в интервале 1-100 смещений на атом.

Для выявления основных элементов тонкой субструктуры использовали электронный микроскоп EM-100 CX. Образцы для электронно-микроскопических исследований представляли собой диски диаметром 3 мм, вырезанные из лент толщи-

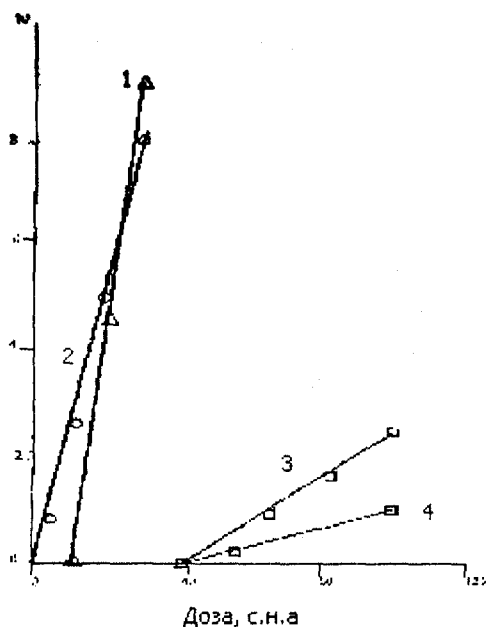


Рис. 1. Дозовая зависимость радиационного распухания меди МВЭ (1), бескислородной меди (2) и меди, микролегированной иттрием (3, 4).

ною 0,2 мм. Подготовку образцов к просмотру в электронном микроскопе проводили с помощью установки струйной электрополировки "Микрон-2" в электролите из 96% уксусной кислоты с добавками CrO_3 при напряжении 25 В.

Результаты исследований. Из рис. 1 и 2 видно, что уже при облучении до дозы 20 с.н.а образцы чистой меди (МВЭ) распухали на 10% (кривая 1). Аналогичный результат получен другими авторами для бескислородной меди (М0б) [5] (рис.1, кривая 2). Распухание микролегированной меди при тех же условиях облучения практически не наблюдается вплоть до 40 с.н.а и составляет не более 3% при дозе 90-100 с.н.а (кривые 3, 4, рис. 1).

Электронномикроскопические исследования структурно-фазового состояния исходной чистой меди (МВЭ), меди МВЭ и ММВ, после облучения до дозы 20 с.н.а (рис.2), показали наличие в облученной чистой меди пор размером 50-100 Å (рис. 2, а).

Обсуждение результатов. Основные механизмы и пути ослабления радиационного распухания конструкционных материалов преимущественно связывают с легированием твердых растворов примесями, вызывающими значительную дилатацию кристаллической решетки [6]. В зависимости от знака и степени несоответствия атомных радиусов легирующего элемента и матрицы вокруг примесей образуются сжатые или растянутые области. При этом легирующие элементы с малым радиусом (Si, Be, В) связываются преимущест-

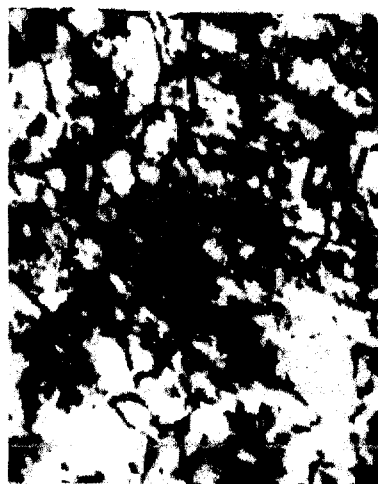
венно с межузельными атомами, а атомы с большим радиусом (Al, Ti, Mo) – с вакансиями. Ослабление распухания при этом объясняется задержкой разноименных точечных радиационных дефектов, вследствие чего предотвращается их уход на стоки и повышается вероятность их рекомбинации при встрече.



а



б



в

Рис. 2. Микроструктура меди: а – МВЭ в исходном состоянии, б – (МВЭ) и в (ММВ) – после облучения, доза 20 с.н.а ($\times 500\ 000$).

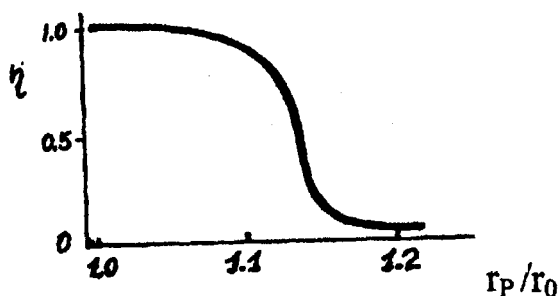


Рис. 3. Зависимость параметра подавления распухания η от размерного несоответствия атомных радиусов примеси и металла r_p / r_0 .

Образование у дислокаций примесных атмосфер и снижение энергии дефекта упаковки при легировании сопровождается релаксацией упругих напряжений вокруг них и уменьшением эффекта предпочтения взаимодействия с межузельными атомами, что может способствовать усилению рекомбинации разноименных точечных дефектов.

Наблюдаемое снижение степени радиационного распухания микролегированной иттрием меди связано с уменьшением пересыщенности по радиационным дефектам вследствие усиления рекомбинации вакансий и межузлий на примесных комплексах атом меди – атом иттрия.

Ранее методом математического моделирования было показано [7], что введение в материал атомов РЗМ с большим атомным радиусом увеличивает эффективность рекомбинации дефектов и может приводить к уменьшению радиационной повреждаемости материала. В достаточно узком интервале отношений атомных радиусов ($\sim 1,18$) происходит сильное подавление скорости распухания $\eta = \dot{S}_p / \dot{S}_0$, где \dot{S}_p , \dot{S}_0 – скорость распухания металла с примесью и без нее (рис. 3).

Для меди и иттрия отношение атомных радиусов равно 1,42 ($r_{a(Cu)}=0,127$ нм, $r_{a(Y)}=0,181$ нм). Таким образом, соотношение радиусов для нашего случая фактически соответствует правой области участка кривой (рис. 3), то есть введение иттрия в медь приводит к сильному подавлению скорости распухания микролегированной меди.

Так как радиационное распухание связано в основном с избытком вакансий в облучаемом материале, то наличие в меди атомов иттрия, которые являются ловушками для вакансий [8], увеличивает скорость взаимной ре-

комбинации разноименных точечных радиационных дефектов, что приводит к подавлению радиационного распухания микролегированной меди.

Согласно концепции, предложенной А.М. Паршиным, И.М. Неклюдовым, А.Н. Орловым [9], в процессе распада твердого раствора образуются упругоискаженные растянутые и сжатые области на границе раздела предвыделение – матрица. Эти места предпочтительны для направленной диффузии и последующей рекомбинации полярных дефектов. Таким образом, твердые растворы обладают свойствами усиливать процессы рекомбинации разноименных дефектов при наличии определенного размерного несоответствия на границе раздела "предвыделение – матрица", то есть подавление радиационного распухания объясняется образованием источников объемной дилатации – фаз внедрения.

В представленной работе рассматриваются вопросы подавления эффекта радиационного распухания за счет легирования меди атомами примеси с большим атомным радиусом, то есть повышение радиационной стойкости меди объясняется наличием ловушек вакансий, которыми в твердом растворе являются атомы иттрия. Естественно, когда при концентрациях иттрия, превышающих равновесную, появляются предвыделения второй фазы, начинают работать оба механизма.

Изменение радиационной стойкости металлов и сплавов при введении в твердый раствор атомов легирующих добавок определяется их влиянием на следующие основные взаимосвязанные процессы при облучении:

- скорость дефектообразования и эффективность рекомбинации и аннигиляции вакансий и межузлий;
- взаимодействие легирующих элементов с вакансиями, межузлиями, атомами газов и других примесей;
- растворимость и диффузионную подвижность атомов примеси и элементов основы;
- дислокационную структуру и характеристики дислокаций;

- фазовую стабильность и особенности распада твердого раствора;

- состояние границ раздела.

Поскольку РЗЭ являются химически активными и малорастворимыми элементами в твердом растворе металлов и сплавов, то при облучении они в разной степени оказывают влияние практически на все перечисленные процессы [4].

Выводы. 1. Изучено влияние микродобавок иттрия (0,01-0,02 вес.%) на радиационное распухание меди. Показано, что микродобавки иттрия приводят к подавлению радиационного распухания меди до дозы 40 с.н.а, в то время как для чистой меди величина распухания при дозе 20 с.н.а достигает 10%.

2. Подавление радиационного распухания микролегированной меди связано с уменьшением пересыщенности по радиационным дефектам вследствие усиления рекомбинации вакансий и межузлий на примесных комплексах.

3. Полученные данные о повышении радиационной стойкости микролегированной иттрием меди указывают на возможность ее использования в качестве конструкционного материала узлов термоядерных установок.

Библиографический список

1. Горынин И.В. и др. Конструкционные материалы первой стенки, blankets и дивертора, разрабаты-

ваемого в России в обеспечение проектирования ИТЭР // Радиационное воздействие на материалы термоядерных реакторов. Часть 1. – Санкт-Петербург: ЦНИИ КМ "Прометей", 1992. – С. 4-34.

2. Неклюдов И.М., Воеводин В.Н., Шевченко С.В., Камышанченко Н.В., Беленко И.А. Изменение структуры и свойств деформированной чистой и микролегированной иттрием меди при отжиге // *Металлы*. – 1998. - №3 - С.87-92.

3. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Черняева Т.П. Радиационные дефекты и распухание металлов. – Киев: Наук. думка, 1988. – 296 с.

4. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М. Влияние РЗЭ на радиационную стойкость материалов // *Радиационное материаловедение*. Т.2. – Харьков: ХФТИ, 1990. – С.45-57.

5. Барабаш В.Р. и др. Исследование распухания медных сплавов при облучении тяжелыми ионами // *Радиационное материаловедение*. Т.5. – Харьков: ХФТИ, 1990. – С.195-201.

6. Физика радиационных явлений и радиационное материаловедение /Под ред. А.М. Паршина, И.М. Неклюдова, Н.В. Камышанченко. – М.; СПб.; Белгород: Изд-во БГУ, 1998. – 378 с.

7. Ганн В.В., Марченко И.Г., Неклюдов И.М. Рекомбинационный механизм подавления распухания материалов при введении примесей с большим атомным радиусом // *ВАНТ*. Сер.: ФРП и РМ. – 1989. - Вып. 1(48). – С.32-35.

8. Бакай А.С., Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М. Центры рекомбинации переменной полярности в кристаллах // *ВАНТ*. Сер.: ФРП и РМ. – 1986. - Вып. 1(38). – С.3-6.

9. Гуляев Б.Б. и др. Структура и свойства сплавов. – М.: Металлургия, 1993. – 317 с.

УДК 621.039

ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ В САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛАХ

В.В. Брык, И.М. Неклюдов

г. Харьков, ИФТТМТ ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

Введение. Важность вопроса о закономерностях эволюции дислокационной структуры связана с той ролью, которую играют дислокации в процессах деградации свойств материалов при облучении. За 40 лет интенсивного изучения этого вопроса накоплен большой объем знаний, касающихся образования дислокационных петель,

их эволюции и влияния исходных дислокаций на эволюцию развивающейся дислокационной структуры под облучением. В целом существует понимание процессов, приводящих к изменению дислокационной структуры в чистых металлах, сплавах и сталях. Установлены этапы эволюции дислокационной структуры, определены типы