

ВОЗДЕЙСТВИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ВЫСОКОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА 03Х20Н45М4БЧ, ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ Мо И W

Д.А. Сатпаев, С.Б. Кислицин

Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан,
ул. Ибрагимова 1, 050032 Алма-Ата, Казахстан, skislitsin@inp.kz

Исследовано влияние облучения низкоэнергетическими альфа-частицами на структурно-фазовый состав и морфологию поверхности стали 12Х18Н10Т, сплава с высоким содержанием никеля 03Х20Н45М4БЧ, чистых металлов молибден и вольфрам. Показано, что облучение до флюенсов $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ приводит к формированию двухфазной структуры аустенит – мартенсит в области торможения альфа-частиц в стали 12Х18Н10Т. В сплаве 03Х20Н45М4БЧ, молибдене и вольфраме облучение не вызывает структурно-фазовых превращений. Установлено, что облучение до флюенса $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ вызывает появление блистеров на облучаемой поверхности, независимо от типа кристаллической решетки.

Введение

Известно, что металлы и сплавы с ОЦК кристаллической структурой менее подвержены вакансионному распуханию по сравнению с металлами и сплавами с ГЦК структурой. Так, например, аустенитные стали (т.е. с ОЦК структурой), распухают в значительно меньшей степени по сравнению с ферритными сталями, т.е. с ГЦК структурой [1].

Газовое распухание, блистеринг (выход газонаполненных пор на поверхность) и флекинг (шелушение, т.е. раскрытие пор на поверхности) обусловлено формированием в материале наполненных гелием пузырьков при облучении альфа-частицами. Инертные газы, в том числе гелий, не образуют химических соединений с металлами и образуют гелий-вакансионные комплексы. Эти комплексы за счет давления газа в них могут коагулировать и перемещаться к поверхности, вызывая образование выступов на поверхности (блистеринг) и шелушение, т.е. раскрытие пор на поверхности (флекинг). Блистеринг при облучении альфа-частицами встречается как в металлах и сплавах с ОЦК, так и с ГЦК кристаллической решеткой.

Задачей настоящей работы является изучение влияния типа кристаллической структуры металлических материалов на блистеринг. С этой целью нами выбраны:

- аустенитная сталь 12Х18Н10Т, претерпевающая под действием механических напряжений и облучения частичный переход в ферритную (мартенситную) фазу, т.е. в процессе облучения может изменяться ее структурно-фазовый состав;
- сплав с высоким содержанием никеля 03Х20Н45М4БЧ, не подверженный структурно-фазовым перестройкам при облучении или деформации;
- чистые металлы Мо и W, которые также не претерпевают фазовых превращений при деформации и облучении.

Подготовка образцов, облучение альфа-частицами и методы исследования

Были подготовлены образцы стали 12Х18Н10Т, сплава с высоким содержанием никеля 03Х20Н45М4БЧ (сталь ЧС-42), молибдена и

вольфрама высокой степени чистоты: Мо - 99.99 вес.% и W - 99.98 вес.%. Образцы размерами 15 мм × 15 мм и толщиной ~ 1 мм вырезались из массивных пластин. Далее образцы сталей отжигались в течение часа при температуре 800°C для снятия напряжений, вызванных механическими воздействиями, и подвергались механической шлифовке и полировке поверхности. Образцы Мо и W шлифовались и полировались без предварительного отжига.

Кристаллическая структура до и после облучения альфа-частицами регистрировалась методом рентгеновской дифрактометрии (РД) на дифрактометре D8 ADVANCE, с использованием излучения рентгеновской трубки с медным анодом и графитовым монохроматором на дифрагированном пучке. Режим работы трубки следующий: напряжение 40 кВ, ток - 40 мА. Дифрактограммы записывались в диапазоне углов $2\theta = 30-120$ град., с шагом 0.02 град., время измерения на каждом шаге – 1 с. Съемка проводилась в геометрии Брега-Брентано.

Морфология поверхности исследовалась методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на электронном микроскопе JEOL JSM-7500 FA.

Облучение альфа-частицами с энергией 40 - 45 кэВ проводилось на низкоэнергетическом канале ускорителя тяжелых ионов ДЦ-60 Астанинского филиала ИЯФ до флюенсов в интервале $10^{17}-2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при температуре, не превышающей 200°C. Согласно расчетам по программе SRIM, пробег альфа-частиц с энергией 40 кэВ составляет ~ 100 нм, страгглинг ~ 50-70 нм. Это означает, что в области торможения альфа-частиц (страгглинга) на один атом матрицы приходится несколько атомов имплантированного гелия.

Результаты и их обсуждение

Влияние облучения низкоэнергетическими альфа-частицами на кристаллическую структуру сталей 12Х18Н10Т и ЧС-42, Мо и W.

В исходном состоянии (до облучения) сталь 12Х18Н10Т, согласно данным рентгеновской дифрактометрии (рис. 1а), имеет двухфазную структуру – основная фаза аустенит (ГЦК), текстурированная по плоскости (220), текстура сохранилась

после прокатки образцов и манипуляций при подготовке поверхности, с некоторым содержанием мартенситной ОЦК фазы. Соотношение содержания аустенитной фазы к мартенситной равно 85%/15%. Постоянная решетки аустенита $a_{\gamma} = 0.35953$ нм.

Облучение альфа-частицами до флюенса $1 \cdot 10^{18}$ см⁻² привело к увеличению содержания мартенситной фазы с ~15% до ~25%, что можно наблюдать на рис. 1 д. Высокая степень пересыщения гелием в области страггинга приводит к значительным механическим напряжениям и стимулирует образование мартенсита.

Исходная кристаллическая структура стали ЧС-42 - ГЦК с параметром решетки $a_{\gamma} = 0.35928$ нм (рис. 1б). Облучение альфа-частицами до того

же флюенса $1 \cdot 10^{18}$ см⁻² и, соответственно, с таким же уровнем напряжений вызвало увеличение параметра решетки до 0.35945 нм, но не привело к фазовому превращению со сменой кристаллической структуры (рис. 1е).

Исходная кристаллическая структура молибдена и вольфрама – ОЦК (рис. 1 в и г) соответственно, с постоянными решетки Mo $a_{Mo} = 0.31477$ нм и W $a_W = 0.31625$ нм. Облучение альфа-частицами до флюенса $1 \cdot 10^{18}$ см⁻² также не вызывает фазовых переходов со сменой кристаллической структуры и проявляется в уширении рентгеновских пиков (рис. 1 ж, з, для Mo и W соответственно). А также в увеличении постоянной решетки.

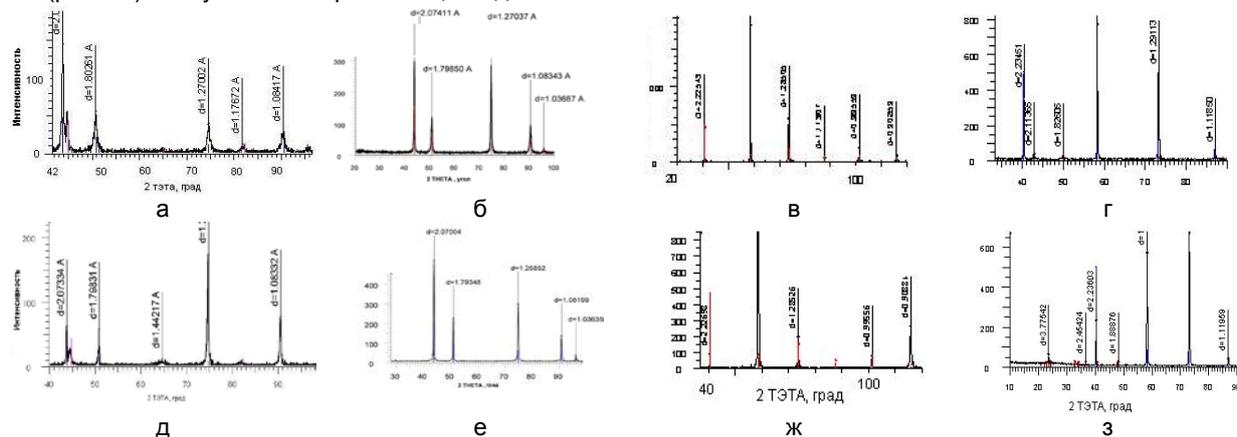


Рис. 1. Диффрактограммы стали 12X18H10T, сплава 03X20H45M4B4, чистых металлов молибдена и вольфрама до облучения и после облучения альфа-частицами с энергией 40 кэВ до флюенса $1 \cdot 10^{18}$ см⁻² при температуре < 200°С: до облучения: а - сталь 12X18H10T, б - сплав 03X20H45M4B4, в – Мо, г – W; после облучения: д - сталь 12X18H10T, е - сплав 03X20H45M4B4, ж – Мо, з – W

Влияние облучения низкоэнергетическими альфа-частицами на структуру поверхности сталей 12X18H10T и ЧС-42, Mo и W.

Исходная структура поверхности стали 12X18H10T показана на рис. 2 а. РЭМ исследования показали, что морфология облученной 40 кэВ альфа-частицами до флюенса $1 \cdot 10^{18}$ см⁻² поверхности существенно изменилась. Непосредственно после облучения наблюдаются блистеры, т.е. вздутия за счет выхода газонаполненных пор на поверхность стали (рис. 2 б). Диаметр пор на поверхности составляет 2-3 мкм.

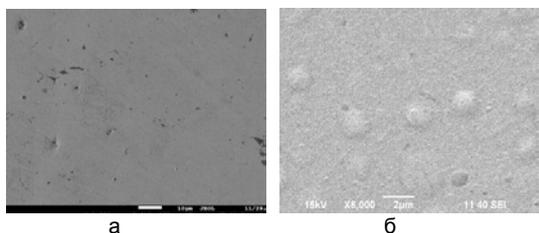


Рис. 2. РЭМ изображения поверхности стали 12X18H10T до облучения (а) и после облучения 40 кэВ альфа-частицами до флюенса $1 \cdot 10^{18}$ см⁻² (б)

РЭМ снимки исходной и облученной альфа-частицами до флюенса $1 \cdot 10^{18}$ см⁻² поверхности стали ЧС-42 приведены на рис. 3 а, б соответственно.

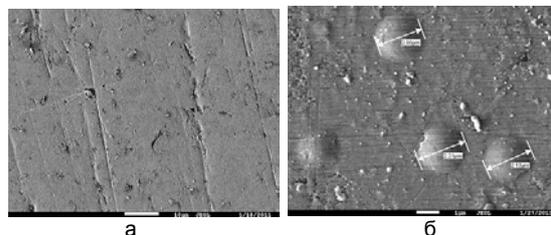


Рис. 3. РЭМ изображения поверхности стали ЧС-42 до облучения (а) и после облучения 40 кэВ альфа-частицами до флюенса $1 \cdot 10^{18}$ см⁻² (б)

Из рис. 3 б видно, что облучение 40 кэВ альфа-частицами приводит к образованию на поверхности стали ЧС-42 блистеров диаметром ~ 2-3 мкм, поверхностная плотность которых такая же, как и для стали 12X18H10T. Т.е. кристаллическая структура облучаемого материала при низких температурах и высокой степени пересыщения гелием не влияет на формирование блистеров на поверхности.

РЭМ снимки исходной и облученной альфа-частицами до флюенса $1 \cdot 10^{18}$ см⁻² поверхности молибдена приведены на рис. 4 а, б соответственно.

Так же, как и для сталей 12X18H10T и ЧС-42 облучение низкоэнергетическими альфа-частицами ведет к появлению блистеров на

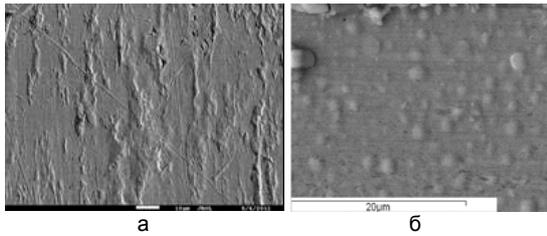


Рис. 4. РЭМ изображения поверхности Мо до облучения (а) и после облучения 40 кэВ альфа-частицами до флюенса $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (б)

поверхности Мо. Отметим, что наблюдается большой разброс диаметров блистеров 0.5-2 мкм на поверхности (рис. 4б).

Изображения исходной и облученной альфа-частицами до флюенса $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ поверхности вольфрама приведены на рис. 5 а, б соответственно. Для вольфрама на поверхности также наблюдаются блистеры с большим разбросом по размерам от 1 мкм до 5 мкм. Однако следует отметить, что в этом случае флюенс облучения альфа-частицами был вдвое большим.

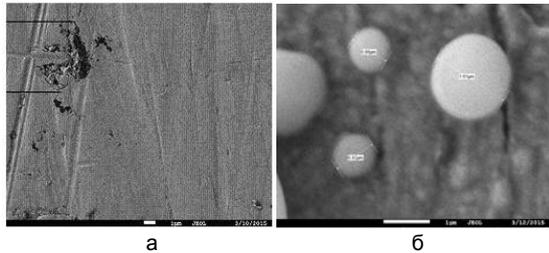


Рис. 5. РЭМ изображения поверхности W до облучения (а) и после облучения 40 кэВ альфа-частицами до флюенса $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (б)

Как видно из представленных результатов, тип кристаллической структуры металлов и сплавов не влияет на образование блистеров на поверхности при облучении альфа-частицами низкой энергии до высоких флюенсов при низких температурах.

Механизм образования блистеров следующий: при низких температурах в области тормо-

жения формируется ансамбль неподвижных гелий - вакансионных пор с давлением газа в них выше равновесного. Избыточное давление газа в порах приводит к превышению предела прочности и разрыву стенок между порами в ансамбле, т.е. соседние поры коагулируют. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока давление в объединенных порах не станет меньше предела прочности. Давление в объединившихся порах равно исходному давлению газа в порах за вычетом его уменьшения, обусловленного прогибом поверхности с облученной стороны, т.е. блистеринга.

Заключение

Выполнены исследования формирования блистеров на поверхности стали 12X18H10T, сплава с высоким содержанием никеля 03X20H45M4BЧ, чистых металлов Мо и W при облучении низкоэнергетическими альфа-частицами до высоких флюенсов при низких температурах.

Показано, что облучение до флюенсов $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ приводит к формированию двухфазной структуры аустенит – мартенсит в области торможения альфа-частиц в стали 12X18H10T. В сплаве 03X20H45M4BЧ, молибдене и вольфраме облучение не вызывает структурно-фазовых превращений. Облучение приводит к появлению блистеров на облучаемой поверхности независимо от структурно-фазового состава облучаемых сплавов и металлов.

Список литературы

1. Garner F.F. Irradiation performance of cladding and structural steels in liquid metal reactors. Nuclear Materials, in Materials Science and Technology. Eds. R.W. Cahn, P. Yaansen and E.J. Kramer. V. 10 A. Chapter 6. P. 420-543.
2. Неклюдов И.М., Толстоуцкая Г.Д. Гелий и водород в конструкционных материалах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2003. № 3 (83). С. 3-14.

EFFECTS OF IRRADIATION WITH LOW-ENERGY ALPHA-PARTICLES ON THE SURFACE STRUCTURE OF STAINLESS STEEL C0.12Cr18Ni10Ti, ALLOY WITH HIGH NICKEL CONTENT C0.03Cr20Ni45Mo4NbB AND OF PURE METALS Мо и W

D.A. Satpaev, S.B.Kislitsin

*Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of Republic Kazakhstan,
1 Ibragimov str., 050032, Alma-Ata, Kazakhstan, skislitsin@inp.kz*

Effects of irradiation with low-energy alpha-particles on the structural-phase composition and surface morphology of C0.12Cr18Ni10Ti steel, of alloy with a high nickel content C0.03Cr20Ni45Mo4NbB, pure metals molybdenum and tungsten was investigated. It is shown that irradiation to fluences of $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ leads to the formation of a two-phase an austenite-martensite structure in the region of alpha particles projective range in 12X18H10T steel. In the alloy 03X20H45M4BЧ, as in molybdenum and tungsten, irradiation does not lead to structural phase transformations. It was established that irradiation up to a fluence of $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ initiate the appearance of blisters on the irradiated surface irrespective of the type of crystal structure.