На правах рукописи

АНТОШИНА Ирина Александровна

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В АМОРФНЫХ СПЛАВАХ

НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА И ЖЕЛЕЗА,

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ИОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

Специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

\Дл\*0

Москва-2005

Работа вьтолнена на кафедре материаловедения Обнинского государственного технического университета атомной энергетики

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор B.C. Хмелевская

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,

В.В. Прасицкий

кандидат физико-математических наук

И.В. Лясоцкий

Ведущая организация:

Московский институт стали и сплавов (технологический университет)

зо

Зашита состоится «2о> ОМТЛбрЛ 2005 г. в часов на заседании

диссертационного совета Д 212 141.17 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 248600, г. Калуга, ул. Баженова, 4, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал

(г. Калуга, ул. Баженова, 4)

Автореферат разослан «ffl» С£ЛГМ>/>£.2005

Ученый секретарь диссертационного совета канд. тех. наук, доцент

С.А. Лоскутов

f!43g

&?/&&

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Многокомпонентные аморфные сплавы привлекают внимание в связи с быстро расширяющимся практическим использованием магнитомяіких аморфных и нанокристаллическнх материалов При лом важное значение приобретает исследование структурных превращений в зі их материалах, происходящих на микроуровне, поскольку свойства аморфных сплавов однозначно связаны с атомной структурой вещества.

Переход аморфного состояния в стабильное кристаллическое происходит через последовательность метастабильных состояний, причем процесс кристаллизации аморфных сплавов представляет большой научный и практический интерес - свойства сплава при переходе из аморфного состояния в закристаллизованное изменяются настолько, что можно говорить о двух различных маїериалах одинаковою химического состава. Управляемую кристаллизацию можно использовать для формирования особых, частично или полностью закристаллизованных материалов, например таких, как нанокристаллы, которые нельзя получить из жидкого или кристаллического состояний.

Изучение превращений, происходящих при кристаллизации, и влияния на них химического состава представляет не только познавательный интерес, но имеет важное практическое значение. В первую очередь, развитие этих процессов іесно связано с проблемой термической стабильности аморфных материалов. Кроме і ого, контролируемая частичная или полная кристаллизация обеспечивают формирование такой структуры, которая может быть полезной для практических целей (в частности, удается повысить высокочастотные магнитные свойства или создать сверхпрочные микрокристаллические материалы).

Существенно отличными могут быть условия кристаллизации в радиационном поле, например, при облучении нейтронными потоками или ионными пучками. Можно предположить, что в этом случае атомные кластеры, образующиеся в аморфной матрице перед кристаллизацией, формируются с участием радиационных точечных дефектов, в результате условия фазообразования изменяются Облучение иошіьіми пучками аморфных материалов может оказаться удобной технологией получения заданных неравновесных состояний, поскольку в этом случае мы можем контролировать температуру и уровень радиационного воздействия. Кроме того, исследование радиационно-индуцированных превращений при кристаллизации позволяет глубже изучить природу процессов, происходящих при переходе аморфной структуры в кристаллическую.

Целью работы являлось:

РвС. НАЦИОНАЛЬНАЯ | БИБЛИОТЕК СИ 09

г\цпипп<1В"пя I

ІБЛИОТЕКА |

1) Комплексное изучение кристаллизации аморфных сплавов на основе кобальта и железа под воздействием пучков заряженных ионов, а также лазерного облучения и сравнение происходящих процессов с превращениями при обычном отжиге.

2) Исследование сопутствующих изменений свойств аморфных сплавов, относящихся как к ионной, так и к электронной подсистемам

3) Изучение эффекта дальнодействия (аномально глубокого проникновения фронта радиационных повреждений в вещество при ионном облучении) для материалов различной природы, в том числе для керамических и аморфных сплавов.

Научная новизна работы.

• Проведено комплексное исследование кристаллизации аморфных сплавов на основе кобальта и железа под воздействием ионного облучения (Аг+, 30 кэВ).

• Впервые обнаружено явление возврата к аморфному состоянию при пострадиациошплх отжигах в температурном тггервале между началом радиацпонно-индуцированной и кристаллизации при отжиге.

• При кристаллизации аморфных сплавов на основе железа обнаружено существенное изменение электронной подсистемы этих сплавов -абсолютный коэффициент термоЭДС значительно уменьшается, что косвенно свидетельствует о повышении вклада ковалентной составляющей связи -"диэлектризации" сплава. Данное явление подтверждено в экспериментах, выполненных методом ядерной гамма-резонансной спектроскопии (ЯГРС), где наблюдалось увеличение изомерного сдвига, т.е. уменьшение плотности электронных состояний в облученных образцах. В сплавах на основе кобальта подобный эффект не обнаружен.

• Проведены эксперименты по исследованию эффекта дальнодействия. Показано, что данный эффект носит универсальный характер -он наблюдается, кроме кристаллических, также в керамических и аморфных материалах.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что полученные в данной работе экспериментальные результаты и сформулированные выводы позволяют продвинуться в понимании природы аморфного состояния, наметить пути радиационного модифицирования свойств аморфных сплавов и условия получения радиационно-стойких материалов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обнаружены существенные отличия процессов фазообразования при кристаллизации аморфных сплавов на основе кобальта и железа с одной стороны, в радиационном поле и, с другой стороны, при отжиге, что проявляется в значительном температурном сдвиге начала кристаллизации при облучении.

2. Впервые обнаруженное явление "возврата" при пострадиационном отжиге сплавов на основе кобальта в температурном интервале между началом радиационно-индуцированной кристаллизации и кристаллизации при отжиге. Такая обработка приводит к растворению кристаллических зародышей и возврату вещества в аморфное состояние.

2

3. Экспериментально зарегистрированное изменение электронной подсистемы аморфных сплавов на основе железа в процессе кристаллизации В сплавах на основе кобальта данный эффект не зарегистрирован.

4. Эффект дальнодействия - аномально глубокое проникновение фронта радиационных повреждений в вещесіво - имеет универсальный характер и наблюдается для материалов различной природы, кристаллических, керамических и аморфных.

Личный вклад автора.

• Проведение экспериментов по исследованию структуры и свойств аморфных сплавов в процессе кристаллизации, обработка и обсуждение полученных результатов.

• Участие в постановке задач исследования, планировать и выполнение экспериментов, обсуждение результатов.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. V Международный Уральский семинар "Радиационная физика

металлов и сплавов" (Снежинск, 2003).

2. VII Международный семинар "Структурные основы модификации

материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ - VII)" (Обнинск,

2003).

3. XVT Международная конференция "Взаимодействие ионов с

поверхностью" (Звенигород, 2003).

4 Всероссийская конференция сгудентов-физиков и молодых ученых

ВНКСФ-10 (Москва, 2004).

5 II Межрегиональный семинар "Нанотехнологии и фотонные кристаллы"

(Калуга-Москва, 2004).

6. 2-ая Международная конференция "Физика электронных материалов" (Калуга, 2005).

7. VIII Международный семинар "Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ - VIII)" (Обнинск, 2005).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, основных выводов, списка цитируемой литературы из 120 наименований, содержит 143 страницы машинописного текста, включая 36 таблиц и 38 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследования, научная и практическая значимость, научная новизна, перечислены основные положения выносимые на защиту

В первой главе приведен обзор и анализ литературных данных но теме

)

диссертации. Пункт 1 1 обзора посвящен структуре и свойствам аморфных сплавов Особенности фазовых превращений в аморфных сплавах при нагреве описаны в пункте 1.2. Пункт 1.3. посвящен обзору экспериментальных работ по влиянию облучения на структуру и свойства аморфных сплавов Теоретические и •экспериментальные данные но эффекгу дальнодействия при ионном облучении представлены в пункте 1.4

В заключение обзора сформулирована цель и поставлены задачи исследоваття

Во второй главе приведены данные об исследуемых образцах, описана методика выполненных экспериментов.

Исследовались аморфные сплавы на основе кобальта системы Co-Fe-Si-B, в гом числе сплавы с добавками хрома и марганца: Co-Fe4 9-Siu9-Bio - 84КСР; Co-r-'e37-Sii2 4-C.T,7-Bii2 - 84КХСР; Co-Fe^-Siis-MnjpBis; - 86КГСР, а также аморфные сплавы на основе железа - Fe-Crm-Bi5 и Fe-Nb-Si|4-B7 Сплавы были получены традиционным методом спиннингования и представляли собой ленты шириной 13 мм (сплавы на основе Со) и 8мм (сплавы на основе Fe) и толщиной 20-30 мкм. Все дальнейшие исследования, а также облучение образцов проводились с внешней (не примыкающей к барабану) стороны аморфной ленты.

Исходные образцы, согласно реіптендифрактометрическим данным, находились в аморфном состоянии.

Далее сплавы облучали в ионном ускорителе «Vita» ионами Arf с энергией 30 кэВ и плотностью тока 50 мкА/см (что соответствует скорости создания смещений в материале 10|4сна/см2с) до флюенса 1.510 ион/см2 при различных температурах мишени (100-600°С). В данной установке ионизация нейтральных атомов- аргона осуществляется при помощи дугового электрического разряда с накальным катодом. Ионы извлекаются из области их генерации электростатическим полем, фокусируются и ускоряются до соответствующей энергии. Для сравнения сплавы также отжигали в вакууме 10"\* Па в течение 1 часа, что соответствует времени нахождения образца в ускорителе при облучении до данной дозы.

Кроме того, образцы подвергали лазерному облучению с использованием непрерывного ССЬ-лазера на специальной установке с непрерывным лазерным нагревом, обеспечивающей протяжку аморфной ленты через зону действия пучка с одновременным теплоотводом от нагретой ленты во вращающийся охлаждающийся металлический барабан. Сфокусированный лазерный пучок сканировали но поверхности ленты перпендикулярно направлению протяжки ленты с частотой 200-400 Гц. Диаметр лазерного пятна был равен 0,5 мм, диапазон мощности - 3 - 5 кВт, коэффициент отражения - 30 %.

Состояние образцов оценивалось ренттендифрактометрически с помощью дифрактометра ДРОН-2.0 с компьютерной регистрацией и обработкой результатов. Для исследования выбрано мягкое Сг Ка-излучение (информативный слой составляет ~2мкм), поскольку предполагалось, что радиационно-поврежденный слой неоднороден. Кроме тот, измеряли

4

микротвсрдость образцов на микротвердомере I FKO М-400А Гфуктуру іакже

исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на

трансмиссионном микроскопе JKM-200CX Температурные зависимости

термоЭДС измерялись интегральным методом, в котором температуру Tt

одного из спаев термопары поддерживакл все время постоянной, а разность

потенциалов Е измеряют в зависимости or температуры Тг другого спая.

Основой прибора для измерения термоЭДС послужил микротвердомер ПМТ-3.

в котором алмазную пирамидку с держателем заменили приспособлением с

иглой из вольфрама. В используемом приборе исследуемый образец приводился

' в контакт с вольфрамовой иглой, снабженной микроиечыо.

Проводился также дилатометрический анализ образцов

В третьей главе представлены резутътаты исследования процесса

' кристаллизации в аморфных сплавах на основе кобальта и желе іа в

радиационном ноле, под влиянием лазерною воздействия, а также при ОІЖИІС.

При кристаллизации данных сплавов обнаружен существенный сдвиг (200°-300°С) начала радиационно-индуцированной кристаллизации в область более низких температур по сравнению с началом кристаллизации при температурном воздействии

На рис. 1 приведены рентгенограммы сплава Co-Fe4<rSi|4 9-Bin> п облученном и отожженном состояіши при различных температурах облучения и отжига. Как видно из рисунка, при облучении кристаллизация начинается при температуре мишени 100°С. С повышением температуры облучения дифракционные пики становятся значительно уже, что указывает на увеличение размера кристаллических образований. Кристаллизация при отжиге аморфных образцов этого сплава начинается при существенно более высоких температурах - при 200°С сплав все еще остается аморфным, а при 300°С начинается интенсивная кристаллизация, причем с самого начала дифракционные пики кристаллических фаз заметно более узкие, чем при облучении Это означает, что кристаллические образования при отжиге больше по размеру.

Можно предположить, что такой значительный температурный сдвиг нельзя объяснить только радиационным ускорением процесса кристаллизации; по-видимому, он связан с различиями кинетики фазообразования в радиационном поле и при отжиге аморфных сплавов.

Дифрактограммы аморфного сплава Co-Fe4 9-Si|4<.rBm до и после лазерного облучения сканирующим непрерывным лазерным пучком различной мощности показаны на рис. 2 При небольших мощностях сплав остается аморфным. Однако, при некоторой промежуточной мощности появляются линии кристаллических фаз - борид и твердый раствор кобальта, те те же фазы, что и при облучении ионными пучками.

При увеличении мощности лазерного облучения количество линий, соответствующих кристаллическим фазам, уменьшается - остаеіся лишь линия борида кобальта, при дальнейшем увеличении мощности остается только аморфное гало. И лишь при максимальной мощности (вблизи і очки плавления

5

сплава) вновь наблюдается крисгалличсская линия борида кобальта r}io приводит к выводу, что в случае лазерной обработки имеет место сложное переплетение температурного и радиационного воздействия

\*Vb\*K &"\*^У\*\*\*\*т<

 1 n " і 1 і

20, град 29, град

а) б)

Рис. І. Дифрактоїраммы сплава Co-Fe49-SiM9-Biu, полученные а) после облучения ионами Аг\ б) после термической активации

J - бориды (СоВ, Со2В. СозВ), ^ - твердый раствор кобальта, t - Согйі

щ?

w\*\*\*\*^"\*\*\*^

исходный

w-M-v\*'\*1^

200°С

tl/v.tt

300"C

I 1 1 I 1 I 1

9 Я ■ Є Я S ■

300"C

I—-

Кристаллизация сплавов во всех случаях сопровождалась их сильным упрочнением, при этом наблюдается следующая особенность. В случае термической кристаллизации максимум микротвердости совпадает с началом появления дифракционных пиков. Однако при кристаллизации в радиационном поле картина другая - максимум микротвердости, соответствующий почти двукратному упрочнению, для всех исследованных сплавов сдвинут в область более высоких температур по сравнению с началом кристаллизации, т.е. сплав оказывается наиболее твердым в аморфно-кристаллическом состоянии, при определенном соотношении объемных долей аморфной и крисгаллической фаз и при определенных размерах кристаллитов. Очевидно, что это связано с отличиями фазообразования в радиационном ноле и при отжиге На рис. З, в качестве примера, приведена зависимость микротвердости от температуры облучения для сплава Co-Fe4 9-Sii4 9-B|o (температура начала ралиационно-индуцированной кристаллизации этого сплава по дифракционным данным равна Ю0°С).

6

Я f ш в

в ■ ■ я

20

Рис. 2. Дифрактограммы (Сг Ка излучение) аморфного сплава Co-Fe49-Sii4 9-Bio,

Т

и лазерном воздействии различной мощности - бориды (СоВ, С02В, СозВ), \* - твердый раствор кобальта, ^ - Co2Si

200 300 400 500

Товл, 'С

Рис. 3. Зависимость микротвердости сплава Co-Fe49-Sii4 9-Bio от температуры облучения

При исследовании сплавов на основе кобальта (сплав с добавлением марганца) был обнаружен эффект, который мы назвали явлением возврата. Как уже говорилось, радиационно-индуцированнзя кристаллизация и кристаллизация при отжиге имеют заметные отличия, что проявляется, во-первых, в снижении температурного порога формирования кристаллических зародышей в радиационном поле, и, во-вторых, в изменении распределения кристаллических зародышей и их размеров, что проявляется в смещении максимума микротвердости. Начало кристаллизации в сплаве с марганцем происходит при 200°С при облучении и только при 500°С при отжиге. Какова

природа превращений в аморфном сплаве в интервале температур от начала радиационно-индуцированной кристаллизации до начала кристаллизации при отжиге? Для выяснения этого были проведены пострадиационные отжиги сплава в этом температурном интервале.

На рис. 4 показана дифрактограмма сплава с марганцем, облученного при 200°С. Видно из дифрактограммы, что в сплаве началась кристаллизация - на фоне гало появились дифракционные пики соответствующие появлению кристаллических фаз. Далее проводился отжиг этого сплава при температурах более высоких, чем температура мишени при облучении (250° и 300°С), но меньших, чем температура начала кристаллизации при отжиге (500°С). Оказалось, что такие отжиги приводят к «возврату» - сплав возвращается к аморфному состоянию, на дифрактограмме снова наблюдается гало. Здесь обнаруживается некоторая аналогия с результатами, полученными в экспериментах по механическому сплавлению, где также наблюдали амортизацию при нагреве. В этом случае аморфизация смеси порошков Ni и Zr, проводимая механической активацией в шаровой мельнице, прерывалась нагревом в калориметре. В процессе этого нагрева отмечено продолжение аморфизации той части смеси, которая не успела аморфизоваться при обработке в мельнице.

м

l»»и^^yVV^,^

Тобл.=200°С

-\*\*w\*ri\*\*^w^ws^M,

Тобл.=200°С Тотж.=250°С

Тобл.=200°С

Тсгж.=300°С

 1 1 1 \*■

60 70 80 26, град

1

Рис. 4. Дифрактограммы (Сг Ка- излучение) аморфного сплава Co-Fe3 2-Si2 5-Пз і-Вц 7 при пострадиационном отжиге - бориды (СоВ, СогВ, СозВ), f - твердый раствор кобальта

Явление возврата в аморфное состояние при пострадиационном отжиге было подтверждено электронно-микроскопическими экспериментами. На рис. 5 представлена электронограмма и темнопольное изображение сплава Co-Fe32-Si2 5-Мпз i-Bj5 7, облученного при 200°С, т.е. при температуре начала радиационно-индуцированной кристаллизации. На электронограмме на фоне гало, соответствующего аморфному сплаву, видны рефлексы от частиц

8

выделяющегося борида (Со3В) и твердого раствора. На темнопольном изображении видны частицы фазы Со3В, которые имеют характерную "полосчатую" структуру и, кроме этого, очень мелкие частички неизвестной природы, распределенные по аморфной матрице.

Рис. 5. Электронограмма и темнопольное изображение для образца сплава Со-Fe3.2-Si2.5-Mii3.i-Bi5.7, облученного при 200°С. Увеличение 100000

Рис. 6. Электронограмма и темнопольное изображение для образца сплава Со-Fe3 2-Si25-Mn3t-Bi5 7, полученные после пострадиационного отжига при температуре 300°С. Увеличение 100000

9

Электронограмма и темнополъное изображение этого сплава после пострадиационного отжига при температуре 300°С изображены на рис. 6. На электронограмме линия аморфного гало «чистая», без рефлексов от кристаллических зародышей, а на темнопольном изображении видно, что полностью исчезли мелкие частицы, а частицы метастабильного борида СозВ уменьшились и частично растворились в аморфной матрице.

Таким образом, при пострадиационном отжиге аморфного сплава на основе кобальта с добавкой марганца происходит возврат материала, в котором уже началась кристаллизация, в аморфное состояние.

Предположительно, в основе этого явления лежит разрушение зародышей

кристаллических фаз, образующихся с участием радиационных дефектов в

аморфной матрице. Можно полагать, что в процессе пострадиационного отжига

радиационные дефекты уходят на стоки. <•

Для оценки изменений электронной подсистемы аморфных сплавов в процессе кристаллизации были проведены измерения температурных зависимостей термоЭДС.

О состоянии электронной связи можно судить по абсолютному коэффициенту термоЭДС SCT^dE/dT, который представляет собой наклон температурной зависимости термоЭДС при данной температуре измерения. Из теории известно, что для переходных металлов абсолютный коэффициент термоЭДС зависит от плогеости состояний на поверхности Ферми. Таким образом, измерение величины S в исследуемых образцах дает возможность судить о качественном изменении состояния металлической связи.

Зависимость термоЭДС от температуры измерения облученных и

отожженных образцов сплава Fe-Crig-Ви приведена на рис. 7. Видно, что при

переходе от аморфного состояния к кристаллическому наклон кривых, и,

следовательно, абсолютный коэффициент термоЭДС, резко меняется. Эти

изменения свидетельствуют об увеличении вклада ковалентной составляющей •

некоторой "диэлектризации" сплава. Однако, изменения наклона кривых

температурных зависимостей термоЭДС появляются при температурах

существенно выше, чем температура при которой регистрируются первые ]

рентгеновские пики, этот сдвиг составляет 200вС.

Подобный эффект изменения электронной подсистемы был

зарегистрирован также для аморфного сплава на основе железа несколько \*

другого состава - Fe77Ni2Si]4B7. В этом случае использовался метод мессбауэровской спектроскопии в геометрии обратного рассеяния с регистрацией конверсионных электронов или резонансного рентгеновского излучения, дающих информацию с глубины образца 2000 А и 15 мкм, соответственно.

Анализ мессбауэровских спектров показал, что в облученном сплаве происходят необратимые изменения, в результате которых образуются области выделений, похожие по мессбауэровским параметрам на кристаллические фазы этого сплава, но только с гораздо большим значением изомерного сдвига. Увеличение изомерного сдвига говорит об уменьшении электронной плотности

10

(

на ядре атомов Fe, что также свидетельствует об изменениях в шектронной подсистеме.

Для аморфных сплавов на основе кобальта изменений в электронной подсистеме при кристаллизации обнаружено не было.

Можно высказать предположение, что данное обстоятельство связано с отличиями электронной подсистемы железа (ОЦК структура) и кобальта, поскольку считают, что в материалах с ОЦК структурой более существенна доля ковалентной связи.

а)

100 150-200 250 300

б)

Рис. 7. Зависимость термоЭДС сплава Fe-Сгц-Ви, облученного (а) и аі ожженного (б) при различных температурах, о г темнерагуры измерения

Кристаллизация аморфных сплавов обычно представляет собой двустадийный процесс. Для аморфных сплавов на основе кобальта и железа были проведены дилатометрические исследования. Результаты этого эксперимента говорят о том, что и в случае аморфных сплавов на основе кобальта, и в случае сплавов на основе железа крисі аллизация протекает в два этапа, на кривых температурной зависимости КТР наблюдается два максимума.

Четвертая глава посвящена исследованию эффекта дальнодействия -

и

аномально глубокого проникновения фронта радиационных повреждений в вещество в кристаллических, керамических и аморфных материалах.

Данный эффект длительное время находится в центре внимания исследователей взаимодействия излучения с веществом, поскольку он тесно связан с природой процессов, индуцированных облучением

Имеются многочисленные косвенные указания на то обстоятельство, что радиационные повреждения проникают значительно глубже, чем это предсказывается существующими моделями. При расчетной глубине проникновения облучающих ионов и радиационных точечных дефектов на расстояния порядка сотни ангстрем радиационно-измененный слой может простираться на глубины в десятки и сотни микрон, что показано различными методами исследования. Поскольку природа эффекта не может считаться выясненной, представляет интерес исследование дальнодействия в материалах различной природы, поскольку это позволяет глубже изучить процессы взаимодействия излучения с веществом.

• Примером проявления данного эффекта являются результаты,

полученные в наших экспериментах для облученного кристаллического сплава

типа нимоник (Ni-Cr-Fe-Mo-Ti-Al). Были сделаны поперечные сечения по

диаметру облученного пятна, при этом исследовалось изменение структуры и

свойств сплава по глубине образца.

Сплав предварительной термообработкой был приведен в состояние твердого раствора Известно, что при старении данного сплава образуется когерентно связанная с матрицей у'-фаза, упрочняющая материал. При воздействии ионами аргона вблизи облученной поверхности образовался слой выделений этой фазы, по-видимому, вследствие радиапионно-стимулированного распада твердого раствора. Слой имеет четкую границу, толишна его составляет 30 мкм, что на несколько порядков превышает глубину радиационно-поврежденного слоя, предсказываемую теорией.

Изменение микротвердости после облучения произошло в приповерхностном слое протяженностью 30 мкм, что совпадает с величиной слоя выделений у'-фазы.

• Эффект дальнодействия также был обнаружен в керамическом

сплаве ВК8. При исследовании поперечных сечений облученных образцов этого

сплава было обнаружено, что изменение микротвердости произошло не только

на поверхности материала, но и в приповерхностном слое, протяженностью 30 -

40 мкм.

При металлографическом исследовании поперечных срезов облученных образцов обнаружено, что при радиационном воздействии в этом сплаве образуется «радиационный белый слой» (слой измененной травимости), толщина которого примерно совпадает с глубиной радиационно-упрочненного слоя.

• При исследовании аморфных сплавов на основе железа и кобальта

также был обнаружен эффект дальнодействия. Образцы этих сплавов,

облученные при температуре начала радиационно-индуцированной

12

кристаллизации, исследовались рентгенографическим методом.

Толщина аморфных лент исследуемых сплавов, как уже говорилось, составляла 20-30 мкм, т.е. существенно превышала теоретическую глубину проникновения радиационных повреждений Рентгенограммы снимались в облученном пятне, а также радом с пятном с исоблученной и облученной стороны Было обнаружено, что с обратной стороны облученного пятна наблюдаются те же линии кристаллических фаз, что и в пятне с облученной стороны, но меньшей интенсивности. Это значит, что при облучении аморфных сплавов ионами Аг+ толщина радиационно-поврежденного слоя составляет не менее 20-30 мкм. На рентгенограммах, снятых рядом с пятном с облученной и необлученной стороны, наблюдается аморфное гало, как в исходном необлученном образце. Результаты этого эксперимента приведены на рис. 8.

Таким образом, можно утверждать, что в исследованных аморфных сплавах имеет место эффекг дальнодействия - толщина радиационно-поврежденного слоя составляет величиїгу не менее 20-30 мкм при расчетной глубине проникновения облучающих ионов и радиационных точечных дефектов на расстояния порядка сотни ангстрем.

облученная сторона необлучеішая сторона

y\*w\*\>

в пятне

мЛАи. РЯДОМ С ПЯТНОМ .^fiHi.

——T—' г ■ 1 1 1 1 1 1 li 1 1 г 1

ss и и я is » as s <• is и в • E

26, град 2Є, град

Рис. 8. Дифрактограммы сплава Fe-Сгц-Ви, полученные с облученной и необлученной стороны образца

Итак, при исследовании образцов различных материалов, облученных ионами, как представляется, получены прямые доказательства существования глубоких радиационно-измененных слоев, толщина которых на порядки превышает величины, предсказываемые теорией. Эти доказательства получены различными методами для кристаллических (сплав нимоник Ni-Cr-Fe-Mo-Ti-А1), керамических (сплав ВК8) и для аморфных материалов (сплавы Co-Fe4<r SiM9-B,o; Co-Fe3rSi,24-Cr37-Bll2; Co-Fe32-Si2,-Mn3rBl57, Fe-Cr,»-B,5). Понимание природы этого эффекта требует дальнейшего тщательного исследования.

'Эффект дальнодействия, кроме несомненного практического значения,

13

играет важную фундаментальную роль в развитии теории взаимодействия излучеїшя с веществом Возможно, данный эффект есть внешнее проявление различных радиационно-индуцированных процессов, в зависимости от типа материала и уровня радиационного воздействия. Совокупность приведенных фактов позволяет предполагать, что в случае металлов и при высоких уровнях радиационного повреждения, как в наших экспериментах, в основе эффекта лежат радиационно-индуцированные кооперативные процессы, при которых реализуется гидродинамическое течение в материале, пересыщенном точечными дефектами.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

• Проведено комплексное исследование процессов радиациошю-индуцированной кристаллизации для аморфных сплавов на основе железа и кобальта.

• Обнаружено, что начало радиационно-индуцированной кристаллизации, сдвинуто в область более низких температур по сравнению с кристаллизацией при отжиге, что предположи-! елыю вызвано различиями в механизмах фазообразования.

• Максимальное упрочнение сплавов при кристаллизации в случае радиационного воздействия сдвинуто в область более высоких температур, что, по-видимому, связано с определенным размером кристаллических образований.

• Впервые обнаружено явление возврата аморфного состояния в процессе пострадиационного отжига аморфных сплавов на основе кобальта - отжиг в температурном интервале между началом радиационно-индуцированной кристаллизации и началом кристаллизации при отжиге приводит к растворению образовавшихся после облучения кристаллических образований и возвращению материала в аморфное состояние.

• Показано, что в результате кристаллизации аморфных сплавов на основе железа существенно изменяются характеристики электронной подсистемы -уменьшается плотность электронных состояний. В сплавах на основе кобальта подобный эффект не наблюдается.

• Изучен эффект дальнодействия при ионном облучении (эффект аномально глубокого проникновения фронта радиационных повреждений в вещество) для металлических, металлокерамических и аморфных материалов. Установлено, что это явление носит универсальный характер для материалов различной природы.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах.

1. Структурные изменения в твердом сплаве ВК8 при ионном облучении / АН. Иванов, B.C. Хмелевская, И.А. Антошина, А.Б. Коршунов // Перспективные материалы. - 2003. - №1. - С. 89-92.

14

2. Радиационная стабильность и свойства аморфных материалов на основе сисгем Fe-Co-Si-B и Fe-Cr-B, полученных закалкой из жидкого состояния / В Г. Малынкин, B.C. Хмелевская, И.А. Антошина и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования - 2004. - №12. -С. 65-70.

3. Кристаллизация аморфных сплавов на кобальтовой основе в радиационном поле и явление возврата аморфной фазы / B.C. Хмелевская, B.C. Крапошин, И.А. Антошина и др // Материаловедение. - 2005 - №3. - С. 23-29.

4. Антошина И.А., Хмелевская B.C. Радиациошю-индуцированная кристаллизация аморфных материалов // Радиационная физика металлов и сплавов: Тезисы докладов V Международного Уральского Семинара,-Спежинск, 2003. - С. 67.

5. Антошина И.А., Хмелевская B.C. Особенности кристаллизации аморфных материалов на основе железа и кобальта в радиационном поле // Структурные основы модификации материалов метолами нетрадиционных технологий: Тезисы докладов на Международном семинаре. - Обнинск, 2003.-С. 16-17.

6. Радиационная стабильность и свойства аморфных материалов на основе систем Fe-Co-Si-B и Fe-Cr-B, полученных закалкой из жидкого состояния / В.Г. Малынкин, B.C. Хмелевская, И.А. Антошина, М.А. Маряхин // Взаимодействие ионов с поверхностью: Материалы Международной конференции. - Звенигород, 2003. - С. 170-173.

7. Антошина И.А. Радиационно-ипдуцированиая кристаллизация аморфных сплавов на основе железа и кобальта // Сборник тезисов десятой Всероссийской конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-10) -М.,2004.-С. 1158-1159.

8. Хмелевская B.C., Крапошин B.C., Антошина И.А. Аморфно-кристаллические состояния, индуцированные облучением в сплавах на основе кобальта // Нанотехнологии и фотонные кристаллы: Материалы II Межрегионального семинара. - Калуга, 2004. - С. 253-254.

9. Радиационно-индуцированная кристаллизация аморфных сплавов на основе железа и кобальта, полученных закалкой из жидкого состояния / B.C. Хмелевская, В.Г. Малынкин, И.А. Антошина, Т.В. Тарасова // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. -Калуга, 2003. - Вып. 4. - С. 72.

10. Klunelevskaya V.S., Antoshina LA. Radiation-induced transformations in Co-based amorphous alloys II Physics of Electronic materials: 2M International Conference Proceedings. - Kaluga, 2005. - P. 64.

11. Антошина И.А. Структурные превращения при кристаллизации аморфных сплавов на основе железа и кобальта при радиационном воздействии // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий: Тезисы докладов на Международном семинаре. - Обнинск, 2005. - С. 64-65.

is

12 Процессы структурной перестойки в аморфном сплаве после облучения ничкоэнергетическими ионами \* Аг / А.А Новакова, Д.С. Голубок, B.C. Хмелевская, И. А Антоигипа // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий: Тезисы докладов на Международном семинаре. - Обнинск, 2005. - С. 89-90.

>

Антошина Ирина Александровна

Структурные превращения в аморфных сплавах на основе кобальта и железа, индуцированные ионным облучением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Подписано в печать "11 "ЦГОНЛ 2005г. Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага типографская № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.0. Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ Ш2.^/0

Московский государственный

технический университет имени Н.Э. Баумана

Калужский филиал

248600, г. Калуга, ул. Баженова, 4.

\*1830

8

РНБ Русский фонд

2006-4 18438

S\*

Ґ