

На правах рукописи

МАХИНЬКО Фёдор Фёдорович

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ
ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2014

Работа выполнена в Институте электрофизики
Уральского отделения Российской Академии Наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
ОВЧИННИКОВ Владимир Владимирович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук,
ГУЩИНА Наталья Викторовна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
ОКОНЕЧНИКОВ Александр Петрович

доктор физико-математических наук,
профессор
ШАРКЕЕВ Юрий Петрович

Ведущее предприятие: Институт физики металлов УрО РАН

Защита состоится «28» октября 2014 года в 15-00 ч. на заседании диссертационного совета Д004.024.01 при Институте электрофизики УрО РАН по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Института электрофизики УрО РАН

Автореферат разослан « » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Сюткин Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Использование пучков ускоренных ионов энергиями в диапазоне от нескольких единиц до нескольких сотен кэВ послужило основой для создания ряда прорывных технологий, внедряемых в настоящее время в практику обработки конструкционных материалов, с целью обеспечения повышенного уровня свойств, не достижимого с применением традиционных методов обработки.

К сожалению, пробеги ионов вышеуказанных энергий в веществе измеряются в лучшем случае всего лишь несколькими десятками или сотнями нанометров. Модифицируемая зона такой глубины явно недостаточна для большинства технологических применений. На практике при облучении непрерывными пучками ионов вышеуказанных энергий обычно наблюдаются две ситуации. Первая – это, когда глубина воздействия недостаточна для обеспечения необходимых свойств. Вторая – когда есть положительный эффект, и глубина воздействия значительно превосходит глубину проникновения ионов, но нет полной ясности в том, чем обусловлен такой эффект.

В связи с этим **актуально** дальнейшее исследование природы **эффектов дальнего действия** при ионном облучении и целенаправленное применение приобретаемых знаний для модификации не только поверхностных, но и объемных свойств материалов пучками ускоренных ионов.

Увеличить протяженность модифицируемой зоны до нескольких десятков микрометров удастся с использованием *мощных непрерывных низкоэнергетических* пучков ионов *малого радиуса* и *мощных наносекундных импульсных* пучков ионов [1]. Результатов, сравнимых по глубине воздействия, удастся достичь также *с использованием высокодозной имплантации* [2], благодаря генерации дислокаций в статических полях напряжений от внедряемых примесей, перемещаемых вглубь материала.

Совмещение ионной имплантации с другими методами (*Ion Mixing* и *Ion Assisted Deposition* и т.п.), также как и привлечение *высокоэнергетической* ионной имплантации связано с существенным усложнением и удорожанием процесса, при сопоставимой глубине модифицируемого слоя.

Однако для многих технических применений было бы желательно увеличить глубину влияния ускоренных ионов на структуру и свойства материалов еще как минимум на 1-2 порядка, что позволило бы модифицировать *субмиллиметровые* и *миллиметровые* слои материалов при их поверхностном облучении.

Из расчетов с использованием методов Монте-Карло и молекулярной динамики [3-5] следует, что нанообласти плотных каскадов атомных смещений являются зонами взрывного энерговыделения с образованием сильно разогретых областей («термических пиков»). Температура таких областей, термализирующихся за время порядка 10^{-12} с, составляет до 5000-6000 К и выше. Быстрое повышение давления в этих областях является причиной эмиссии послекаскадных ударных волн [2,8,7].

К сожалению, данные **экспериментального** определения **параметров энерговыделения** в плотных каскадах атомных смещений отсутствуют. Получение этих данных могло бы явиться подтверждением факта радиационно-

динамического воздействия пучков ускоренных ионов на вещество и уточнения степени интенсивности такого воздействия, что может быть использовано для целенаправленной модификации структуры и свойств материалов.

В термодинамически *стабильных* средах эмиттируемые областями плотных каскадов уединенные волны быстро затухают [7], в радиусе нескольких десятков нанометров. В то же время феноменологическое и гидродинамическое описание этих процессов в *метастабильных* средах с повышенной запасенной энергией [5] свидетельствуют о возможности незатухающего режима распространения послекаскадных волн, совершающих на своем фронте структурно-фазовые превращения. Это открывает возможности модификации *субмиллиметровых* и *миллиметровых* поверхностных слоев материалов.

В работах [8, 9] уже показана возможность ускоренного *радиационного отжига* холоднодеформированных промышленных алюминиевых сплавов АМг6 (Al-Mg), 1441 (Al-Li-Cu-Mg) при пониженных температурах в качестве промежуточной операции между операциями прокатки. Ионно-лучевая обработка не приводит к активации (наведенной радиоактивности) материалов и не предъявляет каких-либо других особых требований в отношении безопасности. Являясь абсолютно экологически чистым процессом, эта технология может быть легко воспринята производством.

Промышленные сплавы ВД1 и Д16 относятся к деформируемым упрочняемым термообработкой сплавам системы Al-Cu-Mg с добавками Mn (дюралюмины). Основными легирующими примесями дисперсионно-твердеющих сплавов этой системы являются медь и магний, которые наиболее эффективно участвуют в процессах старения, образуя вторичные θ - и σ -фазы (CuAl_2 и CuMgAl_2 , соответственно). Все дюралюмины отличаются высокой прочностью в сочетании с высокой пластичностью. Это определило их широкое использование в качестве конструкционного материала в различных областях современной техники, в том числе, в самолетостроении. Поэтому представляет интерес исследовать воздействие ионного облучения на структуру и свойства вышеуказанных сплавов.

Алюминиевый сплав 1424 (Al-Mg-Li-Zn), разработанный в ФГУП «ВИАМ» (г. Москва), относится к сплавам третьего поколения. Он характеризуется пониженным содержанием лития и дополнительно легирован цинком. Сплав имеет пониженную плотность ($2,54 \text{ г/см}^3$), повышенные характеристики вязкости разрушения и трещиностойкости по сравнению с ранее разработанным сплавом 1420 и является альтернативой сплаву 1163-Т. Он характеризуется также повышенной удельной прочностью.

Серьезной проблемой является то, что холоднодеформированный сплав 1424 не восстанавливает свою пластичность в результате термического отжига до уровня, необходимого для его дальнейшей прокатки. Для восстановления пластичности этого сплава используют сложные технологические операции, включающие закалку в селитровой ванне карточным методом, в силу невозможности рулонного отжига в печи.

В связи с этим является **актуальной** задача **разработки технологии** быстропротекающего холодного радиационного отжига сплава 1424 мощными пучками ускоренных ионов, допускающей в перспективе возможность промышленной рулонной холодной прокатки этого сплава.

Целью диссертационной работы являлось:

- 1) экспериментальное определение интенсивности энерговыделения в области плотных каскадов атомных смещений в чистых металлах W, Zr, Fe, Al и сплаве 1424 в зависимости от режимов облучения ионами Ar^+ ;
- 2) использование эффектов взрывного энерговыделения при ионной бомбардировке для разработки основ технологии восстановления пластичности сплавов ВД1 и Д16 системы Al-Cu-Mg, а также трудно поддающегося термическому отжигу сплава 1424 системы Al-Mg-Li-Zn.

В соответствии с целью исследования были поставлены следующие **задачи**:

1. На основе исследования спектрального состава свечения чистых металлов и сплава 1424 в ходе ионного облучения определить параметры энерговыделения в плотных каскадах атомных смещений в зависимости от режимов облучения.
2. Исследовать воздействие пучков ускоренных ионов Ar^+ на структуру, фазовый состав и механические свойства холоднодеформированных сплавов ВД1, Д16 и 1424 при вариации режимов облучения (плотности ионного тока, температуры и флюенса).
3. Подобрать оптимальные режимы ионного облучения, обеспечивающие восстановление пластичности холоднодеформированных сплавов ВД1, Д16 и 1424.
4. Осуществить прокатку холоднодеформированных полос сплава 1424 от исходной толщины 7,3 до 1 мм с использованием радиационного отжига пучками ускоренных ионов аргона, взамен трудоемкой полистной обработки полос в селитровой ванне, аналогичной операции закалки.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

1. Экспериментально определены параметры энерговыделения в областях плотных каскадов атомных смещений в чистых металлах и сплаве 1424 при облучении ионами аргона энергией 5-20 кэВ, достигающие 0,3-0,5 эВ/ат. Соответствующие оценки температуры термализованных каскадных областей принимают значения в интервале 3600-6200 К. Быстрый разогрев этих областей за время $\sim 10^{-12}$ с до установленных экспериментально температур объясняет природу предсказанного теорией механизма эмиссии этими областями послекаскадных ударных волн, способных перестраивать метастабильные среды.
2. Изучены процессы изменения микроструктуры, фазового состава и механических свойств холоднодеформированных сплавов ВД1, Д16 и 1424 под воздействием ионного облучения.
3. Установлены режимы облучения, обеспечивающие наиболее полное восстановление пластичности сплавов ВД1, Д16 и трудно отжигаемого термически сплава 1424.
4. Разработаны основы технологии прокатки трудно поддающегося термическому отжигу алюминий-литиевого сплава 1424, предназначенного для использования в аэрокосмической технике, с применением операций радиационного отжига.

Практическая значимость работы.

1. Предложен метод экспериментального определения параметров энерговыделения в плотных каскадах атомных смещений, основанный на измерении и последующем анализе спектральной плотности свечения поверхности облучаемых ускоренными ионами металлических мишеней. В основе метода лежит измерение плотности энергетической светимости в ходе ионной бомбардировки с использованием спектрофотометра ОС-12 и аппроксимация экспериментальных зависимостей планковскими функциями спектральной плотности, отвечающими: 1) областям термических пиков и 2) объему интегрально разогретых в ходе облучения мишеней.

2. Экспериментально доказана возможность радиационного отжига холоднодеформированных листов сплавов ВД1 и Д16 системы Al-Cu-Mg толщиной 2-3 мм, а также трудно отжигаемых термически полос сплава 1424 системы Al-Mg-Li-Zn толщиной до 7,3 мм при одностороннем облучении пучками ускоренных ионов Ar^+ (при проективном пробеге внедряемых ионов, составляющем всего лишь несколько десятков нанометров). Ускоренный радиационный отжиг представляет собой альтернативу длительному печному отжигу при повышенных температурах.

3. Установлено, что в результате воздействия ускоренных ионов Ar^+ на *холоднодеформированный* сплав Д16 в зависимости от режима облучения могут быть обеспечены *различные свойства*, а именно: 1) при относительно невысоком флюенсе $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ наблюдается изменение относительного удлинения (\sim в 2 раза при постоянстве прочностных характеристик), 2) при последующем увеличении флюенса до $\sim 7,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ достигается увеличение относительного удлинения в 4,5 раза, предел текучести уменьшается на 110 МПа, что аналогично *отожженному* состоянию (но при более высоком значении предела прочности) и 3) при облучении флюенсом $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ формируемые свойства сплава Д16 близки к свойствам *закаленного* состояния. Эти результаты открывают новые возможности управления свойствами этого сплава.

4. Установлен диапазон *энергий ионов, флюенсов и плотностей ионного тока*, обеспечивающих необходимые по техническому регламенту свойства алюминиевых полуфабрикатов из сплава 1424 для их рулонной прокатки. Радиационный отжиг обеспечивает высокую скорость процесса, а также высокую однородность структуры и свойств металла. Рулонная прокатка сплава 1424 позволит увеличить выход годного металла, как минимум на 20-30 %, а также в 2-3 раза снизить энергозатраты и трудоемкость обработки

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. *Экспериментальные свидетельства* формирования в ходе облучения вблизи поверхности мишеней термических пиков (thermal spikes), представляющих собой разогреваемые в течение $\sim 10^{-12}$ с до температур порядка 3000-6000 К наноразмерные области взрывного энерговыделения, формирующиеся в ходе эволюции плотных каскадов атомных смещений. Результат получен впервые на основе анализа данных измерения спектральной плотности энергетической светимости поверхности металлических мишеней вольфрама (99,96 W), циркония (99,98 Zr), железа (99,99 Fe) и алюминия (99,5 Al), а также алюминиевого сплава 1424 при облучении ионами Ar^+ с энергией 5-20 кэВ.

2. Факт *радиационного отжига* холоднодеформированных сплавов ВД1 и Д16 системы Al-Cu-Mg, а также трудно отжигаемого термически холоднодеформированного сплава 1424 системы Al-Mg-Li-Zn ускоренными ионами Ar⁺ с энергией 20-40 кэВ при флюенсах $(0,7-3) \cdot 10^{17}$ см⁻² и более, обеспечивающего протекание процессов рекристаллизации во всем объеме образцов толщиной до 7,3 мм. Это приводит к существенному разупрочнению сплавов. Полученный *уровень свойств* в результате кратковременного облучения сплава пучками ускоренных ионов соответствует *регламентированному уровню*, при котором сплавы могут быть подвергнуты холодной прокатке. При этом время облучения значительно меньше длительности разупрочняющего отжига (1-2 ч) и составляет от нескольких десятков секунд до 2-5 минут.

3. Доказательство дальнедействующего характера воздействия ионной бомбардировки на структуру и свойства холоднодеформированных алюминиевых сплавов ВД1, Д16 системы Al-Cu-Mg и 1424 системы Al-Mg-Li-Zn. Подтверждение нетепловой природы этого эффекта: установлено отсутствие изменений структуры сплавов в отсутствие облучения (при точном воспроизведении режима нагрева ионным пучком). Достигнута рекордная глубина воздействия (более 7 мм) при одностороннем облучении полос алюминиевых сплавов. Проективные пробеги ионов во всех случаях не превышали 100 нм.

4. Основы технологии холодной прокатки полос алюминиевого сплава 1424 с помощью кратковременных промежуточных радиационных отжигов (ускоренными ионами Ar⁺, 20-40 кэВ) взамен применяемых для этого в ходе холодной прокатки сложных технологических операций полистной обработки, включающих операции выдержки в селитровой ванне (аналогичные нагреву под закалку).

Достоверность результатов обеспечивается согласием оценок температуры термических пиков, полученных на основе анализа спектрального состава свечения металлических мишеней, с косвенными данными по ионному распылению и результатами молекулярно-динамическими расчетов методом TRIM [3]. Кроме того, имеет место достаточно хорошее согласие экспериментальных данных с планковской теорией теплового излучения. Это подтверждает наличие наноразмерных зон взрывного энерговыделения в металлах при ионной бомбардировке. Радиационно-динамическая природа быстропротекающего отжига пучком ускоренных ионов аргона подтверждается отсутствием заметных изменений структуры и свойств сплавов ВД1 и 1424 при их обычном печном нагреве в отсутствие облучения, в условиях воспроизведения теплового режима воздействия пучка ионов. Наличие структурных изменений в сплаве зафиксировано независимо методами металлографии и электронной микроскопии. Все обнаруженные эффекты подтверждены на нескольких независимых партиях образцов и согласуются с рядом аналогичных результатов, полученных на сплавах АМ6, и 1441.

Апробация работы. Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, доложены и обсуждены на следующих Международных и Российских совещаниях, конференциях и семинарах: XV, XVI, XVII Международных совещаниях «Радиационная физика твердого тела»

(Севастополь, 2005, 2006, 2007); III, VII Всероссийских научно-технических конференциях «Физические свойства металлов и сплавов» (Екатеринбург, 2005, 2013); VI, IX и X Международных Уральских семинарах «Радиационная физика металлов и сплавов» (Снежинск, 2005, 2011, 2013); IX Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Беларусь, Минск, 2011) и на 11th International Conference "Gas Discharge Plasmas and their Applications" (Томск, 2013).

Личный вклад соискателя заключается в проведении работ по облучению материалов на ионном имплантере, изготовлении необходимой оснастки и аппаратуры для позиционирования, крепления, термического подогрева образцов, мониторинга температуры и измерения спектров свечения мишеней в ходе облучения. Это же касается приготовления партий образцов для металлографических и электронно-микроскопических исследований. Соискатель самостоятельно выполнял расчеты геометрических параметров каскадов атомных смещений, величины и скорости энерговыделения в каскадах при облучении пучками ионов различных энергий методом TRIM [3], а также с использованием специально разработанной программы КБИ-1 (на основе решения кинетического уравнения Больцмана [10]). Осуществлял анализ полученных данных, участвовал в подготовке материалов для научных конференций и написании научных статей.

Публикации. Основные результаты *по теме диссертации* опубликованы в 13 научных работах, среди которых: 4 статьи в рекомендуемых ВАК РФ рецензируемых журналах и 5 статей в сборниках трудов конференций.

Структура и объем работы. Диссертация содержит следующие разделы: введение, 4 главы основного текста, заключение и список цитированной литературы. Общий объем диссертации 150 страниц, в том числе 62 рисунка, 11 таблиц. Список литературы включает 171 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научные положения, выносимые на защиту. Дана оценка научной новизны и практической значимости работы.

В **первой** главе приведен анализ литературных данных, касающихся воздействия различных видов ионизирующих излучений на конденсированные среды. Наиболее подробно рассмотрены вопросы, связанные с воздействием тяжелых ионов на метастабильные среды, т. е. среды с повышенной запасенной энергией. Теоретически показано [5-7], что при определенных условиях ионная бомбардировка может инициировать в таких средах самораспространяющиеся вглубь вещества структурно-фазовые превращения на фронте послекаскадных ударных волн. Глубина воздействия на структуру и свойства конденсированных сред при этом может увеличиваться вплоть до нескольких миллиметров и более (в зависимости от параметров внешнего воздействия и отклика среды) [5, 8].

Условия инициирования самораспространяющихся превращений в метастабильных средах определяются, согласно [5], следующими соотношениями:

$$(\alpha\tau)^{1/2} \ll R_o \ll (E / (4/3\pi n \Delta f))^{1/3}, \quad (1)$$

где $R_o = (\Delta R_{||} \Delta R_{\perp}^2)^{1/3}$ – эффективный радиус каскада атомных смещений (различие среднего продольного и поперечного размеров каскада для тяжелых ионов, $M \geq 10$ а.е.м., в тяжелых матрицах не превышает нескольких процентов), $l = (\alpha\tau)^{1/2}$ – характерная длина теплопроводности (α – коэффициент теплопроводности), $\tau \sim 10^{-12}$ с – время термализации каскада атомных смещений, E – энергия ускоренного иона, выделяемая в плотном каскаде, n – атомная плотность среды (м^{-3}), Δf – энергия потенциального барьера превращения в расчете на атом среды.

Первое из неравенств в соотношении (1) означает, что радиус каскада атомных смещений должен существенно превышать характерную длину теплопроводности, чтобы тепло не успело «убежать» из области каскада за время его термализации. Результаты последних прямых расчетов эволюции каскадов атомных смещений [4] позволяют с уверенностью считать, что это условие выполняется.

Второе условие требует, чтобы плотность энергии ϵ , выделяемой в области каскада атомных смещений (в расчете на один атом каскада), была достаточна для преодоления потенциального барьера Δf , в результате чего инициируется превращение метастабильной среды в состояние с более низкой свободной энергией. Оценки показывают, что практически для всех типов структурно-фазовых превращений в конденсированных средах это условие также выполняется.

Дан обзор экспериментальных данных о воздействии ускоренных ионов на структуру и свойства алюминия и его сплавов. Отмечено, что число исследований, посвященных влиянию ионного облучения на структурно-фазовое состояние сплавов алюминия, невелико. Это в основном работы, выполненные с использованием мощных импульсных ионных пучков, а также работы с использованием высокоэнергетической ионной имплантации.

В последние годы, в результате исследования процессов, протекающих в холоднодеформированных алюминиевых сплавах в ходе воздействия на них пучков ускоренных ионов, было обнаружено явление ускоренного радиационного отжига этих сплавов при пониженных температурах [8, 9].

Время протекания процессов радиационно-динамической природы (от их начала до завершения), которые удается инициировать корпускулярным облучением при аномально низких температурах ($T \ll T_c$), на один-два порядка меньше времени завершения термостимулированных процессов вблизи температурного порога T_c начала их протекания ($T > T_c$).

Во второй главе приведены сведения о химическом составе используемых в работе материалов, оборудовании и методах ионной имплантации, а также об оборудовании и методике проведения экспериментов по получению спектров свечения металлических мишеней. Описаны методы исследования структуры и механических свойств сплавов ВД1, Д16 и 1424.

Листы сплава ВД1 толщиной 2 мм, сплава Д16 толщиной 3 мм и сплава 1424 толщиной 7,3 мм были изготовлены на ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (ОАО «КУМЗ») путем их холодной прокатки. Для проведения экспериментов по облучению из исходных листов сплава ВД1 были изготовлены стандартные разрывные образцы для испытаний на одноосное растяжение (ГОСТ 1497-84), листы сплава 1424 были разрезаны на небольшие

образцы размером $45 \times 35 \times 7,3$ мм с таким расчетом, чтобы в дальнейшем из них можно было изготовить по 3 образца для механических испытаний. Для проведения экспериментов по облучению листового проката из сплава Д16 (и сравнительного анализа исходного и термообработанного состояния) были подготовлены полосы (карточки) размером 210×100 мм, вырезанные поперек и вдоль направления прокатки из холоднокатаных и термообработанных листов сплава Д16.

Исследование спектрального состава свечения было проведено на чистых металлах: вольфраме (99,96 W), цирконии (99,98 Zr), железе (99,99 Fe), а также алюминии технической чистоты (99,5 Al) и промышленном алюминиевом сплаве 1424 системы Al-Mg-Li-Zn.

Облучение мишеней из чистых металлов и сплава 1424 (в ходе измерения спектров свечения и в целях модификации свойств) осуществляли ионами Ar^+ в непрерывном режиме на установке для ионно-лучевой имплантации ИЛМ-1 (рис. 1 а), оснащенной технологическим *ионным источником* «ПУЛЬСАР-1М» на основе тлеющего разряда низкого давления с холодным полым катодом [12], генерирующим (в непрерывном режиме) пучки газовых ионов круглого сечения ($S \sim 100 \text{ см}^2$, $E = 5-50 \text{ кэВ}$, $j = 10-500 \text{ мкА/см}^2$). Для получения ленточного пучка ионов, с целью облучения *движущихся полос* сплава Д16, использовали коллиматор сечением $100 \times 20 \text{ мм}^2$.

Спектры свечения мишеней в ходе их облучения ионами Ar^+ энергией 5-50 кэВ измеряли многоканальным фотоприемником на базе дифракционного спектрографа ОС-12 (рис. 1 б) и ПЗС-линейки в диапазоне от 360 до 850 нм. Использовали кварцевый световод, приемный конец которого был установлен на расстоянии 1 см от края образца и направлен на поверхность образца под углом 60° .

Сплавы ВД1, Д16 и 1424 облучали различными флюенсами ионов Ar^+ энергией 40 кэВ, при плотностях ионного тока 150, 200 и 400 мкА/см². Температуру в ходе облучения контролировали с двух (облучаемой и необлучаемой) сторон образцов с помощью тонких хромель-алюмелевых термопар.

С целью прямого сравнения характера влияния *ионного облучения* на структуру сплава и *обычного нагрева* (в том же режиме), в отсутствие облучения, использовали муфельную печь.

Расчет пространственных распределений имплантированных ионов выполняли с помощью компьютерной программы TRIM. Средний проективный пробег ионов Ar^+ с энергией 20 и 40 кэВ в исследованных алюминиевых сплавах составляет, соответственно, 22 и 40 нм. Пробеги ионов аргона в ходе исследования спектрального состава свечения при использованных энергиях (от 5 до 15 кэВ) в алюминии и сплаве 1424 составляют 6-18 нм, в Fe, W и Zr они не превышают 10 нм.

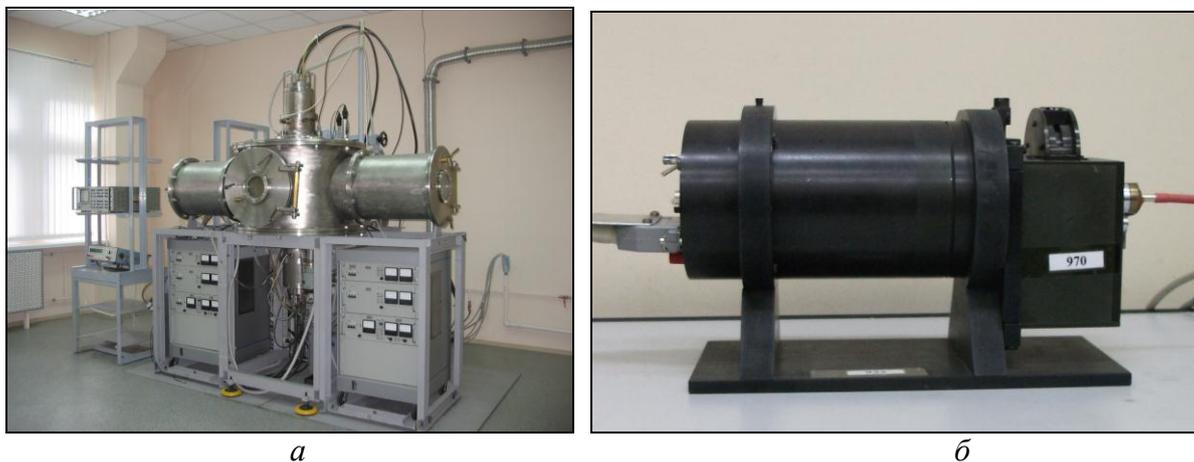


Рис. 1. Ионный имплантер ИЛМ-1 (а) и дифракционный спектрограф ОС-12 (б)

Оптическую металлографию проводили на микроскопе «Neophot-21», статические испытания на одноосное растяжение – в ЦЗЛ ОАО «КУМЗ» в соответствии с ГОСТом 1497-84. Просвечивающую электронную микроскопию осуществляли на электронном микроскопе JEM-200 СХ. Структуру образцов изучали в двух сечениях: параллельном облучаемой поверхности (на расстоянии 150 мкм от нее) и перпендикулярном к ней (по всей толщине образца).

В третьей главе изложены результаты исследований методом оптической спектрометрии, выполненных с целью определения энергетических характеристик термических пиков.

Свечение поверхности различных веществ под воздействием пучков ускоренных ионов в оптическом диапазоне длин волн наблюдали многие авторы. Спектры свечения содержат как дискретные линии, так и полосы непрерывного излучения. Считается, что наблюдаемый спектральный состав свечения обусловлен несколькими основными механизмами (при воздействии на металлы следует учитывать наличие окислов на их поверхности; эти окислы удаляются в результате распыления в течение нескольких минут облучения).

Большая часть гипотез, предложенных с целью объяснения природы широких полос непрерывного излучения, относится к тем или иным видам люминесценции, связанной с распадом экситонов, рекомбинацией электрон-дырочных пар на собственных и образующихся при облучении радиационных дефектах, а также с протеканием на поверхности излучательных реакций между радикалами, созданными в ходе ионной бомбардировки [13].

Наконец, во многих случаях под воздействием ионных пучков наблюдали излучение, имеющее непрерывный спектр, не обладающее признаками люминесценции.

Ни одна из предложенных к настоящему времени теоретических моделей, которые могут быть условно разделены на термодинамические, молекулярные, отрывные и столкновительные [13], не может объяснить все особенности рассматриваемого вида свечения и описать его спектр.

В связи с этим, для объяснения наличия непрерывного спектра (континуума), можно предположить, что мы имеем дело с неким равновесным (иначе говоря, с тепловым) или же, по крайней мере, с квазиравновесным излучением. Это может быть, например, излучение «термических пиков» (thermal

spikes)¹, формирующихся, в случае облучения ионами *низких и средних* энергий (от 1 до 100 кэВ), непосредственно *вблизи поверхности* твердых тел [5, 14], как результат эволюции (термализации) плотных (неразветвленных) каскадов атомных столкновений. Иллюстрацией этой гипотезы является рис. 2.

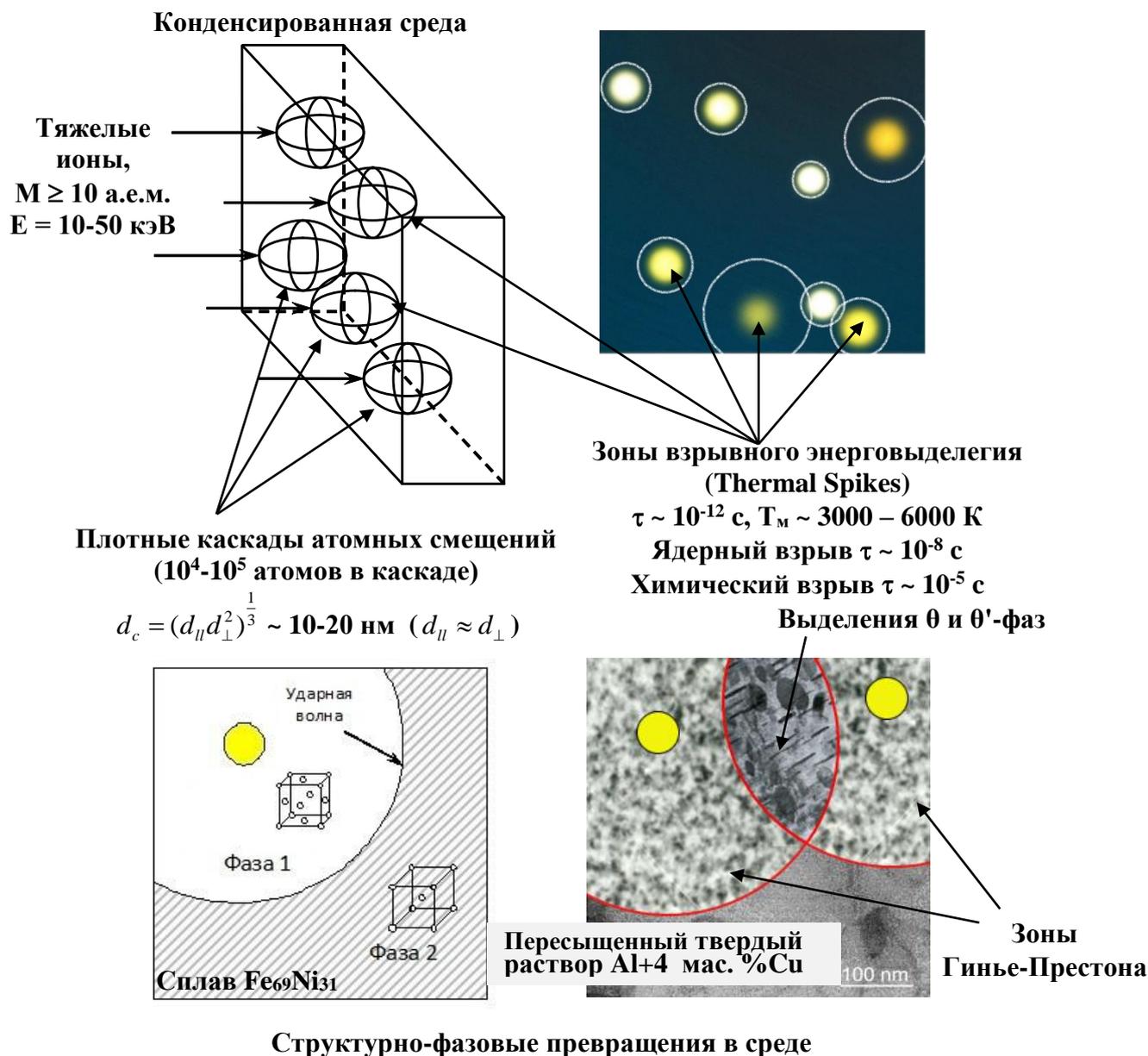


Рис. 2. Радиационно-динамические эффекты при ионном облучении

Глубина проникновения видимого излучения в металлы составляет величину порядка $\lambda/2$ (λ – длина волны излучения). Это означает, что *излучение* от термических пиков, формирующихся в областях плотных каскадов атомных смещений (расположенных при вышеуказанных энергиях на глубине, заведомо не превышающей $l=\lambda/2$ и разогретых, согласно молекулярно-динамическим оценкам, до нескольких тысяч градусов [4,5]) *можно* экспериментально *наблюдать* и изучать его особенности в зависимости от параметров облучения.

¹ Или «тепловых клиньев» (как вариант перевода).

Сравнение этих результатов с теоретическими расчетами плотности энергии, выделяемой в каскадах атомных столкновений, а также их сопоставление с уже известными экспериментальными данными (прежде всего, относящимися к распределению распыляемых частиц по энергиям) дает возможность оценить степень достоверности высказанной гипотезы.

С целью проверки этой гипотезы в настоящей работе анализировали спектральный состав свечения поверхности чистых железа, циркония, вольфрама, технически чистого алюминия (99,5 Al) и сплава 1424 в ходе бомбардировки ионами Ar^+ энергиями $E = 5-20$ кэВ. Предполагали сопоставить изменение *экспериментальных* и *рассчитываемых* на основе теории значений температуры (плотности выделяемой энергии) в области термических пиков при вариации энергии ускоренных ионов, с целью получения информации о природе анализируемых процессов.

Спектры свечения (рис. 3) содержат как *дискретные* линии, так и *полосы непрерывного* излучения. Дискретное излучение может эмиттироваться той частью атомов, ионов и молекул, которая распыляется из поверхностных слоев мишеней в возбужденном состоянии. Любые неравновесные излучения вне твердого тела должны быть дискретными ввиду отсутствия квазинепрерывных энергетических зон. В силу этого ни одна из предложенных к настоящему времени теоретических моделей (все из них относятся к тем или иным видам люминесценции), не может объяснить все особенности рассматриваемого вида свечения, в частности, описать непрерывную составляющую спектра.

В соответствии со сделанными предположениями считали, что в спектрах всех исследованных мишеней присутствуют две широкие полосы планковского теплового излучения (рис. 3), которые могут быть описаны соотношением:

$$\varepsilon_{\lambda, T_1, T_2} = \varepsilon_0 \cdot \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\frac{a_1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T_1}\right) - 1} + \frac{a_2}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T_2}\right) - 1} \right], \quad (1)$$

где h и c – постоянная Планка и скорость света в вакууме, k – константа Больцмана, T_1 – температура наноразмерных зон взрывного энерговыделения (термических пиков), T_2 – температура интегрально разогретой матрицы (мишени), измеряемая термопарой, ε_0 , a_1 , a_2 – константы, учитывающая степень черноты и интегральные сечения объектов свечения, а также поглощение в поверхностном слое и аппаратурные факторы.

Первая полоса с максимумом при длине волны λ_{ml} , изменяющейся в пределах приблизительно от 500 до 570 нм, согласно исходному предположению, соответствует *равновесному* планковскому излучению сильно разогретых приповерхностных областей облучаемых мишеней (термических пиков). Типичный радиус таких областей ~ 5 нм². Вероятно также, это может относиться к плотной приповерхностной плазме, образующийся при «выплескивании»

² Время термализации каскада, т.е. формирования термического пика, составляет $\sim 10^{-12}$ с, а время его охлаждения – $\sim 10^{-11}$ с. При плотностях ионного тока, от 50 до 150 мкА/см², на площади 1 см² одновременно существует не более 10^4 таких *наноразмерных* «горячих точек». Расстояние между ними составляет, соответственно, в среднем несколько десятков микрометров.

термических пиков [11, 13], давление в которых может достигать нескольких десятков кбар. Это может объяснить наблюдающийся в экспериментах светящийся ореол вблизи поверхности мишеней [13].

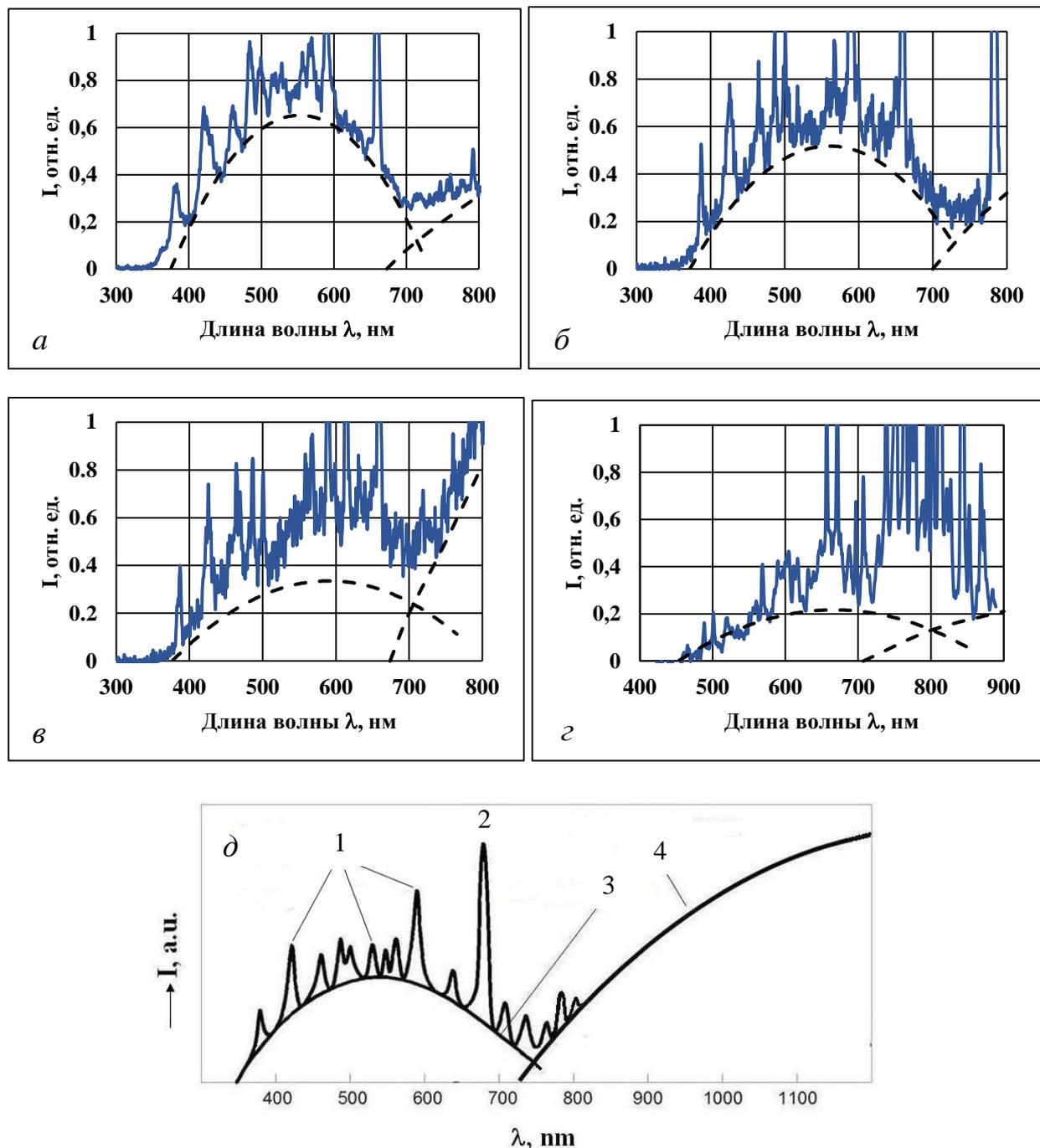


Рис. 3. Спектральный состав свечения мишеней при бомбардировке ионами Ar^+ : а) $\alpha\text{-Fe}$, $E = 15$ кэВ, $T = 5269$ К, $T' = 533$ К; б) W, $E = 15$ кэВ, $T = 4996$ К, $T' = 520$ К; в) Zr, $E = 15$ кэВ, $T = 5040$ К, $T' = 753$ К; з) Al, $E = 10$ кэВ, $T = 3601$ К, $T' = 490$ К; д) схема, иллюстрирующая формирование спектрального состава свечения поверхности $\alpha\text{-Fe}$ при воздействии ускоренных ионов Ar^+ ($E = 5\text{-}20$ кэВ): 1 - неравновесное излучение (приповерхностная плазма); 2 - Ag^+ ; 3 - термические пики; 4 - интегральный нагрев мишени. (Здесь T - температура в области термических пиков, T' - температура интегрального разогрева мишени ионным пучком - измерена термопарой). Штриховые линии - оптическая и ИК полосы теплового излучения.

Максимум второй полосы при длине волны λ_{m2} расположен в ИК-области. Эта полоса проявляется лишь в виде ее коротковолнового крыла и обусловлена тепловым излучением мишени, интегрально нагретой воздействием пучка (значение λ_{m2} определяли по показаниям термопары).

На фоне этих широких полос во всех спектрах наблюдаются значительно более узкие полосы *неравновесного* излучения, некоторые из этих полос хорошо соответствуют излучению атомов облучаемых металлов, а также излучению атомов аргона. Эти полосы наиболее отчетливо проявляются при ускоряющем напряжении менее 10 кВ. Для идентификации остальных полос необходимы специальные исследования. На рис. 3 *г* представлена схема формирования наблюдаемого спектрального состава свечения мишеней в ходе бомбардировки пучками ускоренных ионов.

В предположении о достижении *квазиравновесного* состояния в области термических пиков в результате термализации плотных каскадов атомных смещений, с использованием закона смещения Вина, получены оценки значений температуры в области термических пиков для различных металлов в зависимости от параметров облучения.

Так, для *железной* мишени длина волны, соответствующая максимуму планковского излучения при энергии ионов Ar^+ 5 кэВ, приблизительно равна 500 нм. В соответствии с законом смещения Вина $T = b/\lambda_{m1}$ это отвечает температуре $T \approx 5796$ К ($b = 0,002898$ м·К - постоянная Вина). При энергиях ионов 10, 15 и 20 кэВ соответствующие значения температуры равны 5420, 5269 и 5129 К. Снижение температуры термического пика с ростом энергии иона связано с опережающим *ростом* объема каскада по отношению к энергии порождающего каскад иона (рис. 4).

Аналогичные оценки из экспериментов по облучению ионами Ar^+ с энергией 5, 10, 15 и 20 кэВ получены для мишеней из *циркония* (5087, 5055, 5040 и 4938 К) и из *вольфрама* (5748, 5504, 4996 и 4912 К). Легко подсчитать, что скорость энерговыделения в плотном каскаде радиусом порядка 5 нм за время его термализации ($\sim 10^{-12}$ с) составляет порядка 10^{17} Вт/см², что сопоставимо со скоростью энерговыделения при ядерном взрыве.

Для мишеней из технически чистого алюминия и сплава 1424 при энергиях ионов аргона 5 и 10 кэВ значения температуры в области термализованных каскадов равны, соответственно, 3736 и 3601 К, что ниже чем в тяжелых металлах и согласуется с данными расчета с использованием программ SRIM и КБИ-1.

Оценки давления в области плотных каскадов, полученные с использованием экспериментальных данных о температуре термических пиков, составляют значения от 4 до 10 ГПа и более, что является экспериментальным подтверждением возможности эмиссии послекаскадных уединенных волн с напряжениями на их фронте превышающими предел текучести материала (в том числе для алюминия и его сплавов). Такие волны могут быть ответственны за перестройку конденсированных сред при ионной бомбардировке.

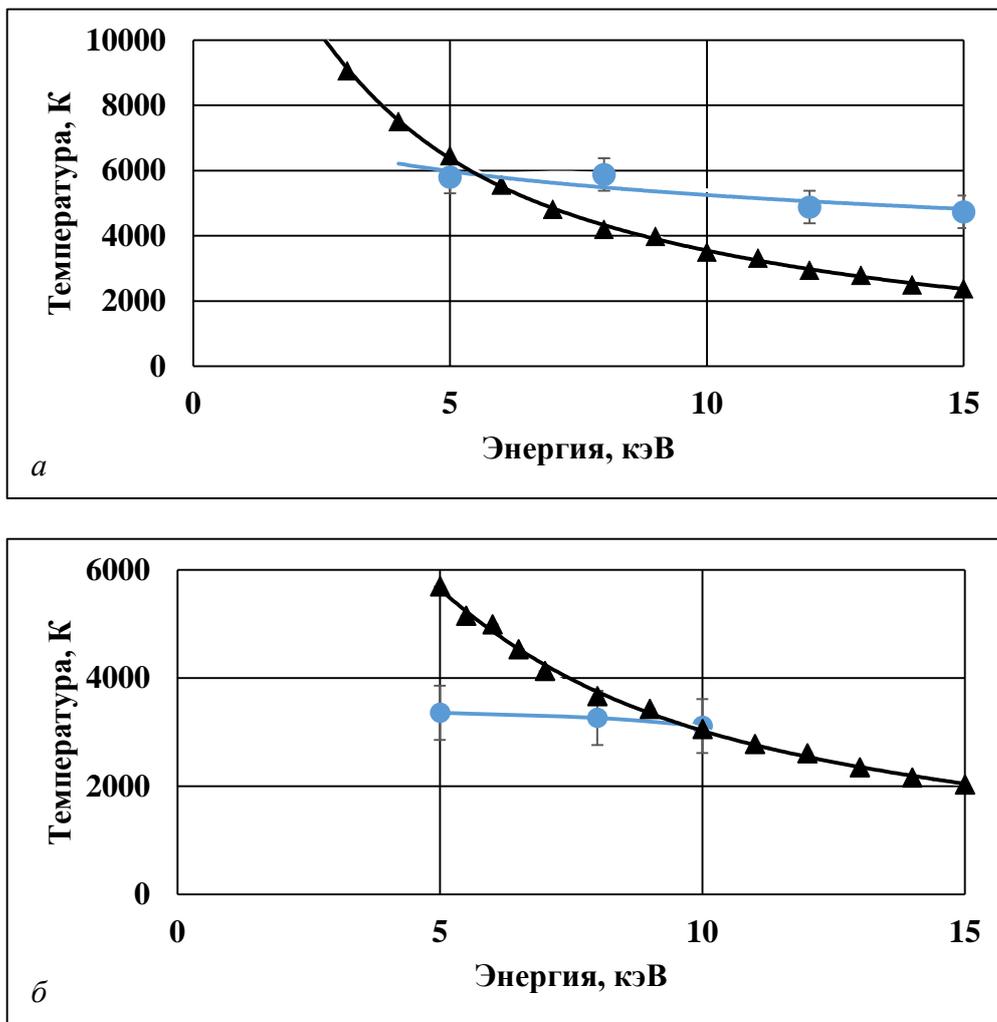


Рис. 4. Теоретическая (\blacktriangle – статистические расчеты методом TRIM) и экспериментальная (\bullet – из анализа спектра свечения мишеней) температура термических пиков при облучении чистого железа (а) и алюминия (б) ионами Ag^+ в зависимости от энергии ионов.

Следует отметить, что степень отклонения состояния термализованных областей от равновесного зависит от различных факторов. Она определяется энергией бомбардирующих ионов, элементным составом мишеней, размерами образующихся в них термализованных областей и особенностями их эволюции. При этом необходимо отдельно учитывать электронные и решеточные процессы [5].

Преобладающий вклад в формирование спектрального состава излучения ($\sim T^4$) дают начальные стадии жизни термических пиков.

То, что плотность выделяемой в каскаде энергии и, соответственно, температура термического пика *возрастает с уменьшением* энергии ионов (а длина волны излучения при этом уменьшается), согласуются с данными расчетов с использованием программы TRIM [3] (рис. 4).

Рост интенсивности ИК крыла излучения для сплава 1424 всех металлов коррелирует с увеличением энергии ионов, плотности ионного тока, флюенса облучения и, как уже отмечалось, связан с интегральным разогревом мишеней ионным пучком (контролировавшимся с помощью термопары).

Отметим, что данные, полученные для чистого железа, хорошо согласуются с результатами работы [5]. В ней в ходе облучения чистого железа ионами аргона

энергией 10 кэВ с использованием времяпролетных методик обнаружены рассеянные атомы железа тепловых энергий. Наиболее вероятная скорость для экспериментально измеренного распределения по скоростям, внешне подобного максвелловскому, соответствует температуре термического пика $T = 5800$ К. Показано, что основная масса атомов тепловых эргий является нейтральной, т.к. не испытывает какого-либо влияния со стороны наложенного извне электрического поля, перпендикулярного к поверхности, напряженностью до 4 кВ/см.

Важным аргументом в пользу особой роли термических пиков является то, что сплошное излучение (континуум) не наблюдали при других способах возбуждения поверхности. Газовый разряд, дуга, искра, лазерное возбуждение, столкновения ускоренных частиц в газовой фазе дают лишь хорошо разрешенные узкие линии, отражающие химический состав мишени [13], и только при ионной бомбардировке твердых тел хорошо виден континуум.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния облучения ионами Ag^+ на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства сплавов ВД1 и Д16 системы Al-Cu-Mg.

В ходе проведенных исследований воздействия ионного облучения на сплавы системы Al-Cu-Mg установлены зависимости, описывающие изменение механических свойств исходно холоднодеформированных сплавов с увеличением флюенса для различных сочетаний энергии ионов Ag^+ и плотности ионного тока. Прослежены закономерности соответствующих структурных изменений.

Установлено, что при низких флюенсах 10^{15} - 10^{16} см⁻² (время облучения ~ 1 и 10 с) прочностные характеристики сплава ВД1 не изменяются (при том, что относительное удлинение несколько увеличивается). Методом просвечивающей электронной микроскопии показано, что это связано с трансформацией исходной ячеистой дислокационной структуры в развитую субзеренную.

Показано, что при увеличении флюенса свыше $> 5 \cdot 10^{16}$ см⁻² сначала происходит разупрочнение сплава ВД1, а затем, вблизи $\Phi = 1 \cdot 10^{17}$ см⁻², предел прочности возрастает до значений, превышающих исходные, при сохранении высоких пластических характеристик. Методом электронной микроскопии установлено, что такое немонотонное изменение предела прочности связано с протеканием двух конкурирующих процессов: *рекристаллизации* с формированием однородной крупнокристаллической структуры (со средним размером зерна более 10 мкм) и *распада* пересыщенного твердого раствора с выделением *дисперсных наноразмерных* частиц θ' (θ'')-фазы ($CuAl_2$).

Установлено, что *кратковременный нагрев* нагартованного образца сплава ВД1 в печи, имитирующий температурный режим разогрева аналогичного образца в ходе ионного облучения, существенно не влияет на его структуру, не приводя к трансформации ячеистой дислокационной структуры в субзеренную, как это происходит в ходе ионной имплантации. Установленный факт является прямым доказательством наличия нетепловой составляющей воздействия пучков ускоренных ионов на структурное состояние сплава. При высоких флюенсах, когда разогрев образцов становится значительным, термостимулированные процессы начинают, безусловно, также играть существенную роль, накладываясь на процессы, инициируемые облучением.

Показано, что в результате воздействия ускоренных ионов Ar^+ на холоднодеформированный сплав Д16 в зависимости от режима облучения можно обеспечить *различные свойства*. При флюенсе $\sim 5 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ увеличивается пластичность сплава (относительное удлинение возрастает в 2 раза) при сохранении высоких прочностных характеристик. Облучение флюенсом $\sim 7,2 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ вызывает увеличение относительного удлинения в 4,5 раза и уменьшение предела текучести на 110 МПа, что аналогично *отожженному* состоянию. Однако при этом сохраняются высокие значения предела прочности – на уровне исходного состояния после холодной деформации. После облучения флюенсом $\sim 1 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$ свойства сплава Д16 близки к его свойствам в *закаленном* состоянии. Отметим, что в результате облучения удается повысить относительное удлинение сплава в 4,5 раза, что сопровождается увеличением, а не снижением, предела прочности на 100 МПа по сравнению с исходным (холоднодеформированным) состоянием.

Облучение флюенсом $\sim 5 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ приводит к формированию в рассматриваемом сплаве развитой однородной субзеренной структуры (взамен неоднородной ячеистой) с размером субзерен 1-2 мкм. Одновременно происходит распад твердого раствора с образованием частиц $Mg_2Cu_6Al_5$, имеющих форму плоских дисков диаметром 20-30 нм по всей толщине образца. При увеличении флюенса до $1 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$ формируется рекристаллизованная структура и происходит трансформация формы интерметаллидов $Al_6(Cu,Fe,Mn)$ от речной к равноосной, а также распад твердого раствора во всем объеме образца с выделением частиц фазы $Mg_2Cu_6Al_5$. Полученные при облучении структурно-фазовые состояния отличаются от получаемых в результате отжига и закалки данного сплава с использованием традиционных режимов.

В результате электронно-микроскопических исследований *параллельных и перпендикулярных* облучаемой поверхности сечений образцов установлено, что инициируемые облучением изменения *структуры и фазового состава* исходно холоднодеформированных сплавов ВД1 и Д16 имеют место по всей глубине полос толщиной 2-3 мм. Это более, чем в 10^4 раз превышает средний проективный пробег ионов Ar^+ в этих сплавах. При $E = 40$ кэВ средний проективный пробег ионов Ar^+ , согласно расчету методом TRIM, составляет всего лишь ~ 40 нм.

В **пятой главе** приведены результаты исследования влияния облучения ионами Ar^+ на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства сплава 1424 (Al-Mg-Li-Zn).

В табл. 1 представлены результаты механических испытаний холоднодеформированных и облученных образцов сплава 1424. Указаны максимальные температуры, до которых образцы непрерывно нагревались в ходе применявшихся режимов облучения (после чего сразу охлаждались без выдержки при этих температурах); приведены энергии ионов, плотности ионного тока, флюенсы и соответствующие экспозиции.

Таблица 1. Механические свойства сплава 1424 в исходном состоянии и после облучения в различных режимах

№ п/п	E, кэВ	j, мкА/см ²	Φ, см ²	Время облучения, с	T, °С	Механические свойства		
						σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %
1	Исходный без облучения					514	351	4,7
2	40	200	5·10 ¹⁶	42	120	471	414	6,2
3			10 ¹⁷	83	200	425	354	11,5
4			3,7·10 ¹⁷	293	400	392	264	13,7
5			4,5·10 ¹⁷	358	450	389	181	20,8
6			400	3·10 ¹⁷	121	450	391	181

Из приведенных в табл. 1 данных видно, что при одностороннем облучении холоднодеформированных пластин толщиной 7,3 мм сплава 1424 относительно низким флюенсом ($5 \cdot 10^{16}$ см²) ионов аргона энергией 40 кэВ при плотности ионного тока 200 мкА/см² (время облучения 42 с) происходит снижение прочности σ_v на 43 МПа. При этом предел текучести $\sigma_{0,2}$ увеличивается (на 63 МПа), относительное удлинение δ изменяется незначительно.

Увеличение флюенса до 10^{17} см² приводит к еще большему снижению предела прочности, предел текучести при этом возвращается к исходному значению, относительное удлинение возрастает до 11,5 %. При дальнейшем увеличении флюенса до $3,7 \cdot 10^{17}$ см² (длительность облучения 5 мин) сплав продолжает разупрочняться: предел прочности достигает значения 392 МПа, предел текучести – 264 МПа, а относительное удлинение – 13,7 %.

Максимальное разупрочнение в сочетании с максимальным относительным удлинением, имеет место при облучении флюенсом $\Phi = 4,5 \cdot 10^{17}$ см²: $\sigma_v = 389$ МПа, $\sigma_{0,2} = 181$ МПа, $\delta = 20,8$ %, при этом снижается лишь предел текучести (по сравнению с облучением предыдущим флюенсом), предел же прочности более практически не изменяется и составляет 389 МПа.

Таким образом, оптимальным режимом, позволяющим максимально разупрочнить сплав 1424, является режим: $E = 40$ кэВ, $j = 200$ мкА/см², $\Phi = 4,5 \cdot 10^{17}$ см² (время облучения составляет 6 мин).

Увеличение плотности ионного тока в 2 раза до 400 мкА/см² позволило сократить время облучения до 120 с (2 мин), что, несмотря на более низкое значение флюенса: $3 \cdot 10^{17}$ см², обеспечивает близкий уровень разупрочнения: $\sigma_v = 390$ МПа, $\sigma_{0,2} = 181$ МПа, $\delta = 17,8$ %. Достигаемый в результате кратковременного облучения уровень свойств сплава соответствуют регламентированным значениям ($\sigma_v = 370$ МПа, $\sigma_{0,2} = 220$ МПа, $\delta = 15-18$ %), гарантирующим возможность его холодной прокатки.

С помощью металлографического исследования установлено, что для микроструктуры сплава 1424 в исходном холоднодеформированном состоянии характерна строчечная структура, указывающая на наличие вытянутых тонких зерен. После облучения в оптимальном режиме наблюдается уширение деформационных полос, а также формирование в отдельных участках как равноосных, так и вытянутых зерен внутри исходных, образующих цепочки,

параллельные поверхности листа. Это свидетельствует о том, что *под действием* облучения в сплаве протекают процессы *рекристаллизации*.

Следует отметить, что структурные изменения в сплаве 1424 под воздействием облучения ионами Ar^+ с энергией 40 кэВ при плотностях ионного тока 200 и 400 мкА/см^2 и флюенсах более $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, происходят *по всей толщине* образца. Такой вывод сделан на основе анализа микроструктуры образцов в *поперечном* сечении с *облученной* и *необлученной* сторон образцов, а также в их центральной части. Микроструктура достаточно *однородна* по толщине.

С помощью электронно-микроскопических исследований было также установлено, что при поверхностном облучении ионами Ar^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $j = 200$ и 400 мкА/см^2 , диапазон флюенсов: $\Phi = (3-4,5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) во всем объеме образцов холоднодеформированного сплава 1424 толщиной 7,3 мм протекают процессы *рекристаллизации*, проявляющиеся в зависимости от режима облучения либо в уширении деформационных полос, либо в формировании равноосной зеренной структуры с размером зерен 2-6 мкм (рис. 5). Кроме того, под **действием облучения** снижается *плотность зернограничных выделений*, а также *измельчаются интерметаллиды Al_6Mn* . Все это приводит к увеличению пластичности сплава. При облучении происходит также образование мелких частиц метастабильной δ' -фазы (Al_3Li) диаметром $\sim 10-15 \text{ нм}$, но плотность их распределения настолько мала, что не влияет на возможность дальнейшей холодной прокатки сплава на 20-30 % (в отличие от высокой плотности этой фазы после проведения печного отжига, не обеспечивающего восстановление пластичности сплава 1424).

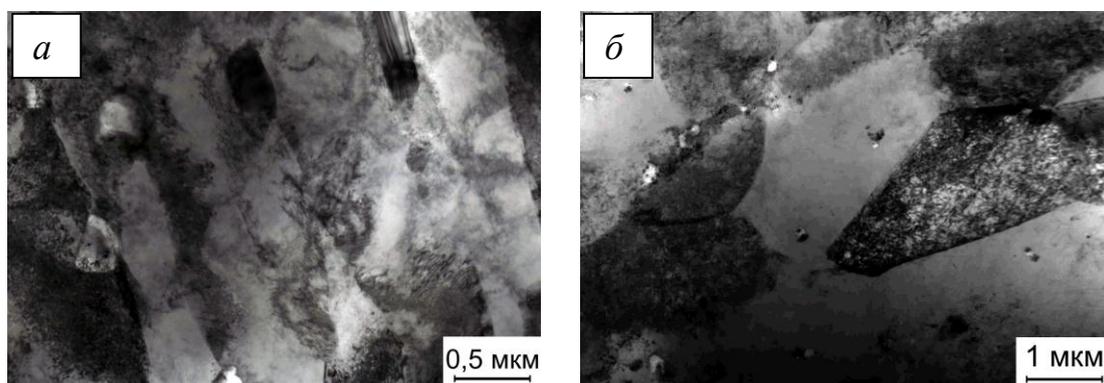


Рис. 5. Результаты электронно-микроскопического исследования микроструктуры сплава 1424 после холодной деформации (а) и после облучения ионами аргона по режиму: $E = 40 \text{ кэВ}$, $j = 400 \text{ мкА/см}^2$, $\Phi = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (б); центральная часть образца

Таким образом, установлено, что облучение холоднодеформированного сплава 1424 ионами Ar^+ энергией 40 кэВ при флюенсах $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и более обеспечивает протекание в нем процессов рекристаллизации, снижения размера и плотности зернограничных выделений и измельчения интерметаллидов кристаллизационного происхождения (растворения) во всем объеме образцов толщиной 7,3 мм. Это приводит к существенному разупрочнению сплава.

Полученный в результате кратковременного облучения сплава пучками ускоренных ионов *уровень свойств* соответствует *регламентированному уровню*, при котором сплав может быть подвергнут холодной прокатке. При этом время облучения значительно меньше длительности разупрочняющего отжига (1-2 ч) и

составляет всего лишь 2-5 мин. Следует отметить, что в ходе облучения осуществляется кратковременный непрерывный разогрев образцов ионным пучком до 450°С без выдержки при этой температуре (см. рис. 6 б).

Эксперименты по нагреву холоднодеформированных образцов сплава 1424 в муфельной печи (при точном воспроизведении режима нагрева таких же образцов ионным пучком) показали, что кратковременный термический отжиг к каким-либо существенным изменениям структуры холоднокатаных образцов сплава 1424 не приводит (рис. 6 в-е). Эти данные свидетельствуют о решающей роли радиационно-динамического воздействия пучков ионов на исследуемый сплав.

На основе результатов проведенных исследований в работе была выполнена холодная прокатка листов сплава 1424 с использованием ионно-лучевой обработки вместо трудоемких технологических операций выдержки в селитровой ванне (аналогичных нагреву под закалку). На рис. 7 показан исходный образец толщиной 7,3 мм и образцы, подвергнутые холодной прокатке после кратковременных, в течение нескольких десятков секунд, *разупрочняющих радиационных отжигов*; толщина образцов: 1 – 2,4 мм; 2 – 1,6 мм; 3 и 4 – 1,2 мм.

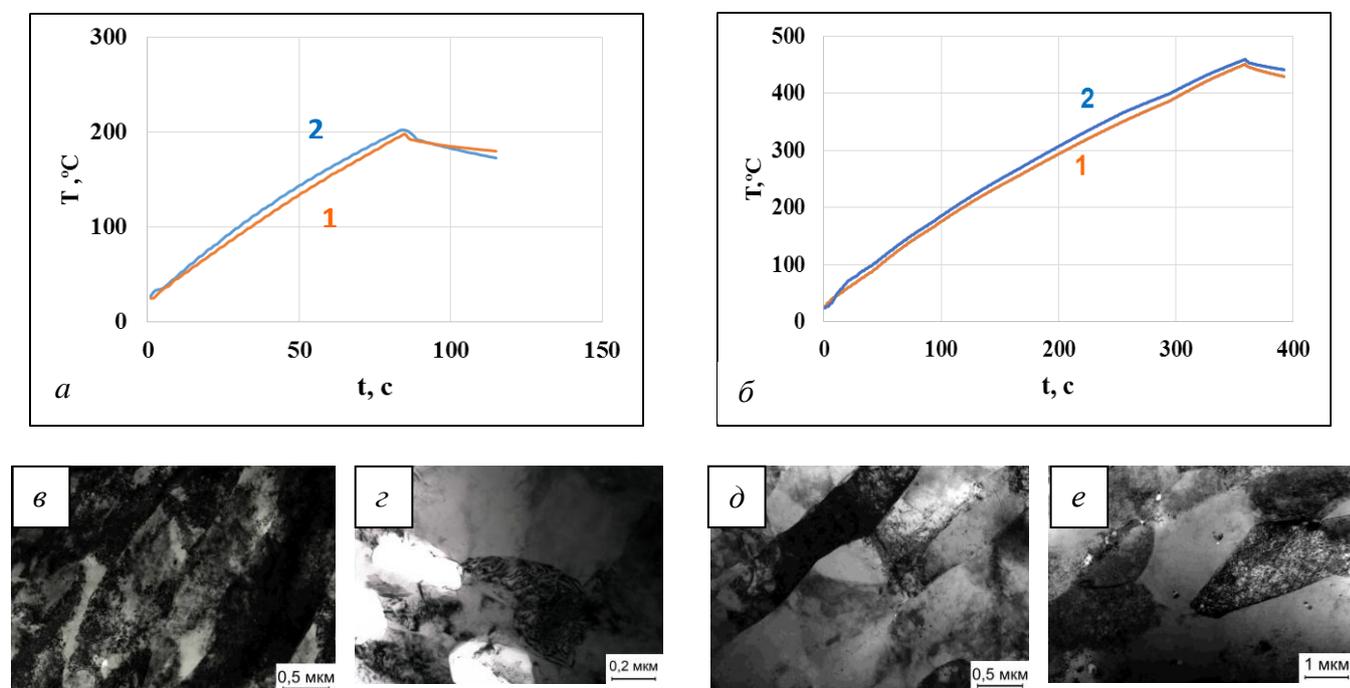


Рис. 6. Сравнение результатов печного и радиационного отжига образцов холоднодеформированного сплава 1424 при практически полном совпадении теплового режима обработок (кривых $T(t)$): а, б – нагрев образцов сплава 1424 до различных температур пучком (1) и в печи (2); в, д – полосы скольжения (нагрев инфракрасным нагревателем 2, $T_{\max}=200$ и 450° С); з – субзернистая структура (обработка пучком 1, $T_{\max}=200^{\circ}$ С) и е – рекристаллизованная структура (обработка пучком 1, $T_{\max}=450^{\circ}$ С).

Высокая скорость радиационного отжига, протекающего в течение нескольких секунд облучения, открывает возможность отжига движущихся полос алюминиевых сплавов ленточными пучками ионов (при перематке из рулона в рулон). Вследствие чего имеется возможность значительного увеличения выхода годного металла, а также снижения энергоемкости и трудоемкости процесса.

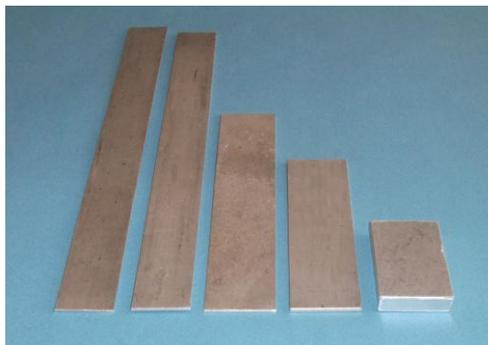


Рис. 7. Результаты холодной прокатки образца 7,3 мм сплава 1424 (Al-Mg-Li-Zn) от до толщины 1,2 мм с промежуточными радиационными отжигами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые в результате анализа спектральной плотности энергетической светимости чистых металлов экспериментально *определены температуры* наноразмерных областей термализованных каскадов атомных смещений (термических пиков) в W, Zr, Fe, а также технически чистом Al и сплаве 1424 в зависимости от параметров облучения.

2. Установлено достаточно хорошее согласие результатов *численного моделирования* объемной плотности энерговыделения в термализованных каскадах атомных смещений и данных *эксперимента*. Экспериментально подтверждена обнаруженная ранее на основе расчетов тенденция к увеличению плотности энерговыделения (и соответствующей температуры термического пика) с *уменьшением* энергии ускоренного иона. Это связано с опережающим *ростом* объема каскада по отношению к энергии порождающего каскад иона.

3. Полученные экспериментальные данные подтверждают предсказываемый теорией факт формирования наноразмерных (диаметром порядка 10 нм) зон взрывного энерговыделения вблизи поверхности мишеней в ходе ионной бомбардировки. Скорость энерговыделения (порядка 10^{17} Вт/см³) сопоставима со скоростью выделения энергии при ядерном взрыве.

4. Оцененные на основе полученных данных давления в области термических пиков в изученных металлах достигают значений ~4-10 ГПа. Это свидетельствует о возможности генерации наноразмерными областями термализованных каскадов послекаскадных решеточных волн сжатия.

Последнее может быть использовано на практике для *перестройки неравновесных* сред. В частности, это касается возможности модификации структуры и свойств *метастабильных* промышленных алюминиевых сплавов в результате суперфинишной обработки пучками ускоренных ионов (холоднодеформированного металла, сплавов, содержащих неравновесные интерметаллиды кристаллизационного происхождения, дисперсионно-твердеющих сплавов и т.д.).

5. Получены данные об изменении дислокационной, субзеренной, зеренной, интерметаллидной структуры и механических свойств листов сплавов ВД1, Д16 системы Al-Cu-Mg (толщиной 2-3 мм), а также трудно отжигаемого термически сплава 1424 системы Al-Mg-Li-Zn (толщиной 7,3 мм) в исходном

(холоднодеформированном) состоянии и в состояниях после одностороннего облучения пучками ускоренных ионов Ar^+ в различных режимах.

Установлены режимы ионно-лучевой обработки указанных сплавов, обеспечивающие их максимальное разупрочнение. Полученный *уровень свойств* соответствует *регламентированному уровню*, при котором сплавы могут быть подвергнуты холодной прокатке.

6. Установлено, что в результате воздействия ускоренных ионов Ar^+ на *холоднодеформированный* сплав Д16 в зависимости от режима облучения могут быть обеспечены *различные свойства*, а именно: 1) при относительно невысоком флюенсе $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ имеет место изменение относительного удлинения (\sim в 2 раза при постоянстве прочностных характеристик), 2) при последующем увеличении флюенса до $\sim 7,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ достигается увеличение относительного удлинения в 4,5 раза, предел текучести уменьшается на 110 МПа, что аналогично *отожженному* состоянию (но при более высоком значении предела прочности) и 3) при облучении флюенсом $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ формируемые свойства сплава Д16 близки к свойствам *закаленного* состояния.

Различие структурных изменений, преимущественно на конечных стадиях термического и радиационного отжига, дает дополнительные возможности управления структурой и свойствами алюминиевых сплавов.

7. С целью верификации результатов работы успешно реализована холодная прокатка полос толщиной 7,3 мм алюминиевого сплава 1424 до толщины 1,2 мм с помощью кратковременных промежуточных радиационных отжигов (ускоренными ионами Ar^+ , 20-40 кэВ) взамен применяемых для этого в ходе холодной прокатки сложных технологических операций полистной обработки, включающих операции выдержки в селитровой ванне (аналогичные нагреву под закалку).

Цитированная литература

1. Диденко А.Н. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов / А.Н. Диденко, А.Е. Лигачев, И.Б. Куракин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 184 с.
2. Диденко А.Н. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах / А.Н. Диденко, Ю.П. Шаркеев, Э.В. Козлов, А.И. Рябчиков. – Томск: Изд-во НТЛ. – 2004. – 328 с.
3. Biersack J.P. A Monte Carlo Computer Program for the Transport of Energetic Ions in Amorphous Targets / J.P. Biersack, L.G. Hagmark // Nucl. Instr. & Meth. – 1980. – V. 174. – P. 257-269.
4. Dremov V.V. Monte Carlo + molecular dynamics modeling of radiation damages in Pu / V.V. Dremov [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2007. – V. 444-445. – P. 197-2001.
5. Овчинников В.В. Радиационно-динамические эффекты. Возможности формирования уникальных структурных состояний и свойств конденсированных сред / В.В. Овчинников // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178. – № 9. – С. 991-1001.
6. Zhukov V.P. The role of shock wave in low-energy recoil radiation damage / V.P. Zhukov, A.V. Ryabenko // Rad. Eff. – 1984. – V. 82. – № 3/4. – P. 85-95.

7. Жуков В.П. Генерация упругих волн при эволюции пиков смещений / В.П. Жуков, А.А. Болдин // Атомная энергия. – 1987. – Т. 63. – № 6. – С. 375-379.
8. Овчинников В.В. Структурные особенности алюминиевого сплава 1441, подвергнутого облучению ионами Ar^+ / Овчинников В.В., Гущина Н.В., Махинько Ф.Ф., Чемеринская Л.С., Школьников А.Р., Можаровский С.М., Филиппов А.В., Кайгородова Л.И. // Известия вузов. Физика. – 2007. – № 2. – С. 73-81.
9. Изменение механических свойств и структуры алюминиевого сплава АМг6 (Al-Mg) после облучения ионами Ar^+ и после термического отжига / В.В. Овчинников, Н.В. Гущина, С.М. Можаровский, А.В. Филиппов, В.В. Сагарадзе, Н.Ф. Вильданова // Известия вузов. Физика. – 2008. – № 11/2. – С. 56-61.
10. Буренков А.Ф. Пространственные распределения энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах / А.Ф. Буренков, Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов, М.М. Темкин. – М.: Энергоиздат. – 1985. – 248с.
11. Проблемы прикладной физики. Распыление под действием бомбардировки частицами / Под ред. Р. Бериш, К. Виттмак // Мир, Выпуск 3, 1998. – 551 с.
12. Гаврилов Н.В. Источник интенсивных широких пучков ионов газов на основе разряда с полым катодом в магнитном поле / Н.В. Гаврилов, С.П. Никулин, Г.В. Радковский // Приборы и техника эксперимента. – 1996. – № 1. – С. 93-98.
13. Плешивцев Н.В., Бажин А.И. Физика воздействия ионных пучков на материалы / Н.В. Плешивцев, А.И. Бажин // М.: Вузовская книга, 1988. – 392 с.
14. Овчинников В.В. Свечение поверхности металлических мишеней при облучении ионами Ar^+ с энергией 5-20 кэВ / В.В. Овчинников, Ф.Ф. Махинько, В.И. Соломонов, Н.В. Гущина, О.А. Кайгородова // ПЖТФ. – 2012. – Т. 38. – Вып. 1. – С. 86 – 94.
15. Способ получения листового проката из алюминиевых сплавов: патент РФ № 2363755 / Овчинников В.В., Гаврилов Н.В., Гущина Н.В., Школьников А.Р., Можаровский С.М., Филиппов А.В.; патентообладатель ОАО «КУМЗ»; пат. поверенный Янц В.К. № 2006143709/02; заявл. 08.12.2006; опубл. 10.08.2009 г. Бюл. № 22; приоритет 08.12.2006 г.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Анализ изменений структурного состояния сплава ВД1 (Al-Cu-Mg-Mn) под воздействием ионного облучения (Ar^+ , $E = 40$ кэВ) методом просвечивающей электронной микроскопии / В.В. Овчинников, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько, Л.С. Чемеринская, А.Р. Школьников, С.М. Можаровский, А.В. Филиппов, Л.И. Кайгородова // ФММ. – 2008. – Т. 105. – № 4. – С. 404-411.
2. Свечение поверхности металлических мишеней при облучении ионами Ar^+ с энергией 5-20 кэВ / В.В. Овчинников, Ф.Ф. Махинько, В.И. Соломонов, Н.В. Гущина, О.А. Кайгородова // ПЖТФ. – 2012. – Т. 38. – Вып. 1. – С. 86 – 94.
3. Влияние облучения ионами Ar^+ средних энергий на структуру и свойства холоднодеформированного сплава системы Al-Cu-Mg-Mn // Н.В. Гущина, В.В. Овчинников, А.А. Клепикова, Ф.Ф. Махинько, Л.И. Кайгородова // Известия вузов. Физика. – 2014. – № 3/3. – С. 288-291.
4. Исследование возможности радиационного отжига сплава 1424 (Al-Li-Mg-Zn-Mn) пучками ускоренных ионов аргона / В.В. Овчинников, С.М. Можаровский,

- Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько, Л.И. Кайгородова, Н.И. Колобнев, Л.Б. Хохлатова // Известия вузов. Физика. – 2014. – № 3/3. – С. 222-226.
5. Свечение поверхности металлических мишеней при облучении ионами низких энергий / В.В. Овчинников, Ф.Ф. Махинько, Н.В. Гущина, В.И. Соломонов, О.А. Снигирева // Труды XV Международного совещ. «Радиационная физика твердого тела», Севастополь. – М.: НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ), 2005. – С. 199-202.
 6. Низкотемпературный ускоренный радиационный отжиг сплава Al-Cu-Mg (ВД1) под воздействием ионов Ar^+ ($E = 40$ кэВ) / В.В. Овчинников, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько, Л.С. Чемеринская, А.Р. Школьников, С.М. Можаровский, В.А. Козловских, Л.И. Кайгородова // Труды XVI Международного совещания «Радиационная физика твердого тела», Севастополь. – М.: НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ), 2006. – С. 534-539.
 7. Воздействие ускоренных ионов Ar^+ средних энергий на структуру и свойства холоднодеформированного сплава системы Al-Cu-Mg-Mn / А.А. Клепикова, Н.В. Гущина, В.В. Овчинников, Ф.Ф. Махинько, Л.И. Кайгородова // Труды IX Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», Беларусь, Минск, 2011. – С. 234-236.
 8. Исследование воздействия ионного облучения на структуру деформированного сплава 1424 (Al-Mg-Li-Zn) методом просвечивающей электронной микроскопии / Ф.Ф. Махинько, В.В. Овчинников, Н.В. Гущина, С.М. Можаровский // Труды VII Всероссийской научно-технической конференции «Физические свойства металлов и сплавов ФСМиС-VII», Екатеринбург, 2013. – С. 21-25.
 9. Влияние облучения ионами аргона на распад пересыщенного твердого раствора сплава Д16 (Al-Cu-Mg-Mn) / Ф.Ф. Махинько, В.В. Овчинников, Н.В. Гущина, Л.И. Кайгородова // Труды VII Всероссийской научно-технической конференции «Физические свойства металлов и сплавов ФСМиС-VII», Екатеринбург, 2013. – С. 17-20.
 10. Воздействие ускоренных ионов (Ar^+ , $E = 40$ кэВ) на структуру холоднодеформированного алюминиевого сплава ВД1 / В.В. Овчинников, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько, Л.С. Чемеринская, С.М. Можаровский, В.А. Козловских, А.Р. Школьников, Л.И. Кайгородова // Тезисы III Российской научно-технической конференции «Физические свойства металлов и сплавов», Екатеринбург, 2005. – С. 152-153.
 11. Свечение поверхности металлических мишеней при облучении ионами низких энергий / В.В. Овчинников, Ф.Ф. Махинько, Н.В. Гущина, В.И. Соломонов, О.А. Снигирева // Тезисы VI Международного Уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов», Россия, Снежинск, 2005. – С. 12-13.
 12. Спектральный состав свечения поверхности железа, циркония и вольфрама при облучении ионами Ar^+ средних энергий / В.В. Овчинников, В.И. Соломонов, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько // Тезисы докладов IX Международного Уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов», Россия, Кыштым, 2011. – С. 85.
 13. Влияние облучения ионами Ar^+ на микроструктуру и фазовый состав сплава Д16 в различном исходном состоянии / В.В. Овчинников, А.А. Клепикова, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько, Л.И. Кайгородова, С.М. Можаровский, А.В. Филиппов // Тезисы докладов IX Международного Уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов», Россия, Кыштым, 2011. – С. 80.