

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

14-87-30

**В.Р.Регель*, Е.Д.Воробьев, А.Ю.Дидык,
В.А.Скуратов, В.А.Щеголев**

**ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА УСКОРИТЕЛЯХ ЛЯР ОИЯИ
ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ,
ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА
МЕТАЛЛОВ И КРИСТАЛЛОВ**

* Институт кристаллографии АН СССР
им. А.В.Шубникова, Москва

1. ВВЕДЕНИЕ

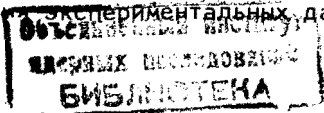
В течение ряда лет в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ помимо традиционных прикладных исследований на ускорителях тяжелых ионов успешно развиваются работы по радиационному материаловедению /см., например, /1-23/ /. Ускорители ИЦ-100, У-200, У-300 и У-400 представляют для таких исследований уникальные возможности. Они позволяют получать практически моноэнергетические пучки ускоренных тяжелых ионов с энергиями от нескольких десятков до сотен МэВ при интенсивностях порядка 10^{12} - 10^{13} ионов/с.

Тяжелые ионы обладают высокой повреждающей способностью, а также более жестким спектром энергий первично выбитых атомов по сравнению с легкими заряженными частицами. Для сравнения приведем сечения образования радиационных дефектов ионами ксенона, аргона, неона с энергиями 1 МэВ/нуклон и нейтронами с энергией 2 МэВ в никеле, которые составляют соответственно: $1,1 \cdot 10^{-16}$, $1,8 \cdot 10^{-17}$, $6,9 \cdot 10^{-18}$ и $7,9 \cdot 10^{-22}$ смещ./ат. ион (нейтрон). Из приведенных данных видно, что использование пучков тяжелых ионов позволяет существенно сократить продолжительность экспериментов по изучению свойств материалов, облученных до высоких уровней радиационных повреждений, по сравнению с реакторным облучением.

Важным преимуществом тяжелых ионов перед нейтронами является то, что исследования можно проводить при энергиях ионов ниже кулоновского барьера, не вызывая активации облученных образцов, в то же время и при энергиях ионов выше кулоновского барьера активация образцов оказывается малой по сравнению с активацией, вызываемой соответствующим потоком нейтронов.

При этом, в отличие от реакторных испытаний, эксперименты на ускорителях можно проводить непосредственно на пучках частиц в условиях надежного контроля параметров облучения, успешно имитируя радиационные воздействия нейтронов.

Необходимо отметить, что проведение экспериментов на пучках тяжелых ионов с целью изучения радиационных нарушений в материалах и последующего сравнения экспериментальных данных с анало-



гичными нейтронными воздействиями сталкивается с определенными затруднениями, из которых выделим наиболее существенные.

Во-первых, высокая интенсивность и плотность радиационных повреждений, на несколько порядков превышающих интенсивность и плотность повреждений при облучении нейтронами, может значительно сказаться на результатах исследований, в особенности при выявлении тех эффектов, которые нелинейно зависят от концентрации образующихся радиационных дефектов, а следовательно, и от интенсивности облучения.

Во-вторых, заряженные частицы, в том числе и тяжелые ионы, при прохождении через исследуемый образец значительную долю своей энергии /примерно 70-80%/ теряют на возбуждение электронной подсистемы, в то время как нейтроны с электронами не взаимодействуют, и только выбитые ими в столкновениях атомы решетки могут создавать каскады смещений и взаимодействовать с электронами. Таким образом, имеется существенное и трудно учитываемое различие в радиационном воздействии на материалы тяжелых ионов и нейтронов.

В-третьих, пробег тяжелых ионов в твердых телах составляет всего несколько десятков микрон, что вызывает необходимость применения образцов с толщинами, сравнимыми с пробегом ионов. Кроме того, дефектообразование тяжелых ионов существенно неоднородно по их пробегу.

Несмотря на указанные различия процессов дефектообразования от нейтронов и заряженных частиц, тяжелые ионы могут использоваться не только в экспериментах по изучению взаимодействий тяжелых заряженных частиц с различными материалами, но и в исследовательских работах по радиационному материаловедению с целью имитации радиационных изменений механических свойств при реакторном облучении с учетом того, что качественно, а в ряде случаев и количественно все важные для практического использования явления, такие как радиационное распухание, упрочнение, охрупчивание, ползучесть и другие, в той или иной мере воспроизводятся при облучении материалов тяжелыми ионами. При этом наблюдается корреляция данных по радиационной стойкости материалов при воздействии тяжелых ионов и нейтронов, что служит основанием для имитационных экспериментов.

Помимо практических целей имитации изменений свойств реакторных материалов под действием потоков нейтронов при их испытаниях на ускорителях тяжелых ионов следует иметь в виду и необходимость детальных исследований особенностей дефектообразования, вызываемого воздействием тяжелых заряженных частиц при их прохождении через различные материалы, для развития радиационной физики твердого тела.

Приведенные выше соображения обосновывают важность дальнейшего развития исследований особенностей дефектообразования и изменения механических и других свойств материалов под действием пучков тяжелых ионов высокой энергии на ускорителях ЛЯР ОИЯИ.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА ПУЧКАХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

А. Диагностика пучков тяжелых ионов

Элементы системы диагностики пучка должны обеспечивать наряду с непрерывным измерением потока частиц, попадающих на облучаемый образец, еще и контроль за однородностью облучения по площади образца. Это вызывает необходимость использования датчиков, не искажающих пространственное распределение потока частиц и существенно не изменяющих исходную энергию бомбардирующих частиц.

В настоящее время в ЛЯР ОИЯИ разработано и используется показанное на рис. 1 устройство диагностики пучков тяжелых ионов,

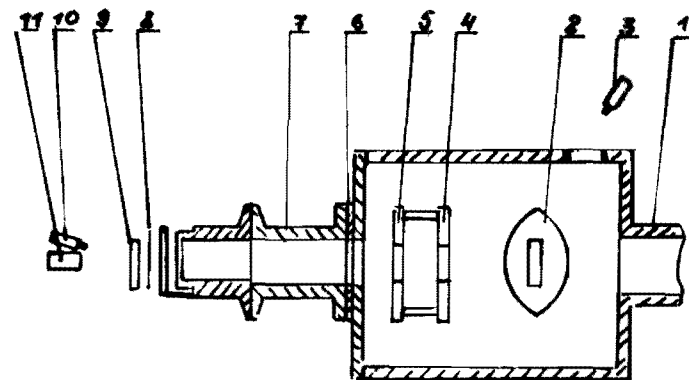


Рис.1. Устройство для диагностики пучка ионов.

позволяющее определять поток частиц и форму пучка в пределах рабочей части образцов во время их испытаний под облучением ¹⁴/ . Пучок ионов через коллиматор 1 /длина 200 мм, диаметр 30 мм/ попадает на диафрагму из тугоплавкого металла 2 /с прямоугольной прорезью 25x8 мм/, повернутую по отношению к пучку на 45°. По свечению краев диафрагмы, наблюдение за которой проводится с помощью телекамеры 3, определяется форма и положение пучка относительно центра диафрагмы. На диафрагме 4 /20x5 мм/ крепится секционированный монитор вторичной электронной эмиссии 5. Далее через диафрагму 6 и цилиндр Фарадея с открывающимся дном 7 пучок через алюминиевую фольгу выводится на воздух. Образец 8 для механических испытаний находится на расстоянии 4 см от выводной фольги. За образцом находится кварцевый экран 9 и телекамера 10, применяющаяся для индикации попадания пучка на всю площадь рабочей части образца. Юстировка диафрагм и положения

образца относительно их центра проводится с помощью лазера 11. Измерительным элементом устройства является секционированный монитор вторичной электронной эмиссии, выполненный в виде печатной платы с прямоугольным отверстием 25x8 мм, на которой расположены 10 алюминиевых фольг шириной 2,5 мм и толщиной 6 мкм. Эти фольги - секции монитора, расположенные таким образом, что, будучи изолированными друг от друга, составляют как бы сплошную фольгу, перекрывая отверстие в плате. Это исключает возможность неравномерного облучения мишеней за счет рассеяния ионов на фольгах. Схема монитора приведена в /14/.

Не останавливаясь на более детальном описании монитора и работы устройства, укажем лишь, что суммарная относительная погрешность при определении полного потока частиц, проходящих через образец, по величине тока эмиссии равна $\approx 15\%$.

Б. Установки для механических испытаний материалов на пучках тяжелых ионов

Вывод пучка ионов из ионпровода на воздух через разделительные фольги позволяет проводить механические испытания образцов с помощью обычных испытательных установок. Первые испытания на долговечность и ползучесть образцов из алюминия осуществлялись с помощью рычажных установок со специальными фигурными рычагами, обеспечивающими поддержание постоянного напряжения в течение всего эксперимента по растяжению образца /1/ вплоть до разрыва. Измерение деформации образца со временем проводилось индукционным датчиком с точностью примерно 1 мкм /2/.

В работах /8-13/ описана испытательная машина для регистрации кривых активного деформирования испытываемых образцов и кривых релаксации напряжений при облучении образцов тяжелыми ионами. Заметим, что применение сравнительно простых установок /1,2,8-13/ позволило получить важные экспериментальные результаты, однако в последнее время для изучения механических свойств материалов на пучках тяжелых ионов разработана более совершенная методика, а именно: на ускорителе У-400 ЛЯР установлена испытательная машина ИНСТРОН-1121, позволяющая деформировать испытываемые образцы как с заданной постоянной скоростью (от 0,05 мм/мин и выше), так и в режимах ползучести или программированного нагружения /3/. Конструкция стандартных захватов образцов к машине ИНСТРОН изменена таким образом, чтобы можно было бы осуществлять нагрев образцов электрическим током, что дает возможность контролировать температуру образца во время проведения измерений. Температура образца определяется стандартным образом: с помощью термпары, прикрепленной токопроводящим клеем к нижней лопатке образца. Получаемые в ходе эксперимента данные о значениях нагрузки на образец, его деформации и температуры, интенсивности пучка регистрируются многоканальным самописцем и передаются че-

рез преобразователь аналог-код на микропроцессор, позволяющий накапливать и обрабатывать информацию. Возможности микропроцессора существенно расширены за счет связи его с ЭВМ ТРА-11/40. Контроль параметров пучка осуществляется с помощью описанной выше системы диагностики /14/. Данные о распределении интенсивности частиц в пучке выводятся в виде гистограмм на дисплей микропроцессора. Основной задачей разработанной методики на основе машины ИНСТРОН является выполнение экспериментов непосредственно на пучках тяжелых ионов в режиме он-лайн. Наряду с решением этой основной задачи имеющееся оборудование позволяет также изучать явления радиационного упрочнения и охрупчивания материалов после предварительного облучения их тяжелыми ионами /в режиме офф-лайн/. При этом облучение образцов можно производить прямо в захватах машины ИНСТРОН, что позволяет начинать испытание материала сразу после окончания облучения /3/.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ АЛЮМИНИЯ

Исследования проводились на циклотроне У-300 ЛЯР ОИЯИ /1/. Ионы ^{12}C выводились из ионпровода через алюминиевую фольгу толщиной 20 мкм, после прохождения фольги они имели энергию около 80 МэВ. Образец закреплялся в зажимах рычажного устройства, обеспечивающего постоянное растягивающее напряжение в образце в течение опыта. Ось рычага была связана с осью потенциометра, что позволяло регистрировать кривую ползучести образца. Температура образца контролировалась термпарой.

Образцы были изготовлены из алюминиевой фольги /99,99%/ толщиной от 20 до 40 мкм и имели форму двойных лопаток с длиной рабочей части 22 и шириной 4 мкм. Исследовались два типа образцов: упрочненные прокаткой и отожженные на воздухе при температуре 400°C в течение часа. Погрешность в определении относительной деформации образцов составляла 0,01%. Температура облучаемых образцов контролировалась с точностью $\pm 10^\circ\text{C}$.

Эксперименты включали в себя измерения долговечности, относительной деформации на установившейся стадии ползучести и скорости ползучести без облучения (τ , $\Delta\epsilon$, $\dot{\epsilon}$) и под облучением (τ_j , $\Delta\epsilon_j$, $\dot{\epsilon}_j$). Во время облучения $\Delta\epsilon_j$ и $\dot{\epsilon}_j$ определялись следующим образом. Образец нагружался без облучения и в нагруженном состоянии подвергался облучению. Было обнаружено, что облучение резко ускоряет процесс ползучести, так что кривая радиационной ползучести имеет значительно больший наклон, чем без облучения. Если облучение прекратить, то скорость ползучести вновь уменьшается до исходной величины, как это схематично показано на рис.2. Если образец выдерживается под облучением до разрушения, то кривая ползучести дает возможность определить и радиационную долговечность. Несмотря на то, что в этих экспериментах регистрация ве-

на величину $\Delta \epsilon_j$ и затем постепенный выход на участок установившейся скорости ползучести. При выключении облучения наблюдается плавное уменьшение скорости ползучести вплоть до исходной.

Одной из проблем, которые решались в ^{12/}, было выяснение связи между скоростью установившейся радиационной ползучести $\dot{\epsilon}_j$ и радиационной долговечностью τ_j . Известно, что для испытаний без облучения имеет место соотношение $\tau \epsilon = \text{const} = B$. Опыты, описанные в ^{11,2/}, показали, что и в случае испытаний под облучением справедливо аналогичное соотношение:

$$\tau_j \cdot \dot{\epsilon}_j = \text{const} = B_j. \quad /4/$$

Более того, оказалось, что величины B и B_j близки друг к другу.

Полученный результат показывает, что между процессами деформирования и разрушения и в условиях облучения наблюдается тесная взаимосвязь. Вопрос о возможной интерпретации такой закономерности, по-видимому, следует считать открытым, так как законченной и общепринятой теории радиационной ползучести, и тем более радиационного разрушения, пока не существует.

Остановимся теперь на результатах изучения функциональной зависимости скорости радиационной ползучести от напряжения $\dot{\epsilon}_j(\sigma)$, полученной в ^{12/}. В этой работе на основе анализа экспериментальных данных было установлено, что при напряжениях больше предела текучести зависимость $\dot{\epsilon}_j(\sigma)$ может быть представлена в виде

$$\dot{\epsilon}_j \sim (\sigma - \sigma_i)^n, \quad /5/$$

где σ_i - внутреннее напряжение, близкое по величине к напряжению предела текучести, n - показатель степени ($n \geq 3$), зависящий от исходного состояния материала. Отметим, что подобная зависимость справедлива и для испытаний на ползучесть без облучения при температурах выше $0,5 T_{пл}$. Это дает возможность предположить, что на процесс пластической деформации под облучением оказывает влияние локальный разогрев материала вдоль траекторий ионов за счет ионизационных потерь энергии.

В работах ^{13,16/} из данных экспериментов по релаксации напряжений в холоднодеформированном алюминии, облучаемом ионами углерода, получены значения скорости радиационной ползучести в интервале напряжений $0,2 - 0,9$ предела текучести. Было установлено, что при таких напряжениях скорость радиационной ползучести линейно зависит от напряжения. Сопоставление кривых радиационной релаксации напряжений образцов, облучаемых в режимах непрерывного и циклического действия /частота $0,12$ Гц, глубина модуляции 50% / пучка, показало, что в условиях циклирования скорость радиационной ползучести увеличивается практически в 2 раза /рис.4/. Увеличение скорости ползучести при циклировании может быть объяснено динамическим преференсом точечных дефектов, так как период циклирования сравним с характерным временем преферен-

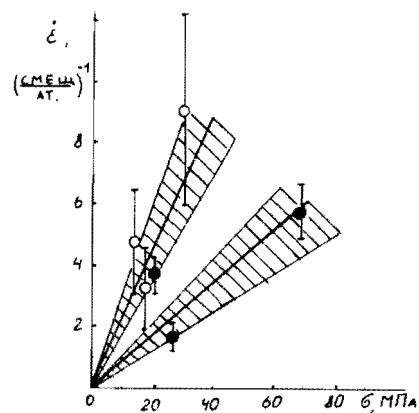


Рис.4. Зависимость скорости радиационной ползучести, отнесенной к скорости деформирования, от приложенного напряжения: ● - облучение постоянным средним током ионов, ○ - модулированное облучение.

са ^{16/}. Полученный результат свидетельствует о перспективности работ по изучению поведения материалов в условиях нестационарного облучения на пучках тяжелых ионов. Следует отметить, что исследование свойств материалов, находящихся под нагрузкой при нестационарном облучении, представляет особый интерес, вызванный ведущимися работами по созданию термоядерного реактора-токамака, работающего в периодическом режиме ^{14/}.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ НА ПУЧКАХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Проводимые в ЛЯР ОИЯИ исследования радиационно-стимулированного изменения механических свойств материалов включают и работы по изучению радиационного упрочнения металлов и сплавов. Для этого используется установка ИНСТРОН, а также такой традиционный метод, как измерение микротвердости.

В ^{15/} изучались прочностные свойства никеля, облученного ионами неона с энергией 230 МэВ. Образцы, находящиеся в захватах установки ИНСТРОН, облучались выведенным на воздух пучком. Сразу после облучения проводилось деформирование образца и оценивалась величина радиационного упрочнения по увеличению условного предела текучести σ_{02} . Изменение предела текучести $\Delta \sigma_{02}$ в зависимости от дозы повреждений представлено на рис.5, на котором также приведены аналогичные данные, полученные при облучении легкими ионами и нейтронами. Наблюдаемое качественное согласие между зависимостями $\Delta \sigma_{02}$ от дозы повреждений свидетельствует о возможности имитационных экспериментов. Зависимость радиационного упрочнения чистых металлов /никеля и ванадия/ от массы и энергии бомбардирующих ионов в интервале дозы повреждений $10^{-5} - 1$ смещ./ат. получена в ^{17/}. Показано, что наблюдаемое

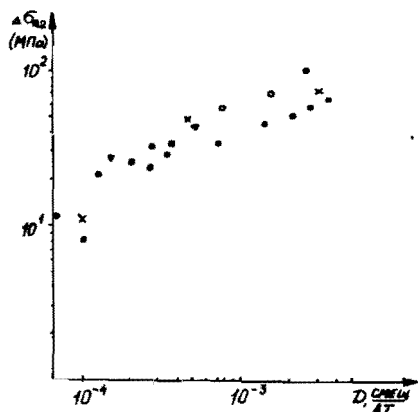


Рис. 5. Зависимость изменения условного предела текучести никеля от дозы повреждений: ∇ и \circ - облучение нейтронами с энергией 15 МэВ /разные экспериментальные данные/, \times - облучение протонами с энергией 16 МэВ и \bullet - ионами неона (8,5 и 11,5 МэВ/нуклон).

различие в изменении микротвердости в облученных образцах никеля и ванадия при одинаковом уровне повреждений

может быть объяснено различиями в жесткости спектров первично-выбитых атомов.

Метод измерения микротвердости применялся также для изучения прочностных свойств модельных сплавов на основе ванадия при послерадиационном отжиге /облучение проводилось ионами ксенона и кобальта с энергиями 1 МэВ/нуклон, а также быстрыми нейтронами/. Наиболее важным результатом работы^{/19/} является обнаружение зависимости радиационного и радиационно-отжигового упрочнения от состава и структурного состояния сплавов. Детальное изучение механических свойств сплавов при послерадиационном отжиге представляет значительный интерес как для выяснения механизмов влияния различных примесей на радиационные эффекты, так и с точки зрения отбора наиболее перспективных сплавов с уменьшенной величиной радиационно-отжигового упрочнения для последующих экспериментов в реакторах.

Тем самым в указанных работах^{/17,19/} показана принципиальная возможность имитации изменений механических свойств никеля и ванадия при их облучении нейтронами путем облучения тяжелыми ионами до таких же доз повреждений. Можно полагать, что и на других конструкционных материалах, используемых в реакторостроении, подобная имитация окажется возможной. Этот же вывод был сделан при изучении эффектов распухания на аустенитной стали 0X16N15M3B в работе^{/7/}, в которой были исследованы температурные и дозовые зависимости распухания, а также поведение концентрации и среднего диаметра вакансионных и дислокационных петель при облучении этой стали ионами железа с энергиями 12-13 МэВ с интенсивностью $6 \cdot 10^{12}$ ион/с при температурах от 400 до 800°C. Дозы облучения составляли от 20 до 200 смещений/атом (скорость создания смещений составляла $5 \cdot 10^{-3}$ смещений/атом.с). В указанной работе не обнаружено существенных отличий в протекании процесса радиационного распухания, вызываемого облучением тяжелыми ионами, от того, что наблюдался при нейтронном облучении. На основе полу-

ченных данных в работе^{/7/} сделан вывод, что использование тяжелых ионов для сравнительных испытаний материалов на радиационное распухание правомерно.

6. ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ АЛЮМИНИЯ, ОБЛУЧЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ УГЛЕРОДА

Помимо изучения влияния облучения тяжелыми ионами на параметры кривых деформирования, ползучести и релаксации исследуемых материалов для получения информации об особенностях радиационного дефектообразования под действием такого облучения необходимы и прямые исследования дефектной структуры этих материалов.

Приведем здесь результаты электронно-микроскопических исследований на высоковольтном микроскопе JEM-1000 дефектной структуры образцов алюминия после их облучения ионами углерода^{/4/}. Об-



наружено возникновение новой, не наблюдавшейся ранее в алюминии, дефектной структуры, представляющей собой образование в виде продолговатых стержней /см. рис.6/, что напоминает выделения новой фазы. Поскольку обнаруженные области малы, для определения их состава был использован метод микро-микродифракции, позволивший сделать вывод, что стержне-

Рис.6. Микрофотографии дефектной структуры, возникшей в алюминиевой фольге толщиной 250 мкм /а/ и 40 мкм /б/, облученной ионами ^{12}C с энергией 90 МэВ до дозы 10^{13} ион/см².

вые выделения представляют собой карбид алюминия - Al_4C_3 . Вопрос о том, образовались ли эти выделения непосредственно в процессе облучения или же в результате последующих диффузионных процессов, остается открытым и требует более детальных исследований.

Явления выделения новых фаз, подобные обнаруженным в алюминии, могут иметь место и в других материалах; отметим, что образование подобных выделений может влиять и на механические свойства облученных материалов.

Закономерности возникновения различного рода выделений как непосредственно во время облучения, так и в результате последующих диффузионных процессов заслуживают дальнейшего изучения с целью выяснения особенностей процессов радиационно-стимулированной диффузии, играющей важную роль в явлениях сегрегации и роста фаз в твердых растворах и других сложных соединениях.

7. ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ НА ДЕФЕКТНУЮ СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

При исследовании особенностей дефектообразования в твердых телах помимо изучения важных в практическом отношении материалов необходимо также проводить детальное изучение различных кристаллов как наиболее изученных и простых структур с точки зрения интерпретации получаемых результатов.

Примером подобных исследований может служить работа ^{15/}, в которой изучалось дефектообразование при облучении тяжелыми ионами кристаллов фтористого лития. На рис.7 схематично представлен расколотый по спайности образец LiF, подвергнутый воздействию

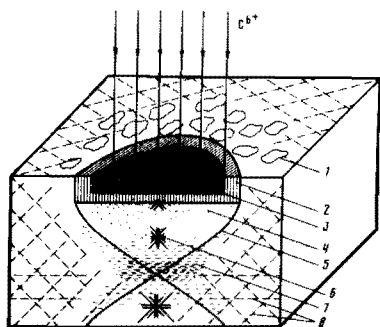


Рис.7. Схема изменений в строении кристалла LiF, облученного ионами ^{12}C при температуре подложки 100 K: 1 - участки конденсированной поликристаллической пленки, 2 - переходная область вокруг облученной зоны, 3 - зона имплантации ионов, 4 - распределение F-центров, 5 - распределение упругих напряжений, в верхней и нижней частях "песочных часов" напряжения имеют противоположный знак,

о чем свидетельствует неодинаковая деформация дислокационных розеток /6/, 7 - распределение свободных катионных вакансий, 8 - ряды винтовых /горизонтальные линии/ и краевых /косые линии/ дислокаций, возникших в результате пластической деформации объема кристалла при бомбардировке ионами.

ионов углерода с энергией 108 МэВ. Облучение также проводилось ионами ксенона и хрома для сравнения дефектообразования при действии различными ионами. Раскалывание кристалла после облучения проводилось примерно через центр облученной области, затем делались уколы индентором в разных частях образца и проводилось химическое травление для выявления выходов дислокаций. На рис.8

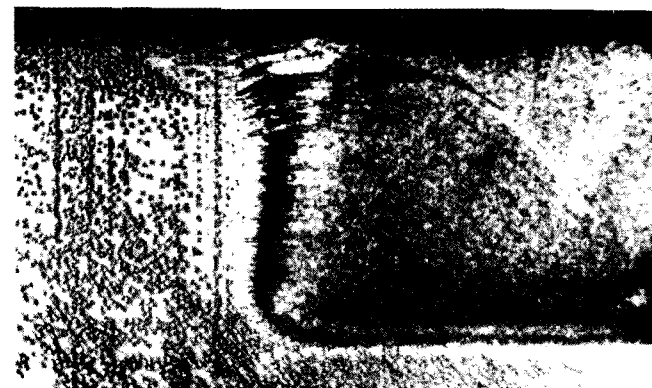


Рис. 8. Вид поверхности раскола образца LiF, перпендикулярно облученной ионами ^{12}C /см.рис.7/. После раскалывания поверхность протравлена избирательным травителем, выявляющим выходы дислокаций.

приведен вид поверхности раскола образца, облученного ионами углерода. Исследования микротвердости, проведение химического травления, а также применение спектроскопических и оптических методов в ^{15/} позволили сделать вывод, что изменения структуры и свойств образца, подвергнутого воздействию облучения тяжелыми ионами, не ограничиваются только областью внедрения и оказываются достаточно сложными, в частности, из облученной области имеет место распыление фтористого лития, внутри зоны имплантации имеются сильные нарушения, включая эффекты радиолитического распада. Указанные изменения удалось зарегистрировать спектрометрическими методами по убыванию F-центров за зоной имплантации.

Исследования изменений структуры и свойств кристаллов в результате облучения тяжелыми ионами проводились в работе ^{15/}, в которой изучались кристаллы окиси цинка, а также в работах ^{20,21/}, в которых рассмотрены изменения концентраций оптических центров поглощения при облучении кристаллов алмаза. Отметим, что и в этих работах обнаружены значительные изменения механических свойств и структуры за зоной остановившихся ионов. По-видимому, наблюдаемые за зоной имплантации изменения обуслов-

лены механическими напряжениями, возникающими при облучении, и процессами радиационно-стимулированной диффузии.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные выше эксперименты и полученные в них результаты позволяют сделать вывод о перспективности проведения дальнейших работ по изучению структуры и механических свойств различных материалов при облучении их тяжелыми ионами. Такие исследования необходимы как для дальнейшего развития общих представлений физики радиационных повреждений, так и для решения задач, связанных с имитацией реакторного облучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Регель В.Р. и др. - ЖТФ, 1981, 51, № 11, с.134. Препринт ОИЯИ 18-12741, Дубна, 1979.
2. Воробьев Е.Д. и др. - ЖТФ, 1983, 53, № 9, с. 1804.
3. Флеров Г.Н. и др. Препринт ОИЯИ 18-83-537, Дубна, 1983.
4. Воробьев Е.Д. и др. Препринт ОИЯИ 10-83-802, Дубна, 1983.
5. Regel L.L. et al. phys. stat. sol. (a), 1982, 73, p.255.
6. Воробьев Е.Д. - В сб.: 4-е Совещание по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. ОИЯИ, P18-82-117, Дубна, 1982, с. 93.
7. Воробьев Е.Д. и др. Препринт ОИЯИ 18-80-646, Дубна, 1980.
8. Афанасьев В.Д. и др. Препринт ОИЯИ 18-80-829, Дубна, 1980.
9. Афанасьев В.Д. и др. - Письма в ЖТФ, 1981, 7, № 11, с. 653.
10. Афанасьев В.Д. и др.-В сб.: Радиационные дефекты в металлах. М.: Наука, 1981, с.162.
11. Афанасьев В.Д. и др.-Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика рад. повреждений и рад. материаловедение, 1983, вып. 1 /24/, с. 71.
12. Афанасьев В.Д., Гофман Ю.И.- Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика рад. повреждений и рад. материаловедение, 1983, вып. 2 /25/, с. 96.
13. Афанасьев В.Д. и др. Препринт ОИЯИ 18-83-971, Дубна, 1983.
14. Хаванчак К. и др. Препринт ОИЯИ 13-84-601, Дубна, 1984.
15. Хаванчак К. и др. Препринт ОИЯИ P14-85-604, Дубна, 1985.
16. Афанасьев В.Д. и др.-В сб.: Совещание по использованию ядерных фильтров для решения научно-технических и народнохозяйственных задач и радиационному материаловедению. ОИЯИ, P18-86-110, Дубна, 1986, с.88.
17. Дидык А.Ю. и др. Препринт ОИЯИ 14-86-410, Дубна, 1986.

18. Никитенко В.А. и др.-В сб.: Совещание по использованию ядерных фильтров для решения научно-технических и народнохозяйственных задач и радиационному материаловедению. ОИЯИ, P18-86-110, Дубна, 1986, с. 112.
19. Гомозов Л.И. и др. Препринт ОИЯИ 14-86-409, Дубна, 1986.
20. Вариченко В.С. и др. Препринт ОИЯИ 14-85-893, Дубна, 1985.
21. Вариченко В.С. и др. Сообщение ОИЯИ 14-86-411, Дубна, 1986.
22. Регель Л.Л. - В сб.: Совещание по использованию ядерных фильтров для решения научно-технических и народнохозяйственных задач и радиационному материаловедению. ОИЯИ, P18-86-110, Дубна, 1986, с. 102.
23. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974, с.560.
24. Орлов В.В., Альтовский И.В. - Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1981, вып. 1/15/, с.9.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 января 1987 года.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Регель В.Р. и др. 14-87-30
Итоги и перспективы исследований на ускорителях ЛЯР ОИЯИ влияния высокоэнергетического ионного облучения на структуру, деформационные и прочностные свойства металлов и кристаллов

Дан обзор экспериментальных работ по радиационному материаловедению, проводимых в ЛЯР ОИЯИ на ускорителях тяжелых ионов. Приведено описание экспериментальных методик, позволяющих изучать свойства различных материалов в условиях облучения тяжелыми ионами. Рассмотрены результаты исследований свойств ряда кристаллов, металлов и сплавов, облученных тяжелыми ионами с энергиями от 1 до 10 МэВ/нуклон.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод авторов

Regel V.R. et al. 14-87-30
The Results and Perspectives of the Investigations at the Accelerators in LNR of JINR High Energy Ion Irradiation of Influence on the Structure, Deformational and Solid Metals and Crystal Properties

The review on radiation material test in LNR of JINR at heavy ion accelerators are given. The description of experimental methods, which can permit to study different material properties at heavy ion irradiation is presented. The results on different crystals, metals and alloy investigations, irradiated by ions with energies from 1 to 10 Mev/nucleon are considered.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987