

ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ. СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС ИМИТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин, Г.Д. Толстолуцкая

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
ул. Академическая, 1, Харьков, Украина, 61108, тел. 38 057 3353795
neklyudov@kipt.kharkov.ua, voyev@kipt.kharkov.ua, g.d.t@kipt.kharkov.ua*

Рассмотрены эффекты взаимодействия заряженных частиц с твердым телом: первичные процессы радиационной повреждаемости материалов, эволюция дислокационной структуры, особенности распада твердого раствора, концепции радиационного распухания и механизмы радиационной повреждаемости конструкционных материалов, полученные в имитационных экспериментах. Обсуждены достоинства и недостатки имитационных технологий. Представлены возможности минимизации ограничений и недостатков имитационных экспериментов при использовании ускорителей новых типов (двух или трех пучковых) и современных высокотехнологических методов исследования.

Введение

Ядерная энергетика является составной частью производства электроэнергии. Её развитие происходило и происходит в жесткой конкурентной борьбе, как с традиционными технологиями производства электроэнергии, так и с альтернативными (восстанавливаемыми) источниками. Наиболее эффективный (единственный) путь улучшения технических и экономических характеристик ядерного топливного цикла - увеличение выгорания (энергии, выделяемой при сжигании удельного количества ядерного топлива [Гига-Ватт дней на тонну]). Повышение выгорания ядерного топлива, увеличение длительности кампаний, повышение мощности и энергонапряженности единичных блоков ядерных энергетических установок обуславливают необходимость разработки новых конструкционных материалов [1]. Именно недостаточная радиационная стойкость конструкционных материалов ограничивает достижение более высоких уровней повреждений и таким образом тормозит достижение глубоких выгораний топлива [2]. Определяющим научно-техническим вызовом является длительное время (~20 лет) необходимое для разработки материалов, их тестирования, лицензирования, постановку в реактор и получение результатов. Создание радиационно-стойких материалов является очень сложной задачей из-за недостаточного понимания природы радиационно-индуцированных явлений и повреждения материалов в практически не исследованном интервале очень высоких доз облучения. Для решения этой задачи необходимо использование соответствующих облучательных устройств, в том числе ионных ускорителей, с целью определения механизмов радиационной повреждаемости и селекции материалов с высокой радиационной стойкостью.

В обзоре рассмотрены процессы взаимодействия твердых тел с потоками заряженных частиц и современный статус имитационных исследований.

Современное состояние имитационных экспериментов

С 1974 г. в ХФТИ развернуты широкомасштабные исследования в области физики радиационных явлений и использованию ускорителей в ра-

диационном материаловедении. В 1972 г. приказом министра Е.П. Славского утверждена программа работ по физике радиационных повреждений и радиационному материаловедению, обеспечивающая научное сопровождение развития работ по разработке новых конструкционных материалов и прогнозированию их поведения в реакторах на быстрых нейтронах и в термоядерных реакторах. ХФТИ назначен головной организацией по этой проблеме.

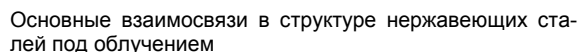
Имитационные технологии, разработанные в ХФТИ, могут значительно сократить время и материальные ресурсы при выборе и оптимизации химического состава, термической и термомеханической обработки материалов.

Мотивация развития имитационных технологий:

- Основные явления, ограничивающие использование материалов (охрупчивание корпусов реакторов, низкотемпературное распухание аустенитных сталей, рост и формоизменение циркониевых сплавов, распухание оболочек и чехлов быстрых реакторов), связаны между собой общей физикой явлений, характерных для облучаемых материалов, но проявляются в специфических условиях.
- Возможность использования материалов в ядерных энергетических установках определяется условиями облучения – энергетическим спектром нейтронов, температурой облучения и т.д., так как именно эти условия определяют поведение ансамблей точечных дефектов и трансмутантов, ответственных за механизмы деградации и размерной нестабильности.
- Поставленная цель – участие в «ядерном ренессансе» и достижение коммерчески необходимых уровней выгорания ядерного топлива может быть достигнута только на базе современных научных представлений о роли физических механизмов микроструктурной эволюции, ассоциируемых с изменением первоначальных физико-механических свойств при облучении.

Развитие теоретических представлений, экспериментальные исследования и моделирование процессов радиационной повреждаемости, эволюции дефектной структуры облучаемых материалов дают возможность предсказать поведение материала в реальных условиях их длительного использования в активных зонах атомных реакто-

- взаимодействие потоков точечных дефектов и атомов твердого раствора;
- сегрегация на стоках точечных дефектов;
- преференциальное поведение краевых дислокаций;
- изменение химического состава из-за протекания явления радиационно-индуцированной сегрегации и ядерной трансмутации.



- исследование стабильности систем, имеющих наномасштабные особенности, особая стабильность нанокластеров в ОДС сталях.

Облученные образцы не радиоактивны, в отличие от реакторных образцов, которые обладают высокой радиоактивностью, и обращаться с ними можно только в «горячих камерах».

- задача на будущее – исследование синергетических эффектов Ti, Nb, V, P, B, Si, с вероятным формированием систем мелких стабильных вы-

делений под облучением и вероятное снижение влияния процессов радиационно-индуцированной сегрегации.

Предполагается, что возможным способом улучшения радиационных характеристик аустенитных материалов может являться разработка ODS-аустенитных сталей.

Философия радиационной стойкости нержавеющей сталей: достижение приемлемого уровня распухания напрямую связано с созданием более стабильной микроструктуры при облучении.

Влияние легирования и обработки заключается в следующем:

- формирование более стабильной дислокационной структуры (сохранение мало подвижных петель Франка) и повышение уровня рекомбинации ТД. Это может быть достигнуто благодаря холодной деформации или процессами сегрегации легирующих элементов на дислокационных компонентах, что снижает их подвижность;
- сохранение мелких карбидных выделений (TiC) и фосфидов (Fe₂P). Продление срока их жизни служит основным фактором подавления распухания в этих сталях и сдвигает дозовый интервал формирования G-фаз и η - карбидов в область более высоких доз;
- задержка формирования G-фазы и η-карбидов должна сохранить в твердом растворе достаточное количество таких элементов как Ni, Si и P, которые в основном влияют на зарождение и рост пор.

В настоящее время существуют международные программы, направленные на разработку перспективных реакторов 4 Поколения, а также термоядерных реакторов. В этих программах предусматривается использование ферритно-мартенситных сталей, способных эксплуатироваться при температурах облучения 650-750 °С, уровнях повреждающих доз 200 смещений на атом (сна) и выше, а также, в большинстве случаев, при наработке высоких уровней газов (гелия и водорода).

Облучение тяжелыми ионами на нынешний момент в мире – это единственный способ исследования радиационной стойкости ферритно-мартенситных сталей, позволяющий достигать сверхвысоких доз облучения. В ННЦ ХФТИ реализована возможность высокодозного облучения и проведено исследование распухания ферритно-мартенситных сталей ЭП-450 и НТ-9 после облучения металлическими ионами Cr³⁺ (1,8 МэВ) до доз 300 сна в интервале температур 430–550 °С. Установлено, что максимум распухания стали ЭП-450 находится в области 480 °С. После продолжительного инкубационного периода ~150 сна

наблюдается переход к стационарной стадии распухания со скоростью 0,14 %/сна. Впервые показано, что распухание ферритной стали может достигать величины ~20 % [4].

Заключение

Таким образом, современная необходимость использования ускорителей диктуется такими основными задачами:

- Понимание механизма радиационного повреждения в ядерных материалах; получение более глубоких знаний относительно природы точечных дефектов и взаимодействия между ними.
- Установление корреляции между радиационно-индуцированными дефектами, структурно-фазовой эволюцией и механизмом деградации материалов.
- Исследование стабильности систем, имеющих нано-масштабные свойства. Это чрезвычайно важно для разработки и предсказания радиационного поведения при высоких дозах нано-выделений в ОДС сталях, которые являются наиболее привлекательными материалами для реакторов следующих поколений.
- Совместное облучение (реактор+ускоритель). Несмотря на экспериментальные сложности, этот метод может дать наилучшие результаты для предсказания радиационного поведения материалов при очень высоких дозах. Создание дефектной структуры, характерной для реакторного облучения за всю кампанию, может быть экспрессно достигнуто на этапе дооблучения на ускорителе.
- Разработка технологии предсказания радиационного поведения материалов вплоть до доз, необходимых для реакторов будущих поколений.

Для достижения основной цели – разработки материалов, которые обеспечат безопасную и экономичную эксплуатацию действующих и разрабатываемых ядерных установок, необходимо тесное сотрудничество между теоретиками, экспериментаторами и конструкторами.

Список литературы

1. Воеводин В.Н., Неклюдов И.М. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов. – Киев: Наукова думка. 2006. – 376 с.
2. Garner F. A. and Greenwood L. R. // Radiation Effects and Defects in Solids – 1998. –144. – P. 251.
3. Неклюдов И.М. Воеводин В. Н. // Физико-химическая механика материалов – 2006. – 42. – С. 15.
4. Бородин О.В., Брык В.В., Воеводин В.Н., Кальченко А.С, Куприянова Ю.Э., Мельниченко В.В., Неклюдов И.М., Пермяков А.В. // ВАНТ. Сер.: ФРП и РМ. – 2011. – Вып. 2(97). – С. 10.

EFFECTS OF SOLIDS WITH CHARGED PARTICLES FLUXES. MODERN STATUS OF SIMULATION INVESTIGATION

Ivan Neklyudov, Victor Voyevodin, Galina Tolstolutskaia

National science centre "Kharkov Institute of Physics and Technology"
1, Akademicheskaya St., Kharkov, Ukraine, 61108, tel./fax: +38 057 335 37 95
neklyudov@kipt.kharkov.ua, voyev@kipt.kharkov.ua, g.d.t@kipt.kharkov.ua

The data are presented on investigations carried out in Kharkov Institute of Physics and Technology (KIPT) during last years in the field of simulation and studies of radiation damage in materials with the use of accelerators of charged particles.

Using irradiation with charged particle beams one could reproduce and examine practically all the known radiation effects and investigate physical nature of these effects in more details under well-controlled conditions. Simulation experiments together with results of reactor investigation contribute much to radiation physics phenomena, radiation and ion-beam technologies as well as to creation of low-activated materials with good radiation resistance. The advantages and disadvantages of simulation experiments in comparison with reactor tests are discussed. The using of new types of accelerators (of two and three beams) and of modern methods of research allows minimize the restrictions and disadvantages in the using of results of simulation experiments caused by low depth of damaged layer. Modern status of using accelerators demand by such main tasks: understanding of radiation damage mechanism of nuclear materials; achievement of better knowledge of the nature of point defects and interaction between them; set up the correlation between radiation-induced defects, structure phase evolution and material degradation mechanism; investigation of stability of systems which have nanoscale features. It is especially important for development and prediction of radiation behavior at high irradiation doses of nano-precipitates in ODS steels, which are the most pronounce materials for of next generation.