

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности
«6D071000 — Материаловедение и технология новых материалов»

МЕРЕЖКО МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

Локализованная пластическая деформация в металлах (Cu, Fe) и аустенитных нержавеющей сталей (12X18H10T, AISI 304), облученных нейтронами

Общая характеристика работы. В диссертационной работе представлены экспериментальные результаты материаловедческих исследований локализации пластической деформации в образцах модельных металлических материалов (Fe, Cu) и реакторных аустенитных сталей (12X18H10T, AISI 304), облученных нейтронами до различных повреждающих доз.

Актуальность темы.

Научно обоснованное продление срока службы ядерных реакторов для сохранения их генерирующих мощностей без вложений в новое капитальное строительство является важным этапом развития мировой и казахстанской атомной отрасли. Срок службы энергетических ядерных реакторов зависит от работоспособности компонентов активной зоны, а именно, корпуса реактора и внутрикорпусных устройств (ВКУ). Ресурс внутрикорпусных устройств, выполненных из аустенитных сталей, типа 12X18H10T и AISI 304, ограничивается проявлением таких радиационно-стимулированных эффектов, как: распухание, коррозия под напряжением и низкотемпературное радиационное охрупчивание.

Низкотемпературное радиационное охрупчивание (НТРО) аустенитных сталей обусловлено снижением равномерной пластичности материала с ростом повреждающей дозы нейтронного облучения. В необлученных металлах, деформационные механизмы, локализованные на микроуровне, такие как дислокационные дефектные структуры, крупные дефекты упаковки и двойники приводят к упрочнению материала в процессе деформации и препятствуют локализации деформации на макроуровне (образованию геометрической «шейки»). С ростом дозы нейтронного облучения количество возможных типов дислокационных структур уменьшается, способность материала к деформационному упрочнению подавляется, что приводит к снижению равномерной пластичности и преждевременному образованию «шейки». Существует доза нейтронного облучения, после достижения которой шейка в аустенитных сталях образуется сразу после предела текучести, минуя стадию равномерной деформации, 15–40 смещений на атом (сна), что сопоставимо с расчетной дозой облучения ВКУ ядерных реакторов (например, фрагментов выгородки реактора ВВЭР-1000) после 30–40 лет эксплуатации (до 50 сна).

Одним из перспективных направлений решения проблемы НТРО является использование деформационных механизмов, локализованных на микроуровне, стимуляция которых может вызывать дополнительное упрочнение в процессе деформации и препятствовать локализации на макроуровне. К таким процессам относят мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращение. В процессе пластической деформации при относительно низких температурах ($<100^\circ\text{C}$) в аустенитной матрице метастабильных нержавеющих сталей образуются зерна α' -мартенсита, которые характеризуются значительно большей прочностью по сравнению с аустенитом.

За последние 10 лет были зарегистрированы случаи, когда низкотемпературная пластичность метастабильных аустенитных сталей типа AISI 304 и 12X18H10T после высокодозного (>40 сна) нейтронного облучения значительно превышала ожидаемую. В настоящее время существует научный консенсус о решающей роли мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращения в формировании пластичности в этих случаях. Примечательно, что этот эффект наблюдается в крайне широком диапазоне повреждающих доз от 7 до 150 сна.

Отдельный интерес вызывает динамическое деформационное старение. В процессе пластического течения при повышенных температурах в определенном диапазоне скоростей деформаций происходит периодическая блокировка движущихся дислокаций примесными атомами. Этот процесс может рассматриваться, как источник дополнительного упрочнения материала.

Несмотря на многочисленные исследования, посвященные изучению процессов охрупчивания и разрушения облученных конструкционных реакторных материалов, вопросы, связанные с установлением причин и закономерностей развития сосредоточенной деформации на разных масштабных уровнях, освещены явно недостаточно. Систематизированные знания закономерностей и особенностей проявления локализации деформации в облученных конструкционных материалах представляют большой научный и практический интерес в рамках решения проблемы НТРО и безопасного продления срока службы ядерных реакторов.

Цель диссертационной работы заключалась в установлении особенностей локализованного пластического течения в образцах модельных металлических материалов (Fe, Cu) и реакторных аустенитных сталей (12X18H10T, AISI 304), облученных нейтронами в реакторах Казахстана ВВР-К и БН-350.

Задачи исследования:

– Провести механические испытания на одноосное растяжения образцов меди, АРМКО-железа и аустенитных сталей, подвергнутых нейтронному облучению в реакторах ВВР-К и БН-350, определить их физико-механические характеристики и параметры образования геометрической шейки.

– Выявить влияние нейтронного облучения на динамическое деформационное старение АРМКО-железа, деформированного при повышенных температурах.

– Определить особенности мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращения в сталях 12X18H10T и AISI 304 и выявить его влияние на локализацию деформации.

– Установить связь между сформировавшейся в результате длительного высокодозного облучения в реакторе БН-350 микроструктурой и особенностями локализованного пластического течения в образцах аустенитной стали 12Х18Н10Т.

Объект исследования. Модельные металлические материалы с ОЦК и ГЦК кристаллическими решетками (Fe, Cu) и реакторные аустенитные стали (12Х18Н10Т, AISI 304), облученные нейтронами в реакторах ВВР-К и БН-350.

Предмет исследования. Локализованное пластическое течение в облученных нейтронами металлических материалах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Нейтронное облучение в реакторе ВВР-К до дозы в 0,05 сна приводит к снижению величины «истинной» локальной деформации, соответствующей началу образования стабильной «шейки» в аустенитных сталях 12Х18Н10Т и AISI 304 на 10% вследствие подавления упрочняющих деформационных механизмов, локализованных на микроуровне; в то время как величина «истинного» критического напряжения остается постоянной.

2. Дефекты радиационной природы, возникающие в структуре АРМКО-железа, облученного нейтронами в реакторе ВВР-К в диапазоне 0,006–0,06 сна приводят к подавлению деформационного динамического старения в процессе одноосного растяжения при температурах 100–300°С, способствуя при этом проявлению более сложных типов дислокационной структуры.

3. Дополнительное упрочнение стали AISI 304 вследствие более интенсивного деформационно-индуцированного мартенситного превращения увеличивает равномерную деформацию в 2 раза по сравнению со сталью 12Х18Н10Т как в необлученном, так и в облученном до 0,05 сна в реакторе ВВР-К состояниях, что позволяет рассматривать деформационно-индуцированное мартенситное превращение как эффективный способ борьбы с преждевременной локализацией деформацией на макроуровне в аустенитных сталях.

4. В метастабильной аустенитной стали 12Х18Н10Т, облученной до высоких повреждающих доз 45–57 сна, увеличение температуры облучения с 305 до 405°С приводит к росту пластичности материала в 2 раза и смене механизма локализованной деформации: от развития стационарной геометрической «шейки» к образованию подвижной «шейки» и ее перемещению от одного края рабочей области образца к другому.

Экспериментальные и теоретические методы. Для реализации поставленных задачи были применены современные методы исследований структуры и свойств модельных металлов и аустенитных нержавеющей сталей, включающие низкотемпературные механические испытания на растяжение с одновременным контролем фазового состава в локальных микрообъемах образца и динамической корреляцией изображений, оптическую и электронную микроскопию, микротвердость, изохронные отжиги.

Научная новизна и основные результаты работы:

– Впервые проведено систематическое и комплексное материаловедческое исследование локализации деформации в поликристаллических металлах с ОЦК (Fe) и ГЦК (Cu и аустенитные стали) кристаллическими решетками, облученных нейтронами до низких (<1 сна) и высоких (>40 сна) повреждающих доз.

– Впервые был обнаружен эффект увеличения равномерной пластичности и подавления динамического деформационного старения в облученном нейтронами АРМКО-железе.

– С применением методики корреляции цифровых изображений были выявлены два различных механизма деформации в высокооблученной (45–57 сна) аустенитной стали 12X18H10T в зависимости от температуры облучения (300–400°C) в реакторе БН-350. В результате исследований микроструктуры было установлено, что определяющим фактором в формировании пластичности в данном случае является мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращение и образование в структуре материала крупных дефектов типа пустот и вторичных фаз и создание областей, свободных от мелких дефектов, типа black-dots или небольших петель.

– Впервые были получены кривые индуцированного деформацией мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращения в высокооблученной (>40 сна) аустенитной стали 12X18H10T, определены кинетические параметры процесса.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлена использованием в работе актуальных литературных данных, опубликованных рецензируемых тематических журналах; применением современных и актуальных методов исследования, обсуждением полученных результатов с зарубежными коллегами. Результаты диссертации были опубликованы в высокорейтинговых научных журналах.

Практическая значимость исследования. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для прогнозирования работоспособности внутрикорпусных устройств ядерных энергетических установок выполненных из нержавеющей аустенитных сталей, с целью обоснования безопасного продления срока службы существующих промышленных ядерных реакторов; а также в развитии фундаментальных основ физики пластической деформации высокооблученных металлов и сплавов, которые будут безусловно полезны в промышленности Казахстана, связанной с ядерной энергетикой.

Связь темы диссертации с планами научных работ. Диссертационная работа выполнялась в рамках НИР по программам грантового финансирования научных исследований МОН РК: 0380ГФ/4 «Разработка физических основ решения проблемы низкотемпературного (20–300°C) радиационного охрупчивания конструкционных материалов для ядерных реакторов», АР08052488 «Управление пластичностью реакторных материалов после высокодозного нейтронного облучения».

Апробация работы проведена на семинарах отдела Радиационной физики твердого тела РГП ИЯФ РК, а также на 14-ти международных научных конференциях, в том числе: TMS 2021 Annual Meeting & Exhibition, 2021 (Online, USA); 20th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, 2022 (Aspen, USA); NuMat2022: The Nuclear Materials Conference, 2022 (Ghent, Belgium).

По материалам диссертации опубликовано 13 статей, в том числе 5 статей в журналах, рекомендуемых ККСОН, 4 работы опубликованы в материалах международных конференций, индексируемых в базах данных Scopus и Thomson Reuters. 4 статьи опубликованы в зарубежных научных журналах:

1. *Merezhko, M.S.* Merezhko, D.A., Rofman, O.V., Dikov, A.S., Maksimkin, O.P., Short, M.P. Macro-Scale strain localization in highly irradiated stainless steel investigated using digital image correlation // Acta Materialia. – 2022. – Vol. 231 – P. 117858 (IF=9,4; Q1. CiteScore=15,1; 96-й перцентиль).

2. Merezhko, D.A. Gussev, M.N., *Merezhko, M.S.*, Rofman, O.V., Rosseel, T.M., Garner, F.A. Morphology and elemental composition of a new iron-rich ferrite phase in highly irradiated austenitic steel // Scripta Materialia. – 2022. – Vol. 215 – P. 114690. (IF=6; Q1. CiteScore=10,7; 94-й перцентиль).

3. *Merezhko, M.S.*, Merezhko, D.A., Tsai, K.V. Mechanical Properties of Neutron-Irradiated Armco Iron upon Plastic Deformation at Elevated Temperatures // Physics of Metals and Metallography. – 2022. – Vol. 123, № 2. – P. 193-199 (IF=1,2; Q3. CiteScore=2,0; 30-й перцентиль).

4. *Merezhko, M.S.*, Maksimkin, O.P., Merezhko, D.A., Shaimerdenov, A.A., Short, M.P. Parameters of Necking Onset during Deformation of Chromium–Nickel Steel Irradiated by Neutrons // Physics of Metals and Metallography. – 2019. – Vol. 120, № 7. – P. 716-721 (IF=1,2; Q3. CiteScore=2,0; 30-й перцентиль).

Во всех публикациях диссертант принимал участие в написании итогового текста (если диссертант указан как 1-й автор – основной части рукописи), определении выводов. В отдельных случаях выступал как автор-корреспондент.

Личный вклад диссертанта

В процессе исследования автором были проведены комплексные материаловедческие исследования локализации деформации в поликристаллических металлах, на основе литературного обзора выполнен анализ полученных результатов, сформулированы выводы.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа содержит список используемых обозначений и сокращений, введение, основную часть, состоящую из трех разделов, заключение, приложение и список использованных литературных источников. Объем диссертации составляет 125 печатных страниц, 66 рисунков, 27 таблиц и 160 литературных источников.