

На правах рукописи

УДК 621.039.531:669.15-194.56:539.4

ГРНТИ 53.49.17



СОРОКИН Александр Андреевич

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
И РАЗРУШЕНИЯ СИЛЬНООБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВКУ ВВЭР**

Специальность 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2015 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Наряду с корпусом реактора наиболее ответственными элементами реакторных установок (РУ) типа ВВЭР, определяющими безопасность их эксплуатации, являются внутрикорпусные устройства (ВКУ), которые формируют активную зону, удерживают топливные сборки на своих местах, организуют поток теплоносителя в реакторе, удерживают и защищают органы регулирования, снижают поток нейтронов на корпус реактора (КР). ВКУ являются фактически незаменимыми и, как и КР, определяют ресурс РУ.

К сожалению, до последнего времени ВКУ, в отличие от корпуса реактора, не уделялось сколь-нибудь значимого внимания. Считалось, что целостность и работоспособность ВКУ, изготовленных из аустенитной стали, обладающей большим запасом пластичности, не могут быть нарушены в процессе эксплуатации под действием незначительных весовых нагрузок, термических напряжений и нагрузок, вызванных гидропульсацией теплоносителя. Поэтому работы по созданию норм расчета на прочность элементов ВКУ ВВЭР не проводились.

В то же время опыт эксплуатации ВКУ зарубежных реакторов типа PWR и материаловедческие исследования влияния облучения на аустенитные стали показали необходимость создания специальных методик и норм расчета прочности и работоспособности ВКУ с учетом деградации материала в процессе эксплуатации.

Эта деградация в первую очередь проявляется в сильном снижении пластичности и трещиностойкости под действием нейтронного облучения, интенсивность которого на три порядка превышает интенсивность потока нейтронов, приходящуюся на КР. Учитывая значительные внутренние напряжения, возникающие в процессе эксплуатации вследствие радиационного распухания и температурного расширения материала, возможна фрагментация элементов ВКУ. Кроме того, в результате радиационного распухания и радиационной ползучести происходит значимое изменение геометрических размеров элементов ВКУ, что может привести к непредусмотренному проектом контакту элементов и нарушению работоспособности ВКУ.

К моменту начала работы над диссертацией отсутствовали как методология расчета прочности и работоспособности элементов ВКУ, так и экспериментально обоснованные зависимости для прогнозирования влияния нейтронного облучения и сопутствующих процессов (радиационного распухания, радиационной ползучести, образования радиационно-индуцированных фаз и т.п.) на свойства материала ВКУ, необходимые для адекватной оценки работоспособности, в частности, на характеристики

прочности и пластичности, трещиностойкость и сопротивление развитию трещин в элементах ВКУ.

В связи с изложенным была поставлена следующая цель диссертационной работы.

Цель работы

Целью работы является разработка методологии оценки прочности и работоспособности элементов ВКУ ВВЭР с учетом эксплуатационных факторов, исследование механизмов деградации материалов ВКУ и разработка методов прогнозирования их свойств.

Для достижения цели решены следующие задачи.

- Выявлены основные повреждающие эксплуатационные факторы, определяющие прочность и работоспособность ВКУ ВВЭР.

- Исследованы основные механизмы деградации материалов ВКУ под действием нейтронного облучения, приводящие к снижению пластичности, трещиностойкости и прочности материала.

- Проведен комплекс экспериментальных исследований по определению механических свойств и трещиностойкости облученных материалов ВКУ в диапазоне температур облучения 320÷450 °С, доз нейтронного облучения 7÷150 сна и температур испытаний 20÷490 °С.

- На основании экспериментального исследования механических свойств, микроструктуры и фрактографических исследований разработана физико-механическая модель, описывающая основные механизмы вязкого разрушения аустенитных сталей и учитывающая влияние на них таких факторов, как доза и температура нейтронного облучения, радиационное распухание, температура испытаний и жесткость напряженного состояния.

- Выполнено физико-механическое моделирование процессов разрушения материала ВКУ; на базе такого моделирования определены основные закономерности влияния дозы нейтронного облучения, температуры испытания и облучения на статическую трещиностойкость и пластичность материалов ВКУ.

- Определены режимы облучения, приводящие к фазовому $\gamma \rightarrow \alpha$ превращению в аустенитных сталях. Установлено влияние радиационно-индуцированной α фазы на охрупчивание материала ВКУ. Сформулирован критерий перехода материала ВКУ из вязкого состояния в хрупкое.

- Разработана зависимость для прогнозирования скорости роста трещины в условиях радиационной ползучести.

- Разработаны зависимости для прогнозирования механических свойств, деформационного упрочнения и статической трещиностойкости материала ВКУ в процессе эксплуатации вплоть до дозы нейтронного облучения 150 сна.

Научная новизна работы

- Разработана методология оценки прочности и работоспособности элементов ВКУ ВВЭР с учетом влияния основных эксплуатационных факторов.
- Определены закономерности влияния различных режимов нейтронного облучения (температура и доза) и условий нагружения (температура и жесткость напряженного состояния) на механические свойства материалов ВКУ ВВЭР. Предложены уравнения, описывающие эти закономерности.
- Установлены основные механизмы влияния радиационного распухания на охрупчивание облученных аустенитных сталей.
- Определены режимы нейтронного облучения, при которых происходит фазовое $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение, приводящее к возникновению вязко-хрупкого перехода в материалах ВКУ. Показано, что пластичность материала при квазихрупком разрушении близка к нулю.
- Разработана физико-механическая модель вязкого разрушения, позволяющая прогнозировать влияние нейтронного облучения, радиационного распухания и температуры испытаний на пластичность и статическую трещиностойкость аустенитных сталей.
- Получены уравнения, описывающие влияние радиационного распухания на пластичность и статическую трещиностойкость материалов ВКУ.
- Установлены механизмы вязкого разрушения материала, приводящие к резкому снижению прочности (до величин ниже предела текучести) облученных аустенитных сталей.
- Разработан подход к оценке скорости роста трещины при радиационной ползучести в материале ВКУ ВВЭР.

Практическая значимость работы

- Разработанная методология оценки прочности и работоспособности элементов ВКУ ВВЭР положена в основу Руководящих документов и Методик ОАО «Концерн Росэнергоатом»: РД ЭО 1.1.2.99.0944-2013 «Методика расчета прочности и остаточного ресурса внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет» и МТ 1.2.1.15.0230-2014 «Методика расчета прочности ВКУ РУ ВВЭР-440 (В-213) при ПСЭ до 55 лет». В эти документы также вошли полученные в рамках диссертации зависимости для прогнозирования физико-механических свойств материала ВКУ ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 – стали 08X18H10T и металла сварных соединений.
- Разработанная в рамках диссертации физико-механическая модель вязкого разрушения использовалась при создании зависимостей для прогнозирования характеристик пластичности и статической трещиностойкости материалов основных элементов реакторных установок на быстрых нейтронах с

натриевым теплоносителем, включенных в Методику ОАО «Концерн Росэнергоатом»: МТ 1.2.3.06.0991-2014 «Расчет прочности основных элементов реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем на стадии проектирования».

- Разработанная методология оценки прочности и работоспособности элементов ВКУ ВВЭР и полученные зависимости для прогнозирования физико-механических свойств материалов ВКУ включены в международный код МАГАТЭ “Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs “Verlife”, 2003-2012”.

- Упомянутые в данном разделе Руководящие документы и Методики для расчета прочности ВКУ ВВЭР одобрены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (РОСТЕХНАДЗОР).

- На базе разработанных Руководящих документов и Методик ведется обоснование продления срока эксплуатации реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

Основные положения, выносимые на защиту

- Методология оценки прочности элементов ВКУ ВВЭР.
- Результаты исследования и зависимости, описывающие влияние дозы и температуры нейтронного облучения, радиационного распухания и температуры испытаний на механические свойства материалов ВКУ ВВЭР.
- Результаты исследования возникновения фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, его влияния на охрупчивание материалов ВКУ и формулировка критерия $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, приводящего к появлению вязко-хрупкого перехода.
- Результаты исследования влияния радиационного распухания на статическую трещиностойкость материалов ВКУ.
- Выявленные механизмы охрупчивания аустенитных сталей под действием радиационного распухания.
- Разработанная физико-механическая модель вязкого разрушения, позволяющая прогнозировать влияние нейтронного облучения, радиационного распухания и температуры испытаний на пластичность и статическую трещиностойкость аустенитных сталей.
- Расчетные зависимости для прогнозирования влияния радиационного распухания на пластичность и статическую трещиностойкость материала.
- Подход к оценке скорости роста трещины при радиационной ползучести в материале ВКУ ВВЭР и расчетная зависимость для такой оценки.

Достоверность результатов

Экспериментальные исследования проводились согласно российским и международным стандартам на сертифицированном оборудовании. Расчетные методы использовали теорию статистической обработки результатов, а также

математические методы решения нелинейных задач. Модели строились на базе методов математической физики. Достоверность результатов обусловлена соответствием полученных расчетных данных и зависимостей оригинальным экспериментальным данным, а также данным из литературных источников, полученных при сходственных условиях эксперимента.

Апробация работы

Материалы, представленные в диссертации, были доложены на конференциях:

- 10 Международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», 14-18 июня, Санкт-Петербург, 2008.
- 6 Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 26-29 мая, 2009, г. Подольск, ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»
- ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2009, July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic
- IX Российская конференция по реакторному материаловедению, 14-18 сентября, 2009, г. Димитровград, ОАО «ГНЦ НИИАР».
- FINAL DISSEMINATION MEETING OF TAREG PROJECTS 2.00/01 AND 2.03/01, 30 November - 1 December, 2010, Kiev, Ukraine.
- Межотраслевая научно-техническая конференция «Исследовательскому комплексу ИВВ-2М - 45 лет», 26-27 мая, 2011, г. Заречный, ОАО «ИРМ»
- Межотраслевой семинар «Физика радиационных повреждений материалов атомной техники», 24-26 апреля, 2012, г. Обнинск.
- 12 Международная конференция "Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС", 5-8 июня, 2012, г. Пушкин.
- 19th European Conference on Fracture “Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety”, Kazan, Russia, 26-31 August, 2012.
- Международная научно-техническая конференция «Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС «РЕСУРС – 2012» Киев, Украина, 2 – 5 октября, 2012.
- X Российская конференция по реакторному материаловедению, 27-31 Мая, 2013, Димитровград, ОАО «ГНЦ НИИАР».
- Научная конференция, посвященная 50-летию ОРМ «Новые материалы для инновационного развития атомной энергетики», Димитровград, 24-27 марта, 2014, ОАО «ГНЦ НИИАР».
- Межотраслевой семинар «Физика радиационных повреждений материалов атомной техники», 22-24 апреля, 2014, г. Обнинск.

- 13 Международная конференция "Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС", 2-6 июня, 2014, теплоход Санкт-Петербург-Валаам-Мандроги-Санкт-Петербург.
- Международная конференция Fontevraud 8 «Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs' Safety, Performance and Reliability», 15-18 September, 2014, Avignon, France.
- Межотраслевой семинар «Физика радиационных повреждений материалов атомной техники», 21-23 апреля, 2015, г. Обнинск.

Личный вклад автора

Лично автором проведена обработка экспериментальных результатов исследования механических свойств, статической трещиностойкости и радиационного набухания, фрактографические исследования образцов, расчеты по моделированию влияния условий облучения и испытания на пластичность, трещиностойкость и прочность материалов ВКУ, разработаны зависимости для прогнозирования механических свойств и трещиностойкости. Основные результаты по выполненной работе подготовлены к публикации автором диссертации.

Автором, совместно с научным руководителем:

- развита методология оценки прочности и ресурса элементов ВКУ;
- разработана физико-механическая модель вязкого разрушения;
- развит подход к оценке скорости роста трещины в условиях радиационной ползучести;
- сформулирован критерий охрупчивания материала ВКУ при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении;
- выполнена постановка экспериментальных исследований и разработана методология обработки результатов.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 15 работ в ведущих российских и зарубежных рецензируемых научных журналах и изданиях. Из них 6 работ опубликовано в рецензируемых журналах из перечня ВАК и 4 работы в международных изданиях, включенных в международные базы цитируемости.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав и выводов по диссертации. Работа изложена на 207 страницах, включая 89 рисунков и 10 таблиц. Библиографический указатель состоит из 194 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проблемы оценки прочности и ресурса элементов ВКУ ВВЭР, а также необходимость разработки методов прогнозирования свойств материалов ВКУ и получения расчетных зависимостей для прогнозирования свойств. Указана цель диссертационной работы и решаемые задачи. Приведены основные положения, выносимые автором на защиту, представлена научная новизна полученных результатов и их практическая значимость.

В **первой главе** рассмотрены конструкция ВКУ ВВЭР и условия их эксплуатации. Проведен обзор литературы и дан анализ влияния основных эксплуатационных факторов: нейтронного облучения, температуры эксплуатации и теплоносителя I-го контура ВВЭР – на физико-механические характеристики хромо-никелевых аустенитных сталей, к классу которых принадлежат материалы ВКУ. Обозначены нерешенные проблемы, имеющиеся на момент начала работы над диссертацией, сформулированы и обоснованы цель работы и решаемые задачи.

Вторая глава посвящена разработке методологии оценки прочности и ресурса элементов ВКУ ВВЭР с учетом действующих на них эксплуатационных факторов и механизмов деградации аустенитных хромо-никелевых сталей под облучением.

Анализ условий эксплуатации ВКУ и механизмов повреждения их материалов показал следующее. Ввиду значимого радиационного упрочнения материала, условия статической прочности элементов ВКУ не нарушаются в процессе эксплуатации. В то же время вследствие сильного снижения трещиностойкости материала ВКУ и наличия в элементах значимых внутренних напряжений, обусловленных градиентом температуры и радиационного распухания, существует опасность нестабильного развития исходных технологических трещиноподобных дефектов и/или трещин, зародившихся в процессе эксплуатации ВКУ, что может привести к фрагментации элементов ВКУ.

Кроме того, даже при отсутствии трещин и сохранении пластичности и трещиностойкости материала на уровне необлученного состояния, возможно нарушение работоспособности ВКУ вследствие изменения геометрических размеров элементов за счет радиационного распухания и радиационной ползучести материала.

Для схематизации и алгоритмизации расчета прочности и работоспособности ВКУ введено понятие «критическое событие», т.е. такое событие, которое влияет на прочность и/или работоспособность элемента ВКУ, но не обязательно приводит к их полной потере.

Исходя из рассмотренных эксплуатационных факторов введены следующие критические события:

- зарождение трещины по механизму усталости;
- зарождение трещины по механизму коррозионного растрескивания;
- формирование зон предельного охрупчивания (ЗПО) материала;
- достижение трещиноподобным дефектом (за счет его роста по механизмам усталости, коррозионного растрескивания и в процессе радиационной ползучести, а также за счет увеличения ЗПО под облучением) критического размера, при котором происходит либо его дальнейшее нестабильное развитие, либо потеря несущей способности элемента с таким дефектом;
- недопустимое изменение размеров элемента конструкции.

Прочность элемента ВКУ считается обеспеченной, если в рассматриваемый период эксплуатации ВКУ не реализуется критическое событие «достижение трещиноподобным дефектом критического размера».

Работоспособность элемента ВКУ считается обеспеченной, если в рассматриваемый период эксплуатации ВКУ обеспечивается прочность элемента и не реализуется критическое событие «недопустимое изменение размеров элемента конструкции».

Поскольку облученный материал имеет низкое сопротивление не только старту, но и росту трещины, выполнение для трещины условия старта ($J = J_c$) практически означает ее нестабильное развитие. В связи с этим в качестве критерия нестабильного развития трещины используется критерий достижения J -интегралом критического значения J_c .

Третья глава посвящена исследованию механизмов, приводящих к фазовому $\gamma \rightarrow \alpha$ превращению в аустенитных сталях под облучением, и его влиянию на охрупчивание материалов ВКУ.

Обобщение и анализ литературных данных показали, что процессом, обуславливающим $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение, является обеднение твердого раствора элементами, стабилизирующими аустенитную фазу (в основном никелем).

Такое обеднение может происходить по следующим механизмам.

а) Диффузия никеля к свободным поверхностям, каковыми в сильнооблученной аустенитной стали являются, в первую очередь, поверхности вакансионных пор, обуславливающих распухание, и границы зерен. В результате такой диффузии образуются радиационно-индуцированные сегрегации никеля вокруг пор и на границах зерен.

б) Образование вторичных фаз, содержащих аустенитостабилизирующие элементы. К этим фазам относятся G-фаза (типа $Me_6Ni_{16}Si_7$) с повышенным содержанием никеля, γ' -фаза, а также карбиды титана, содержащие стабилизатор аустенита углерод.

Как правило, механизм «б» преобладает в сталях со сложным легированием, в которых под облучением выделяется большое количество вторичных фаз. В этом случае, помимо никеля из матрицы во вторичные фазы также диффундируют элементы, снижающие склонность стали к распуханию (Si, Ti, C). При этом процесс распухания начинает происходить более интенсивно. В дальнейшем обеднение матрицы никелем продолжается преимущественно по механизму «а» за счет распухания.

Стоит отметить, что G-фаза может образовываться в области сегрегации никеля у поверхности вакансионной поры. В таком случае обеднение никелем твердого раствора идет по механизму «а», а появление радиационно-индуцированной G-фазы является следствием перераспределения никеля в материале с вакансионными порами.

Как видно распухание является обобщенным параметром, который индексирует обеднение никелем матрицы материала вне зоны пор. Следовательно, величина распухания может служить критерием $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

Для экспериментального подтверждения связи распухания с $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением и исследования влияния превращения на охрупчивание материалов ВКУ были проведены механические испытания двух групп образцов из стали 08X18H10T и металла шва, облученных до близких повреждающих доз нейтронного облучения $46 \div 49$ сна при разных температурах облучения $T_{\text{обл}}$. Первая группа была облучена в диапазоне температур $T_{\text{обл}} = 330 \div 340$ °С (НТО – низкотемпературное облучение) и имела распухание, близкое к нулю; вторая группа была облучена в диапазоне температур $T_{\text{обл}} = 400 \div 450$ °С (ВТО – высокотемпературное облучение), а полученные значения радиационного распухания образцов находились в диапазоне от 3 до 13%.

Результаты испытаний показали, что пластичность как стали 08X18H10T, так и металла шва после НТО снижается незначительно, при этом вид температурной зависимости пластичности характерен для вязкого разрушения. На рисунке 1 представлены температурные зависимости пластичности в терминах относительного сужения ψ для стали и металла шва в исходном состоянии и после ВТО, ранжированные по распуханию. Как видно из рисунка в материале после ВТО с распуханием больше 7 % наблюдается вязко-хрупкий переход при температуре $T_{\text{tr}} = 290$ °С с близкой к нулю пластичностью при квазихрупком разрушении.

Фрактографические исследования обнаружили две различные моды квазихрупкого разрушения материала. На базе проведенных исследований микроструктуры и поверхности разрушения материала были предложены механизмы, объясняющие появление двух различных мод (рисунок 2).

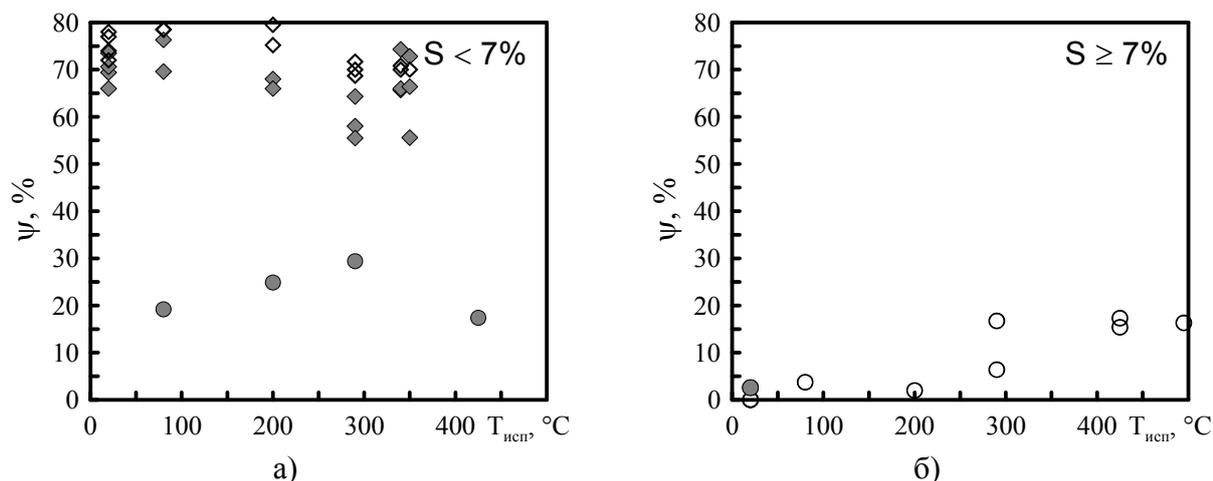
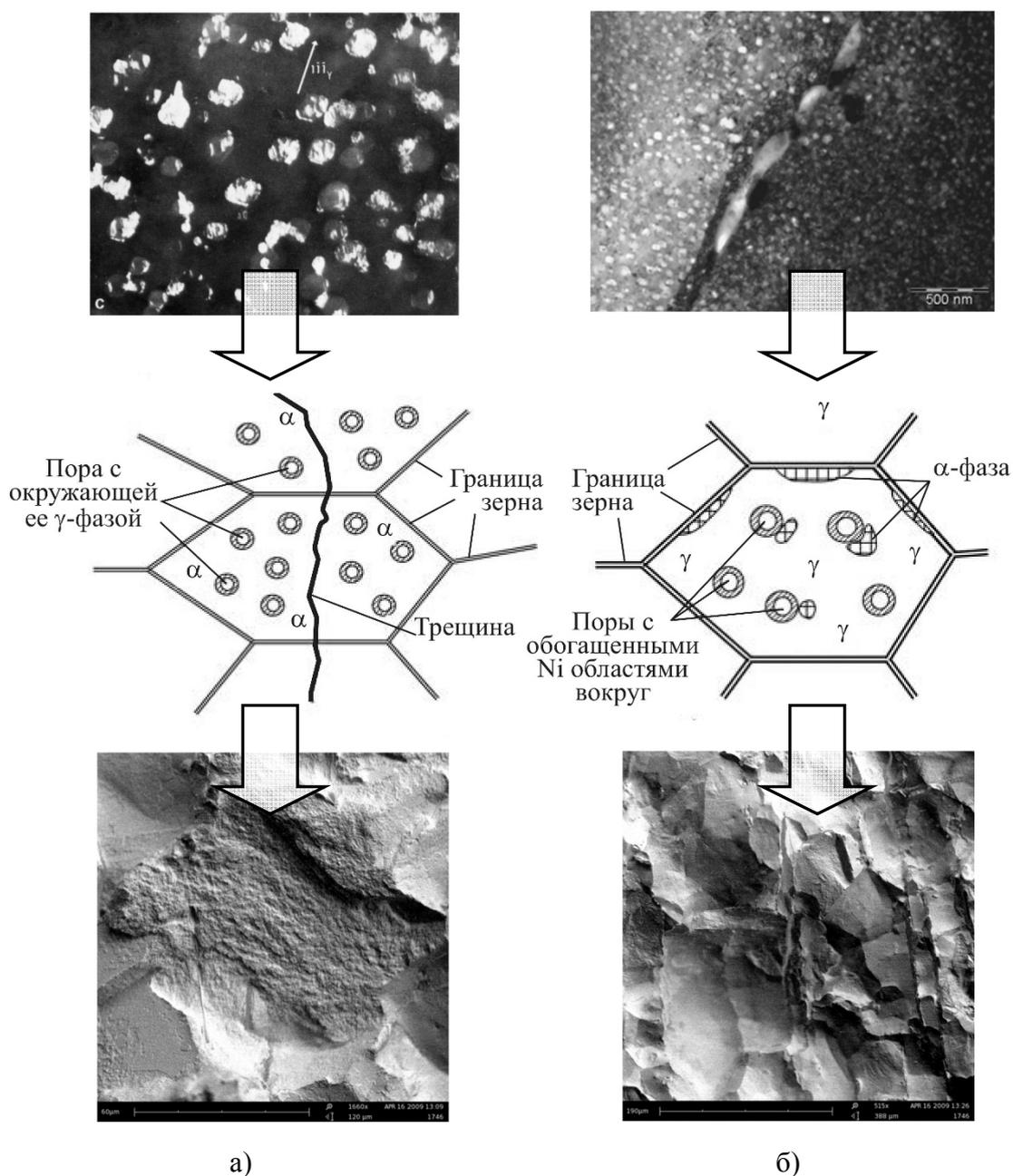


Рисунок 1 – Температурные зависимости относительного сужения ψ для стали 08X18N10T (\diamond , \circ) и металла шва (\blacklozenge , \bullet) в исходном (\diamond , \blacklozenge) состоянии и после ВТО (\circ , \bullet) с распуханием выше (а) и ниже (б) 7%

В случае, когда фазовое $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение реализуется по всему объему образца за исключением областей с высоким содержанием никеля вокруг вакансионных пор (назовем подобное превращение полным $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением), хрупкое разрушение происходит по механизму внутризеренного скола. Подобное разрушение может происходить в материале с односвязной областью α -фазы, в которой происходит хрупкое распространение трещины без торможения в γ -фазе.

Вторая мода реализуется, когда количество α -фазы после $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения незначительно (назовем подобное превращение частичным $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением). Поскольку никель диффундирует к порам и границам зерен, области с пониженным содержанием никеля, где зарождается α -фаза, находятся в теле зерна и вблизи границ зерен рядом с сегрегациями никеля. Хрупкое разрушение инициируется по границе фаз $\gamma - \alpha$ вследствие значительных сдвиговых деформаций в этой области за счет разницы в плотности α - и γ -фаз. Зарождение микротрещин в теле зерна не может привести к хрупкому разрушению на макроуровне, т.к. их распространение будет остановлено вязкой γ -фазой. В то же время микротрещины, зародившиеся вблизи границ зерен, могут легко распространяться по границе зерна, т.к. прочность границы, имеющей острые микротрещины, мала.

Проведенные в главе исследования показали влияние $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения на охрупчивание материала ВКУ и его связь с радиационным распуханием. Для прогнозирования такого охрупчивания введен критический уровень распухания $S_{крит}$ при котором размер областей α -фазы становится достаточно большим для возникновения квазихрупкого макроразрушения. Тем не менее следует отметить, что даже при квазихрупком разрушении общее количество радиационно-индуцированной α -фазы в материале составляет порядка 10%. На базе анализа исследованных образцов материалов ВКУ ВВЭР: стали 08X18N10T и металла шва – получено значение $S_{крит} = 7\%$.



а)

б)

Рисунок 2 –Разрушение материала после полного (а) и частичного (б) $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

Сверху вниз: микроструктура*, механизм разрушения, поверхность разрушения

* для иллюстрации микроструктуры «а» использован рисунок из статьи Porter D.L. and Wood E.L. In –Reactor Precipitation and Ferritic Transformation in Neutron-Irradiated Stainless Steels. J. of Nucl. Mater. 83 (1979), pp. 90-97

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния нейтронного облучения на механические свойства и деформационное упрочнение материалов ВКУ, а также получены расчетные зависимости для прогнозирования указанных характеристик.

Экспериментальные исследования проводились на образцах из стали 08X18H10T и металла шва в исходном состоянии и после их нейтронного облучения в диапазоне температур 320÷450 С до повреждающих доз от 7 до 49 сна, а также на металле отработавших сборок бокового отражателя ректора

БОР-60, изготовленных из стали 12Х18Н10Т и облученных до максимальной повреждающей дозы нейтронов 150 сна.

Для описания температурной зависимости предела текучести $\sigma_{0,2}$ материала в исходном состоянии использовалось уравнение, вытекающее из физической теории пластичности и широко применяемое для сталей различного класса, в том числе и аустенитных сталей

$$\sigma_{0,2}(T_{исп}) = \sigma_{YG} + \sigma_{YS}(T_{исп}), \quad (1)$$

где σ_{YG} – температурно-независимая (атермическая) компонента предела текучести; $\sigma_{YS}(T_{исп})$ – температурно-зависимая компонента предела текучести, описываемая уравнением

$$\sigma_{YS}(T_{исп}) = \beta \cdot \exp(-h \cdot (T_{исп} + 273)), \quad (2)$$

где $T_{исп}$ – температура в °С; β и h – независимые от температуры константы материала.

Температурная зависимость предела прочности материала в исходном состоянии описывалась уравнениями, аналогичными (1) и (2).

Известно, что как для аустенитных, так и для перлитных сталей, под облучением происходит увеличение только атермической компоненты предела текучести. При этом вид зависимости $\sigma_{YS}(T_{исп})$ остается неизменным. Тогда при фиксированной температуре облучения температурно-дозовую зависимость предела текучести можно представить в виде

$$\sigma_{0,2}(T_{исп}, D) = \sigma_{0,2}^0(T_{исп}) + \Delta\sigma_{YG}(D), \quad (3)$$

где $\Delta\sigma_{YG}$ – приращение атермической части предела текучести, D – повреждающая доза.

Радиационное упрочнение связано с образованием барьеров для движения дислокаций в процессе нейтронного облучения, которыми, в первую очередь, являются дислокационные петли и частицы радиационно-индуцированных фаз. Поскольку при высоких значениях дозы наступает динамическое равновесие между процессом генерации петель и их аннигиляции, зависимость плотности дислокационных петель от повреждающей дозы нейтронов должна иметь насыщение. Согласно имеющимся данным насыщение имеет и концентрация радиационно-индуцированных фаз.

Исходя из этого, зависимость приращения предела текучести и предела прочности от повреждающей дозы также будет иметь насыщение при больших дозах нейтронного облучения, что подтверждается экспериментальными данными. Для описания приращения предела текучести и предела прочности целесообразно использовать обратную экспоненциальную зависимость

$$\Delta\sigma_{YG}(D) = A_{\sigma_{0,2}} \cdot \sqrt{1 - \exp(-C_{\sigma_{0,2}} \cdot D)}, \quad (4)$$

где $A_{\sigma_{0,2}}$ и $C_{\sigma_{0,2}}$ – параметры материала.

В качестве примера на рисунке 3 представлена аппроксимация зависимостью (4) данных по приращению предела текучести и предела прочности металла шва под облучением без радиационного распухания.

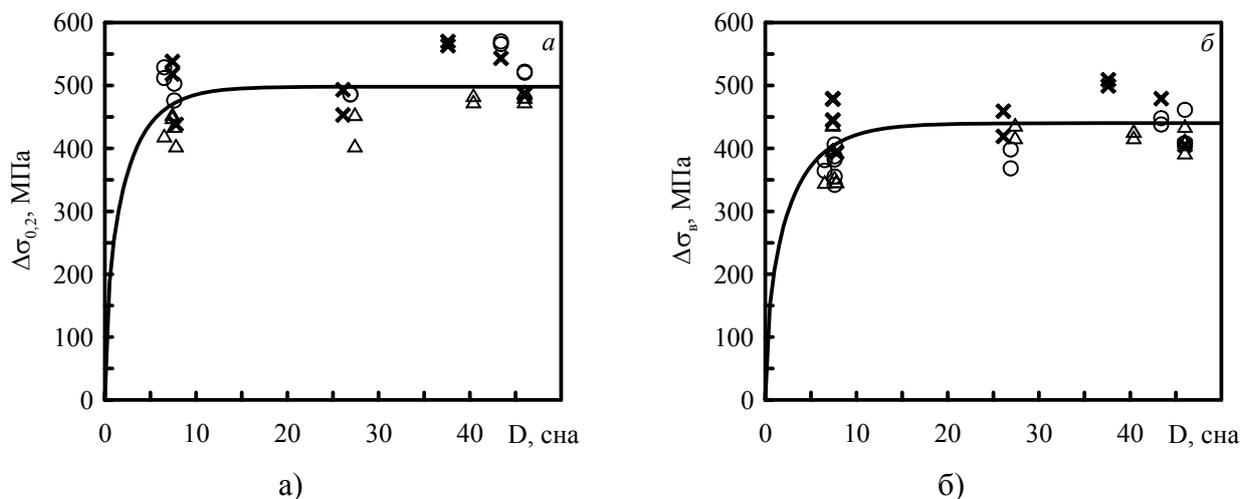


Рисунок 3 – Дозовая зависимость прироста предела текучести (а) и предела прочности (б) металла шва стали 08X18N10T для различных температур испытаний и $T_{\text{обл}}=320\div340^\circ\text{C}$: точки – экспериментальные данные (\circ – $T_{\text{исп}} = 20^\circ\text{C}$, \times – $T_{\text{исп}} = 80^\circ\text{C}$, \triangle – $T_{\text{исп}} = 290^\circ\text{C}$), линия – аппроксимация данных уравнением (4)

Следует отметить, что в случае малых доз нейтронного облучения, когда заведомо отсутствует насыщение зависимости радиационного упрочнения, она может быть успешно описана степенным уравнением. Такой подход, например, используется при прогнозировании прочностных свойств корпусных сталей и металла аустенитной наплавки корпусов реакторов ВВЭР-1000.

Влияние нейтронного облучения на снижение пластичности описывается в работе через относительное снижение критической деформации $\Delta\varepsilon_f/\varepsilon_f^0 = (\varepsilon_f^0 - \varepsilon_f^{\text{обл}})/\varepsilon_f^0$, где ε_f^0 и $\varepsilon_f^{\text{обл}}$ – значения критической деформации для материала в исходном и облученном состоянии. Для образца на одноосное растяжение $\varepsilon_f = -\ln(1-\psi)$, где ψ – относительное сужение в шейке образца при разрушении. Дозовая зависимость относительного снижения критической деформации материала, также как и зависимости прочностных характеристик, имеет насыщение и может быть представлена в виде

$$\frac{\Delta\varepsilon_f}{\varepsilon_f^0} = A_\varepsilon \cdot [1 - \exp(-B_\varepsilon \cdot D)]^{0,5}, \quad (5)$$

где A_ε и B_ε – параметры материала.

Аппроксимация уравнением (5) данных по снижению пластичности стали X18N10T под действием нейтронного облучения представлена на рисунке 4.

Исследование влияния температуры облучения на характеристики прочности показало, что уменьшение приращения предела текучести и прочности с повышением температуры облучения $T_{\text{обл}}$ в диапазоне температур $320\div450^\circ\text{C}$ при одной и той же дозе нейтронного облучения связано с температурной зависимостью радиационного распухания, а не с увеличением

самоотжига дефектов с ростом $T_{\text{обл}}$. Увеличение радиационного распухания приводит к уменьшению нетто-сечения образца.

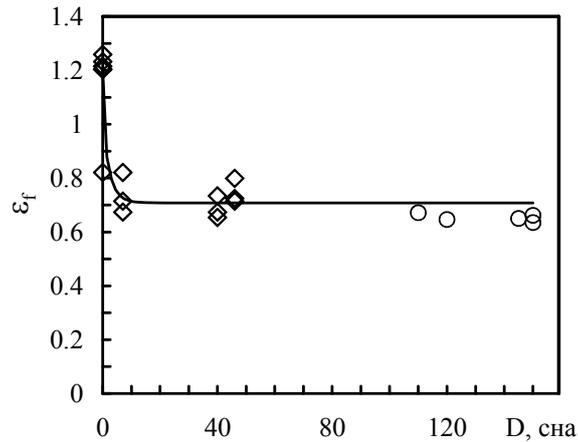


Рисунок 4 – Зависимость $\varepsilon_f(D)$ при $T_{\text{исп}} = 290$ °С: кривая – расчет по формуле (5) при $\varepsilon_f^0 = 1,2$; точки – экспериментальные данные для стали 08X18H10T (\diamond) и 12X18H10T (\circ)

Стоит отметить, что в отличие от аустенитных сталей, для корпусных сталей бейнитного класса (15X2МФА, 15X2НМФА) при отсутствии радиационного распухания наблюдается сильное влияние температуры облучения в рассматриваемом диапазоне. По-видимому, это связано с более низкой энергией дефекта упаковки $E_{\text{ду}}$ в сталях с ГЦК решеткой по сравнению со сталями с ОЦК решеткой. Поскольку при облучении происходит частичный самоотжиг радиационных дефектов, при более высокой $E_{\text{ду}}$ требуется меньшее повышение температуры (тепловой энергии) для интенсификации перестройки дислокационной структуры и самоотжига дефектов, приводящего к снижению прочностных характеристик материала.

Для описания влияния радиационного распухания S на прочностные характеристики предложено и экспериментально верифицировано следующее уравнение

$$\sigma = \sigma^{\text{eff}} \cdot (1 - \bar{A}_v(S)), \quad \bar{A}_v = \left(\frac{S}{1+S} \right)^{2/3}, \quad (6)$$

где σ – деформирующее напряжение (предел текучести или прочности), σ^{eff} – эффективное значение деформирующего напряжения, т.е. значение для материала без радиационного распухания; \bar{A}_v – относительная площадь пор.

Для описания диаграмм деформирования материала в работе используется степенное уравнение вида

$$\sigma_{\text{eq}} = \sigma_{0,2} + A \cdot (\bar{\varepsilon}_{\text{eq}}^p)^n, \quad (7)$$

где σ_{eq} – эквивалентное напряжение (интенсивность напряжений); $\bar{\varepsilon}_{\text{eq}}^p = \int d\varepsilon_{\text{eq}}^p$ – накопленная пластическая деформация (параметр Одквиста); $d\varepsilon_{\text{eq}}^p$ – интенсивность приращения пластической деформации; A и n – коэффициент и показатель

деформационного упрочнения, в общем случае зависящие от температуры испытания, повреждающей дозы и температуры облучения.

В работе показано, что деформационное упрочнение уменьшается с ростом дозы облучения; коэффициент A линейно снижается с повышением температуры испытаний $T_{исп}$ и радиационного упрочнения $\Delta\sigma_{0,2}$ (рисунок 5). Показатель n может быть вычислен как функция $n = f(A, \sigma_{0,2}, \sigma_B)$. Конкретные уравнения для определения коэффициентов A и n приведены в диссертации.

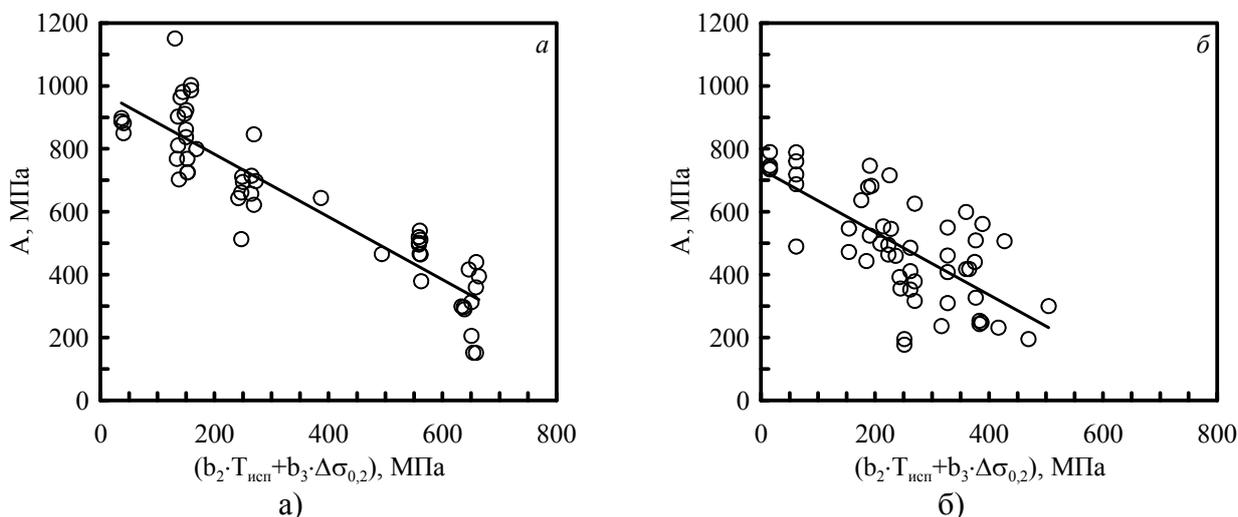


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента деформационного упрочнения A для стали 08X18H10T (а) и металла шва (б) от двучлена $(b_2 \cdot T_{исп} + b_3 \cdot \Delta\sigma_{0,2})$, где b_2 и b_3 – константы материала

Все разработанные зависимости экспериментально верифицированы в диапазоне температур облучения $320 \div 450$ С при распухании до 7% и нейтронном облучении до доз 150 сна для стали 08X18H10T, и 46 сна для металла шва, и вошли в действующий РД ЭО 1.1.2.99.0944-2013.

Пятая глава посвящена исследованию механизмов повреждения и разрушения облученных аустенитных сталей и разработке модели вязкого разрушения, учитывающей основные механизмы деформирования и повреждения облученных аустенитных сталей.

Анализ полученных в диссертации экспериментальных данных показал следующие особенности. Снижение трещиностойкости под облучением без распухания происходит гораздо сильнее, нежели снижение пластичности. Это связано с сильным влиянием жесткости напряженного состояния на снижение критической деформации под облучением.

Уникальный эксперимент по исследованию влияния радиационного распухания на статическую трещиностойкость позволил выявить еще одну особенность. Для сильнооблученной аустенитной стали 12X18H10T обнаружено резкое снижение статической трещиностойкости J_c с ростом распухания при незначительном снижении пластичности. Так при распухании 5,5% J_c снижается в 35 раз по сравнению с облученным состоянием без распухания, тогда как

критическая деформация ε_f для гладких образцов, испытанных на одноосное растяжение – только в 1,7 раза (рисунок 6).

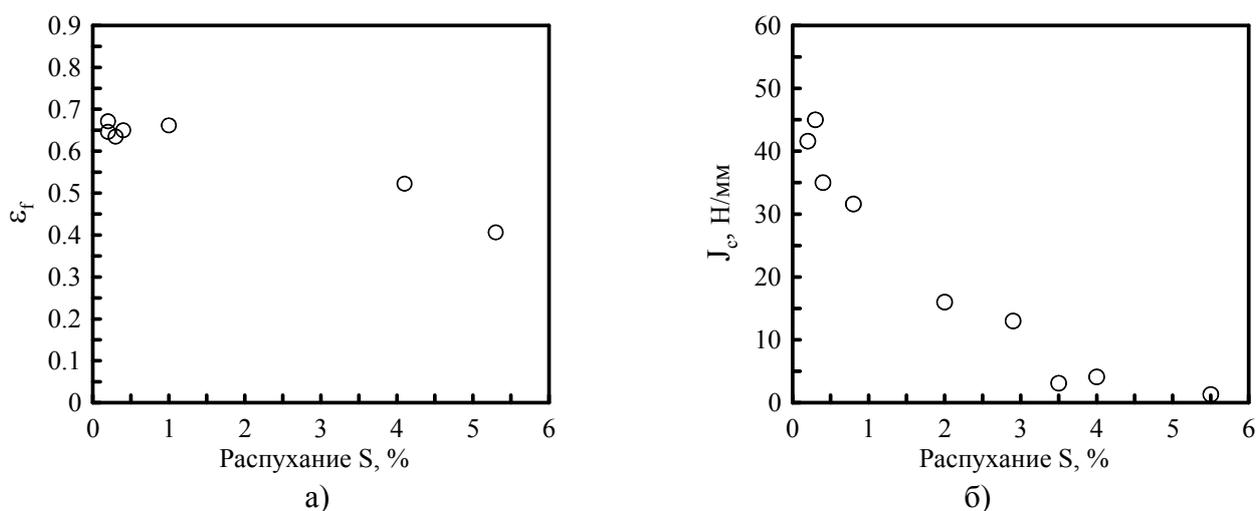


Рисунок 6 – Влияние радиационного распухания на пластичность (а) и трещиностойкость (б) стали 12X18H10T, облученной до максимальной дозы нейтронов 150 сна

Предложен механизм, объясняющий различное влияние распухания на пластичность и трещиностойкость материала. Механизм связан со сменой масштабного уровня, на котором происходит элементарный акт разрушения – уменьшением размера так называемой зоны процесса r_f с сотен микрометров до десятка нанометров (рисунок 7). Фактически происходит переход от классического вязкого разрушения путем зарождения, роста и объединения пор на включениях второй фазы к вязкому разрушению путем роста и объединения вакансионных пор.

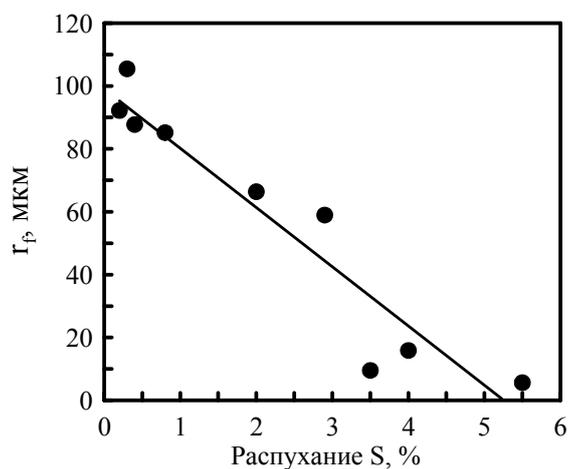


Рисунок 7 – Влияние распухания S на размер зоны процесса r_f в стали 12X18H10T, облученной до максимальной дозы нейтронов 150 сна, линия – аппроксимация линейной зависимостью

Для прогнозирования влияния нейтронного облучения, радиационного распухания и температуры испытаний на пластичность и статическую трещиностойкость аустенитных сталей с учетом представленных выше особенностей была разработана модель вязкого разрушения. Модель основана на рассмотрении зарождения, роста и объединения пор в материале, и

дополнительно учитывает возможность так называемого канального разрушения (channel fracture). Для учета влияния радиационного распухания на вязкое разрушение в модель введено две группы пор: деформационные поры, зарождающиеся в процессе деформирования на включениях второй фазы и вакансионные поры, обуславливающие радиационное распухание, а также введена функция $\gamma_f(S)$.

Для описания зарождения деформационных пор использован деформационно-силовой критерий, записанный в виде:

$$\frac{d\rho_v^{\text{def}}}{d\sigma_{\text{nuc}}} = \frac{\rho_v^{\text{max}} - \rho_v^{\text{def}}}{\sigma_d}, \quad (8)$$

где ρ_v^{def} – количество пор, зародившихся в процессе деформирования в единице объема матрицы материала, ρ_v^{max} – максимальная объемная концентрация мест зарождения пор, σ_{nuc} – напряжение, контролирующее зарождение поры, σ_d – локальная прочность связи матрица-включение или прочность включения, на котором образуется деформационная пора.

Напряжение σ_{nuc} получено на основании анализа напряжений у дислокационного скопления и может быть записано в виде:

$$\sigma_{\text{nuc}} \equiv \sigma_1 + m_{T\varepsilon} \cdot \sigma_{\text{eff}} \quad (9)$$

где σ_1 – максимальные главные напряжения; $\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{eq}} - \sigma_{0,2}$ – эффективное напряжение, $m_{T\varepsilon}$ – параметр, зависящий от температуры и пластической деформации.

При анализе роста вакансионных пор и пор, зародившихся в процессе деформирования, используется уравнение Хуанга, модифицированное для учета взаимодействия пор.

В качестве критерия разрушения используется критерий микропластического коллапса или, другими словами – критерий микропластической неустойчивости:

$$\left. \frac{\partial F_{\text{eq}}}{\partial \varepsilon_{\text{eq}}^p} \right|_{q=\text{const}} = 0, \quad (10)$$

где $F_{\text{eq}} = \sigma_{\text{eq}} \cdot (1 - \bar{A}_\Sigma)$, σ_{eq} – интенсивность напряжений, отнесенных к матрице материала (за вычетом пор), \bar{A}_Σ – относительная площадь пор, т.е. площадь сечения пор, отнесенная к единице площади сечения элементарной ячейки с порами. Следует отметить, что при анализе условия (10) жесткость напряженного состояния q принимается неизменной.

Согласно предлагаемой модели снижение пластичности и трещиностойкости под облучением связано с несколькими факторами:

- облегчением зарождения пор на включениях за счет увеличения действующих напряжений σ_1 при радиационном упрочнении и снижения величины σ_d , которое происходит в результате облегчения образования

дислокационных скоплений и сегрегации примесей на границе включения-матрица;

- объединением пор при меньших деформациях вследствие уменьшения деформационного упрочнения материала.

На базе оригинальных экспериментальных данных разработанная модель успешно верифицирована для материалов ВКУ, облученных до доз нейтронного облучения, достигающих 150 сна при температуре облучения $T_{обл}=320\div 450$ °С и имеющих распухание до 7%.

Модель показала, что влияние $T_{исп}$ на критическую деформацию ε_f облученного материала контролируется влиянием температуры испытания на предел текучести и деформационное упрочнение. На рисунке 8а представлена зависимость $\varepsilon_f(T_{исп})$, рассчитанная с помощью модели, в которой единственными температурно-зависимыми параметрами были предел текучести и деформационное упрочнение. Видно хорошее совпадение расчетной кривой с экспериментальными данными.

Учет вклада вакансионной пористости в вязкое разрушение облученного материала позволил адекватно спрогнозировать влияние радиационного распухания на критическую деформацию материала, используя в качестве входных данных модели свойства материала, облученного до той же дозы, но при температуре, при которой распухание отсутствовало (рисунок 8б).

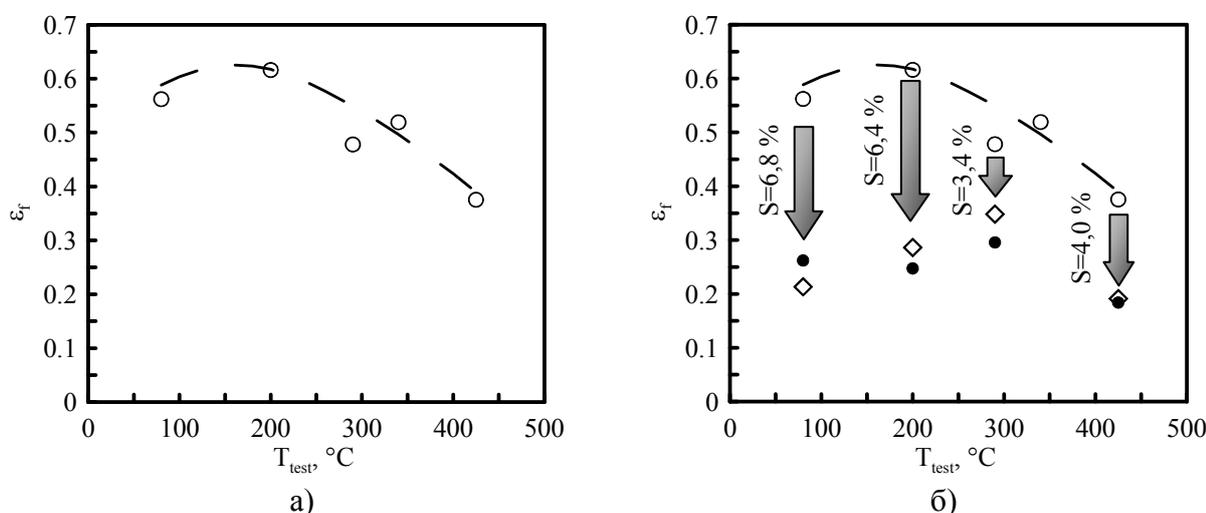


Рисунок 8 – Прогнозирование температурной зависимости $\varepsilon_f(T_{исп})$ металла шва стали 08X18N10T без распухания (а) и с учетом влияния распухания (б); экспериментальные данные: ○ – без распухания ($D = 46$ сна, $T_{обл}=320\div 340$ °С), ◇ – с распуханием, указанным в поле графика ($D = 49$ сна, $T_{обл}=400\div 450$ °С); прогноз: пунктирная линия – без распухания, ● – с учетом распухания

С помощью модели получена инженерная зависимость для прогнозирования влияния радиационного распухания на критическую деформацию при одноосном растяжении.

Модель прогнозирует гораздо более сильное снижение ε_f в вершине трещины по сравнению с образцом на одноосное растяжение (рисунок 9а). Учет

влияния жесткости напряженного состояния на ε_f позволяет прогнозировать влияние нейтронного облучения на трещиностойкость материала без распухания (рисунок 9б).

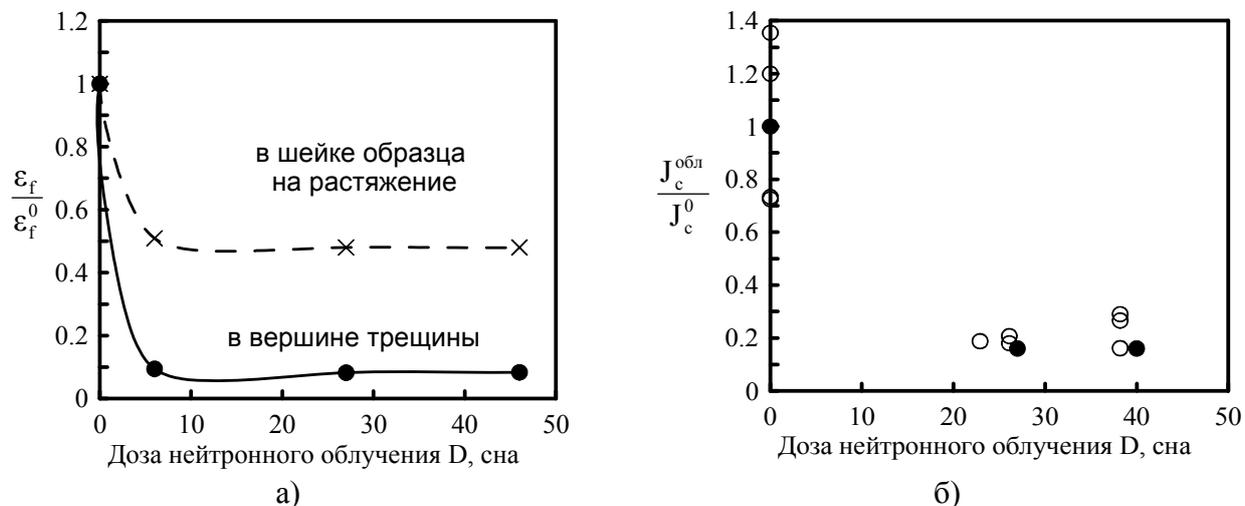


Рисунок 9 – Влияние жесткости напряженного состояния на относительное снижение ε_f от дозы D (а) и прогнозирование относительного снижения J_c от D для металла шва, испытанного при $T_{исп} = 290$ °С: ○, × - экспериментальные данные, ● - прогноз по модели

С помощью модели получена инженерная зависимость для прогнозирования влияния радиационного распухания на статическую трещиностойкость, учитывающая уменьшение размера зоны процесса r_f от распухания S.

На базе разработанной физико-механической модели вязкого разрушения предложен механизм, объясняющий резкое снижение предела прочности аустенитных сталей при высоких значениях радиационного распухания. Показано, что причиной резкого снижения предела прочности и вязкого разрушения материала при напряжениях меньше предела текучести, являются два фактора.

Первым фактором является возникновение неоднородной пористости, обусловленное началом объединения вакансионных пор при некотором уровне распухания, что приводит к появлению областей с распуханием много большим, чем среднее по образцу. Такие области могут разрушаться при напряжениях гораздо ниже предела текучести образца.

Вторым фактором является уменьшение размера зоны процесса вследствие распухания, что приводит к возможности вязкого разрушения, когда нагружение материала происходит в зоне с очень малыми размерами ($\sim 80 \div 400$ нм), значительно меньшими, чем размер зерна.

Вязкое разрушение в зонах с малыми размерами обеспечивает возможность нестабильного развития трещины при низких напряжениях по механизму, названному бегущим коллапсом. Результаты расчетного моделирования влияния радиационного распухания на предел прочности

аустенитной стали показали хорошее согласие с имеющимися экспериментальными данными (рисунок 10).

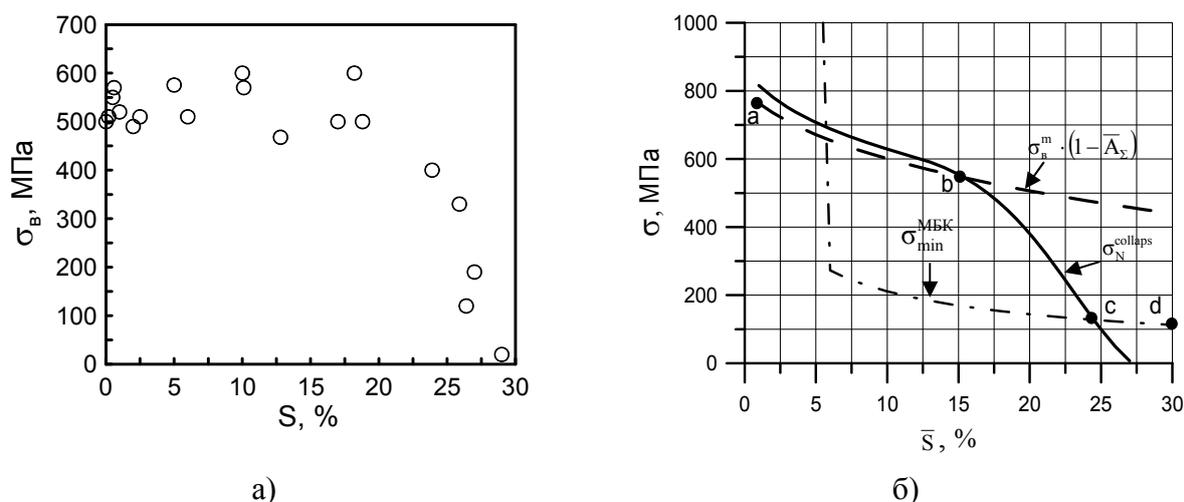


Рисунок 10 – Зависимость предела прочности от распухания для стали 12X18H10T при температурах испытания 400÷500 °С: а) экспериментальные данные; б) – моделирование предела прочности материала $\sigma_{в}$ (линия a-b-c-d) от среднего распухания образца \bar{S}

Полученные на базе разработанной модели расчетные зависимости для прогнозирования влияния радиационного распухания на пластичность и трещиностойкость материалов ВКУ вошли в действующий РД ЭО 1.1.2.99.0944-2013.

В **шестой главе** представлен подход, позволяющий прогнозировать скорость роста трещины в материале ВКУ в условиях радиационной ползучести в процессе нейтронного облучения.

Как известно, радиационная ползучесть обусловлена направленным движением вакансий и межузельных атомов, генерируемых в материале при его нейтронном облучении. Подобная ползучесть необлучаемых материалов называется диффузионной ползучестью, которая реализуется при высоких гомологических температурах.

Обычно повреждение материала при радиационной ползучести, как и при диффузионной ползучести, связано с межзеренным проскальзыванием. Это обусловлено аккомодацией изменения формы зерна в процессе диффузии атомов и вакансий в поле напряжений. Внутрзеренные повреждения практически отсутствуют за счет релаксации напряжений у включений, обусловленной диффузией атомов или вакансий. Межзеренное проскальзывание в сочетании с повышенной зернограничной диффузией по отношению к телу зерна приводит к развитию зернограничных повреждений в виде линзообразных диффузионных пор и клиновидных трещин на тройных стыках зерен.

На основании вышеизложенного можно заключить, что радиационная ползучесть, как и диффузионная, может привести к зернограничному повреждению материала и развитию трещины по межзеренному механизму.

В шестой главе предложен разработанный в рамках диссертации подход, позволяющий провести оценку скорости роста трещины в условиях радиационной ползучести в аустенитных сталях. Подход основан на предположении о равенстве величины константы Монкмана-Гранта C_{MG} для различных видов ползучести (термоактивированной и радиационной) при одинаковом механизме разрушения. На базе предложенного подхода разработана зависимость для расчета скорости роста трещины $\frac{dl}{dt}$ при радиационной ползучести

$$\frac{dl}{dt} = \lambda(B\dot{D} + \omega\dot{S}) \cdot K_I \quad (11)$$

где B , ω - коэффициенты радиационной ползучести; \dot{D} – скорость набора дозы нейтронов; \dot{S} – скорость радиационного распухания с учетом влияния напряженного состояния, K_I – коэффициент интенсивности напряжений, λ – параметр, зависящий от C_{MG} и размера зерна d_g

$$\lambda = \frac{(1 - 2\mu)}{C_{MG}} \cdot \left(\frac{(1 + \mu) \cdot d_g}{3\pi} \right)^{1/2} \quad (12)$$

Анализ экспериментальных данных по термической ползучести и моделирование влияния нейтронного облучения на значение константы Монкмана-Гранта позволили определить величину $\lambda = 4,0\sqrt{m}$.

Выводы по диссертации

1. Показано, что основными механизмами повреждения материалов ВКУ под облучением, определяющими их прочность и работоспособность, являются радиационное распухание, коррозионное растрескивание в среде теплоносителя I контура ВВЭР, снижение трещиностойкости материала ВКУ, а также образование хрупкой α фазы при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении, приводящей к резкому снижению пластичности.

2. Исследовано влияние эксплуатационных факторов (повреждающей дозы нейтронного облучения D , температуры облучения $T_{обл}$ и температуры испытаний $T_{исп}$, соответствующей температуре нагружения при переходных режимах работы реактора) на механические свойства и деформационное упрочнение материалов ВКУ и получены зависимости, описывающие это влияние. Зависимости верифицированы для диапазона температур облучения $T_{обл} = 320 \div 450$ °C вплоть до повреждающих доз нейтронного облучения 150 сна при распухании до 7%. Показано, что влияние $T_{обл}$ в диапазоне от 320 °C до 450 °C на механические свойства и деформационное упрочнение материалов ВКУ обусловлено в основном влиянием на эти характеристики радиационного распухания, зависящего от $T_{обл}$.

3. Установлено, что основными механизмами охрупчивания материала ВКУ в процессе облучения являются:

- снижение сопротивления вязкому разрушению материала за счет облегчения зарождения пор на включениях, роста вакансионных пор и облегчения объединения пор обоих типов вследствие снижения деформационного упрочнения под облучением;

- фазовое $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение, приводящее к возникновению вязко-хрупкого перехода в аустенитных сталях.

4. Проанализированы факторы, приводящие к $\gamma \rightarrow \alpha$ превращению в аустенитных сталях под облучением. Основным фактором является обеднение твердого раствора аустенитообразующими элементами (в первую очередь никелем). Такое обеднение происходит по двум механизмам: при радиационно-индуцированной сегрегации никеля на поверхность вакансионных пор и границы зерен, а также при образовании вторичных фаз с большой концентрацией никеля. Установлено, что при обоих механизмах параметром, контролирующим степень обеднения твердого раствора никелем, является радиационное распухание.

5. Исследовано влияние $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения на охрупчивание материалов ВКУ. Показано, что $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение может приводить к появлению хрупко-вязкого перехода в материале ВКУ и возможности квазихрупкого разрушения в диапазоне температур эксплуатации ВКУ. Установлено критическое значение радиационного распухания $S_{\text{крит}}$, при котором реализуется хрупко-вязкий переход при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении; для материалов ВКУ $S_{\text{крит}} = 7\%$.

6. По результатам оригинального эксперимента по исследованию влияния радиационного распухания на статическую трещиностойкость сильнооблученной аустенитной стали 12X18H10T обнаружено резкое снижение статической трещиностойкости J_c с ростом распухания при незначительном снижении пластичности. Так при распухании 5,5% J_c снижается в 35 раз по сравнению с облученным состоянием без распухания, тогда как критическая деформация ϵ_f для одноосного образца – только в 1,7 раза.

Предложен механизм, объясняющий данный феномен. Механизм связан со сменой масштабного уровня, на котором происходит элементарный акт разрушения, с размера порядка нескольких микрометров до десятка нанометров. Фактически происходит переход от классического вязкого разрушения путем зарождения, роста и объединения пор на включениях второй фазы к вязкому разрушению путем роста и объединения вакансионных пор

7. Показано, что причиной резкого снижения предела прочности при значительном распухании и вязкого разрушения материала при напряжениях меньше предела текучести, являются два фактора. Первым фактором является возникновение неоднородной пористости, обусловленное началом объединения вакансионных пор при некотором уровне распухания, что приводит к

появлению областей с распуханием много большим, чем среднее по образцу. Такие области могут разрушаться при напряжениях гораздо ниже предела текучести образца. Вторым фактором является уменьшение размера зоны процесса с увеличением распухания, что приводит к возможности вязкого разрушения, когда нагружение материала происходит в зоне с очень малыми размерами ($\sim 80 \div 400$ нм), значительно меньшими, чем размер зерна. Вязкое разрушение в зонах с малыми размерами обеспечивает возможность нестабильного развития трещины при низких напряжениях по механизму, названному бегущим коллапсом.

8. Разработана физико-механическая модель вязкого разрушения, учитывающая основные механизмы деформирования и повреждения облученных аустенитных сталей. Модель позволяет прогнозировать влияние нейтронного облучения, радиационного распухания и температуры испытаний на критическую деформацию материала при различной жесткости напряженного состояния. Учет жесткости напряженного состояния позволяет прогнозировать статическую трещиностойкость аустенитных сталей с учетом влияния указанных выше факторов. Разработанная физико-механическая модель верифицирована для материалов ВКУ ВВЭР – стали 08X18H10T и металла шва, облученных дозами нейтронного облучения вплоть до 150 сна при температуре облучения $T_{\text{обл}} = 320 \div 450$ °С, имеющих распухание до 7% и испытанных в диапазоне $T_{\text{исп}} = 80 \div 425$ °С. Получены инженерные зависимости для прогнозирования влияния радиационного распухания на снижение пластичности и трещиностойкости материалов ВКУ. На базе разработанной физико-механической модели предложен метод, позволяющий описать резкое снижение прочности облученных аустенитных при высоких значениях радиационного распухания материалов до величин ниже предела текучести.

9. Разработан подход, позволяющий провести оценку скорости роста трещины при радиационной ползучести в аустенитных сталях. Подход основан на предположении о равенстве величины константы Монкмана-Гранта для различных видов ползучести при одинаковом механизме разрушения. На базе предложенного подхода разработана зависимость для расчета скорости роста трещины при радиационной ползучести. Анализ экспериментальных данных по термической ползучести и моделирование влияния нейтронного облучения на значение константы Монкмана-Гранта позволили определить коэффициенты в разработанной зависимости. Выполнены оценки максимально возможной скорости роста трещины при радиационной ползучести во внутрикорпусной выгородке реактора ВВЭР-1000.

10. Разработанный подход к оценки прочности и работоспособности элементов ВКУ ВВЭР, а также полученные зависимости для прогнозирования физико-механических характеристик материалов ВКУ вошли в Руководящие документы ОАО «Концерн Росэнергоатом» и, в настоящее время, используются

для продления и обоснования срока эксплуатации ВКУ действующих реакторных установок типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, а также для обоснования срока эксплуатации ВКУ проектируемых ВВЭР.

Основные результаты диссертационной работы представлены в следующих научных трудах:

1. Марголин Б.З., Курсевич И.П., **Сорокин А.А.**, Лапин А.Н., Кохонов В.И., Неустроев В.С. К вопросу о радиационном распухании и радиационном охрупчивании аустенитных сталей. Часть 1. Экспериментальные результаты // Вопросы материаловедения, 2009, №2(58), – с.89-98.

2. Марголин Б.З., Курсевич И.П., **Сорокин А.А.**, Лапин А.Н., Кохонов В.И., Неустроев В.С. К вопросу о радиационном распухании и радиационном и радиационном охрупчивании аустенитных сталей. Часть II. Физические и механические закономерности охрупчивания // Вопросы материаловедения.– 2009. – №2(58). – С. 99-111.

3. Марголин Б.З., Фоменко В.Н., **Сорокин А.А.** Анализ условий развития трещины в элементах внутрикорпусных устройств реакторов, подверженных интенсивному нейтронному облучению // Вопросы материаловедения.– 2009.– №2(58). – С.112-126.

4. Б.З. Марголин, И.П. Курсевич, **А.А. Сорокин**, А.Н. Лапин, В.И. Кохонов, В.С.Неустроев. Охрупчивание и трещиностойкость высокооблученных аустенитных сталей для элементов ВКУ ВВЭР. Сообщение 1. Связь радиационного распухания с радиационным охрупчиванием – экспериментальные результаты // Проблемы прочности.– 2009.– №6. – С. 5–16.

5. Б.З. Марголин, И.П. Курсевич, **А.А. Сорокин**, Н.К. Васина, В.С.Неустроев. Охрупчивание и трещиностойкость высокооблученных аустенитных сталей для элементов ВКУ ВВЭР. Сообщение 2. Связь радиационного распухания с радиационным охрупчиванием – физические и механические закономерности // Проблемы прочности.– 2010.– №2. – С. 25–38.

6. Б.З. Марголин, В.Н. Фоменко, **А.А. Сорокин**. Охрупчивание и трещиностойкость высокооблученных аустенитных сталей для элементов ВКУ ВВЭР. Сообщение 3. Анализ условия развития трещин// Проблемы прочности.– 2010.– №3. – С. 29–46.

7. **Сорокин А.А.**, Марголин Б.З., Курсевич И.П., Минкин А.И., Неустроев В.С., Белозеров С.В. Влияние нейтронного облучения на механические свойства материалов внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР // Вопросы материаловедения.– 2011.– №2 (66). – С. 131-152.

8. Марголин Б.З., **Сорокин А.А.** Прогнозирование влияния нейтронного облучения на характеристики вязкого разрушения аустенитных сталей // Вопросы материаловедения.– 2012.– №1(69). – С.126-147.

9. Марголин Б.З., **Сорокин А.А.** К вопросу о природе влияния радиационного распухания на предел прочности облученных аустенитных материалов // Вопросы материаловедения.– 2012.– №1(69). – С.148-162.

10. Б.З. Марголин, **А.А. Сорокин.** Физико-механическая модель вязкого разрушения облученных аустенитных сталей // Проблемы прочности.– 2013.– №2.– С. 5–30.

11. Б.З. Марголин, **А.А. Сорокин.** К вопросу о природе резкого снижения прочности аустенитных сталей при их радиационном распухании // Проблемы прочности.– 2013.– №3.– С. 5–23.

12. **A.A. Sorokin,** B.Z. Margolin, I.P. Kursevich, A.J. Minkin, V.S. Neustroev. Effect of neutron irradiation on tensile properties of materials for pressure vessel internals of WVE type reactors // J. Nucl. Mater., 444 (2014), pp. 373-384.

13. B. Margolin, **A. Sorokin,** V. Smirnov, V. Potapova. Physical and mechanical modelling of neutron irradiation effect on ductile fracture. Part 1. Prediction of fracture strain and fracture toughness of austenitic steels //J. Nucl. Mater., 452 (2014), Issues 1-3, pp. 595–606.

14. B. Margolin, **A. Sorokin.** Physical and mechanical modeling of the neutron irradiation effect on ductile fracture. Part 2. Prediction of swelling effect on drastic decrease in strength // J. Nucl. Mater., 452 (2014), Issues 1-3, pp. 607-613.

15. B. Margolin, **A. Sorokin,** V. Smirnov, V. Potapova. Physical and mechanical modeling and prediction of fracture strain and fracture toughness of irradiated austenitic steels // Engineering Failure Analysis, 47 (2015), pp. 283–298.

Подписано в печать г. Формат 60x48 1/16.

Печать – офсетная. Усл. п. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1.05.

Тираж 90 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
191015, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49

Лицензия на полиграфическую деятельность
Лр № 020644 от 13 октября 1997