

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Александра Андреевича Сорокина «Физико-механическое моделирование деформирования и разрушения сильнооблученных аустенитных сталей и разработка методов прогнозирования свойств материалов для ВКУ ВВЭР», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

В настоящее время реакторы ВВЭР являются основным типом реакторов, используемых в России и строящихся Госкорпорацией «Росатом» за рубежом по межправительственным соглашениям. Повышение ресурса эксплуатации таких станций открывает перспективы их более широкого распространения. Многолетние исследования материалов корпуса реактора показали, что он позволяет продление эксплуатации до 60 и более лет. Несменными элементами являются и внутрикорпусные устройства, которые работают в реакторе в значительно более жестких, по сравнению с корпусом, условиях. Исследования поведения материалов ВКУ и прогнозирование ресурса их безопасной эксплуатации являются очень важными для решения задачи повышения ресурса ВВЭР.

Работа Сорокина Александра Андреевича посвящена моделированию деформирования и разрушения аустенитных сталей – материалов ВКУ ВВЭР, что определяет ее актуальность.

Структура и содержание работы. Диссертация изложена на 207 страницах. Состоит из введения, 6 глав, выводов, списка цитируемой литературы. Содержит 10 таблиц, 89 рисунков и библиографический список, включающий 194 источника. Материал изложен четко и последовательно, грамотно структурирован и логично распределен по главам.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы цель работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена конструкция ВКУ ВВЭР и условий их эксплуатации. Приведен анализ состояния исследуемого вопроса и обзор литературы по влиянию эксплуатационных факторов на физико-механические свойства сталей того же класса, что и материалы ВКУ ВВЭР. Перечислены нерешенные проблемы, имеющиеся на момент начала работ над диссертацией, а также задачи, поставленные в диссертационной работе.

Вх. №	3882	Исп. №	
23	11	20	15
Осн. №	7	л.	№
Прил.		л.	подп.

Во второй главе описана методология, разработанная для оценки прочности элементов внутрикорпусных устройств и прогнозирования их ресурса в условиях действующих на них эксплуатационных факторов. Показано, что сильное снижение трещиностойкости материала ВКУ, в совокупности с наличием значительных напряжений, обусловленных градиентом температур и радиационным распуханием, могут создать условия для нестабильного развития дефектов. Для алгоритмизации расчета прочности введено понятие «критическое событие» и проведена систематизации таких событий. При этом в качестве критерия нестабильного развития трещины используется достижение J-интегралом критического значения.

В третьей главе проведено исследование механизмов $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, происходящих в аустенитных сталях под облучением, и рассмотрено его влияние на охрупчивание материалов ВКУ. Явление связывается с обеднением кристаллической матрицы γ -стабилизирующими элементами за счет образования карбидов и интерметаллидов и радиационно-индуцированной сегрегации. Эффективность этих процессов возрастает вместе с радиационным распуханием, так что его величина может использоваться в качестве индексирования количества образовавшейся α -фазы. Для прогнозирования влияния $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения на охрупчивание материалов ВКУ введено понятие «критическое значение распухания», равное 7 %.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния нейтронного облучения на механические свойства материалов ВКУ, которые проводились на образцах из стали 08X18H10T и металла сварного шва в исходном состоянии и после облучения в реакторе БОР-60 при двух температурах. Получены зависимости радиационного упрочнения и снижения критической деформации материала от температуры и дозы нейтронного облучения. Показано, что при температурах облучения 320÷450 °С уменьшение приращения предела текучести связано с температурной зависимостью распухания.

Пятая глава посвящена исследованию механизмов повреждения и разрушения облученных аустенитных сталей. Для этого разработана модель вязкого разрушения, учитывающая основные механизмы повреждений и деформирования облученных аустенитных сталей. Анализ полученных при работе над диссертацией экспериментальных данных показал, что снижение трещиностойкости под облучением

происходит гораздо сильнее, чем снижение пластичности. Так при распухании 5,5 % значение J_C уменьшается в 35 раз по сравнению с исходным состоянием, тогда как критическая деформация при одноосном напряжении цилиндрических образцов снижается только в 1,7 раза. Предложен механизм, объясняющий различное влияние распухания на трещиностойкость и пластичность материала.

В шестой главе представлен подход, позволяющий описывать скорость роста трещины в материале ВКУ в условиях радиационной ползучести. Подход основан на том, что радиационная ползучесть контролируется направленными потоками генерируемых облучением точечных дефектов, которые приводят к локализации деформаций вдоль границ зерен и межзеренному проскальзыванию. Это приводит к развитию зернограницных повреждений в виде линзообразных пор и клиновидных трещин в тройных стыках зерен и к развитию трещин по межзеренному механизму.

В выводах по диссертации перечислены основные результаты, полученные в работе.

Научная новизна заключается в разработке методологии оценки прочности и работоспособности элементов ВКУ ВВЭР и полученных закономерностях влияния на них режимов облучения и условий нагружения. Создана модель вязкого разрушения, позволяющая прогнозировать влияние нейтронного облучения на пластичность и статическую трещиностойкость аустенитных сталей. Установлены механизмы вязкого разрушения, приводящие к резкому снижению предела прочности аустенитных сталей. Разработан подход к оценке скорости роста трещины при радиационной ползучести материалов ВКУ ВВЭР.

Практическая ценность полученных результатов заключается в использовании разработанной методологии расчета прочности и оценки остаточного ресурса ВКУ ВВЭР для создания Руководящих документов и Методик АО «Концерн Росэнергоатом», являющихся основой для обоснования безопасной эксплуатации реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 и продления их ресурса. Созданные Руководящие документы и Методики для расчета прочности ВКУ ВВЭР одобрены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору «РОСТЕХНАДЗОР». Полученные зависимости для прогнозирования физико-механических свойств материалов ВКУ включены в международный код МАГАТЭ.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждена соответствием результатов расчетов, выполненных с использованием разработанных моделей, полученным в работе экспериментальным данным, а также данным литературных источников, полученных в близких условиях эксперимента. Материалы, представленные в

диссертации, доложены на многочисленных отечественных и международных конференциях по проблемам материаловедения и прочности и физике радиационных повреждений материалов атомной техники.

Замечания к работе

В качества замечаний можно отметить следующее:

1 На стр. 32 высказывается утверждение: «... в виду малого содержания C в материале основной причиной $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения является именно обеднение ее Ni », которое представляется несколько утрированным. По диаграмме Шеффлера C и Ni являются аустенитно-образующими элементами, но у C коэффициент аустенитообразования равен 30, а у Ni – 1. Содержание углерода составляет $\sim 0,09$ %. Если половина его уйдет из матрицы на образование карбидов, то это уменьшит интегральный коэффициент аустенитообразования на $1,5 \cdot 10^{-2}$. Содержание Ni в G -фазе составляет ~ 50 % (вместо 10 % в матрице), ее объемная доля $\sim 1-2$ %. Таким образом, убыль Ni в матрице составляет $\sim 0,7$ %, что уменьшает коэффициент аустенитообразования на $1,2 \cdot 10^{-2}$, и скорее свидетельствует о сопоставимых вкладах во влияние на $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение обеднения по никелю и углероду.

2 При описании поверхности разрушения автор относит участки транскристаллитного разрушения к «внутризеренному квазихрупкому разрушению». Вероятно, на самом деле, эти участки являются классическим вязким разрушением. Они имеют типичный для аустенитных сталей с распуханием выше 5-7 % мелкочашечный излом с преимущественным размером чашек 100...200 нм, который разрешается при увеличениях более чем на порядок превышающих использованное в работе. На рисунках 1 и 2 приведена типичная картина вязкого разрушения образца аустенитной стали с распуханием 6 %, полученная при увеличениях $\times 750$ и $\times 12000$ соответственно.

3 Тезис о том, что в экспериментах автора реализуется полное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение, приводящее к «квазихрупкому» внутризеренному разрушению сомнителен и, на взгляд оппонента, не имеет достаточного экспериментального доказательства. Для того, чтобы первый из приведенных тезисов был верным, содержание α -фазы должно было бы превышать 50 %. В то же время, согласно результатам автора «..максимальное содержание α -фазы (в исследованном в диссертационной работе материале) составляет около 10 %», что противоречит предположению о реализации полного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Для наблюдаемого внутризеренного разрушения большого содержания α -фазы внутри зерен не требуется.

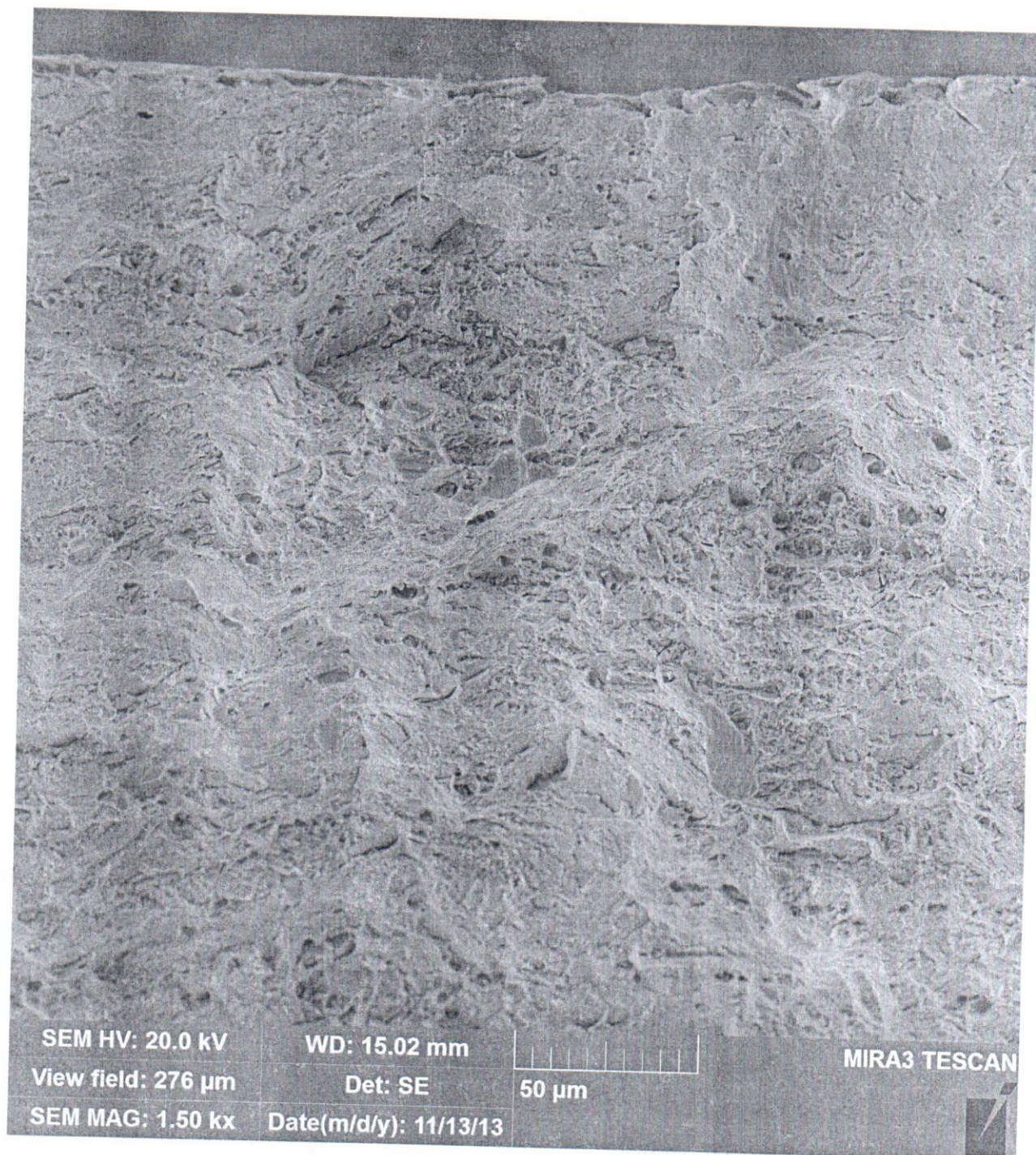


Рисунок 1 – Вид поверхности разрушения образца из аустенитной стали распуханием 6%,
полученный при увеличении $\times 750$

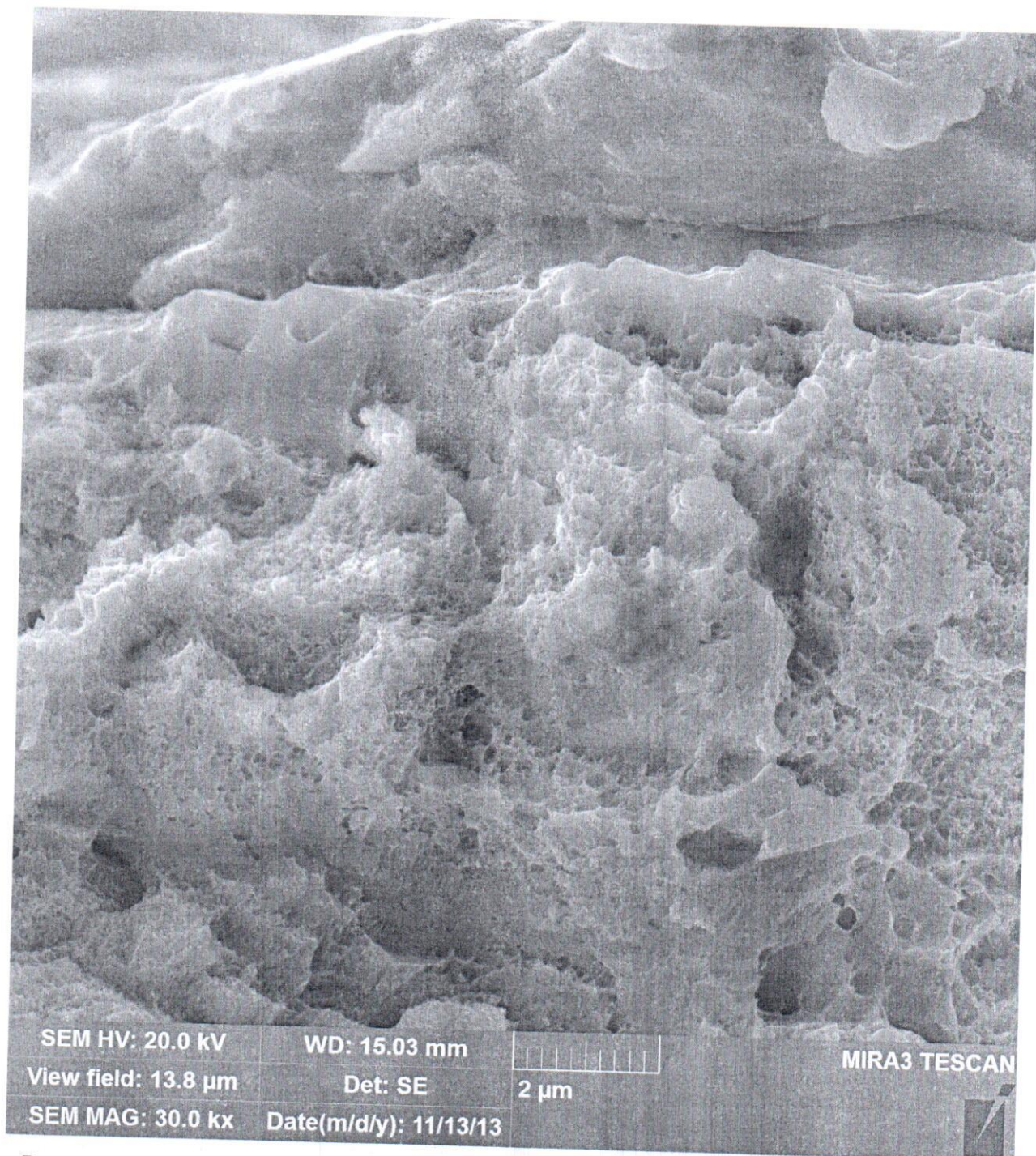


Рисунок 2 – Вид поверхности разрушения того же образца из аустенитной стали, $S=6\%$, полученный при увеличении $\times 12000$

Отмеченные замечания не затрагивают основных данных, полученных в работе и не влияют на ее оценку. Представленная диссертационная работа «Физико-механическое моделирование деформирования и разрушения аустенитных сталей и разработка методов прогнозирования свойств материалов для ВКУ ВВЭР» является логически завершенным научным трудом, удовлетворяющим требованиям Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации к кандидатским диссертациям, а ее автор Сорокин Александр

Андреевич заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – «Материаловедение (машиностроение)».

Главный научный сотрудник
АО «Институт реакторных материалов»
Доктор технических наук



А.В. Козлов

Подпись Козлова А.В. заверяю
Ученый секретарь АО « ИРМ»
Кандидат технических наук



В.А. Сафонов

АО «Институт реакторных материалов»
Адрес: а/я 29, г. Заречный Свердловской обл., 624250
Тел (34377) 35001, Факс (34377) 733 46,
E-mail: irm@irmatom.ru