

Кратковременные механические свойства и характер разрушения аустенитной нержавеющей стали 12X18N10T после низкотемпературного облучения и изохронных отжигов

С.И. Поролло, А.М. Дворяшин, А.А. Иванов, С.В. Шулепин

АО «ГНЦ РФ–ФЭИ»,

249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Реферат. Исследованы кратковременные механические свойства и характер разрушения аустенитной нержавеющей стали 12X18N10T после облучения в реакторе БН-350 при температурах облучения в интервале 280–321°C повреждающими дозами 7,7–56 сна. Показано, что после облучения сталь заменить на 12X18N10T имеет высокие прочностные свойства и сохраняет достаточно большой запас пластичности. Максимальные прочностные свойства стали наблюдаются при минимальной температуре облучения 280–286°C. С повышением температуры облучения прочностные свойства стали снижаются, несмотря на увеличение повреждающей дозы. Отжиг облученных образцов до температуры 500°C незначительно снижает прочностные характеристики стали, но при более высоких температурах отжига прочность материала снижается значительно быстрее. Пластичность образцов в результате отжига возрастает от 20,6 до 25%. В облученной стали 12X18N10T реализуется механизм смешанного разрушения, представляющего собой сочетание транскристаллитного вязкого и межзеренного хрупкого разрушения. Отжиг стали после облучения при температуре 600°C в течение одного часа приводит к исчезновению хрупкой межзеренной составляющей.

Ключевые слова: радиационное упрочнение, охрупчивание, аустенитные нержавеющие стали, механические свойства, поверхность разрушения, повреждающая доза, нейтронное облучение.

Для цитирования: Поролло С.И., Дворяшин А.М., Иванов А.А., Шулепин С.В. Кратковременные механические свойства и характер разрушения аустенитной нержавеющей стали 12X18N10T после низкотемпературного облучения и изохронных отжигов. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;2:202–212. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.13>

Введение

Внутрикорпусные устройства (ВКУ) реакторов ВВЭР-1000 являются несменяемыми элементами конструкции. Поэтому срок их эксплуатации равен ресурсу реактора. Функционально ВКУ предназначены для размещения и удержания ТВС активной зоны, обеспечения циркуляции теплоносителя внутри реактора, снижения радиационной нагрузки на корпус реактора и т.д. Наиболее напряженные условия работы среди внутрикорпусных устройств ВВЭР имеют шахта и выгородка реактора ВВЭР-1000 [1].

Выбор в качестве материала ВКУ аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т в первую очередь был сделан по технологическим соображениям. Радиационные свойства этой стали учитывались в меньшей степени в том числе и из-за дефицита данных о поведении этой стали под облучением. За время, прошедшее с начала эксплуатации первых блоков ВВЭР, был накоплен большой экспериментальный материал по радиационным характеристикам этой стали. При этом были открыты новые радиационные явления, среди которых важнейшим оказалось явление распухания нержавеющей сталей. Расчет дозотемпературных характеристик элементов ВКУ показывает, что за весь срок эксплуатации повреждающая доза может превысить 50 сна при температурах облучения до 450°C. В таких условиях распухание сталей типа 12Х18Н10Т может быть весьма значительным. Кроме размерных изменений распухание элементов ВКУ вызовет появление дополнительных напряжений, связанных с неравномерностью распухания по сечению компонентов ВКУ. Частично эти напряжения будут релаксировать в результате радиационной ползучести. Тем не менее, уровень внутренних напряжений в элементах конструкции ВКУ может оказаться весьма значительным. Наличие напряжений в совокупности с ухудшением механических характеристик стали в результате облучения является одним из наиболее важных факторов, который следует учитывать при обеспечении безопасной эксплуатации реакторов данного типа. Облучение элементов ВКУ, находящихся в напряженном состоянии, снижает и коррозионную стойкость стали, что также является крайне нежелательным фактором.

Важнейшей особенностью работы элементов ВКУ водо-водяных реакторов является то, что облучение материала происходит при значительно более низкой интенсивности по сравнению с интенсивностью облучения материалов в активной зоне быстрых реакторов. В быстрых реакторах подобные скорости создания смещения характерны либо для корпуса реактора, либо для внутрикорпусного оборудования, расположенного вне активной зоны. Материаловедческие исследования этих компонентов реакторных установок сопряжены со значительными техническими трудностями и поэтому количество данных по поведению материалов в условиях, характерных для условий работы ВКУ реактора ВВЭР-1000, ограничено. Реактор БН-350 в этом отношении наиболее хорошо подходил для проведения такого рода исследований, поскольку в нем температура натрия на входе в активную зону была равна 280°C и некоторые компоненты этого реактора были облучены при температурах 280–350°C в достаточно большом диапазоне повреждающих доз. Исследование кратковременных механических свойств сталей, облученных в этом температурном диапазоне, представляет значительный интерес, поскольку при близких условиях работают большинство элементов внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР.

В данной статье приводятся результаты исследования кратковременных механических свойств и характера разрушения стали 12X18N10T после облучения в реакторе БН-350 в температурном диапазоне 280–321°C до максимальной повреждающей дозы 56 сна.

Характеристика материала, условий облучения и методик исследования

Для исследования механических свойств и характера разрушения стали 12X18N10T после низкотемпературного облучения была выбрана сборка СБ-11В реактора БН-350, которая по своему функциональному назначению являлась заглушкой в линии, соединяющей бак реактора с емкостью, заполненной натрием. Сборка состоит из шестигранной трубы с размером «под ключ» 96 мм и центральным отверстием диаметром 65 мм, верхнего и нижнего хвостовиков. Общая длина сборки 3435 мм равна длине штатных ТВС реактора БН-350.

Шестигранная труба сборки СБ-11В изготовлена из аустенитной нержавеющей стали 12X18N10T следующего марочного состава (вес.%): С – 0,12; Cr – 17–19%; Ni – 8–9,5; Mn – 2; Si – 0,8; Ti – 0,5–0,7. Содержание основных элементов в стали было дополнительно проверено с использованием рентгеновского микроанализатора «Камебакс» и оказалось равным (% вес.): Cr – 18,5; Ni – 9,5; Mn – 1,5; Si – 0,6–0,8; Ti – 0,6–0,7. Таким образом, по содержанию основных элементов исследуемая сталь соответствует своему марочному составу.

Сборка СБ-11В была облучена в активной зоне реактора БН-350 на расстоянии 94,5 см от оси АЗ в течение 46536-ти часов (с ноября 1972 по июнь 1984 г.) без перестановок и поворотов. Максимальные значения флюенса нейтронов с $E > 0$ и $E > 0,1$ МэВ в центральной плоскости АЗ составили $3,3 \times 10^{23}$ н/см² и $1,6 \times 10^{23}$ н/см² соответственно. Указанные значения флюенса соответствуют повреждающей дозе 56 сна. Распределение температуры по высоте сборки для ближней и дальней граней приведено в табл. 1. Расчет температурного состояния сборки был проведен для среднего уровня мощности реактора за период с 1973 по 1984 г., составлявшего 60% от номинального. Температура натрия на входе в активную зону принималась равной

Таблица 1

Распределение температуры сборки СБ-11В в период облучения

Расстояние от ЦАЗ, мм	Температура, °С					
	ближняя грань			дальняя грань		
	внешняя поверхность	внутренняя поверхность	максимальное значение	внешняя поверхность	внутренняя поверхность	максимальное значение
–750	282	282	285	281	281	283
–450	290	287	291	288	286	289
–150	306	296	312	303	293	306
0	317	302	324	313	299	314
+150	324	304	327	321	301	322
+450	334	307	334	333	306	333
+750	337	307	337	336	306	336

Кратковременные механические свойства и характер разрушения аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т после низкотемпературного облучения и изохронных отжига

280°С. Средний за период облучения сборки СБ-11В подогрев натрия в окружающих ТВС боковой зоны воспроизводства составлял ~ 60°С.

На исследование в горячую лабораторию поступила центральная часть сборки длиной 1500 мм (от -750 до +750 мм), разрезанная на пять равных частей. Образцы для определения механических свойств были вырезаны из четырех участков по высоте сборки (-750... -670, -500... -450, 0...+50, +530...+590 мм от ЦА3). Максимальные значения повреждающей дозы и скорости создания смещений, а так же средние температуры облучения в этих сечениях приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры облучения для исследованных участков сборки

Расстояние от ЦА3, мм	$T_{обл.}, ^\circ\text{C}$	Максимальная повреждающая доза, сна	Скорость создания смещений, 10^{-8} сна/сек
-750 ... -670	280	7,7	2,1
-500 ... -450	286	15,9	4,3
0 ... +50	310	56	15,6
+530 ... +590	321	16,8	4,7

Механические свойства на растяжение измерялись на плоских образцах с длиной рабочей части 12 мм и поперечным сечением 2×2 мм. Испытания проводились на дистанционной испытательной машине в температурном диапазоне 20–850°С при начальной скорости деформирования $1,4 \times 10^{-3}$ сек⁻¹. Для каждого измерения испытывалось не менее двух образцов. Часть образцов перед испытаниями была подвергнута изохронным отжигам в течение одного часа при температурах 400, 500, 550 и 600°С. Фрактографические исследования стали 12Х18Н10Т были выполнены на тех же образцах после их разрушения в результате испытания при комнатной температуре. Исследование было проведено на сканирующей приставке ASID-4D к электронному микроскопу JEM-100CX в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 40 кВ.

Результаты исследования

Согласно справочным данным [2], в необлученном состоянии сталь 12Х18Н10Т при температуре 25°С имеет следующие характеристики механических свойств: предел прочности 577 МПа; предел текучести 244 МПа; полное относительное удлинение 69,5%. Результаты измерения механических свойств облученной стали для сборки СБ-11В в зависимости от температуры испытания показаны в табл. 3 и на рис. 1. Из представленных данных видно, что в результате облучения происходит значительное упрочнение стали и снижение ее пластических характеристик. Максимальный эффект наблюдается для нижнего сечения сборки при температуре облучения 280°С и повреждающей дозе 7,7 сна. Для этого сечения значения предела прочности и предела текучести стали составили 1260 и 1110 МПа соответственно, а упрочнение материала при комнатной температуре испытания превысило 800 МПа. В целом, прочностные свойства стали 12Х18Н10Т снижаются с увеличением температуры испытания, но для нижнего сечения сборки зависимости предела прочности и предела текучести

Механические свойства материала сборки (сталь 12X18N10T) после облучения

$T_{исп.}, ^\circ C$	Усредненные механические характеристики стали								
	+560 мм $T_{обл.} = 321^\circ C; 16,8$ сна			0 мм $T_{обл.} = 310^\circ C; 56$ сна			-750 мм $T_{обл.} = 280^\circ C; 7,7$ сна		
	σ_{Br} МПа	$\sigma_{0,2r}$ МПа	δ_{0r} , %	σ_{Br} МПа	$\sigma_{0,2r}$ МПа	δ_{0r} , %	σ_{Br} МПа	$\sigma_{0,2r}$ МПа	δ_{0r} , %
25	740	570	32,0	1150	1050	15,0	1260	1110	6,0
250	–	–	–	1070	1050	6,0	875	840	7,0
300	600	530	9,0	950	820	4,5	1070	965	5,0
500	600	540	9,0	750	650	5,5	820	785	5,0
650	410	360	9,0	600	510	5,0	415	400	10,5
750	270	240	9,5	370	310	5,0	310	225	11,0
850	–	–	–	200	170	3,0	–	–	–

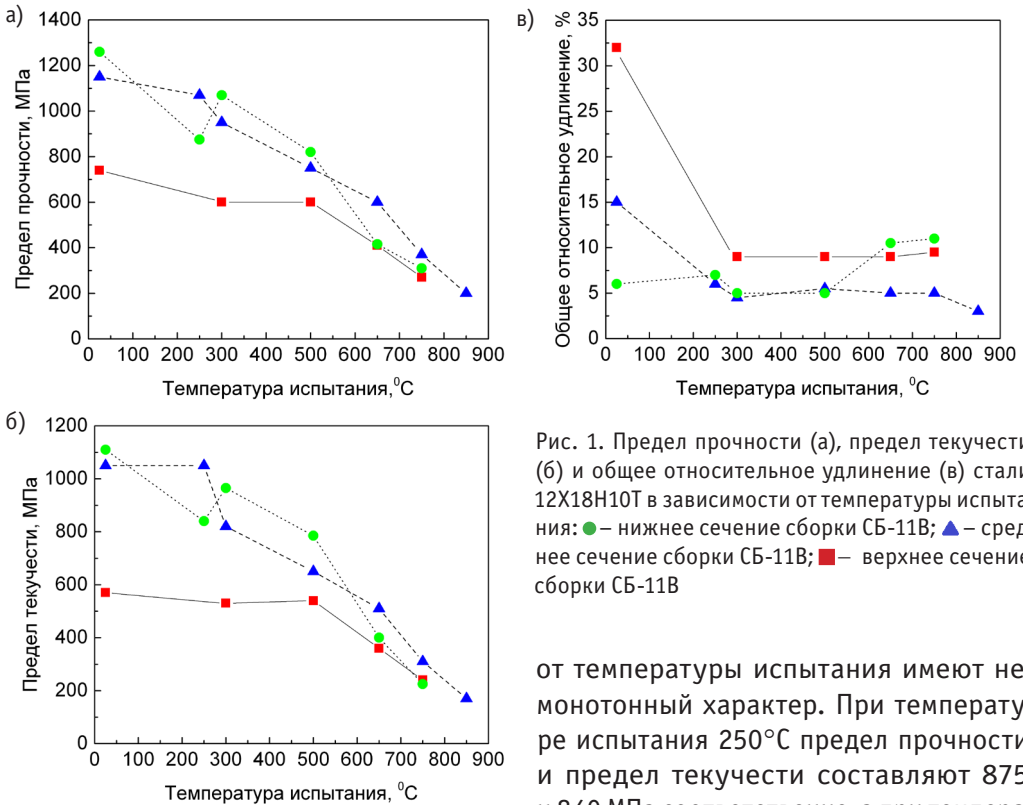


Рис. 1. Предел прочности (а), предел текучести (б) и общее относительное удлинение (в) стали 12X18N10T в зависимости от температуры испытания: ● – нижнее сечение сборки СБ-11В; ▲ – среднее сечение сборки СБ-11В; ■ – верхнее сечение сборки СБ-11В

от температуры испытания имеют не-монотонный характер. При температуре испытания 250 °C предел прочности и предел текучести составляют 875 и 840 МПа соответственно, а при температуре испытания 300 °C те же характеристики равны 1070 и 965 МПа. При дальнейшем увеличении температуры испытания прочность стали плавно снижается.

Исследование влияния отжига на изменение кратковременных механических свойств стали 12X18N10T проводилось на образцах, вырезанных из участка сборки СБ-11В на расстоянии 458 – 502 мм ниже центра АЗ. Условия облучения исследованных образцов приведены в табл. 4.

Условия облучения материала сборки СБ-11В в местах вырезки образцов

Координата вырезки, мм от ЦАЗ	458	462	466	470	474	478	482	486	490	494	498	505
Доза, сна	15,9	15,7	15,5	15,4	15,2	15,0	14,8	14,4	14,4	14,2	14,0	13,8
$T_{обл.}$, °C	286	286	286	285	285	285	285	285	285	285	285	285

Часть образцов перед испытаниями была подвергнута изохронным отжигам в течение одного часа при температурах 400, 500, 550 и 600°C. Механические испытания образцов после отжигов проводились при комнатной температуре. Результаты измерения кратковременных механических свойств стали 12X18H10T после облучения и последующих отжигов показаны на рис. 2.

При испытании облученных образцов и облученных образцов после отжига при температурах 400 и 500°C наблюдается явно выраженный зуб текучести. Деформирование материала за зубом текучести происходит с понижением нагрузки на 2–3% и появлением протяженной площадки текучести. Пластическое течение материала на этом участке характеризуется отсутствием деформационного упрочнения, локализацией деформации в шейке и отрывом при значениях полного относительного удлинения на уровне 20,6–23%.

После отжига при 550°C и выше зуб текучести пропадает, однако характер пластического деформирования стали на участке диаграмм с площадкой текучести сохраняется.

Из рисунка 2 следует, что в результате отжига происходит снижение прочностных свойств стали, причем наиболее сильно предел прочности и предел текучести снижаются при температуре отжига свыше

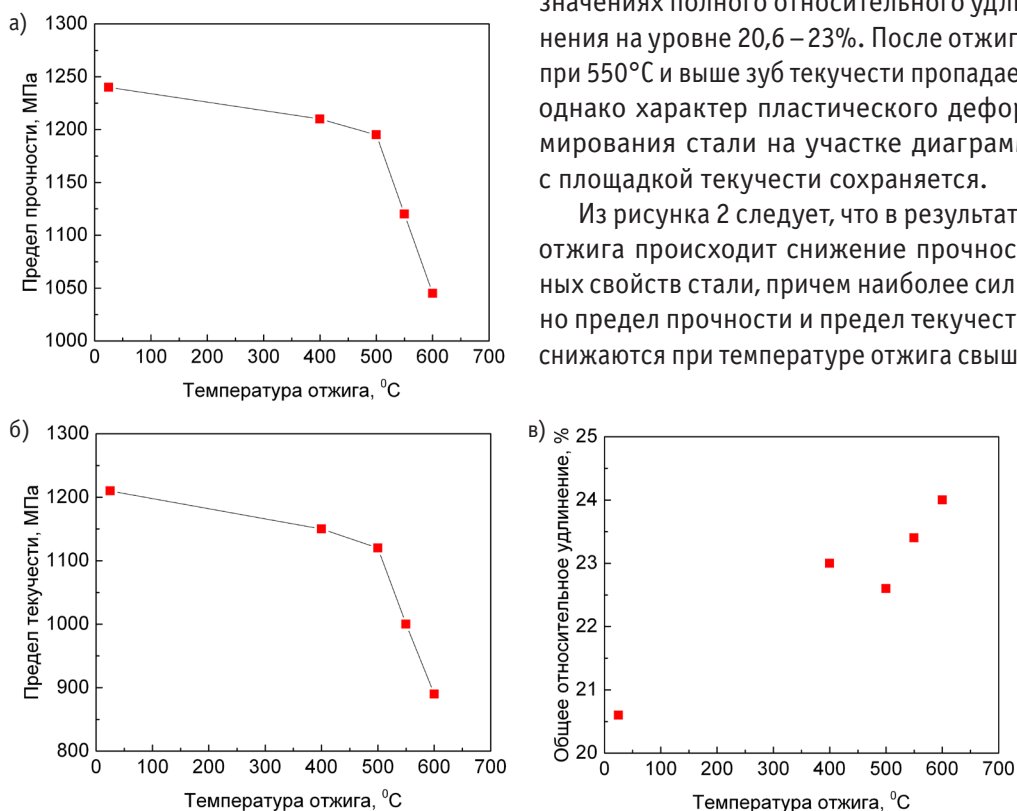


Рис. 2. Предел прочности (а), предел текучести (б) и общее относительное удлинение (в) стали 12X18H10T в зависимости от температуры отжига

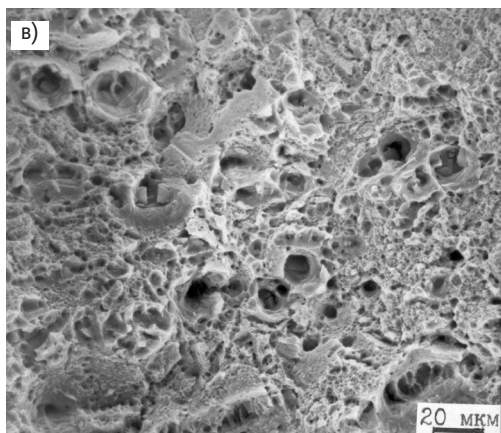
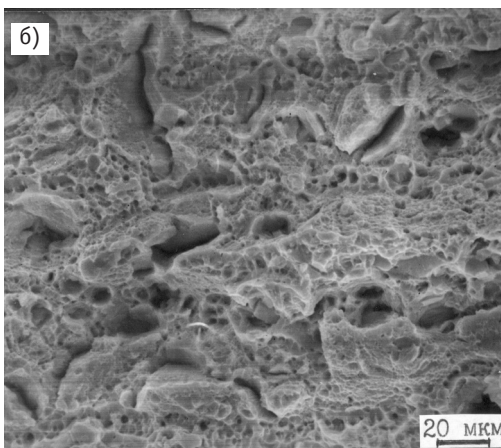
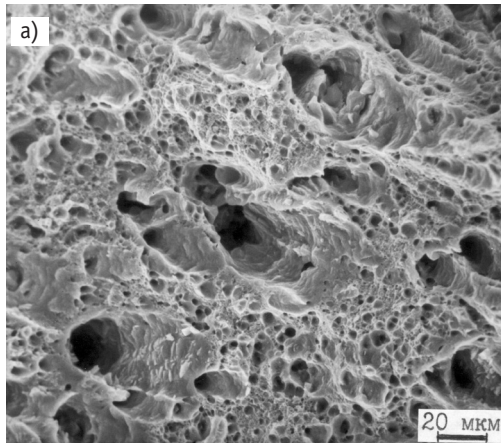


Рис. 3. Поверхность разрушения стали 12X18N10T в исходном состоянии (а), после облучения при температуре 286°C дозой 14,9 сн (б) и после облучения и отжига при 600°C в течение 1 часа (в)

500°C. Пластичность образцов при этом увеличивается более-менее равномерно.

Фрактографическое исследование стали 12X18N10T было проведено на исходных, облученных и отожженных образцах, разрушенных в результате механических испытаний на растяжение при комнатной температуре. В качестве исходного материала для стали 12X18N10T использовались образцы-свидетели корпуса реактора БР-10 [3]. Результаты исследования показаны на рис. 3. Характер разрушения стали 12X18N10T в исходном состоянии является полностью вязким, транскристаллитным и осуществляется по механизму слияния микропор (рис. 3а). Ямочный рельеф занимает всю поверхность разрушения образцов, внутри некоторых ямок расположены включения различной формы размером от 1 до 10 мкм. Перемычки между крупными ямками заполнены сеткой более мелких ямок. Нейтронное облучение изменяет характер разрушения стали. Поверхность излома облученных образцов стали состоит, в основном, из сравнительно мелких ямок размером 0,1 – 5 мкм и немногочисленных зернограницных фасеток (рис. 3б).

В изломе также наблюдается небольшое количество более крупных ямок размером до 10 мкм, внутри которых, как правило, находились фазовые выделения. На отдельных участках поверхности разрушения наблюдались раскрытые вторичные трещины. Отжиг облученной стали приводит к исчезновению хрупкой межзеренной составляющей. Излом облученных образцов после отжига имеет полностью ямочный характер (рис. 3в).

Обсуждение результатов

Ранее, в работах [4, 5] были приведены результаты исследования набухания, микроструктуры и коррозионной стойкости сборки СБ-11В после облучения в реакторе БН-350. Было показано, что вакансионные поры в стали 12X18N10T при скоростях

смещения от $1,1 \times 10^{-8}$ сна/с до $1,6 \times 10^{-8}$ сна/с наблюдаются в температурном диапазоне 305–334°C. При температурах ниже ~ 300°C поры, разрешимые в электронный микроскоп, не наблюдаются. Максимальное распухание стали не превышает 1%. После испытаний образцов облученной стали по методу Штрауса коррозионного поражения в виде межкристаллитной коррозии не обнаружено. Дефекты глубиной до 500 мкм в виде коррозионных каналов, каверн и питтингов, как правило, наблюдаются на выделениях δ -феррита.

Измерения кратковременных механических свойств показали, что после облучения сталь 12X18H10T имеет высокие прочностные свойства и сохраняет достаточную пластичность. Максимальная прочность стали наблюдается при минимальной температуре облучения 280–286°C, при этом радиационное упрочнение стали составляет 800 МПа. При увеличении температуры облучения прочность стали снижается, степень радиационного упрочнения падает до 326 МПа.

Отжиг образцов при температурах до 500°C незначительно снижает прочностные свойства стали, при более высоких температурах отжига прочность образцов уменьшается гораздо сильнее. При этом после отжига при 550 и 600°C на диаграммах растяжения образцов наблюдается исчезновение зуба текучести.

Результаты фрактографических исследований образцов стали после отжига согласуются с данными кратковременных механических испытаний, показывая, что в облученной нейтронами стали 12X18H10T разрушение происходит по смешанному транскристаллитному вязкому и межзеренному хрупкому механизму.

Заключение

Исследования кратковременных механических свойств материала сборки СБ-11В показали, что после облучения в реакторе БН-350 при температурах в интервале 280–321°C повреждающими дозами в диапазоне от 7,7 до 56 сна сталь 12X18H10T имеет высокие прочностные свойства и сохраняет достаточно большой запас пластичности. Максимальные прочностные свойства стали наблюдаются при минимальной температуре облучения 280–286°C. С повышением температуры облучения прочностные свойства стали снижаются несмотря на увеличение повреждающей дозы. Степень радиационного упрочнения стали $\Delta\sigma_{0,2} = 800$ МПа, максимальная при температуре облучения 280°C, снижается с увеличением температуры облучения до $\Delta\sigma_{0,2} = 326$ МПа.

Отжиг облученных образцов до температуры 500°C незначительно снижает прочностные характеристики стали, но при более высоких температурах отжига прочность материала снижается значительно быстрее. Одновременно со снижением прочностных свойств стали при отжиге происходит изменение характера диаграмм растяжения, а именно, исчезновение зуба текучести после отжига при температурах 550 и 600°C. Пластичность образцов в результате отжига возрастает от 20,6 до 25%.

В облученной стали 12X18H10T реализуется механизм смешанного разрушения, представляющего собой сочетание транскристаллитного вязкого и межзеренного хрупкого разрушения. Отжиг стали после облучения при температуре 600°C в течение одного часа приводит к исчезновению хрупкой межзеренной составляющей. Излому стали после отжига присущи все основные особенности, наблюдавшиеся на изломах образцов стали 12X18H10T в исходном состоянии.

В целом результаты проведенных исследований показали, что в условиях низкотемпературного облучения при скоростях смещений, характерных для условий работы ВКУ реактора ВВЭР, сталь 12X18N10T сохранила свои механические характеристики на достаточно высоком уровне. В случае необходимости существует возможность восстановления исходных кратковременных механических свойств стали путем отжига при температурах 550–600°C.

Литература

1. Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Хмелевский М.Я. и др. Оценка и анализ термомеханического поведения элементов ВКУ реакторов ВВЭР с учетом эффектов облучения. Сборник докладов V Межотраслевой конф. по реакторному материаловедению. Димитровград, 8–12 сентября 1997 г. Димитровград, 1998, т. 2, ч. 1, с. 3–18.
2. Справочник по свойствам сталей, применяемых в котлотурбиностроении. М.: Машгиз, 1958.
3. Поролло С.И., Иванов С.Н., Шулепин С.В., Иванов А.А., Конобеев Ю.В. Исследование механических характеристик материала корпуса реактора БР-5 после 20-летней эксплуатации. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы*. 2023;2(118):7–17. EDN: QMFEOQ.
4. Porollo S.I., Konobeev Yu.V., Dvoriashin A.M., Vorobjev A.N., Krigan V.M., Garner F.A. Void swelling at low displacement rates in annealed 12X18N9T stainless steel at 4–56 dpa and 280–332°C. *J. Nucl. Mater.* 2002;307–311:339–342. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/s0022-3115\(00\)00342-1](https://dx.doi.org/10.1016/s0022-3115(00)00342-1)
5. Иванов С.Н., Поролло С.И., Алексеев Ю.В., Дворяшин А.М., Конобеев Ю.В. Влияние нейтронного низкотемпературного облучения на коррозионную стойкость аустенитной коррозионно-стойкой стали 12X18N9T. *Материаловедение*. 2010;2:15–21. EDN: LATFDL.

Поступила в редакцию 27.11.2025

После доработки 05.02.2026

Принята к опубликованию 12.05.2026

Авторы

Поролло Сергей Иванович, ведущий научный сотрудник, к.т.н.,

E-mail: porollo@ippe.ru

Дворяшин Александр Михайлович, старший научный сотрудник,

E-mail: dvoryashin@ippe.ru

Иванов Андрей Алексеевич, начальник лаборатории,

E-mail: aaivanov@ippe.ru

Шулепин Сергей Викторович, начальник департамента,

E-mail: ympev@ippe.ru

UDC 621.039.59

Short-Term Mechanical Properties and Fracture Mode of the 12X18N10T Austenitic Stainless Steel After Low-Temperature Irradiation and Isochronous Annealing

Porollo S.I., Dvoriashin A.M., Ivanov A.A., Shulepin C.V.

IPPE JSC,

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

The short-term mechanical properties and fracture mode of 12X18N10T austenitic stainless steel were studied after irradiation in the BN-350 reactor at temperatures ranging from 280 to 321°C with damage doses of 7.7 to 56 dpa. It was shown that after irradiation, 12X18N10T steel has high strength properties and retains a sufficiently large ductility. The maximum strength properties of the steel are observed at the minimum irradiation temperature of 280 to 286 °C. With increasing irradiation temperature, the strength properties of the steel decrease, despite the increase in the damage dose. Annealing of irradiated samples to 500°C slightly reduces the strength characteristics of the steel, but at higher annealing temperatures, the strength of the material decreases significantly faster. The ductility of the samples as a result of annealing increases from 20.6 to 25%. Irradiated 12X18N10T steel exhibits a mixed fracture mode, which is a combination of transcrystalline ductile fracture and intergranular brittle fracture. Annealing the steel after irradiation at 600°C for 1 hour results in the disappearance of the brittle intergranular component.

Keywords: radiation hardening, embrittlement, austenitic stainless steels, mechanical properties, fracture surface, damage dose, neutron irradiation.

For citation: Porollo S.I., Dvoriashin A.M., Ivanov A.A., Shulepin C.V. Short-Term Mechanical Properties and Fracture Mode of the 12X18N10T Austenitic Stainless Steel After Low-Temperature Irradiation and Isochronous Annealing. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;2:202–212. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.13> (in Russian).

References

1. Troyanov V.M., Likhachev Yu.I., Khmelevsky M.Ya., Cofin V.I., Shary N.V., Yuremenko V.P., Neustroev V.S., Prokhorov V.I. Evaluation and analysis of the thermomechanical behavior of WWER reactor internal components taking into account irradiation effects. Proc. of the V Conf. on reactor Materials Science. Dimitrovgrad, 8 – 12 september. Dimitrovgrad, 1998, vol. 2, part 1, p. 3–18.
2. Handbook of the properties of steels used in boiler and turbine construction. Moscow, Mashgiz, 1958.
3. Porollo S.I., Ivanov S.N., Shulepin S.V., Konobeev Yu.V. Investigation of the mechanical characteristics of the BR-5 reactor vessel material after 20 years of operation. *Problems of atomic science and technology. Series: Materials Science and New Materials*. 2023;2(118):7–17. EDN: QMFEQO.
4. Porollo S.I., Konobeev Yu.V., Dvoriashin A.M., Vorobjev A.N., Krigan V.M., Garner F.A. Void swelling at low displacement rates in annealed 12X18H9T stainless steel at 4–56 dpa and 280–332°C. *J. Nucl. Mater.* 2002;307–311:339–342. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/s0022-3115\(00\)00342-1](https://dx.doi.org/10.1016/s0022-3115(00)00342-1)
5. Ivanov S.N., Porollo S.I., Alekseev Yu.V., Dvoriashin A.M., Konobeev Yu.V. Effect of Low-Temperature Neutron Irradiation on the Corrosion resistance of 12Kh18N9T Austenitic Stainless Steel. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2010;1:231–237. EDN: LATFDL.

Authors

Sergey I. Porollo, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: porollo@ippe.ru

Aleksandr M. Dvoriashin, Senior Researcher,

E-mail: dvoryashin@ippe.ru

Andrey A. Ivanov, Head of Laboratory,

E-mail: aaivanov@ippe.ru

Sergey V. Shulepin, Head of Department,

E-mail: ympev@ippe.ru