

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ X18H9 ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В СОСТАВЕ ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРА БН-600

**И.А. Портных, А.В. Козлов, В.Л. Панченко, В.С. Шихалев**

*АО «Институт реакторных материалов»*

*624250, Свердловская область, г. Заречный, а/я 29*



Для оценки состояния несменных элементов – внутрикорпусных устройств (ВКУ) реактора БН-600 и последующего использования их при прогнозировании предельного ресурса реактора проведены исследования микроструктуры и физических свойств аустенитной стали 10X18H9, отработавшей в составе элементов ВКУ в течение 22-х и 33-х лет. Приведены гистограммы распределения пор по размерам в образцах из участков после нейтронного облучения со скоростями смещений от  $1,0 \cdot 10^{-9}$  до  $4,3 \cdot 10^{-8}$  сна/с при температурах 370 – 440°C. На образцах из тех же участков резонансным ультразвуковым методом измерены характеристики упругости. Показано, что распухание, рассчитанное по гистограммам распределения пор по размерам, имеет максимум при температуре ~415°C и достигает значений ~3% после 33-х лет облучения. Изменения модуля Юнга, происшедшие за длительное время, имеют немонотонную зависимость от повреждающей дозы. Максимальное относительное изменение модуля Юнга после 22-х лет эксплуатации не превышает 2%, а после 33-х лет эксплуатации 6% от соответствующих величин исходного состояния. Показано, что наряду с радиационным распуханием на изменение физических свойств существенное влияние при реализованных условиях облучения оказывают и другие структурные изменения, в частности, образование вторых фаз. По результатам исследований ВКУ реактора БН-600 из стали X18H9 после 33-х лет эксплуатации имеют остаточный ресурс. Сопоставление результатов, полученных на материале после 22-х и 33-х лет эксплуатации, содержит информацию, необходимую для описания дальнейших изменений структуры и свойств элементов ВКУ из стали X18H9. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования предельного ресурса реактора в рамках существующих или разрабатываемых моделей.

**Ключевые слова:** внутрикорпусные устройства, аустенитная сталь, нейтронное облучение, характеристики пористости, радиационное распухание, характеристики упругости.

## ВВЕДЕНИЕ

Аустенитные стали типа X18H9, склонные к образованию альфа-фазы при радиационно-деформационных воздействиях [1], используются в качестве материала элементов внутрикорпусных устройств (ВКУ) реакторов на быстрых и тепловых нейтронах. Под

© И.А. Портных, А.В. Козлов, В.Л. Панченко, В.С. Шихалев, 2019

действием реакторного облучения в них протекает ряд радиационно-индуцированных процессов, приводящих к радиационному распуханию и изменению фазового состава сталей, что вызывает деградацию физико-механических свойств [2] и ограничивает ресурс эксплуатации реактора.

Цель исследований заключалась в оценке состояния несменных элементов – внутрикорпусных устройств из стали 10X18H9 реактора БН-600 после длительной эксплуатации и в получении результатов для последующего использования при прогнозировании предельного ресурса реактора.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили на образцах из стали X18H9, изготовленных из фрагментов ВКУ реактора БН-600, после длительного облучения. Химический состав стали X18H9 приведен в табл. 1 [3]. Исследовались две партии образцов: первая облучалась в течение 22-х лет, вторая – в течение 33-х лет. Скорости генерации атомных смещений и температуры облучения определялись расчетным путем без экспериментальной верификации, погрешность их определения не оценивалась. По результатам электронно-микроскопических исследований характеристики радиационной пористости определялись количественно по экспериментально построенным распределениям пор по размерам. При этом определялись, в частности, средние размеры пор, их концентрация, удельная интегральная площадь поверхности и распухание с использованием методов, описанных в работе [4]. Кроме того, на образцах определялись характеристики упругости материала, измеренные резонансным ультразвуковым методом.

Таблица 1

Химический состав стали X18H9 [1]

Элемент	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Fe
Содержание, вес %	0.09	1.36	0.38	0.025	0.02	8.75	17.66	0.21	Остальное

Таблица 2

Характеристики облучения исследованных образцов

Партия	№ образца	Температура облучения, °C	Скорость набора дозы, $\times 10^{-8}$ сна/с	Повреждающая доза, сна
22 года	22-1	368	0.4	1.7
	22-2	380	2.1	9.9
	22-3	394	2.6	12.4
	22-4	414	3.4	16.2
	22-5	426	4.3	20.5
33 года	33-1	368	0.1	>1
	33-2	374	1.6	12.8
	33-3	377	3.1	24.4
	33-4	415	4.1	33.1
	33-5	433	3.0	23.6
	33-6	442	1.6	12.6

В таблице 2 приведены параметры облучения исследованных образцов [5]. Диапазон доз нейтронного облучения на образцах первой партии составил от менее 1 до 21 сна (смещений на атом) при температурах от 370 до 425°C, на образцах второй партии от менее 1 до 33 сна при температурах от 370 до 440°C. Предполагалось,

что состояние образцов, облучавшихся в течение 33-х лет, может рассматриваться как эволюция состояния образцов после 22-х лет облучения [6]. При таком анализе надо учитывать следующие обстоятельства:

- параметры облучения образцов разных партий не вполне идентичны, в частности, при близких температурах облучения скорости генерации атомных смещений отличались до 1,5 раз;
- расчетные параметры облучения соответствуют реально реализованным с определенной погрешностью;
- исходное состояние материала одинаково с точностью исходной неоднородности материала.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

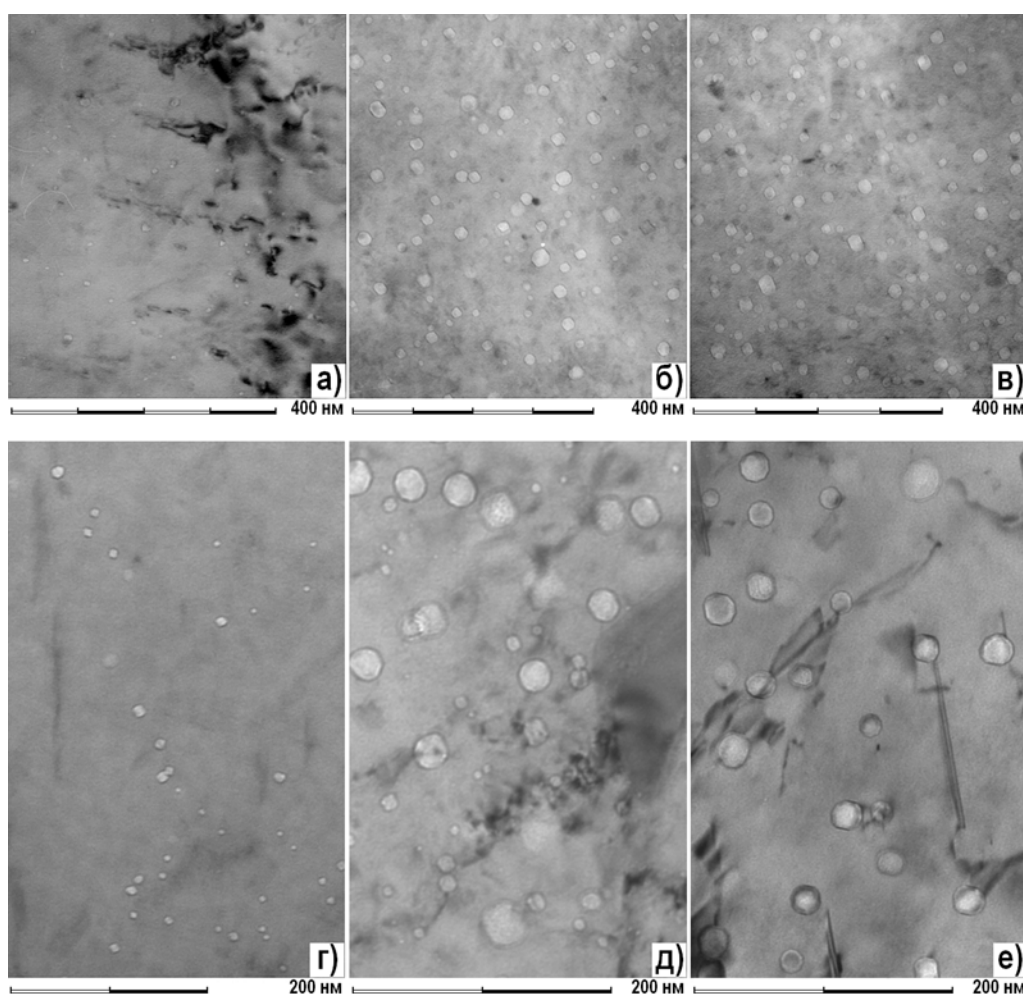


Рис. 1. Вакансионные поры в образцах после облучения в течение 22-х лет (а, б, в) и 33-х лет (г, д, е) до повреждающих доз  $\sim 1$  сна при температуре  $\sim 370^\circ\text{C}$  (а, г), до повреждающих доз  $\sim 16$  сна (б) и  $\sim 33$  сна (д) при температуре  $\sim 415^\circ\text{C}$ , до повреждающей дозы  $\sim 21$  сна (в) при  $425^\circ\text{C}$  и до повреждающей дозы  $\sim 24$  сна (е) при  $\sim 430^\circ\text{C}$

Электронно-микроскопическими (ПЭМ) исследованиями было установлено, что во всех облученных образцах обеих партий наблюдаются поры. На рисунках 1а, б приведены изображения мелких пор, образованных в образцах, облученных при температуре  $\sim 370^\circ\text{C}$  до повреждающих доз  $\sim 1$  сна после 22-х и 33-х лет облучения. На рисунках 1в, г

приведены изображения пор, образованных в образцах, облученных при температуре  $\sim 415^\circ\text{C}$  до повреждающих доз  $\sim 16$  сна после 22-х лет облучения и до  $\sim 33$  сна после 33-х лет облучения. Наблюдаются мелкие и крупные поры большой концентрации, равномерно распределенные по объему образцов. На рисунках 1д, е приведены изображения пор, образованных в образцах, облученных при температуре  $\sim 425^\circ\text{C}$  до повреждающей дозы  $\sim 22$  сна после 22-х лет облучения и при температуре  $\sim 430^\circ\text{C}$  до дозы  $\sim 24$  сна после 33-х лет облучения. Наблюдаемые поры равномерно распределены по объему образцов, их концентрация меньше, чем в предыдущем температурном диапазоне.

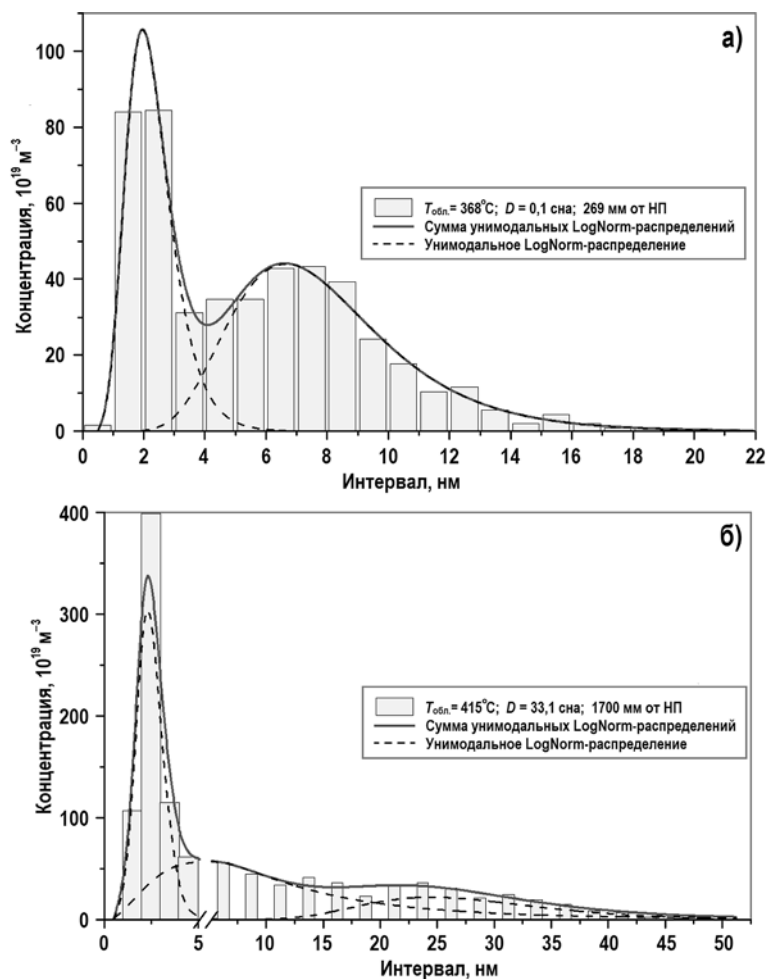


Рис. 2. Гистограммы распределения пор по размерам для образцов, облученных при  $\sim 370^\circ\text{C}$  до повреждающей дозы  $>1$  сна (а) и при  $\sim 415^\circ\text{C}$  до повреждающей дозы  $\sim 33$  сна (б)

На рисунке 2 приведены типичные гистограммы распределения пор по размерам [7] в исследованных образцах. Гистограммы имеют два, а в ряде случаев три максимума: один, ярко выраженный со средним размером 2 – 3 нм; второй – размытый в области размеров от 10 до 20 – 50 нм. Условно поры были разбиты на две группы: «мелкие», относящиеся к первому максимуму, и «крупные» – остальные. Так как в распухание основной вклад вносят крупные поры, рассматривались количественные характеристики крупных пор (более 5 нм), по ним же оценивалось значение распухания образцов.

По гистограммам распределения пор по размерам для пор более 5 нм были определены характеристики пористости образцов первой и второй партий: средний размер, концентрация, площадь поверхности пор и распухание. На рисунке 3 приведены темпе-

ратурные зависимости среднего размера и концентраций крупных пор в стали X18H9 после облучения в реакторе БН-600 в течение 22-х и 33-х лет. Видно, что средний размер пор растет с ростом температуры облучения, и у материала, облучавшегося в течение 33-х лет при температурах выше 370°C, средний размер пор больше, чем у облучавшегося в течение 22-х лет. Концентрация пор максимальна в интервале температур 380 – 420°C. При выходе температуры за границы этого интервала в обе стороны концентрация пор уменьшается. Увеличение длительности облучения (с 22-х до 33-х лет) приводит к уменьшению концентрации пор, при этом размер их растет. Вероятно, это вызвано коалесценцией пор [8] и тем, что новых пор на этой стадии практически не образуется.

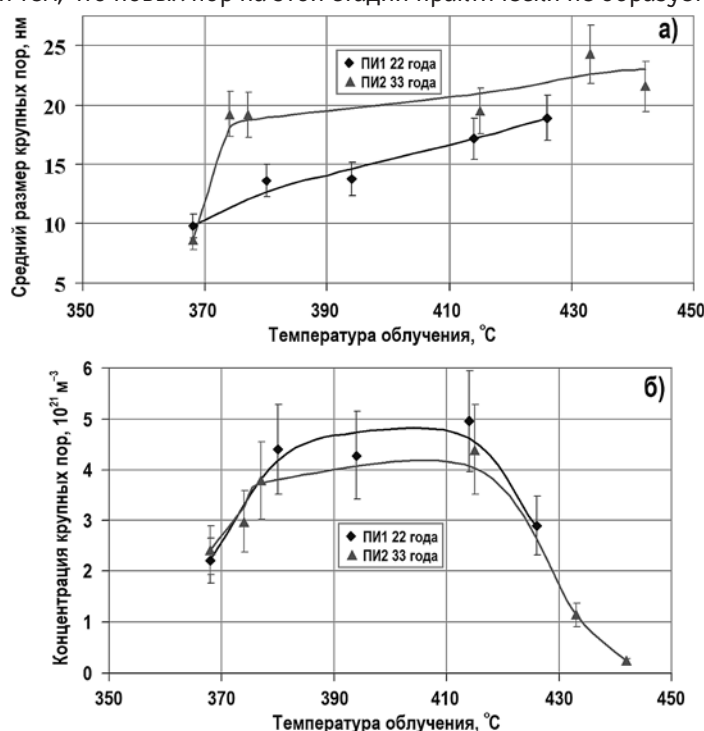


Рис. 3. Температурные зависимости среднего размера (а) и концентрации (б) крупных пор в стали X18H9 после облучения в реакторе БН-600 в течение 22-х и 33-х лет

Интегральные удельные площади поверхности пор также максимальны в диапазоне температур 380 – 420°C (рис. 4а), и с увеличением длительности эксплуатации с 22-х до 33-х лет значение интегральной площади поверхности пор возрастает. Аналогичным образом ведет себя набухание материала стали X18H9 с максимумом при температуре ~415°C (рис. 4б). При более низких температурах ( $\leq 370^\circ\text{C}$ ) и более высоких ( $\geq 440^\circ\text{C}$ ) набухание оценивается на уровне погрешности ее определения, что не позволяет выявить различия ее значений у образцов после 22-х и 33-х лет облучения.

Изменение структуры материала под облучением приводит к изменению его физических характеристик, одной из которых является модуль Юнга материала [9, 10]. На рисунке 5 приведен график изменения модуля Юнга стали X18H9 после облучения в реакторе БН-600 в течение 22-х и 33-х лет в зависимости от повреждающей дозы облучения. Здесь же прямой линией приведено значение модуля Юнга, измеренное на необлученных образцах, изготовленных из толстой стальной пластины той же плавки, что и исследуемый материал. Символами обозначены средние значения, полученные на четырех образцах с идентичными условиями облучения и их среднеквадратичные разбросы. Видно, что модуль Юнга образцов после 22-х и 33-х лет облучения снижается с увеличением повреждающей дозы. Причем у материала, облучавшегося 22 года, значения модуля Юнга ниже, чем

у материала, облучавшегося 33 года, при одних и тех же дозах облучения.

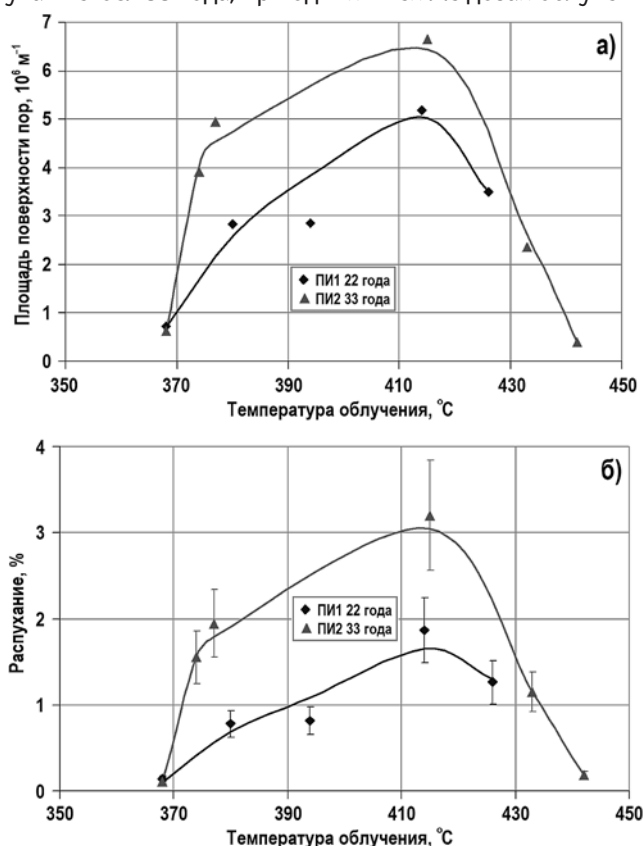


Рис. 4. Температурные зависимости интегральной удельной площади поверхности (а) и распухания (б) крупных пор в стали X18N9 после облучения в реакторе БН-600 в течение 22-х и 33-х лет

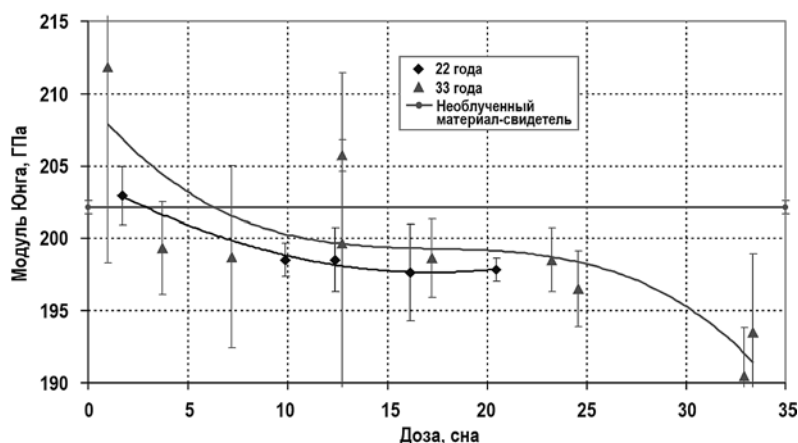


Рис.5. Изменение модуля Юнга стали X18N9 после облучения в реакторе БН-600 в течение 22-х и 33-х лет в зависимости от повреждающей дозы облучения

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования показали, что уже при дозах в несколько единиц сна происходит радиационное распухание стали X18N9, величина которого с ростом дозы, достигая около 3% при дозе  $\sim 30$  сна. Наряду с этим происходят и другие структурные изменения, которые в комплексе приводят к изменению характеристик уп-



ругости. Как было показано в [11, 12], в случае, когда других структурных изменений не происходит или когда распухание оказывает доминирующее влияние на физико-механические свойства, изменения модуля Юнга, вызванные распуханием, могут быть рассчитаны по формуле

$$\Delta E/E_0 = (1 + S)^{-2} - 1, \quad (1)$$

где  $\Delta E$  – абсолютное изменение модуля Юнга;  $E_0$  – модуль Юнга исходного состояния;  $S$  – распухание, в долях единицы.

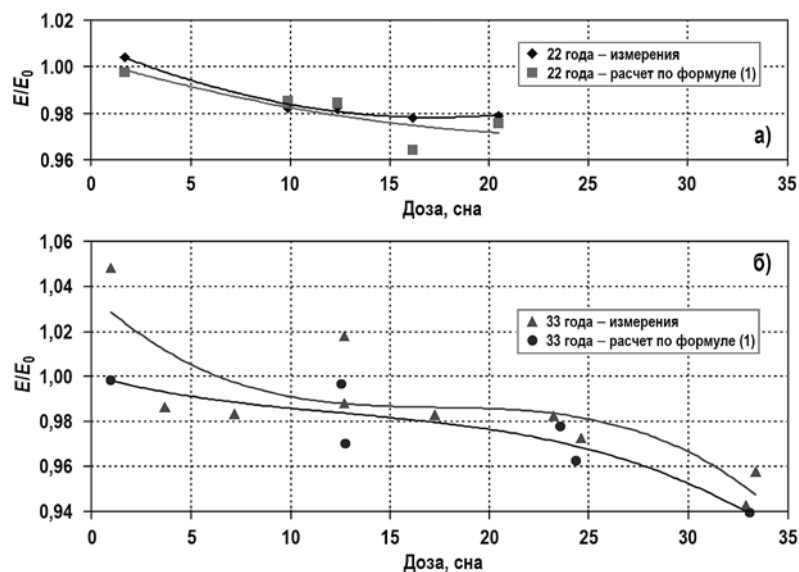


Рис. 6. Относительное изменение модуля Юнга стали X18H9 после облучения в реакторе БН-600 в течение 22-х (а) и 33-х лет (б) и теоретически рассчитанное по значению распухания образцов в зависимости от повреждающей дозы облучения по формуле (1)

Были построены графики зависимости относительного изменения модуля Юнга у образцов, облученных различными дозами и рассчитанных по формуле (1) для значений распухания, найденных электронно-микроскопическим способом у образцов стали после облучения различными дозами (рис. 6). На рисунке 6а приведены зависимости, полученные для материала после 22-х лет облучения. Видно, что рассчитанные по распуханию относительные изменения модуля Юнга для некоторых образцов ниже экспериментально определенных значений. Аналогичные зависимости получены для материала после 33-х лет облучения (рис. 6б). Наблюдается также отличие относительного изменения модуля Юнга, рассчитанного по распуханию с экспериментально определенными значениями. Это говорит о том, что при длительном облучении до малых значений распухания (< 2%) оно не является доминирующим фактором, влияющим на изменение физических характеристик. Происходящие другие структурные изменения также существенно влияют на физико-механические свойства материала [13, 14].

К таким изменениям относятся образование вторичных фаз, протекающее с одновременным изменением состава кристаллической матрицы [15]. Выпадение карбидов сопровождается обеднением твердого раствора примесями внедрения, что должно приводить к уменьшению модуля Юнга [16]. С другой стороны, сами частицы карбидов имеют модуль Юнга выше, чем у кристаллической матрицы [17, 18]. В связи с отсутствием количественной информации о вторичных фазах и их характеристиках упругости получить численную оценку вызываемых ими изменений модуля Юнга не представляется возможным.

Еще одним фактором, способным приводить к большим разбросам свойств образцов и разбросам из-за этого величин средних значений, может быть неоднородность материала трубы, поскольку образцы вырезались из реальной металлоемкой промышленной конструкции, при изготовлении которой условия однородности структуры и состава выдержать труднее, чем на специально изготавливаемых образцах лабораторных плавок. Разброс структуры и свойств внутри одной партии образцов может быть связан с градиентами температур и напряжений по сечению в различных участках толстостенной конструкции, фактические значения которых могут отличаться от полученных в модельных теплофизических расчетах  $\gamma$ -разогрева и теплосъема в участках стенки трубы при ее эксплуатации в реакторе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования физических свойств и радиационной пористости стали X18H9, формирующейся при нейтронном облучении со скоростями смещений от  $1,0 \cdot 10^{-9}$  до  $4,3 \cdot 10^{-8}$  сна/с при температурах 370 – 440 °С в течение 22-х и 33-х лет показали следующее.

Во всех исследованных образцах образовались радиационные поры, в гистограммах распределения которых прослеживается два максимума – «мелких» пор размером до 5 нм и «крупных» размером более 5 нм, дающих основной вклад в распухание.

При температурах выше 370 °С средний размер «крупных» пор растет с ростом температуры облучения, и у материала, облучавшегося в течение 33-х лет, он больше, чем у облучавшегося в течение 22-х лет.

Концентрация «крупных» пор максимальна в интервале температур 380 – 420 °С, увеличение длительности облучения с 22-х до 33-х лет приводит к некоторому уменьшению концентрации пор.

Интегральная удельная площадь поверхности «крупных» пор максимальна в диапазоне температур 380 – 420 °С, и с увеличением длительности эксплуатации с 22-х до 33-х лет значения интегральной площади поверхности пор возрастает.

Распухание материала стали X18H9 имеет максимум при температуре ~415 °С и достигает значений ~3% после 33-х лет облучения.

Изменения за длительное время модуля Юнга имеют немонокотонную зависимость от повреждающей дозы; максимальное относительное изменение модуля Юнга после 22-х лет эксплуатации не превышает 2%, а после 33-х лет эксплуатации 6% от соответствующих величин исходного состояния.

Наряду с радиационным распуханием на изменение физических свойств существенное влияние при реализованных условиях облучения оказывают образование вторых фаз и состав кристаллической матрицы.

По результатам исследований ВКУ реактора БН-600 из стали X18H9 после 33-х лет эксплуатации имеют остаточный ресурс.

Сопоставление результатов, полученных на материале после 22-х и 33-х лет эксплуатации, содержат информацию, необходимую для описания дальнейших изменений структуры и свойств элементов ВКУ из стали X18H9. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования предельного ресурса реактора в рамках существующих или разрабатываемых моделей.

### Литература

1. Курсевич И.П., Карзов Г.П., Марголин Б.З., Сорокин А.А., Теплухина И.В. Принципы легирования новой радиационно-стойкой аустенитной стали для ВКУ ВВЭР-1200, обеспечивающей их безопасную эксплуатацию не менее 60 лет. // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 3 (71). – С. 146-154.
2. Марголин Б.З., Курсевич И.П., Сорокин А.А., Лапин А.Н., Коханов В.И., Неустроев В.С. К вопросу о радиационном распухании и радиационном охрупчивании аустенитных сталей. Часть I. Эк-



- спериментальные результаты // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 2(58). – С. 89-98.
3. Kozlov A.V., Shcherbakov E. N., Yagovitin P. I., Evseev M. V., Kinev E. A., Panchenko V. L., Isobe I., Sagisaka M., Okita T., Sekimura N., Garner F.A. Influence of damage rate on swelling and physical-mechanical properties of 18Cr-9Ni austenitic steel in the range of  $3 \cdot 10^{-9}$  to  $4 \cdot 10^{-8}$  dpa/s. // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 386-388. – PP. 153-156.
4. Портных И.А., Панченко В.Л. Характеристики радиационной пористости и структурно-фазового состояния реакторной аустенитной стали 07С-16Cr-19Ni-2Mo-2Mn-Ti-Si-V-P-B после нейтронного облучения при температурах 440 – 600°С до повреждающих доз 36 – 94 сна/ // Физика металлов и материаловедение. – 2016. – Т.117. – № 6. – С. 632- 644.
5. Первичные послереакторные исследования и разделка пакета-имитатора ОК-505 сб. 71 В № 2 / Техническая справка филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Белоярская атомная станция» № 21-4/5-1195 от 27.12.2016.
6. Условия эксплуатации и результаты первичных исследований пакета-имитатора сб. 71В./ Техническая справка филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Белоярская атомная станция» № 213205 от 20.02.2015 г.
7. Портных И.А., Козлов А.В. Методология количественного анализа радиационной пористости в металлах. // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2002. – Вып. 1 (59). – С.41-54.
8. Козлов А.В., Портных И.А. Связь скорости радиационного набухания с ростом и коалесценцией радиационных пор. // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2008. – Вып. 2 (71). – С. 3-13.
9. Козлов А.В., Щербаков Е.Н., Коростин О.С., Шихалев В.С., Асипцов О.И. Механизмы влияния высокодозного нейтронного облучения на физико-механические свойства аустенитных сталей. // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2004. – Вып. 2 (63). – С. 283-290.
10. Balachov Yu.I., Shcherbakov E.N., Kozlov A.V., Portnikh I.A., Garner, F.A. Influence of radiation-induced voids and bubbles on physical properties of austenitic structural alloys. // Journal of Nuclear Materials. – 2004. – Vol. 329-333. – PP. 617-620.
11. Kozlov A.V., Shcherbakov E.N., Averin S.A., and Garner F.A. The Effect of Void Swelling on Electrical Resistance and Elastic Moduli in Austenitic Steels, Effects of Radiation on Materials. / Proc. of the XXI<sup>th</sup> International Symposium, ASTM STP1447, ASTM International. – West Conshohocken, PA, 2004. – PP. 66-77.
12. Мосин А.М., Щербаков Е.Н., Панченко В.Л. Влияние деформационного и радиационного воздействия на изменение структуры и физических свойств аустенитных сталей Х18Н10Т и Х18Н9. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2008. – Т. 5. – № 3. – С. 99-104.
13. Повстанко А.В., Буланова Т.М., Федосеев А.Е. и др. Механические свойства и структура стали 12Х18Н10Т после длительного облучения в реакторе БОР-60 до максимальной повреждающей дозы 108 сна. / Докл. VII Российской конф. по реакторному облучению. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2004. – Т. 3, ч. 2. – С. 134-150.
14. Ершова О.В., Щербаков Е.Н., Яговитин П.И., Евсеев М.В., Шихалев В.С. Связь изменений физико-механических свойств с набуханием аустенитной стали ЧС-68 при высокодозном нейтронном облучении. // Физика металлов и материаловедение. – 2008. – Т. 106. – № 6. – С. 644-649.
15. Margolin B., Sorokin A., Kursevich I., Neustroev V. FCC to BCC phase transformation in austenitic steels for WWER internals with significant swelling / Proc. of VII<sup>th</sup> International Symposium «Contribution of materials investigations to improve the safety and performance of LWRs». – France, Avignon, 26 – 30 September 2010.
16. Лифшиц Б.Г., Карпошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 276 с.
17. Неймарк Б.Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник. – М.-Л.: Энергия, 1967. – 240 с
18. Поплавский В.М. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Том 5. Свойства реакторных сталей и сплавов. – М.: ИздАТ, 2014. – 584 с.

Поступила в редакцию 16.05.2019 г.

**Авторы**

Портных Ирина Александровна, руководитель проекта

E-mail: portnykh\_ia@mail.ru

Козлов Александр Владимирович, эксперт

E-mail: kozlov\_alv@irmatom.ru

Панченко Валерий Леонидович, ведущий специалист

E-mail: irm@irmatom.ru

Шихалев Вячеслав Семенович, ведущий специалист

E-mail: irm@irmatom.ru

UDC 539.1.09

**A STUDY INTO THE STRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES  
OF THE Cr18Ni9-GRADE STEEL FOLLOWING LONG-TERM  
IRRADIATION AS PART OF THE BN-600 REACTOR INTERNALS**

Portnykh I.A., Kozlov A.V., Panchenko V.L., Shikhalev V.S.

JSC «Institute of Nuclear Materials»

PO Box 29, Zarechny, Sverdlovsk reg., 624250 Russia

**ABSTRACT**

The microstructures and physical properties of the austenitic Cr18Ni9-grade steel after 22 and 33 years of operation as part of the reactor internals were tested to assess the state of the BN-600 reactor unchangeable components (internals) and to use these further to predict the reactor ultimate life. The paper presents block diagrams of the porosity distribution, depending on the pore size, in samples from portions that were subjected to neutron irradiation with displacement rates of  $1.0 \cdot 10^{-9}$  to  $4.3 \cdot 10^{-8}$  dpa/s at temperatures of 370 to 440°C. The elasticity characteristics were measured on samples taken from such portions using a resonance ultrasonic-type test. The swelling calculated from the block diagrams of the porosity distribution depending on the pore size has been shown to have the maximum value at  $\sim 415^\circ\text{C}$  and to reach values of  $\sim 3\%$  after 33 years of irradiation. Long-term variations of Young's modulus have a non-monotonous dependence on damaging dose. The maximum relative variation of Young's modulus after 22 and 33 years of operation does not exceed respectively 2% and 6% of the initial state values. Apart from the irradiation-induced swelling, the changes in the physical properties in the process of irradiation were shown to be also affected by other structural changes, specifically by the secondary phase formation. As shown by the results of the studies, the BN-600 reactor internals of the Cr18Ni9-grade steel can be operated beyond 33 years of service. The comparison of the results obtained for the material after 22 and 33 years of operation contain information required to describe further changes in the structure and properties of the Cr18Ni9 internals. The available results can be used to predict the reactor ultimate life as part of both existing and developed models.

**Key words:** internals, austenitic steel, neutron irradiation, porosity characteristics, irradiation-induced swelling, elasticity characteristics.

## REFERENCES

1. Kursevich I.P., Karzov G.P., Margolin B.Z., Sorokin A.A., Teplukhina I.V. Alloying principles for new radiation-resistant austenitic steel for VVER-1200 in-vessel internals to provide safe operation during at least 60 years. *Voprosy Materialovedeniya*. 2012, no. 3(71), pp. 146-154 (in Russian).
2. Margolin B.Z., Kursevich I.P., Sorokin A.A., Lapin A.N., Kokhanov V.I., Neustroev V.S. Radiation-induced swelling and radiation embrittlement of austenitic steels. Part I. Experimental Results. *Voprosy Materialovedeniya*. 2009, no. 2 (58), pp. 89-98 (in Russian).
3. Kozlov A.V., Shcherbakov E.N., Yagovitin P.I., Evseev M.V., Kinev E.A., Panchenko V.L., Isobe I., Sagisaka M., Okita T., Sekimura N., Garner F.A. Influence of damage rate on swelling and physical-mechanical properties of 18Cr-9Ni austenitic steel in the range of  $3 \cdot 10^{-9}$  to  $4 \cdot 10^{-8}$  dpa/s. *Journal of Nuclear Materials*. 2009, v. 386-388, pp. 153-156.
4. Portnykh I.A., Panchenko V.L. Characteristics of radiation-induced porosity and structural-phase state of 07Cr-16Cr-19Ni-2Mo-2Mn-Ti-Si-V-P-B reactor austenitic steel after neutron irradiation at temperatures 440-600°C up to damage doses 36-94 dpa. *Fizika Metallov i Metallovedenie*. 2016, v. 117, no. 6, pp. 632-644 (in Russian).
5. Preliminary post-irradiation examination and dismantling of the simulation package OK-505, assembly 71 B No. 2 / Technical Certificate of the Beloyarsk NPP, Affiliate of Rosenergoatom JSC, No. 21-4/5-1195 dated 27.12.2016 (in Russian).
6. Operating conditions and results of the preliminary examination of the simulation package, assembly 71 B / Technical Certificate of the Beloyarsk NPP, Affiliate of Rosenergoatom JSC, No. 213205 dated 20.02.2015 (in Russian).
7. Portnykh I.A., Kozlov A.V. Methodology of the quantitative analysis of radiation-induced porosity in metals. *VANT. Ser.: Materialovedenie i Novye Materialy*. 2002, iss. 1 (59), pp. 41-54 (in Russian).
8. Kozlov A.V., Portnykh I.A. Correlation between radiation-induced swelling rate and growth and coalescence of radiation voids. *VANT. Ser.: Materialovedenie i Novye Materialy*. 2008, iss. 2 (71), pp. 3-13 (in Russian).
9. Kozlov A.V., Shcherbakov E.N., Korostin O.S., Shikhalev V.S., Asiptsov O.I. Mechanisms of the effect of high-dose irradiation on physical and mechanical properties of austenitic steels. *VANT. Ser.: Materialovedenie i Novye Materialy*. 2004, iss. 2 (63), pp. 283-290 (in Russian).
10. Balachov Iouri I., Shcherbakov E.N., Kozlov A.V., Portnykh I.A., Garner, F.A. Influence of radiation-induced voids and bubbles on physical properties of austenitic structural alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 2004, v. 329-333, pp. 617-620.
11. Kozlov A.V., Shcherbakov E.N., Averin S.A., and Garner F.A. The Effect of Void Swelling on Electrical Resistance and Elastic Moduli in Austenitic Steels, Effects of Radiation on Materials. *Proc. of the XXI<sup>th</sup> International Symposium, ASTM STP1447, ASTM International*. West Conshohocken, PA, 2004, pp. 66-77.
12. Mosin A.M., Shcherbakov E.N., Panchenko V.L. The effect of deformation and radiation on changes in the structure and physical properties of 18Cr-10Ni-Ti and 18Cr-9Ni austenitic steels. *Fundamental'nye Problemy Sovremennogo Materialovedeniya*. 2008, v. 5, no. 3, pp. 99-104 (in Russian).
13. Povstyanko A.V., Bulanova T.M., Fedoseeva A.E. et al. Mechanical properties and structure of Cr12-Ni18-Ti10 steel after long-term irradiation in BOR-60 reactor up to maximum damage dose of 108 dpa. *Proc. of the VII<sup>th</sup> Russian Conference on Reactor Irradiation*. Dimitrovgrad. GNTs RF NIIAR Publ., 2004, v. 3, part 2, pp. 134-150 (in Russian).
14. Ershova O.V., Shcherbakov E.N., Yagovitin P.I., Evseev M.V., Shikhalev V.S. Correlation between changes in physical and mechanical properties and swelling of ChS-68 austenitic steel at high-dose neutron irradiation. *Fizika Metallov i Metallovedenie*. 2008, v. 106, no. 6, pp. 644-649 (in Russian).
15. Margolin B., Sorokin A., Kursevich I., Neustroev V. FCC to BCC phase transformation in

austenitic steels for WWER internals with significant swelling. *Proc. of the VII<sup>th</sup> International Symposium «Contribution of materials investigations to improve the safety and performance of LWRs»*. France, Avignon, 26 – 30 September 2010.

16. Lifshitz B.G., Karposhin V.S., Linetsky Ya.L. *Physical Properties of Metals and Alloys*. Moscow. Metallurgiya Publ., 1980, 276 p. (in Russian).

17. Neimark B.E. *Physical Properties of Steels and Alloys used in Energy*. Guide book. Moscow-Leningrad. Energiya, 1967. 240 p. (in Russian).

18. Poplavsky V.M. *Guide Book on Properties of Materials for Advanced Reactor Technologies. Vol. 5. Properties of Reactor Steels and Alloys*. Moscow. IzdAT Publ., 2014, 584 p. (in Russian).

### Authors

Portnykh Irina Aleksandrovna, Project Manager

E-mail: portnykh\_ia@mail.ru

Kozlov Aleksandr Vladimirovich, Expert

E-mail: kozlov\_alv@irmatom.ru

Panchenko Valery Leonidovich, Leading Specialist

E-mail: irm@irmatom.ru

Shikhalev Vyacheslav Semyonovich, Leading Specialist

E-mail: irm@irmatom.ru