

## РАСПУХАНИЕ УЛУЧШЕННОЙ СТАЛИ X16H15M2ГТФР ПРИ СКОРОСТИ НАБОРА ДОЗЫ ОТ $1 \cdot 10^{-8}$ ДО $1,7 \cdot 10^{-6}$ СНА/С

**Е.А. Кинёв, В.Л. Панченко**

*АО «Институт реакторных материалов»,  
624250, Свердловская обл., г. Заречный, а/я 29*



Радиационное распухание негативно отражается на работоспособности конструктивных узлов активной зоны реакторов на быстрых нейтронах (РБН). Поиск новых и улучшение известных сталей для снижения распухания является важной задачей.

Оболочечная сталь X16H15M2ГТФР в период с 2003 г. по настоящее время показывает существенное увеличение радиационной стойкости как результат совершенствования состава и термообработки. Силами АО «ИРМ» изучено распухание стали X16H15M2ГТФР улучшенной технологии, получены данные о температуре максимального распухания и средней скорости распухания в типичных диапазонах температур теплоносителя и скорости набора дозы быстрого реактора.

Результаты основаны на измерениях распухания методами гидростатического взвешивания и просвечивающей микроскопии. Погрешности гидростатических измерений рассмотрены с привлечением данных металлографии и выбора иммерсионной жидкости.

Установлено, что средняя скорость распухания улучшенной стали X16H15M2ГТФР при температуре максимального распухания находится в диапазоне от 0,04 до 0,14%/сна. Наблюдается сдвиг этой температуры от 460 до 520°C с ростом максимальной повреждающей дозы в интервале от 60 до 80 сна ( $1,3 \cdot 10^{-6}$  и  $1,7 \cdot 10^{-6}$  сна/с соответственно). При дозах менее 10 сна и температурах ниже 400°C скорость среднего распухания может достигать 0,04%/сна. При температурах около 600°C и дозах менее 50 сна скорость распухания не превышает 0,01%/сна за весь период наблюдения.

**Ключевые слова:** сталь X16H15M2ГТФР, средняя скорость радиационного распухания, температура максимального распухания, скорость набора дозы.

### ВВЕДЕНИЕ

Радиационное распухание в потоке нейтронов высоких энергий негативно отражается на свойствах конструктивных элементов активной зоны РБН [1 - 5]. Внедрение новых и улучшение известных сталей для снижения распухания является важной практической задачей, в рамках которой актуально исследование таких характеристик, как средняя скорость и температура максимального распухания.

Начиная с 2003 г. радиационная стойкость оболочечной стали X16H15M2ГТФР улучшается путем совершенствования состава и термообработки [6 - 8]. Прогресс улучшения стали затрудняется длительными сроками облучения и многообразием повреждаю-

щих факторов (скорость набора и максимум повреждающей дозы, градиент температуры, напряженно-деформированное состояние). Важное значение для адекватной оценки результатов облучения имеют методические особенности послереакторного материаловедения [9].

Силами АО «ИРМ» изучалось распухание улучшенной стали X16H15M2ГГФР. Получен массив данных для температуры максимального распухания (характеристической температуры) и средней скорости распухания в типичных для РБН диапазонах температур 370 – 650°C и скоростей набора дозы от  $1 \cdot 10^{-8}$  до  $1,7 \cdot 10^{-6}$  сна/с. Цель работы – анализ полученных результатов.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Распухание оболочечных образцов РБН из улучшенной стали X16H15M2ГГФР с различной термообработкой и вариациями химического состава изучали методами дистанционного гидростатического взвешивания и лабораторной просвечивающей микроскопии с относительной погрешностью 0,5 и 15% соответственно [10, 11].

Время реакторного облучения оболочек составляло 1,5 – 2 года. Максимальные повреждающие дозы 60 – 85 сна получены при температуре  $520 \pm 10^\circ\text{C}$ , минимальная доза на уровне 0,5 сна – при  $370^\circ\text{C}$ . Погрешности определения средней температуры облучения материала составляли  $\pm 10^\circ\text{C}$ , а повреждающей дозы – менее 1 сна. Интервалы скоростей набора дозы для трех исследованных выборок материала с максимальной повреждающей дозой 60, 70 и 83 сна представлены на рис. 1.

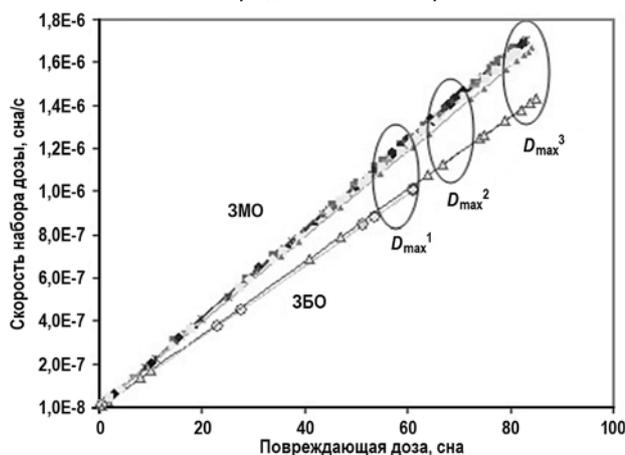


Рис.1. Интенсивность облучения выборок стали с максимальными дозами  $D_{\max}^1$ ,  $D_{\max}^2$ ,  $D_{\max}^3$  в зонах малого (ЗМО) и большого (ЗБО) обогащений РБН

Методические погрешности дистанционных гидростатических измерений анализировали с привлечением результатов оптической металлографии, просвечивающей электронной микроскопии и выбора иммерсионной жидкости (дистиллированной воды с добавкой поверхностно-активного вещества и керосина). Эффекты, связанные с изменением структурно-фазового состояния стали под облучением не учитывали.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Массив средних скоростей радиационного распухания улучшенной стали X16H15M2ГГФР на ранних этапах испытания (выборка  $D_{\max}^1$  с максимальными повреждающими дозами  $\sim 60$  сна) приведён на рис. 2а. В области низких ( $< 400^\circ\text{C}$ ) и высоких ( $> 580^\circ\text{C}$ ) температур при дозах менее 25 и 55 сна соответственно скорость распухания остается ниже  $0,01\%$ /сна. Пик скорости распухания  $\sim 0,04\%$ /сна достигается при характеристической температуре на уровне  $450 - 460^\circ\text{C}$  и дозах порядка 50 сна.

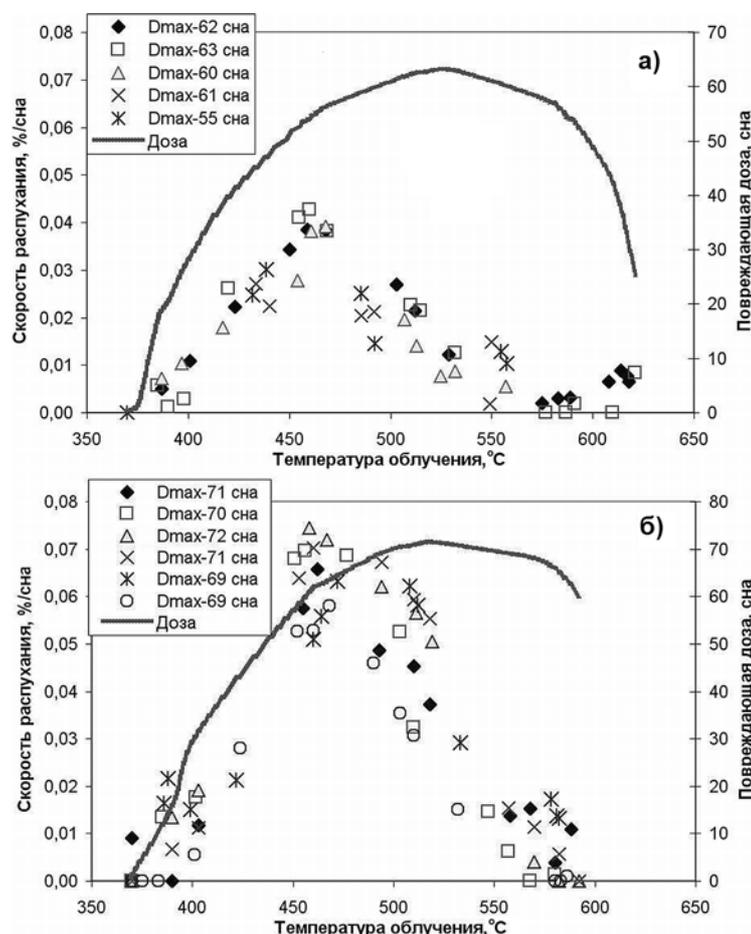


Рис. 2. Скорости распухания стали в условиях реакторного облучения, реализованного для выборок  $D_{\max}^1$  (а) и  $D_{\max}^2$  (б)

Увеличение сроков испытаний стали с целью достижения максимальных повреждающих доз порядка 70 сна (выборка  $D_{\max}^2$ ) вызывает рост средней скорости распухания во всем температурном диапазоне (рис. 2б). Ниже 400 °C и дозах до 30 сна, а также выше 580 °C и дозах менее 65 сна скорость распухания составляет 0,01 – 0,02%/сна. Скорость максимального распухания при характеристических температурах 460 – 470 °C и дозах ~ 65 сна достигает 0,06 – 0,075%/сна.

Массив результатов распухания партий стали с максимальными дозами 80 – 83 сна (выборка  $D_{\max}^3$ ) является наиболее представительным и условно разбит на этапы, связанные с совершенствованием трубной технологии в течение 2003 – 2006 гг. и с 2007 по 2009 гг. (рис. 3). Массив демонстрирует рост характеристической температуры максимального распухания (до 480 – 520 °C) с тенденцией сдвига пика скорости распухания в область максимальных повреждающих доз. Диапазон максимальных скоростей распухания стали составляет от 0,08 до 0,20%/сна.

Последние годы изготовления стали X16H15M2ГТФР преимущественно характеризуются максимальной скоростью ее распухания менее 0,13%/сна (рис. 3б). Более высокие значения этого показателя, полученные за все годы испытаний, следует считать неперспективными, а лучшие (менее 0,10%/сна) – как реальную возможность обеспечения работоспособности стали X16H15M2ГТФР при дозах 110 – 140 сна.

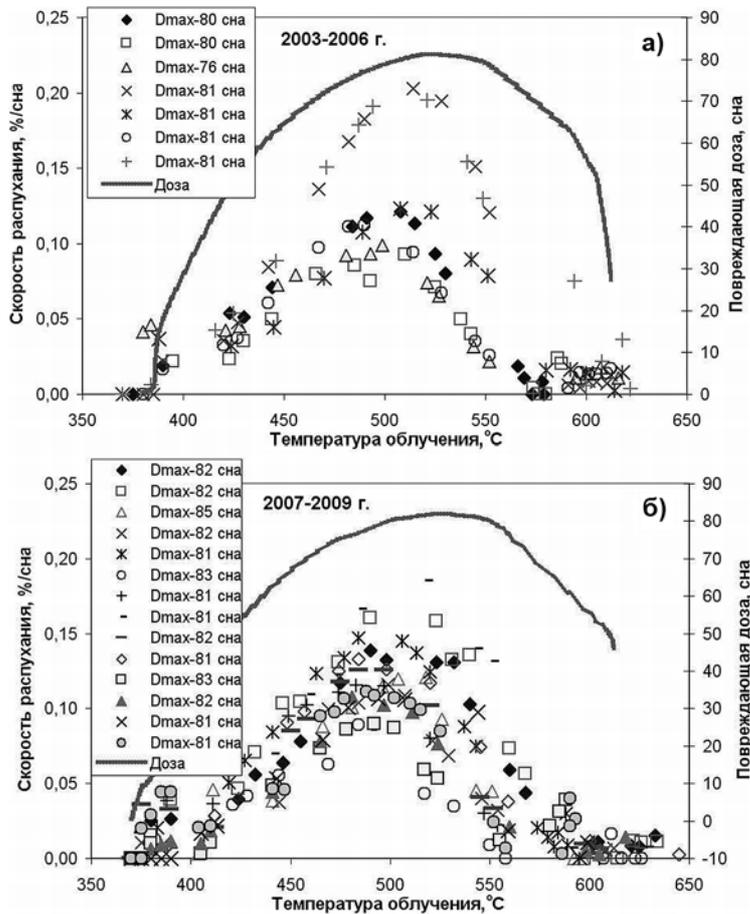


Рис. 3. Скорости распухания стали в условиях реакторного облучения выборки  $D_{\max}^3$  до 2006 г. (а) и после 2007 г. (б)

Низкотемпературное поведение улучшенной стали при дозах менее 40 сн для выборки  $D_{\max}^3$  характеризуется скоростью распухания менее 0,05%/сн. Результаты оценки высокотемпературной (выше 580°C и доза на уровне 50 – 60 сн) скорости распухания (до 0,04%/сн, по данным гидростатики) требуют дополнительных комментариев, так как не согласуются с результатами геометрических измерений.

В процессе многолетних исследований показано, что при температурах более 580°C сталь X16N15M2ГТФР подвергается коррозионным повреждениям агрессивными продуктами деления ядерного топлива [12]. Глубина таких повреждений может достигать десятков микрон и вносить существенный вклад в погрешность гидростатических измерений скорости распухания, представленной на рис. 2 и 3.

Для исключения погрешностей выполнен комплекс сравнительных измерений распухания с применением иммерсионной жидкости высокой проникающей способности (керосин против дистиллята  $H_2O$ ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). В результате наглядно показано, что фактическая скорость высокотемпературного распухания образцов стали для выборки  $D_{\max}^3$  не превышает 0,01%/сн (табл. 1). В условиях низкотемпературного распухания при отсутствии коррозионного фактора результаты измерений распухания гидростатическим методом в дистиллированной воде и электронной микроскопии находятся в удовлетворительном соответствии (табл. 2).

Таблица 1

**Высокотемпературное распухание стали X16H15M2ГФР по данным гидростатических измерений и ПЭМ**

Год изготовления	Номер образца	T, °C	D, сна	Скорость набора дозы, сна/с	Распухание, %			Скорость распухания, %/сна (минимум)
					Иммерсионная жидкость		ПЭМ	
					H <sub>2</sub> O	керосин		
2005	5302-16	585	42,5	8,7·10 <sup>-7</sup>	1,3*	–	0,7	0,016
2006	5541-26	604	50,5	1,0·10 <sup>-6</sup>	0,4	–	0,5	0,008
	5541-72	600	50,2	1,0·10 <sup>-6</sup>	0,7*	–	0,5	0,008
	5541-66	600	63,0	1,3·10 <sup>-6</sup>	0,2	0,1	–	< 0,001
		608	58,0	1,2·10 <sup>-6</sup>	0,9*	0,1	–	0,002
	618	51,0	1,0·10 <sup>-6</sup>	1,5*	0,3	–	0,006	
2007	5770-25	584	45,5	9,4·10 <sup>-7</sup>	0,7	–	0,3	0,007
	5928-116	595	62,0	1,3·10 <sup>-6</sup>	0,6*	–	0,1	0,002
	5939-64	612	52,0	8,7·10 <sup>-7</sup>	0,3	–	0,1	0,002

\* Межкристаллитная коррозия внутренней поверхности глубиной 20 – 30 мкм

Таблица 2

**Низкотемпературное распухание стали X16H15M2ГФР по данным гидростатических измерений и ПЭМ**

Год изготовления	Номер образца	T, °C	D, сна	Скорость набора дозы, сна/с	Распухание, %		Скорость распухания, %/сна (минимум)
					Иммерсионная жидкость H <sub>2</sub> O	ПЭМ	
2003	4872/110	370	1,5	3,1·10 <sup>-8</sup>	0,04	0,02	0,013
2005	5302/16	420	48,0	9,8·10 <sup>-7</sup>	1,1	1,5	0,023
2006	5506/64	440	57,7	1,2·10 <sup>-6</sup>	4,5	4,5	0,078
	5541/72	390	18	3,6·10 <sup>-7</sup>	0,3	0,3	0,017
		415	46,0	9,3·10 <sup>-7</sup>	1,5	1,6	0,033
2007	5928/116	370	0,5	1,0·10 <sup>-8</sup>	0,0	< 0,03	< 0,060
	5770/25	419	50,0	1,0·10 <sup>-6</sup>	2,5	2,7	0,050

Анализ средней скорости высокотемпературного распухания улучшенной стали по годам изготовления (помимо вышесказанного) иллюстрирует благоприятную тенденцию увеличения ее радиационной стойкости (см. табл. 1). Для низких температур это не столь очевидно из-за различий в скорости набора дозы (см. табл. 2).

Влияние скорости набора дозы при разных температурах облучения на скорость радиационного распухания улучшенной стали X16H15M2ГФР иллюстрирует рис. 4. Здесь приведена скорость распухания стали только в диапазоне температур от 370 до 540°C, поскольку при более высоких температурах распухание замедляется (см. рис. 2, 3) из-за интенсивной рекомбинации и миграции вакансионных дефектов радиационного происхождения на стоки: границы зерен, дислокации. С увеличением ресурса испытаний от максимальной дозы ~ 60 (скорость набора 1,3·10<sup>-6</sup> сна/с) до 83 сна (скорость набора 1,7·10<sup>-6</sup> сна/с) характеристическая температура максимума распухания возрастает от 460

до примерно 510°C (см. рис. 4). Дополнительно прослеживается, что при одинаковой скорости набора дозы средняя скорость распухания стали монотонно увеличивается с ростом времени и дозы облучения. Одновременно высокий разброс максимальных скоростей распухания в область малых значений (до 0,06%/сна) показывает перспективу промышленного освоения стали X16H15M2ГТФР с повышенной стойкостью к распуханию при характеристической температуре  $500 \pm 10^\circ\text{C}$ .

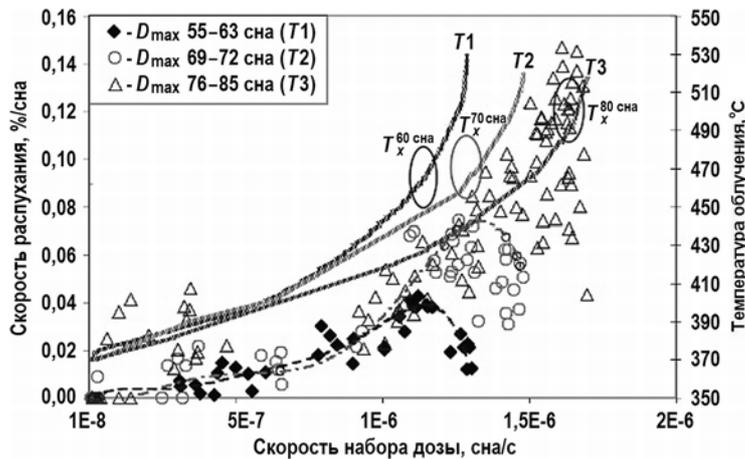


Рис.4. Рост характеристической температуры ( $T_x$ ) максимального распухания стали X16H15M2ГТФР в условиях РБН (при  $T_{обл} < 540^\circ\text{C}$ )

Фактор роста характеристической температуры максимального распухания улучшенной стали X16H15M2ГТФР с ростом скорости набора дозы вполне согласуется с известными результатами имитационного ионного облучения аустенитной стали X18H10Т [13], а также с экспериментами на РБН [4, 5]. Дополнительное влияние на кинетику и характеристическую температуру распухания стали должно оказывать накопление трангенного гелия, образующего термически стабильные гелийвакансионные комплексы [5, 14]. По данным [15, 16], концентрация гелия в стали ЧС-68 после эксплуатации в течение 560-ти эффективных суток может достигать  $\sim 60$  ррт. Таким образом, скорость рекомбинации радиационных вакансий с ростом температуры облучения может стабилизироваться и сопровождаться подрастом характеристической температуры максимума распухания.

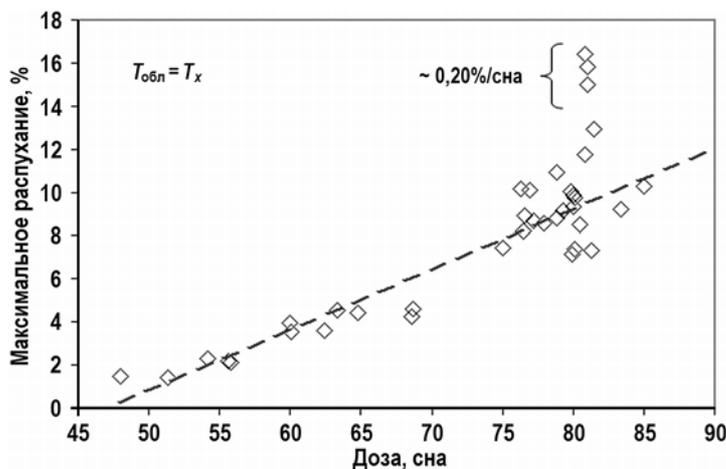


Рис. 5. Инкубационная доза стационарного распухания при характеристической температуре  $T_x$  облучения и скорости набора дозы  $1,7 \cdot 10^{-6}$  сна/с

Инкубационная доза начала стационарного распухания улучшенной стали

X16H15M2ГГФР при температуре облучения, равной характеристической, средней скорости распухания 0,12%/сна и максимальной скорости набора дозы  $1,7 \cdot 10^{-6}$  сна/с составляет 47 сна (рис. 5). Неперспективные партии стали со средней скоростью распухания 0,2%/сна не являются показательными в массиве обработанных данных ввиду неоптимального сочетания технологических параметров термообработки и легирования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что средняя скорость радиационного распухания промышленных партий улучшенной стали X16H15M2ГГФР при характеристической температуре максимального распухания находится в диапазоне от 0,04 до 0,14%/сна. Наблюдается тенденция сдвига характеристической температуры от 460 до 520°C с ростом максимальной повреждающей дозы от 60 до 83 сна (скорости набора  $1,3 \cdot 10^{-6}$  и  $1,7 \cdot 10^{-6}$  сна/с соответственно). При низких дозах (< 40 сна) и минимальных температурах (< 400°C) средняя скорость распухания не превышает 0,05%/сна. Высокотемпературная коррозия материала дает погрешность в гидростатические измерения, но по данным электронной микроскопии при температурах выше 600°C и дозах менее 60 сна средняя скорость распухания не превышает 0,01%/сна за весь период наблюдения.

2. Эксплуатация улучшенной стали X16H15M2ГГФР при характеристических температурах максимального распухания  $500 \pm 10^\circ\text{C}$  и скорости набора дозы  $1,7 \cdot 10^{-6}$  сна/с возможна до повреждающей дозы не менее 100 сна при средней скорости радиационного распухания не выше 0,14%/сна.

3. Лучшие партии стали X16H15M2ГГФР в условиях высокоэнергетического нейтронного облучения показывают скорость распухания на уровне 0,08 – 0,1%/сна, обеспечивая перспективу работоспособности конструкционных и топливных элементов РБН при 110 – 140 сна.

4. Инкубационная доза начала стационарного распухания стали при  $500 \pm 10^\circ\text{C}$  составляет 47 сна.

### Литература

1. Уолтерс А., Рейнольдс А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах. / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 624 с.
2. Поролло С.И., Конобеев Ю.В. Электронно-микроскопические исследования распухания и микроструктуры стали ЭП-172 в холоднодеформированном состоянии, облученной в качестве оболочек твэлов реактора БН-600 до высоких повреждающих доз / Сб. докл. IX Российской конференции по реакторному материаловедению. – Димитровград, НИИАР, 2009. – С.550-559.
3. Андрианов А.Н., Чернов В.М. Радиационная повреждаемость материалов ядерных энергетических установок (ЯЭУ) // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2005. – Вып. 2. – № 65. – С. 3-11.
4. Будылкин Н.И., Миронова Е.Г., Митрофанова Н.М., Чернов В.М. Влияние скорости набора повреждающей дозы на распухание аустенитных сталей типа 16Cr-15Ni-3Mo-Nb, облученных в реакторах на быстрых нейтронах БОР-60 и БН-350 // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2005. – Вып. 2. – № 65. – С. 48-54.
5. Амаев А.Д., Крюков А.М., Неклюдов И.М. и др. Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов. – СПб.: Политехника, 1997. – 312 с.
6. Баканов М.В., Мальцев В.В., Ошканов Н.Н., Чуев В.В. Основные результаты эксплуатации конструкционных материалов в активных зонах реактора БН-600 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 1. – С. 177-186.
7. Баканов М.В., Мальцев В.В., Ошканов Н.Н., Чуев В.В. Основные результаты контроля работоспособности твэлов с оболочками из аустенитных сталей нового поколения // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 1. – С. 187-195.
8. Солонин М.И., Иолтуховский А.Г., Бибилашвили Ю.К. и др. Проблемы создания и модификации нержавеющей сталей для деталей активных зон реакторов на быстрых нейтро-

нах и термоядерного реактора синтеза // Избранные труды ВНИИНМ. – М.: ФГУП ВНИИНМ. – 2002. – Т. 1. – С. 276-288.

9. *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.

10. *Плаченков Т.Г., Колосенцев С.Д.* Порометрия. – Л.: Химия, 1988. – 176 с.

11. ГОСТ 20018-74 (ИСО 3369-75). Сплавы твердые спеченные. Метод определения плотности. Введ. 1976-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 5 с.

12. *Кинев Е.А.* Внутритвэльная коррозия оболочек из нержавеющей стали в условиях реакторного облучения // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 2. – С. 107-113.

13. *Кальченко А.С., Брык В.В., Воеводин В.Н., Лазарев Н.П.* Моделирование распухания стали X18H10T в имитационных и реакторных условиях // ВАНТ. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2009. – Вып. 4. – № 2. – С. 131-139.

14. *Чернов И.И., Бирюкова С.Ю., Калинин Б.А. и др.* Влияние дозы облучения на развитие и поведение гелия в ГЦК и ОЦК сталях // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2006. – Вып. 1. – № 66. – С.396-404.

15. *Блохин А.И., Дёмин Н.А., Леонтьева-Смирнова М.В. и др.* Активация и трансмутация конструкционных материалов в различных нейтронных полях // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2006. – Вып. 1. – № 66. – С. 88-104.

16. *Блохин Д.А., Чернов В.М., Митрофанова Н.М. и др.* Ядерно-физические свойства аустенитных сталей ЧС68 и ЭК164 в условиях длительного нейтронного облучения в реакторе БН-600 // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2015. – Вып. 3. – № 82. – С.22-37.

Поступила в редакцию 05.01.2017 г.

#### Авторы

Кинёв Евгений Александрович, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: kinev007@yandex.ru irm@irmatom.ru

Панченко Валерий Леонидович, начальник лаборатории

E-mail: irm@irmatom.ru

UDC 621.039.531

### **SWELLING OF 16Cr-15Ni-2Mo-Mn-Ti-V-B STEEL UNDER DOSE RATE FROM $1 \cdot 10^{-8}$ TO $1,7 \cdot 10^{-6}$ DPA/S**

Kinev E.A., Panchenko V.L.

JSC «Institute of Nuclear Materials»

Post box 29, Zarechny, Sverdlovsk reg., 624250 Russia

#### ABSTRACT

Radiation-induced swelling has a negative influence on the structural unit availability of the fast neutron reactor core. Therefore if to reduce swelling it is an important task to search for new steels and improve known ones.

Since 2003 the 16Cr-15Ni-2Mo-Mn-Ti-V-B steel shows a significant increase in radiation resistance as a result of the improvement of composition and heat treatment. The swelling of 16Cr-15Ni-2Mo-Mn-Ti-V-B improved steel is studied with JSC INM's forces. The data about the maximum swelling temperature and the average speed of swelling in typical temperature ranges of the coolant and the dose rate of fast reactor was obtained.

Research materials are based on the results of hydrostatic weighing and transmission microscopy measurements of steel samples density and swelling. Specific matters of hydrostatic measurement errors were discussed considering metallography data and immersion liquid choice.

It was found that the average swelling rate of 16Cr-15Ni-2Mo-Mn-Ti-V-B improved steel under maximum swelling characteristic temperature is within the range of 0,04 – 0,14 %/dpa. There is a tendency of the characteristic temperature shift from 460 to 520°C as maximum damage dose increases from 60 to 80 dpa ( $1,3 \cdot 10^{-6}$  and  $1,7 \cdot 10^{-6}$  dpa/s respectively). At low (less than 10 dpa) damage doses and minimum (less than 400°C) temperatures the swelling rate can reach 0,04 %/dpa. High-temperature metal corrosion causes hydrostatic measurement errors. According to the electron microscopy data, at temperature about 600°C and damage dose below 50 dpa, swelling rate does not exceed 0,01 %/dpa throughout the whole observation period.

**Key words:** 16Cr-15Ni-2Mo-Mn-Ti-V-B steel, average radiation-induced swelling rate, maximum swelling temperature, dose rate.

#### REFERENCES

1. Wolters A, Reynolds A. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1986. 624 p. (in Russian).
2. Porollo S.I., Konobeev Yu.V. Elektronno-mikroskopicheskie issledovaniya raspuchaniya i mikrostruktury stali EP-172 v holodnodeformirovannom sostoyanii, obluchennoy v kachestve obolochek tvelov reaktora BN-600 do vysokih povrezhdayuschih doz. Proc. IX Russian Conf. on Reactor material science. Dimitrovgrad. NIAR Publ., 2009, pp. 550-559 (in Russian).
3. Andrianov A.N., Chernov V.M. Radiatsionnaya povrezhdaemost' materialov yadernyh energeticheskikh ustanovok. *VANT. Ser. Material science and new material*. 2005, v. 2, no. 65, pp. 3-11 (in Russian).
4. Budylkin N.I., Mironova E.G., Mitrofanova N.M., Chernov V.M. The influence of the damage dose rate on swelling of austenitic steels as type 16Cr-15Ni-3Mo-Nb which irradiated in BOR-60 and BN-350 fast reactors. *Ibid.*, pp. 48-54 (in Russian).
5. Amaev A.D., Kryukov A.M., Neklyudov I.M., Parshin A.M., Platonov P.A., Tihonov A.N., Hlopin N.S., Shtrombah Ya.I. Radiatsionnaya povrezhdaemost' i rabotosposobnost' konstruktivnykh materialov. St. Petersburg. Polytechnica Publ., 1997. 312 p. (in Russian).
6. Bakanov M.V., Maltsev V.V., Oshkanov N.N., Chuev V.V. Osnovnye rezultaty ekspluatatsii konstruktivnykh materialov v aktivnykh zonakh reaktora BN-600. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2011, no. 1, pp. 177-186 (in Russian).
7. Bakanov M.V., Maltsev V.V., Oshkanov N.N., Chuev V.V. The main results of workability control of fuel rods with new generation austenitic steel claddings. *Ibid.*, pp. 187-195 (in Russian).
8. Solonin M.I., Ioltuhovskiy A.G., Bibilashvili Yu.K., Leont'eva-Smirnova M.V., Medvedeva E.A., Mitrofanova N.M., Budanov Yu.P., Chernov V.M., Tselishev A.V. Problemy sozdaniya i modifikatsii nerzhavayushih staley dlya detaley aktivnykh zon reaktorov na bystrykh neytronah i termoyadernogo reaktora sinteza. Select VNIINM proceeding. Moscow. VNIINM Publ., 2002, v. 1, pp. 276-288 (in Russian).
9. Portnyh I.A., Kozlov A.V. Metodologiya kolichestvennogo analiza radiatsionnoy poristosti v metallah. *VANT. Ser. Material science and new material*. 2002, v. 1, no. 59, pp. 41-54 (in Russian).
10. Plachenov T.G., Kolosentsev S.D. *Porometriya*. Leningrad. Khimiya Publ., 1988, 176 p. (in Russian).
11. State Standard 20018-74 (ISO 3369-75). Splavy tverdye spechenye. Metod opredeleniya plotnosti. Intr. 1976-01-01. Moscow. Standards Publ., 1986, 5 p. (in Russian).
12. Kinev E.A. Vnutritvel'naja korrozija obolochek iz nerzhavayushej stali v usloviyah reaktornogo materialovedeniya. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2008, no. 2, pp. 107-113 (in Russian).

13. Kalchenko A.S., Bryk V.V., Voevodin V.N., Lazarev N.P. Simulation of 18Cr-10Ni-Ti steel swelling in imitation and reactor conditions. *VANT. Ser. Radiation damage physics and radiation material science*. 2009, v. 4, no. 2, pp. 131-139 (in Russian).

14. Chernov I.I., Biryukova S.Yu., Kalin B.A., Mo Htet Vin., Tan Sve. The influence of radiation dose on the development and behavior of helium in FCC and BCC steels. *VANT. Ser. Material science and new materials*. 2006, v. 1, no. 66, pp. 396-404 (in Russian).

15. Blohin A.I., Demin N.A., Leont'eva-Smirnova M.V., Potapenko M.M., Chernov V.M. Activation and transmutation of constructional materials in various neutron fields. *Ibid.*, pp. 88-104 (in Russian).

16. Blohin D.A., Chernov V.M., Mitrofanova N.M., Tselishev A.V., Blohin A.I. Yadernofizicheskie svoystva austenitnyh stalej CHS68 i EK164 v usloviyah dlitel'nogo nejtronnogo oblucheniya v reaktore BN-600. *VANT. Ser. Material science and new material*. 2015, v. 3, no. 82, pp. 22-37 (in Russian).

#### Authors

Kinev Evgenij Aleksandrovich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: kinev007@yandex.ru irm@irmatom.ru

Panchenko Valerij Leonidovich, Head of Laboratory

E-mail: irm@irmatom.ru