

УДК 620.186:516.11

EDN RPLDXM

## Распухание и радиационная ползучесть аустенитной нержавеющей стали 06X18H10T после низкотемпературного облучения в реакторе БН-350

**С.И. Поролло<sup>1</sup>, А.М. Дворяшин<sup>1</sup>, А.А.Иванов<sup>1</sup>, С.В. Шулепин<sup>1</sup>,  
М.В. Леонтьева-Смирнова<sup>2</sup>, Т.А. Чурюмова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>АО «Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО ГНЦ РФ-ФЭИ), Обнинск

<sup>2</sup>АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва

*Проведено исследование распухания и радиационной ползучести аустенитной нержавеющей стали 06X18H10T после облучения в качестве газонаполненных ампул в реакторе БН-350 при температурах 324–350°C до повреждающей дозы 73 сна. Показано, что с увеличением окружного напряжения суммарная деформация газонаполненных трубок возрастает по линейному закону и достигает величины 13,2 % при напряжении 196 МПа. Деформация радиационной ползучести вносит основной вклад в общую деформацию ампул, тогда как вклад распухания в увеличение диаметра ампул менее значителен. Распухание стали линейно увеличивается с дозой после достижения инкубационного периода, равного 60 сна, скорость распухания стали при этом составляет 0,11% / сна. Модуль радиационной ползучести стали  $B_0$  в данных условиях облучения изменяется в пределах от  $7,9 \times 10^{-6}$  МПа<sup>-1</sup>·сна<sup>-1</sup> до  $10,6 \times 10^{-6}$  МПа<sup>-1</sup>·сна<sup>-1</sup>.*

**Ключевые слова:** распухание, радиационная ползучесть, нейтронное облучение, модуль ползучести, окружное напряжение, деформация, реактор, внутрикорпусное устройство

---

## Swelling and irradiation creep of the 06KH18N10T austenitic stainless steel after low- temperature irradiation in the BN-350 reactor

**S.I. Porollo<sup>1</sup>, A.M. Dvoriashin<sup>1</sup>, A.A. Ivanov<sup>1</sup>, S.V. Shulepin<sup>1</sup>,  
M.V. Leontyeva-Smirnova<sup>2</sup>, T.A. Churumova**

<sup>1</sup>JSC "Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leipunsky" (AO SSC RF-IPPE), Obninsk

<sup>2</sup>JSC « A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow

*The study of the swelling and irradiation creep of the 06Kh18N10T austenitic stainless steel after irradiation as gas-filled tubes in the BN-350 reactor at temperatures of 324–350°C to a damage dose of 73 dpa was conducted. It was shown that with increasing hoop stress, the total deformation of the gas-filled tubes increases linearly and reaches 13.2% at a hoop stress of 196 MPa. Radiation creep deformation makes the main contribution to the overall deformation of the tubes, while the contribution of swelling to the increase in the tubes diameter is less significant. Steel swelling increases linearly with dose after reaching an incubation period of 60 dpa, with the swelling rate being 0.11%/dpa. The irradiation creep modulus of the 06Kh18N10T steel under the given irradiation conditions varies within the range from  $7.9 \times 10^{-6}$  MPa<sup>-1</sup>·dpa<sup>-1</sup> to  $10.6 \times 10^{-6}$  MPa<sup>-1</sup>·dpa<sup>-1</sup>.*

**Keywords:** swelling, irradiation creep, neutron irradiation, creep compliance, hoop stress, deformation, reactor, internal equipment.

---

## Введение

Аустенитные нержавеющие стали типа X18H10T широко используются в реакторостроении. В настоящее время из этих сталей изготавливают большинство деталей внутрикорпусного оборудования реакторов типа ВВЭР, многие элементы в конструкции быстрых реакторов (корпус, напорный коллектор и др.) так же изготавливаются из стали этого типа. Существует достаточно много экспериментальных данных по распуханию и радиационной ползучести этих сталей, но большинство из них получено при температурах облучения свыше 350°C [1-7]. Это связано с тем, что для большинства быстрых реакторов температура натрия на входе в активную зону достаточно высока (340°C и выше). В этом смысле реактор БН-350 являлся исключением с температурой натрия на входе, равной 280°. Данные, полученные при низкотемпературном облучении, особенно актуальны для оценки работоспособности внутрикорпусных устройств (ВКУ) реакторов типа ВВЭР. В реакторах этого типа компоненты ВКУ (например выгородка), изготовленные из стали 08X18H10T, за 30 лет эксплуатации могут накопить повреждающую дозу до 50 сна при температуре облучения 300-460°C [8]. Для расчета напряженно-деформированного состояния компонентов ВКУ реакторов ВВЭР необходимо знать дозно-температурные зависимости распухания и радиационной ползучести во всем температурном режиме работы элементов ВКУ.

В данной статье приведены результаты исследования распухания и радиационной ползучести аустенитной нержавеющей стали 06X18H10T, близкой по составу к стали 08X18H10T, после облучения в качестве материала оболочек газонаполненных ампул в реакторе БН-350 в температурном диапазоне 324–350 °С до повреждающей дозы 73 сна. Полученные результаты пополняют базу экспериментальных исследований низкотемпературной радиационной ползучести аустенитных хромо-никелевых сталей, что весьма полезно для прогнозирования эксплуатационной безопасности перспективных реакторных установок, но и также вносит фундаментальный вклад в исследование механизма радиационной ползучести аустенитных сталей.

## Материалы и методики исследования

Исследование радиационной ползучести и распухания было проведено на образцах в виде ампул под газовым давлением, состоящих из оболочечной трубки размером 7,0×0,3 мм с рабочей длиной 55 мм и двух герметизирующих заглушек (рис. 1). Заданные окружные (тангенсальные) напряжения ( $\sigma_n$ ) 0; 49; 98 и 196 МПа создавались заполнением ампулы аргоном при определенном давлении. Химический состав и окончательная термообработка оболочечных труб из стали 06X18H10T приведены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав (% вес) и термообработка оболочечных труб из стали 06X18H10T.

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	N <sub>2</sub>	Термо-обработка
0,06	0,39	1,20	0,008	0,024	17,85	10,35	0,46	0,16	Аустенизация 1020°C, воздух

Для облучения образцов конструкционных материалов в реакторе БН-350 до высоких повреждающих доз были разработаны и изготовлены две экспериментальные материаловедческие сборки с выемными контейнерами. Сборка представляла собой штатную ТВС, в центральной части которой вместо нескольких твэлов размещался выемной контейнер диаметром 30 мм. В контейнер помещались цилиндрические кассеты диаметром 27 мм, в каждой из которых находились по 7 ампул (одна ампула с нулевым давлением, по 2 ампулы с окружными напряжениями 49, 98 и 196 МПа). Боковые поверхности капсул были перфорированы для протекания натриевого теплоносителя между

трубками. Исследованные газонаполненные трубки из стали 06X18H10T облучались в каскаде №5 на расстоянии 230 мм ниже Ц.А.З.

Облучение сборки проводилось в зоне малого обогащения реактора БН-350 с одной перегрузкой контейнера в свежую ТВС. Общее время облучения сборки составило 14400 часов, что соответствует скорости создания смещений  $1,4 \times 10^{-6}$  сна/сек на уровне расположения исследованных ампул. Распределение повреждающей дозы по высоте АЗ в относительных единицах и температуры облучения показаны на рис. 2. Для центра трубок из стали 0X18H10T температура облучения составила 335°C, а повреждающая доза 73,0 сна. Повреждающая

доза и температура облучения для верхних частей трубок были равны 78,1 сн и 350°C. Аналогичные величины для низа ампулы составили 64,9 сн и 324°C. Температура оболочек ампул определялась расчетным путем по известным расходу теплоносителя и тепловыделению окружающих контейнер твэлов. Точность расчета температуры облучения составляет ±10°C. Одновременно с облучаемыми образцами часть образцов была поставлена на температурную выдержку при 450°C (старение) без облучения.

После облучения проводился осмотр ампул в горячей камере с использованием бинокля с десятикратным приближением. Измерение наружного диаметра образцов проводилось дистанционным микрометром с электроприводом с точностью ±0,01 мм в 3-х точках по длине трубки (на расстояниях 15 мм от верхней и нижней заглушек и в центре трубки) в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. В каждом положении проводилось по 3 замера. Значение увеличения диаметра для каждой ампулы получалось усреднением полученных результатов и отнесением среднего значения в величине исходного диаметра.

Радиационное распухание материала ампул определялось по плотностям необлученных и облученных трубчатых образцов, измеренным путем гидростатического взвешивания (ГСВ) в четыреххлористом углероде. Перед взвешиванием от ампулы отрезались верхняя и нижняя заглушки и взвешиванию подвергался средний участок трубки длиной 45–50 мм. Распухание материала ампулы рассчитывалось по следующему выражению:

$$S = \frac{\rho_{исх.} - \rho_{обл.}}{\rho_{обл.}} \times 100\% \quad (1)$$

где  $S$ -распухание,  $\rho_{исх.}$ - исходная плотность образцов,  $кг/м^3$ ,  $\rho_{обл.}$ - плотность образцов после облучения,  $кг/м^3$ .

Прокол облученных трубчатых образцов осуществлялся дистанционно в горячей камере на специальной установке. Точность определения объема газа, вышедшего из облученного образца при проколе, определялась величиной объема газового пространства аналитической части установки (100-600 см<sup>3</sup>), величиной объема газа в образце и находилась в пределах 0,3-1,0 см<sup>3</sup>. Окружные напряжения в трубчатых образцах при облучении определялись по формуле:

$$\sigma_h = \frac{P_0 V(1+\alpha T)d_{вн.}}{V_0 2t} \quad (2)$$

где  $P_0$  – атмосферное давление, МПа,  $V$ -объем газа, вышедшего из ампулы при проколе, см<sup>3</sup>,  $V_0$ -внутренний объем ампулы, см<sup>3</sup>,  $T$ -температура облучения, К,  $\alpha$ -коэффициент термического расширения аргона, 1/К,  $d_{вн.}$ -внутренний диаметр трубки, мм,  $t$ -толщина стенки, мм.

Деформация радиационной ползучести для каждой ампулы определялась как разница между общей деформацией трубчатого образца и изменением диаметра образца за счет радиационного распухания. Вклад термической ползучести в увеличение диаметра ампул, как показали результаты измерения диаметра трубок, прошедших термические испытания, был пренебрежимо мал.

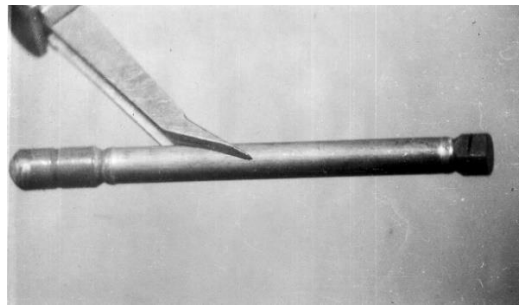


Рис. 1. Внешний вид газонаполненной ампулы для испытания на ползучесть в реакторе БН-350.

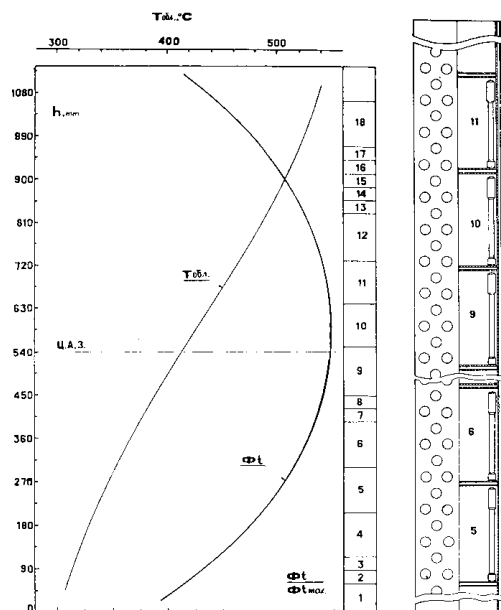


Рис. 2. Схема расположения образцов в сборке и условия их облучения.

**Результаты исследования**

При визуальном осмотре ампул каких-либо дефектов или повреждений на наружной поверхности трубчатых образцов обнаружено не было. Поверхность трубок была покрыта налетом темного цвета, который не удалялся после промывки образцов в этиловом спирте. Две

трубки из семи с окружными напряжениями 98 и 196 МПа оказались изогнутыми. В таблице 2 приведены данные замера наружного диаметра ампул по вышеописанной схеме (измерение в 2 взаимно-перпендикулярных положениях в 3 сечениях ампулы) и усредненные значения увеличения диаметра ампул в зависимости от приложенного напряжения.

Таблица 2

Значения наружного диаметра газонаполненных ампул из стали 06X18H10T.

№ трубки	$\sigma_n$ , МПа	0°			90°			$\Delta D/D$ , %
		Верх	Середина	Низ	Верх	Середина	Низ	
1	0	7,08	7,06	7,08	7,03	7,0	6,98	0,52
		7,08	7,06	7,08	7,02	7,0	6,98	
		7,08	7,06	7,08	7,02	7,0	6,99	
2	49	7,025	7,07	7,13	7,04	7,04	7,06	0,88
		7,025	7,07	7,19	7,04	7,04	7,06	
		7,025	7,07	7,13	7,04	7,04	7,06	
3	49	7,225	7,21	7,21	7,22	7,21	7,21	3,0
		7,225	7,21	7,2	7,22	7,21	7,21	
		7,225	7,21	7,2	7,22	7,21	7,21	
4	98	7,25	7,24	7,25	7,24	7,24	7,24	3,54
		7,25	7,24	7,25	7,24	7,24	7,24	
		7,25	7,24	7,25	7,24	7,24	7,35	
5	98	7,445	7,405	7,42	7,42	7,4	7,41	5,94
		7,445	7,405	7,42	7,42	7,4	7,41	
		7,445	7,405	7,42	7,42	7,4	7,41	
6	196	7,96	7,91	7,91	7,94	7,91	7,93	13,2
		7,96	7,91	7,91	7,94	7,91	7,93	
		7,96	7,91	7,91	7,94	7,91	7,93	
7	196	7,88	7,87	7,88	7,9	7,87	7,89	12,6
		7,88	7,87	7,88	7,9	7,87	7,89	
		7,88	7,87	7,88	7,9	7,87	7,89	

Из приведенных в таблице 2 данных следует, что с ростом окружных напряжений происходит значительное увеличение диаметра газонаполненных ампул. При максимальном напряжении величина прироста диаметра достигает 13%. Для определения характера изменения прироста диаметра по длине ампул для

ампулы с нулевым давлением было проведено повторное измерение диаметра по несколько отличающейся схеме. Замеры диаметра были проведены для низа, середины и верха трубки в шести различных положениях после разворота ампулы вокруг продольной оси на 30°. Результаты измерений приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты замеров наружного диаметра ампулы с нулевым давлением.

№ замера	Верх	Середина	Низ
1	7,07	7,055	7,03
2	7,07	7,06	7,03
3	7,07	7,06	7,05
4	7,06	7,055	7,04
5	7,065	7,05	7,03
6	7,07	7,06	7,03
<d>, мм	7,0675	7,0503	7,035
$\Delta d/d$ , %	0,96	0,8	0,5
Доза, сна	78	73	65
T <sub>обл.</sub> , °C	350	335	324

После измерения диаметра оболочки шесть ампул с напряжениями от 49 до 196 МПа были проколоты для определения количества газа, находящегося в ампулах на момент исследования. Результаты измерения показали, что две ампулы с окружными напряжениями 49 и 196 МПа на момент прокола были негерметичны. В остальных ампулах давление газа сохранилось, хотя для ампулы № 4 оно было существенно ниже расчетного. Для ампул № 3, №5 и №7 отклонения измеренного значения от расчетного составляли (11 – 12) %. Осмотр ампул после прокола показал, что на поверхности оболочки ампулы №5 ( $\sigma=98$  МПа) в нижней части появилась трещина (Рис. 3). У ампулы № 6 ( $\sigma=196$  МПа) в результате прокола была отломана нижняя головка (Рис. 4).

Результаты измерения распухания материала ампул методом гидростатического взвешивания приведены в таблице 4. Сравнение данных по распуханию, полученных методом гидростатического взвешивания, с данными по

увеличению диаметра ампулы с нулевым давлением показывает их значительное расхождение, а именно, согласно данным замера распухания методом гидростатического взвешивания, увеличение диаметра ненагруженной ампулы должно составить  $0,66/2=0,22\%$ , тогда как замер диаметра дает величину 0,52%. Такое расхождение результатов и наличие на поверхности трубок налета позволяет предполагать, что оставшая часть (0,3 %) увеличения диаметра ампулы связана с образованием на ее поверхности пленки. В предположении, что толщина пленки была одинаковой для всех измеренных трубок, значения увеличения диаметра ампул были откорректированы на данную величину – 0,3%. Окончательные результаты увеличения диаметра ампул в диапазоне температур облучения 324–350 °C приведены в таблице 4. Там же в предпоследнем столбце приведена деформация радиационной ползучести стали 06X18H10T, полученная вычитанием из общей деформации ампул деформации, обусловленной распуханием стали.

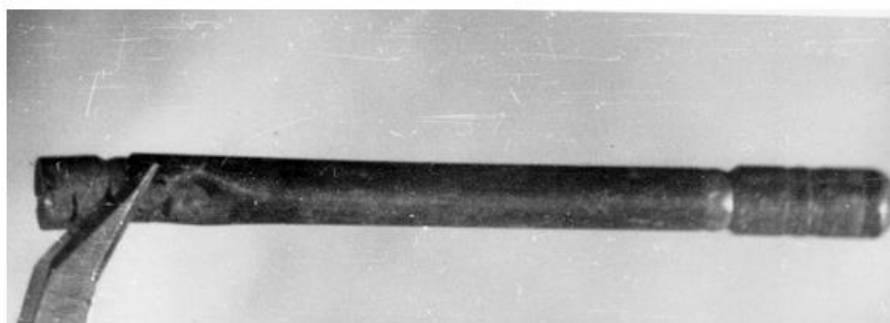


Рис. 3. Внешний вид ампулы №5 ( $\sigma=98$  МПа) после прокола

Рис. 4. Внешний вид ампулы №6 ( $\sigma=196$  МПа) после прокола

Таблица 4

Изменение общей деформации, распухания и деформации радиационной ползучести газонаполненных ампул из стали 06X18H10T в зависимости от напряжения.

№ трубки	Окружное напряжение, МПа	Увеличение диаметра, %	Распухание, %	Увеличение диаметра, %*	Деформация радиационной ползучести, %	Модуль ползучести, МПа <sup>-1</sup> ×сна <sup>-1</sup>
1	0	0,52	0,66	0,22	0	
2	49	0,88	0,02	0,58	0,58	
3	49	3,0	0,72	2,7	2,46	$6,9 \times 10^{-6}$
4	98	3,54	0,77	3,24	2,98	$7,3 \times 10^{-6}$
5	98	5,94	1,36	5,64	5,19	$6,6 \times 10^{-6}$
6	196	13,2	0,81	12,9	12,6	$9,0 \times 10^{-6}$
7	196	12,6	1,19	12,3	11,9	$7,7 \times 10^{-6}$

\*) Увеличение диаметра ампул с вычетом толщины оксидной пленки.

### Обсуждение результатов

Как уже упоминалась выше, аустенитная нержавеющая сталь 08X18H10T используется для изготовления внутрикорпусных устройств (ВКУ) реактора ВВЭР-1000. Одним из основных элементов ВКУ является выгородка реактора, представляющая собой массивную, со сложной формой конструкцию, с помощью которой сборки активной зоны реактора удерживаются в требуемом положении. Особенностью работы элементов ВКУ и, в первую очередь, выгородки реактора является то, что за время эксплуатации материал накапливает значительную повреждающую дозу при температурах от 300 до 460°C [8]. Большие градиенты температуры и флюенса нейтронов в поперечном и азимутальном сечениях выгородки приводят к появлению значительных внутренних напряжений и деформаций, что может существенно снизить безопасный срок эксплуатации реактора. Для расчета напряженно-деформированного состояния выгородки необходимы данные по распуханию и радиационной ползучести материала во всем температурном диапазоне ее работы до повреждающих доз свыше 50 сна. Задачей

данной работы являлось определение характеристик распухания и радиационной ползучести стали 06X18H10T при повреждающих дозах, близких к повреждающим дозам материала выгородки в конце срока ее эксплуатации.

На рис. 5 показана дозная зависимость распухания стали 06X18H10T в температурном диапазоне 324–350°C, полученная путем измерения диаметра по длине ампулы с нулевым избыточным давлением газа. Из рисунка следует, что распухание стали 06X18H10T линейно увеличивается с дозой после достижения инкубационного периода, равного 60 сна. Скорость распухания стали при этом составляет 0,11%/сна.

На рис. 6 показана деформация радиационной ползучести стали 06X18H10T в зависимости от величины приложенного окружного напряжения. Видно, что эта зависимость близка к линейной с небольшим изменением наклона при напряжении 98 МПа. Подобный характер изменения деформации радиационной ползучести с ростом окружного напряжения наблюдался и в других аустенитных сталях после облучения в реакторе БН-350 (см. рис. 7) [9].

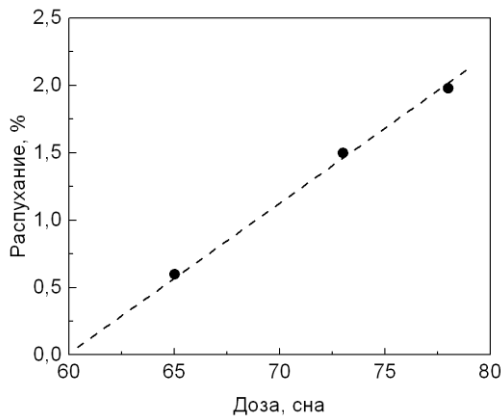


Рис. 5. Дозная зависимость распухания стали 06X18H10T в диапазоне температур облучения 324–350°C.

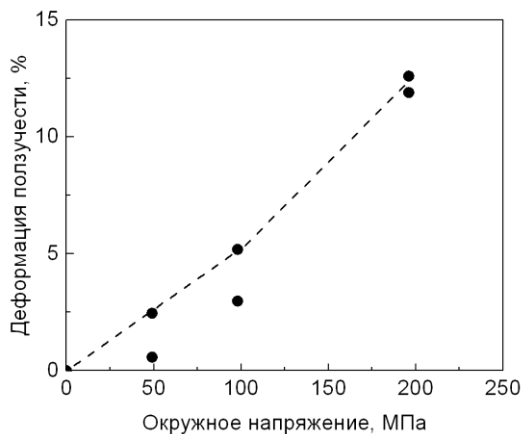


Рис. 6. Зависимость деформации радиационной ползучести стали 06X18H10T от величины окружного напряжения при температуре облучения 324–350°C.

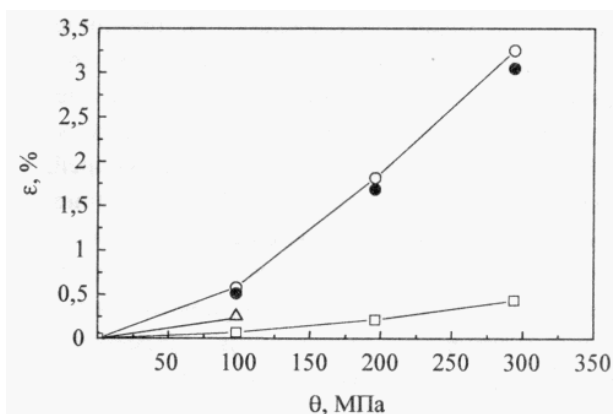


Рис. 7. Зависимость деформации радиационной ползучести стали ЧС-68 х.д. от величины окружного напряжения после облучения при 480°C до 60 сна (○). 480°C до 60 сна по данным гидростатического взвешивания (●), 500°C до 45 сна (Δ), 520°C до 20 сна (□) [9]

В общем случае скорость радиационной ползучести стали под облучением может быть записана в виде:

$$\frac{\dot{\epsilon}}{\bar{\sigma}} = B_0 + D\dot{S} \quad (3)$$

где:  $\dot{\epsilon}$  - эффективная скорость ползучести,  $\text{сна}^{-1}$ ,  $\bar{\sigma}$  - эффективное напряжение равно  $\sqrt{3}/2\sigma_n$ , МПа,  $B_0$  - модуль радиационной ползучести,  $\text{МПа}^{-1} \times \text{сна}^{-1}$ ,  $D$  - коэффициент связи между скоростями ползучести и распухания,  $\text{МПа}^{-1}$ ,  $\dot{S}$  - скорость распухания,  $\text{сна}^{-1}$  [10].

Для аустенитных сталей значение коэффициента  $D$  приблизительно равно  $1,0 \times 10^{-2} \text{ МПа}^{-1}$  [10]. Исходя из этого значения, для исследованных газонаполненных ампул были рассчитаны значения модуля ползучести стали 06X18H10T ( $B_0$ ). Результаты расчетов приведены в таблице 4, из которых следует, что модуль радиационной ползучести стали при данных условиях облучения изменяется в пределах от  $6,6 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1} \times \text{сна}^{-1}$  до  $9 \times 10^{-6} \text{ МПа}^{-1} \times \text{сна}^{-1}$ . Эти значения близки к данным, которые были получены при измерении геометрических размеров шестигранных чехлов из стали 12X18H10T после облучения в реакторе БН-350 [11]. И что так же важно, - данные, полученные в настоящей работе для температурного диапазона 324–350 °C, подтверждают полученную ранее тенденцию, увеличения модуля радиационной ползучести сталей аустенитного класса в низкотемпературном диапазоне облучения (Рис. 8) [9].

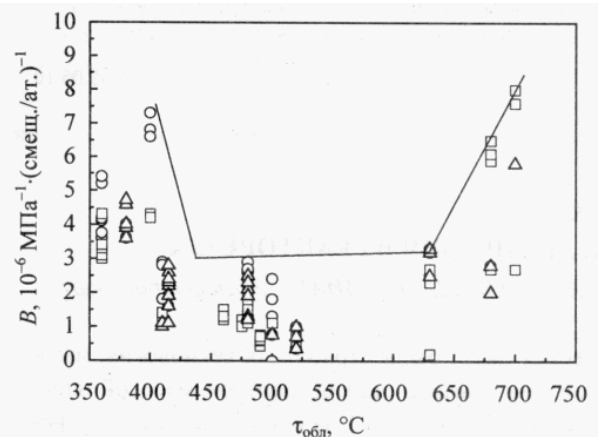


Рис. 8. Температурная зависимость модуля внутриреакторной ползучести стали ЭИ-847 (○), ЭП-172 (□) и ЧС-68 (Δ) [9]

## Заключение

Измерения диаметра и распухания газонаполненных ампул из стали 06X18H10T, облученных в реакторе БН-350 в температурном диапазоне 324–335°C до повреждающей дозы

73,0 снa показали, что с увеличением окружного напряжения суммарная деформация газонаполненных трубок возрастает по линейному закону и достигает величины 13,2 % при напряжении 196 МПа. Деформация радиационной ползучести вносит основной вклад в общую деформацию ампул, тогда как вклад распухания в увеличение диаметра ампул менее

значителен. Распухание стали линейно увеличивается с дозой после достижения инкубационного периода, равного 60 снa, скорость распухания стали при этом составляет 0,11%/снa. Модуль радиационной ползучести стали  $B_0$  в данных условиях облучения изменяется в пределах от  $6,6 \times 10^{-6}$  МПа<sup>-1</sup>·снa<sup>-1</sup> до  $9 \times 10^{-6}$  МПа<sup>-1</sup>·снa<sup>-1</sup>.

### Список литературы

1. Л.М. Забудько, Ю.И. Лихачев, А.А. Прошкин *Работоспособность ТВС быстрых реакторов*. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. С.Н. Воинов, В.И. Прохоров, З.Е. Островский *Облученные нержавеющие стали*. М.: Наука, 1987.
3. В.А. Цыканов, Е.Ф. Давыдов *Радиационная стойкость тепловыделяющих элементов ядерных реакторов*. М.: Атомиздат, 1977.
4. В.Н. Быков, А.Г. Вахтин, В.Д. Дмитриев, Ю.В. Конобеев, Л.Г. Костромин, В.Ф. Реутов *Исследование распухания конструкционных сталей карбидной зоны реактора БР-10*, *Атомная энергия*, том. 34, вып. 4, 1973, с. 247-250.
5. В.Н. Быков, А.Г. Вахтин, В.Д. Дмитриев, Л.Г. Костромин, Ладыгин А.Я., Щербак В.И. *Радиационное распухание стали 0X18H9T*, *Атомная энергия*, том. 35, вып. 4, 1973, с.235-237
6. V.I. Shcherbak, V.N. Bykov, V.D. Dmitriev, L.G. Kostromin, A.JA. Ladygin, S.I. Porollo, *Temperature and dose dependence of swelling of austenitic steels irradiated in the BR-5 reactor*, *J.Br. Nucl. Energy Sos.*, 1975, 14, Apr., no. 2, p. 145-148.
7. В.С. Неустроев, С.В. Белозеров, Е.И. Макаров, З.Е. Островский *Влияние растягивающих и сжимающих напряжений на радиационное распухание и деформацию ползучести аустенитной стали X18H10T*, *Физика металлов и материаловедение*, 2010, том 110, № 4, с. 412–416.
8. В.М. Троянов, Ю.И. Лихачев, М.Я. Хмелевский и др. *Оценка и анализ термомеханического поведения элементов ВКУ реакторов ВВЭР с учетом эффектов облучения*. Сборник докладов 5 межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 1998 г., Т.2, Ч.1, с.3–18.
9. С.И. Поролло, С.В. Шулепин, А.А. Иванов и др. *Распухание и радиационная ползучесть аустенитной коррозионно-стойкой стали, облученной в широком диапазоне дозы и температуры*. *Атомная энергия*. 2011, Т. 110, Вып. 4, с.207–214.
10. Garner F.A. *Irradiation Performance of Cladding and Structural Steels in Liquid Metal Reactors*, 2006 - *Materials Science and Technology A: Comprehensive Treatment*, v. 10A, 2006.
11. V.N. Karaulov, A.P. Blynski, I.L. Yakovlev, E.V. Kononova, *Assemblies and fuel pin behaviour under irradiation in FBR BN-350*, *Proc. of a IAEA Technical Committee meeting "Influence of high dose irradiation on core structural and fuel materials in advanced reactors" held in Obninsk, Russian Federation, 16-19 June 1997*, pp.93-105.

Поступила в редакцию / Received 11.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 15.12.2025

Принята к публикации / Accepted 15.12.2025