

## РАСПУХАНИЕ СТАЛИ КЛАССА X16N19 ПРИ СКОРОСТИ НАБОРА ДОЗЫ ОТ $1 \cdot 10^{-8}$ ДО $1,6 \cdot 10^{-6}$ сна/с

**Е.А. Кинёв**

*АО «Институт реакторных материалов»*

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

**Р**

Представлены первые данные о распухании стали ЭК-164ИД после эксплуатационного облучения в энергетическом быстром реакторе в интервале температур 370 – 630°C и максимальных повреждающих доз 66 – 77 сна. Скорость набора дозы по длине оболочечных труб, изготовленных из данного материала, составила  $1 \cdot 10^{-8}$  –  $1,6 \cdot 10^{-6}$  сна/с. Распухание определялось методом гидростатического взвешивания с погрешностью не более 0,5 %. Полученные результаты проанализированы в зависимости от параметров облучения и в сравнении с материалом класса X16N15.

Задачами исследования являлись оценка характеристических значений температуры и дозы максимального распухания, расчеты средней скорости распухания материала при рабочей температуре облучения, инкубационного периода начала распухания, стационарной скорости распухания.

Установлено, что образцы труб, характеризующихся до облучения размером аустенитного зерна 9 – 12 мкм, имеют среднюю скорость распухания 0,035 – 0,05 %/сна после достижения максимальных повреждающих доз 66 – 77 сна (при темпе набора  $(1 - 1,5) \cdot 10^{-6}$  сна/с) и не более 0,035 %/сна при дозах менее 20 сна (темп набора до  $5 \cdot 10^{-7}$  сна/с). Характеристическая температура максимального распухания исследованного материала находится в интервале 430 – 500°C. Характеристическая доза максимального распухания находится в интервале 61 – 72,5 сна или 70 – 80% от предельной набранной дозы. Инкубационный период стационарного распухания материала составляет 30 сна. Скорость стационарного распухания составляет 0,1 %/сна.

Характеристики радиационной стойкости исследованного материала имеют преимущество над таковыми для оболочечных материалов класса X16N15 в аналогичных условиях облучения и близком структурном состоянии, наследующем размер зерна 9 – 14 мкм в процессе трубного передела.

**Ключевые слова:** сталь X16N15M2ГГФР, температура, скорость набора дозы, средняя скорость радиационного распухания.

### ВВЕДЕНИЕ

Перспективным материалом оболочек топливных элементов ядерных реакторов на быстрых нейтронах является сталь марки ЭК-164ИД с повышенным до 19% содержанием хрома и сложным комплексом легирующих элементов, применяемых для

© Е.А. Кинёв, 2020

увеличения стойкости к радиационному распуханию [1, 2]. Для инженерного проектирования и сопоставления с известными материалами класса X16H15 представляет интерес оценка перспективного материала по таким важнейшим параметрам, как характеристические значения дозы  $D_x$  и температуры  $T_x$  максимального распухания, а также скорости распухания  $S/D$  в зависимости от температуры и скорости набора повреждающей дозы облучения.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Первые данные о соотношении указанных параметров получены в 2009 г. на стали ЭК-164ИД одной плавки, из которой изготовлена партия труб в холоднодеформированном состоянии для отдельного облучения в качестве топливных оболочек в зонах малого (ЗМО) и большого (ЗБО) обогащения энергетического быстрого реактора до максимальных повреждающих доз от 66 до 77 сна и интервале температур 370 – 630°C. Минимальная повреждающая доза менее 1 сна в процессе облучения достигалась при 370°C, а максимальные значения доз – при 510 – 550°C. Скорость набора дозы по длине труб составляла  $1 \cdot 10^{-8}$  –  $1,6 \cdot 10^{-6}$  сна/с (рис. 1). Темп набора дозы в обеих группах труб был практически идентичен.

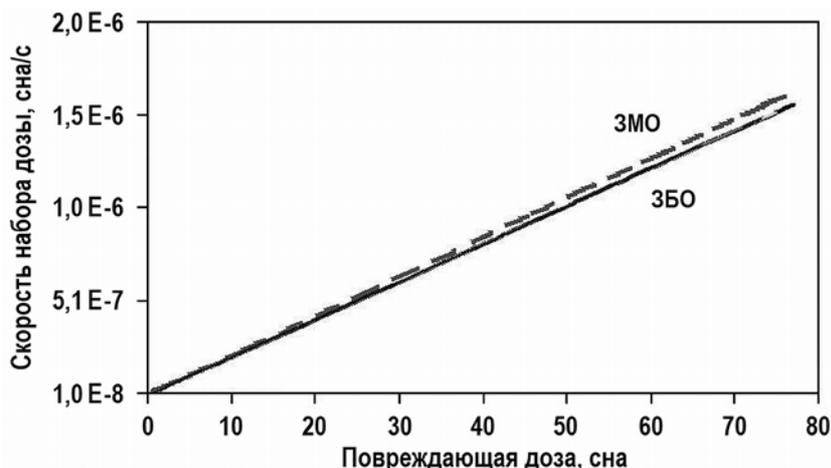


Рис. 1. Скорость набора повреждающей дозы при реакторном облучении

Микроструктура отдельных труб партии начального этапа освоения трубной технологии после финишной термообработки при 1050°C [3] характеризовалась средним условным размером зерна  $d_3$  в поперечном сечении от 9 до 12 мкм. Рекристаллизация зерна в условиях роста температуры по длине оболочек в процессе облучения отсутствовала.

Радиационное распухание стали  $S$  рассчитывали на основе общепринятого соотношения гидростатической плотности  $\rho$  каждого распухшего образца с таковой  $\rho_0$  на участках без распухания при повреждающей дозе менее 1 сна в пределах одной трубы:

$$S = \frac{(\rho_0 - \rho)}{\rho} \times 100\%.$$

Погрешность определения распухания составляла не более 0,5%.

Средняя дозовая скорость распухания металла  $S/D$  (далее по тексту «скорость распухания») при каждой температуре облучения рассчитывалась относительно соответствующей повреждающей дозы  $D$ , включая инкубационный период распухания. Инкубационная доза  $D_0$  определялась методом аппроксимации значений харак-

теристических доз максимального распухания  $D_x$  при соответствующей характеристической температуре распухания.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Средняя скорость распухания облученной в ЗМО реактора стали ЭК-164ИД в зависимости от температуры и дозы облучения имеет немонотонный характер (рис. 2а). Максимум  $S/D$  наблюдается при характеристической температуре  $450^\circ\text{C}$ . Скорость распухания трубы с максимальной дозой 77 сна составила 0,074 %/сна при характеристической дозе 63 сна ( $D/D_{\text{max}} \approx 0,8$ ). Скорость распухания других труб партии при  $T_x = 450^\circ\text{C}$  и  $D_x = 61 - 68$  сна имела значение около 0,05 %/сна.

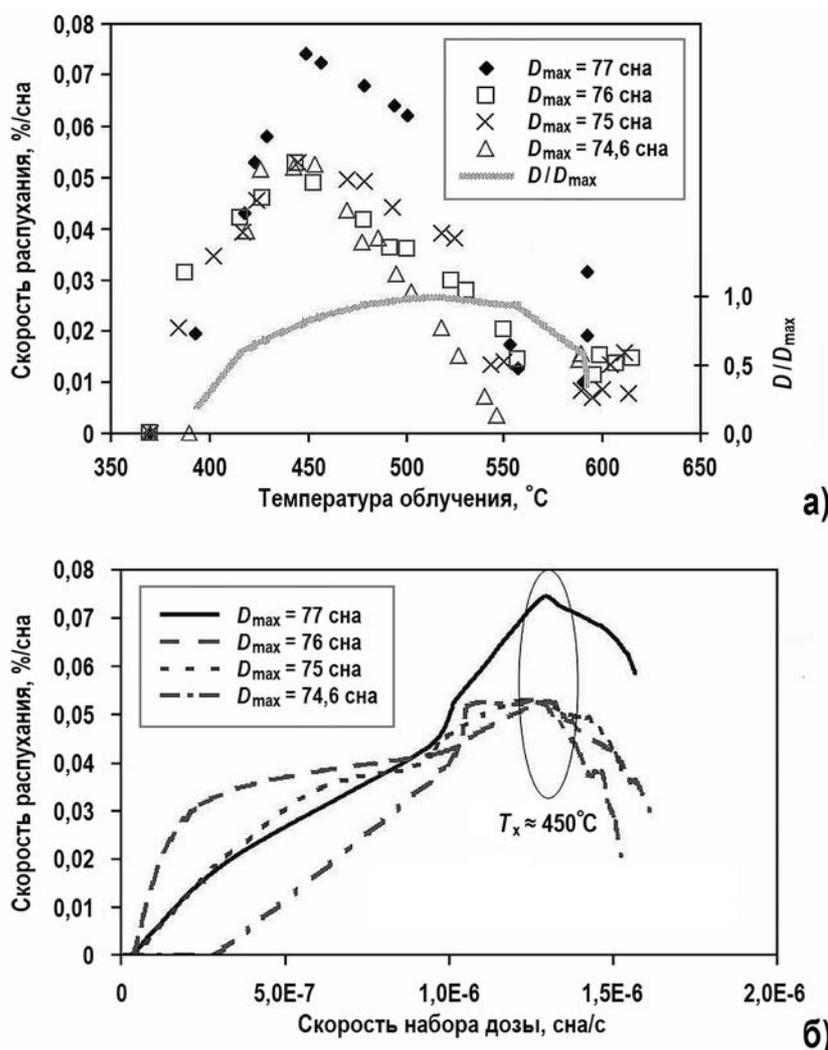


Рис. 2. Скорость распухания при температуре (а) и интенсивности (б) облучения в ЗМО

Максимальные скорости распухания исследованной стали в ЗМО реализованы при скорости набора дозы порядка  $1,3 \cdot 10^{-6}$  сна/с (рис. 2б). При температурах ниже  $400^\circ\text{C}$  и скорости набора дозы менее  $5 \cdot 10^{-7}$  сна/с, характерных для внутрикорпусных конструкций ядерного реактора, скорость распухания не превышала 0,035 %/сна.

Зависимости скорости распухания труб партии, облученных в условиях ЗМО, по-

казаны на рис. 3. Здесь отмечен более существенный разброс данных.

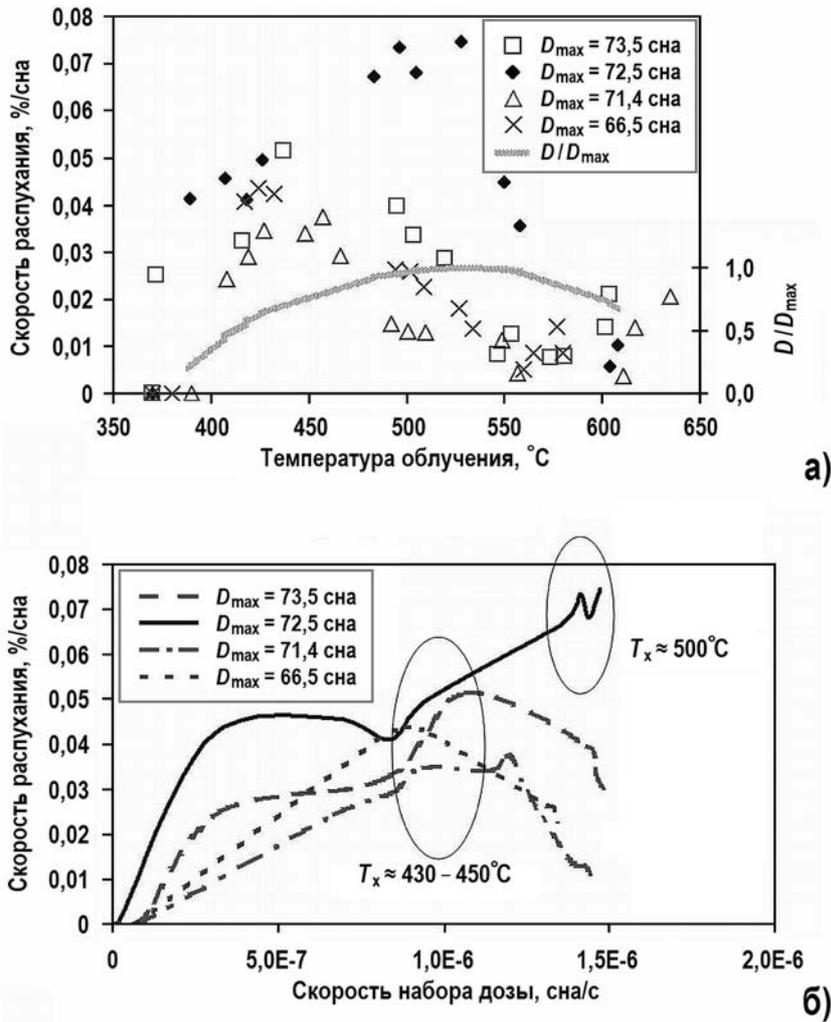


Рис. 3. Скорость распухания при температуре (а) и интенсивности (б) облучения в зр

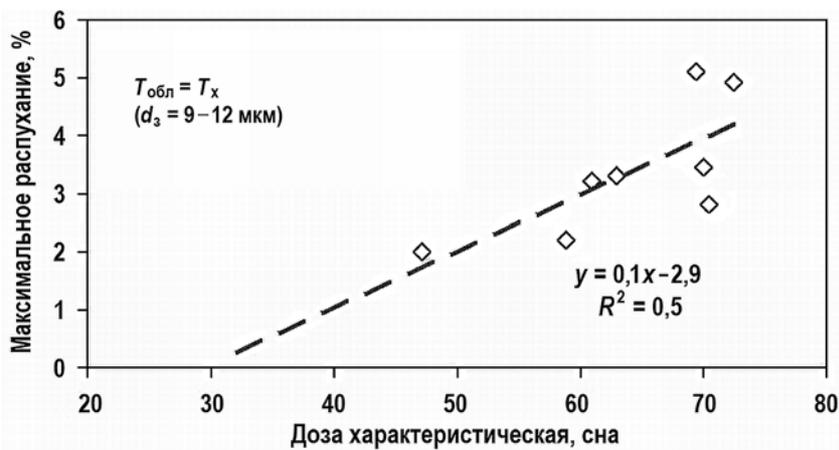


Рис.4. Зависимость распухания исследованной партии труб при характеристических дозах облучения

Один экземпляр трубы с максимальным выгоранием 72,5 сна продемонстрировал повышенную скорость распухания 0,075 %/сна при  $T_x = 500^\circ\text{C}$ ,  $D/D_{\max} = 1$  (рис. 3а) и скорости набора дозы  $1,47 \cdot 10^{-6}$  сна/с (рис. 3б). Остальные экземпляры после набора максимальной дозы 66,5 – 73,5 сна характеризовались предельной скоростью распухания 0,037 – 0,051 %/сна в узком диапазоне  $T_x \approx 430 - 450^\circ\text{C}$  при  $D/D_{\max} \approx 0,7$  и скорости набора дозы порядка  $1 \cdot 10^{-6}$  сна/с.

Инкубационная доза максимального распухания исследованной партии труб из стали ЭК-164ИД составила 30 сна (рис. 4). Указанное значение  $D_0$  получено для исходного структурного состояния, характеризуемого средним условным размером зерна в диапазоне от 9 до 12 мкм. Скорость стационарного распухания стали в интервале 30 – 75 сна находилась на уровне 0,1 сна/с.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первый опыт реакторного облучения стали ЭК-164ИД в качестве материала топливных оболочек несмотря на вышеуказанные разбросы исследованных характеристик распухания показывает перспективу увеличения радиационной стойкости стали класса X16H19 относительно класса X16H15. Данный вывод основан на сравнении представленных в работе данных с ранее полученными результатами [4 – 6]. Обобщенные данные для анализа приведены в табл. 1 и характеризуют трубы с близкими параметрами облучения при исходном размере аустенитного зерна не более 14 мкм. Размер зерна является индикатором предельных температурных режимов трубного передела сталей близкого химического состава.

Таблица 1

**Сравнение характеристик распухания сталей классов X16H19 и X15H16 [4, 5]**

Класс стали	$D_{\max}$ , сна	$D_x$ , сна	$D_0$ , сна	$T_x$ , °C	$S/D$ , %/сна	Скорость набора дозы, сна/с
X16H19	66 – 75	61 – 72,5	30	430 – 500	0,035 – 0,075	$(1-1,47) \cdot 10^{-6}$
X16H15	69 – 76	60 – 75	55	460 – 480	0,06 – 0,1	$(1-1,55) \cdot 10^{-6}$

В таблице показано, что средняя скорость распухания стали класса X16H19 за весь период облучения заметно ниже, чем у объекта сравнения. Это определяется тем, что несмотря на снижение инкубационного периода начала интенсивного распухания скорость стационарного распухания уменьшается в шесть раз по сравнению с таковым для стали с меньшим содержанием никеля [4]. Поэтому при достижении максимальной повреждающей дозы порядка 75 сна общее распухание перспективной стали ЭК-164ИД оказывается ниже, чем у сталей класса X16H15.

Дополнительно стоит отметить, что в единичных случаях ускоренного ( $S/D \approx 0,075$  сна/с) распухания стали ЭК-164ИД в ЗМО и ЗБО не обнаружено явных металлографических отличий (размер зерна, микротвердость) либо эксплуатационных факторов (доза, температура), выделяющих экземпляры труб с аномально высоким распуханием из основной группы со средней скоростью распухания менее 0,05 сна/с.

Аналогичная ситуация неоднократно наблюдалась для сталей класса X16H15 вследствие неоднородности технологии трубного передела [7, 8], которая для обоих классов стали еще продолжает совершенствоваться [9]. В этом аспекте логично считать образцы материала класса X16H19 с повышенной скоростью распухания отклонением от достигнутого технологией «стандарта» и не учитывать при анализе радиационной стойкости всей группы труб начальной стадии освоения.

С учетом критерия допустимого формоизменения и предельного распухания 15%

[6] использование нижней границы скорости распухания дает прогнозную оценку возможности эксплуатации стали с повышенным содержанием никеля в быстрых реакторах до уровня 119 сна [10]. Поэтому следует признать положительными опыт оптимизации химического состава стали класса X16H19, реализованную технологию изготовления оболочек ядерного топлива и ожидать результаты материаловедческого исследования облученных труб следующих этапов производства с более крупным размером аустенитного зерна.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано радиационное распухание материала начального этапа трубного производства из стали класса X16H19 марки ЭК-164ИД после нейтронного облучения в быстром ядерном реакторе при температурах 370 - 630°C.

Установлено, что образцы труб с размером зерна 6 - 12 мкм имеют среднюю скорость распухания 0,035 - 0,05 %/сна после достижения максимальных повреждающих доз 66 - 77 сна (темп набора  $(1 - 1,5) \cdot 10^{-6}$  сна/с) и не более 0,035 %/сна при дозах менее 20 сна (темп набора до  $5 \cdot 10^{-7}$  сна/с).

Характеристическая температура максимального распухания исследованного материала находится в интервале 430 - 500°C.

Характеристическая доза максимального распухания находится в интервале 61 - 72,5 сна или 70 - 80% от максимальной дозы.

Инкубационный период стационарного распухания составляет 30 сна.

Скорость стационарного распухания составляет 0,1 %/сна.

Характеристики радиационной стойкости исследованного материала имеют преимущество над таковыми для оболочечных материалов класса X16H15 в аналогичных условиях облучения и близком структурном состоянии, наследующем размер зерна 9 - 12 мкм в процессе трубного передела.

### Литература

1. Никитина А.А., Агеев В.С., Леонтьева-Смирнова М.В., Митрофанова Н.М., Науменко И.А., Целищев А.В., Чернов В.М. Развитие работ по конструкционным материалам активных зон быстрых реакторов // Атомная энергия. 2015. – Т. 119. – Вып. 5. – С. 292-300.
2. 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.
3. Митрофанова Н.М., Чурюмова Т.А. Сталь ЭК164 – конструкционный материал оболочек твэлов реакторов БН // ВАНТ. Серия: «Материаловедение и новые материалы». – 2019. – Вып. 2 (98). – С. 100-109.
4. Кинёв Е.А., Панченко В.Л. Распухание улучшенной стали X16H15M2ГТФР при скорости набора дозы от  $1,0 \cdot 10^{-8}$  до  $1,7 \cdot 10^{-6}$  сна/с. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 1. – С. 63-70; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.1.06>.
5. Кинёв Е.А. Корреляция высокодозового радиационного распухания стали класса 16Cr-15Ni с размером зерна. // Перспективные материалы. – 2019. – № 3. – С. 39-46.
6. 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.
7. Целищев А.В., Агеев В.С., Буданов Ю.П., Иолтуховский А.Г., Митрофанова Н.М., Леонтьева-Смирнова М.В., Шкабура И.А., Забудько Л.М., Козлов А.В., Мальцев В.В., Повстанко А.В. Разработка конструкционной стали для твэлов и ТВС быстрых натриевых реакторов. // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 217-222.
8. Шемякин В.Н., Кинёв Е.А., Козлов А.В., Портных И.А., Панченко В.Л., Евсеев М.В. Анализ причин разброса свойств оболочек отработавших твэлов быстрого реактора. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 3. – С. 96-107; DOI: <https://doi.org/>

10.26583/пре.2019.3.09 .

9. *Баканов М.В., Чуев В.В., Крюков О.В., Лукин А.В., Бычков С.А., Буданов Ю.П., Коростин О.С., Целищев А.В., Тарасюк В.Б.* Оптимизация структурного состояния материала оболочечных труб из стали ЧС-68 в холоднодеформированном состоянии. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – № 1. – С. 139-145.

10. *Исинбаев А.Р., Козлов А.В., Портных И.А.* Прогнозирование остаточного ресурса твэлов с оболочкой из стали ЭК164 после эксплуатации в реакторе БН-600 с достижением максимальной повреждающей дозы 99 сна. // ВАНТ. Серия: «Материаловедение и новые материалы». – 2019. – Вып. 5 (101). – С. 75-82.

Поступила в редакцию 20.03.2020 г.

#### Автор

Кинёв Евгений Александрович, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук  
E-mail: kinev\_ea@irmatom.ru

UDC 621.039.531

### **SWELLING OF 16Cr-19Ni CLASS STEEL AT DOSE RATE FROM $1 \cdot 10^{-8}$ TO $1.6 \cdot 10^{-6}$ dpa/s**

Kinev E.A.

JSC «Institute of Nuclear Materials»  
PO Box 29, 624250 Zarechny, Sverdlovsk Reg., Russia

#### ABSTRACT

The first data on ЭК-164ИД steel swelling after operational irradiation in the fast power reactor in the temperature range from 370 to 630°C and maximum damaging doses of 66 – 77 dpa are presented. The dose rate set along the length of the cladding tubes made of this material was  $1 \cdot 10^{-8}$  –  $1.6 \cdot 10^{-6}$  dpa/s.

Swelling was determined by hydrostatic weighing with an error of no more than 0.5%. The obtained results are analyzed depending on the irradiation parameters and in comparison with 16Cr-15Ni class material. The objectives of the study were to estimate the characteristic values of the maximum swelling temperature and dose, to calculate the average material swelling rate at the working temperature of irradiation, the incubation period of the beginning of swelling, the stationary swelling rate. It was found that the samples of tubes characterized before irradiation with austenite grain size of 9 – 12 μm have an average swelling rate of 0.035 – 0.05 %/dpa after reaching the maximum damaging doses of 66 – 77 dpa (at the rate of  $(1 - 1.5) \cdot 10^{-6}$  dpa/s) and not more than 0.035 %/dpa at doses less than 20 dpa (rate of  $5 \cdot 10^{-7}$  dpa/s). The characteristic temperature of the maximum swelling of the investigated material is in the range from 430 to 500°C. The characteristic dose of maximum swelling is in the range from 61 to 72.5 dpa or from 70 to 80% of the maximum gained dose. The incubation period of stationary swelling of the material is 30 dpa. Stationary swelling rate is 0.1 %/dpa.

Radiation resistance characteristics of the investigated material have advantage over those of 16Cr-15Ni class cladding materials in similar conditions of irradiation and close structural state inheriting grain size of 9 – 14 μm in the process of tube conversion.

**Key words:** 16Cr-19Ni class steel, temperature, dose rate, average radiation-induced swelling rate.

## REFERENCES

1. Nikitina A. A., Ageev V. S., Leonteva-Smirnova M. V., Mitrofanova N. M., Naumenko I. A., Tselishchev A. V., Chernov V. M. Development of works on structural materials of fast reactor cores. *Atomnaya Energiya*. 2015, v. 119, iss. 5, pp. 292-300 (in Russian).
2. Bakanov M.V., Maltsev V.V., Oshkanov N.N., Chuyev V.V. The main results of operation of structural materials in the BN-600 reactor core. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2011, no. 1, pp. 177-186 (in Russian).
3. Mitrofanova N. M., Churiumova T. A. ЭК164 steel – a structural material of fuel rod claddings of fast nuclear reactors. *VANT. Ser. Materialovedenie i Novye Materialy*. 2019, iss. 2 (98), pp. 100-109 (in Russian).
4. Kinev E. A., Panchenko V. L. Swelling of X16H15M2ГТФ improved steel at a speed of a dose rate from  $1.0 \cdot 10^{-8}$  to  $1.7 \cdot 10^{-6}$  dpa/s. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2017, no. 1, pp. 63-70; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.1.06> (in Russian).
5. Kinev E. A. Correlation of high-dose radiation swelling of 16Cr-15Ni steel class with grain size. *Perspektivnye Materialy*. 2019, no. 3, pp. 39-46 (in Russian).
6. Bakanov M.V., Maltsev V.V., Oshkanov N.N., Chuyev V.V. The main results of workability control of fuel rods with new generation austenitic steel claddings. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2011, no. 1, pp. 187-195 (in Russian).
7. Tselishchev A.V., Ageev V.S., Budanov Yu.P., Ioltukhovskii A.G., Mitrofanova N.M., Leonteva-Smirnova M.V., Shkabura I.A., Zabudko L.M., Kozlov A.V., Maltsev V.V., Povstianko A.V. Development of construction steel for fuel rod claddings and sodium fast reactors fuel assemblies. *Atomnaya Energiya*. 2010, v. 119, iss. 4, pp. 217-222 (in Russian).
8. Shemiakin V.N., Kinev E.A., Kozlov A.V., Portnykh I.A., Panchenko V.L., Evseev M.V. The dispersion reasons analysis of spent pin claddings properties of the fast reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 3, pp. 96-107; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.3.09> (in Russian).
9. Bakanov M.V., Chuev V.V., Kriukov O.V., Lukin A.V., Bychkov S.A., Budanov Yu.P., Korostin O.S., Tselishchev A.V., Tarasiuk V.B. Optimization of structural state of cladding tubes material made of ЧС-68 steel in cold-worked state. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2005, no. 1, pp. 139-145 (in Russian).
10. Isinbaev A.R., Kozlov A.V., Portnykh I.A. Forecasting of a residual resource of pin with a cover from ЭК164 steel after operation in BN-600 reactor with achievement of the maximum damaging dose 99 dpa. *VANT. Ser. Materialovedenie i Novye Materialy*. 2019, iss. 5 (101), pp. 75-82 (in Russian).

**Author**

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

E-mail: [kinev\\_ea@irmatom.ru](mailto:kinev_ea@irmatom.ru)