

РАСПУХАНИЕ СТАЛИ КЛАССА X16H19 ПРИ СКОРОСТИ НАБОРА ДОЗЫ ОТ 1×10^{-8} ДО $1,6 \times 10^{-6}$ СНА/С

Кинёв Е.А. (АО «ИРМ», Заречный Свердловской обл., Россия)

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, задачей которых является увеличение стойкости к радиационному распуханию [1]. 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.

1. 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 раздельного 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 °С. Минимальная повреждающая доза менее 1 сна в процессе облучения достигалась при 370 °С, а максимальные значения доз при 510–550 °С. Скорость набора дозы по длине труб составляла 1×10^{-8} – $1,6 \times 10^{-6}$ сна/с (рис. 1). Темп набора дозы в обеих группах труб был практически идентичен.

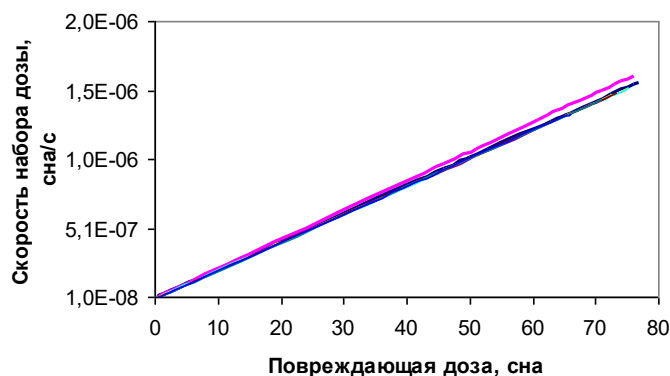


Рис. 1. Скорость набора повреждающей дозы при реакторном облучении

Микроструктура отдельных труб партии начального этапа освоения трубной технологии после финишной термообработки при 1050 °С [2] характеризовалась средним условным размером зерна d_z 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 (ρ) каждого распухшего образца с таковой (ρ_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 характеристических доз максимального распухания D_x при соответствующей характеристической температуре распухания.

2. Результаты исследования

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

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

Зависимости скорости распухания труб партии, облученных в условиях ЗБО, показаны на рис. 3. Здесь отмечен более существенный разброс данных.

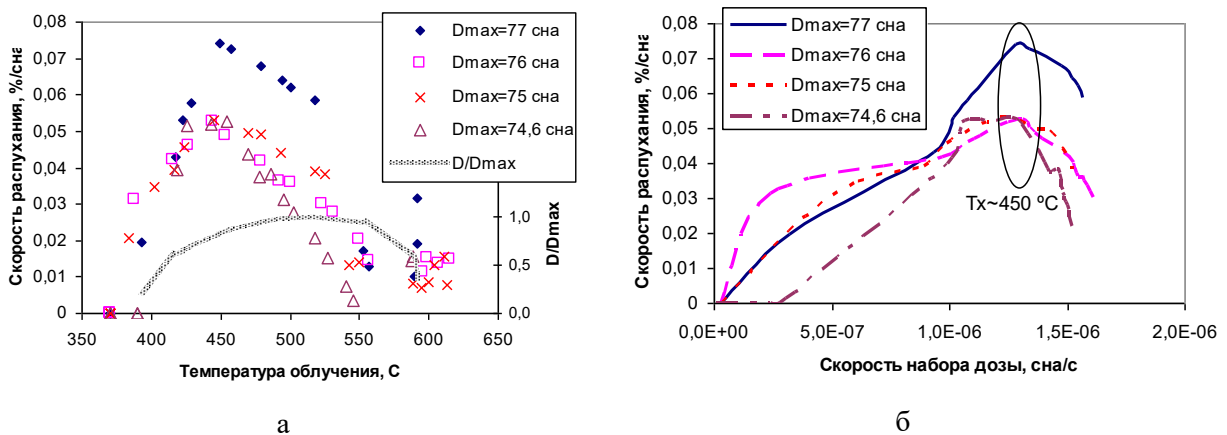


Рис. 2. Скорость распухания при температуре (а) и интенсивности (б) облучения в ЗМО

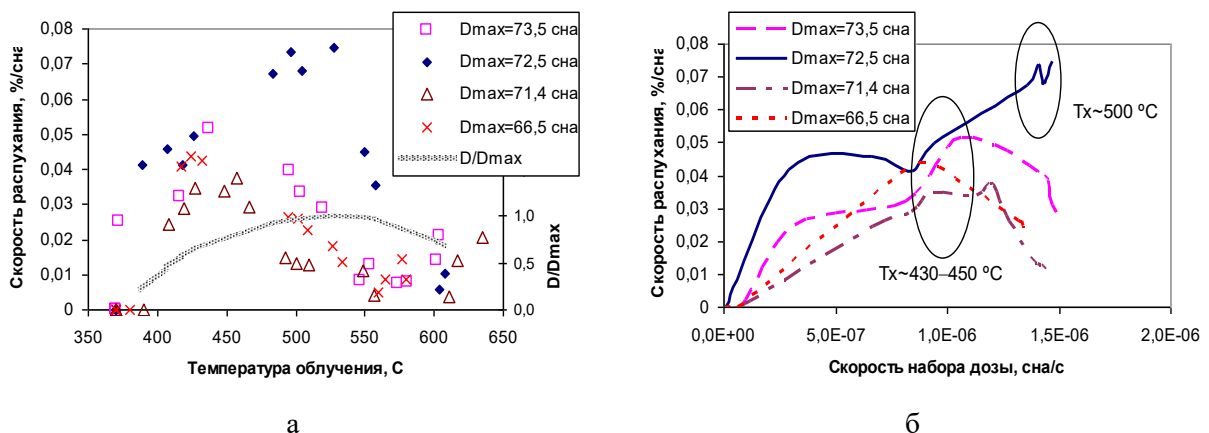


Рис. 3. Скорость распухания при температуре (а) и интенсивности (б) облучения в ЗБО

Один экземпляр трубы с максимальным выгоранием 72,5 снА продемонстрировал повышенную скорость распухания 0,075 %/снА при $T_x = 500$ °С, $D/D_{max} = 1$

(рис. 3, а) и скорости набора дозы $1,47 \times 10^{-6}$ сна/с (рис.3, б). Остальные экземпляры после набора максимальной дозы 66,5–73,5 сна характеризовались предельной скоростью распухания 0,037–0,051 %/сна в узком диапазоне $T_x=430\text{--}450$ °С при $D/D_{max} \sim 0,7$ и скорости набора дозы порядка 1×10^{-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.

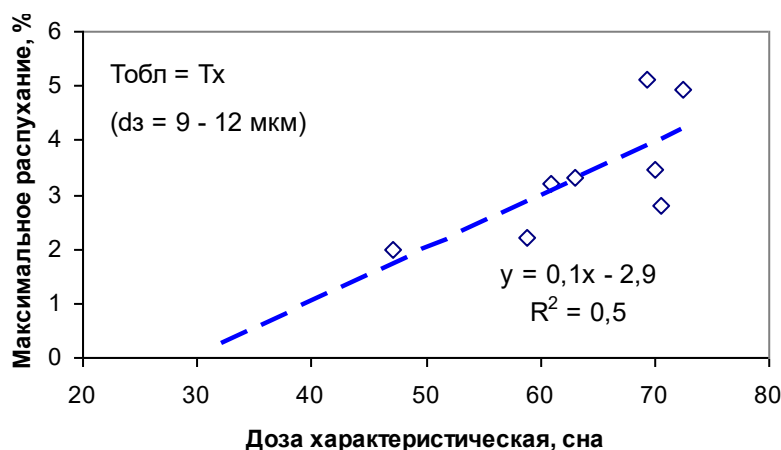


Рис. 4. Зависимость распухания исследованной партии труб при характеристических дозах облучения

3. 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 [3, 4]. Обобщенные данные для анализа приведены в таблице и характеризуют трубы с близкими параметрами облучения при исходном размере аустенитного зерна не более 14 мкм. Размер зерна выступает в качестве показателя предельных температурных режимов трубного передела сталей близкого химического состава.

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 6 раз в сравнении 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.

Сравнение характеристик распухания сталей классов X16H19 и X15H16 [3, 4]

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

Дополнительно стоит отметить, что в единичных случаях ускоренного ($S/D \sim 0,075$ 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 [5, 6], которая для обоих классов стали еще продолжает совершенствоваться [7]. В этом аспекте логично считать образцы материала класса X16H19 с повышенной скоростью распухания отклонением от достигнутого технологией «стандарта» начальной стадии освоения и не учитывать при анализе радиационной стойкости всей группы труб.

Следует признать положительными опыт оптимизации химического состава стали класса X16H19, реализованную технологию изготовления оболочек ядерного топлива и ожидать результаты облучения 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 °С.

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 $1 \dots 1,5 \times 10^{-6}$ сна/с) и не более 0,035 %/сна при дозах менее 20 сна (темп набора до 5×10^{-7} сна/с).

Характеристическая температура максимального распухания исследованного материала находится в интервале 430–500 °С.

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 9–14 мкм в процессе трубного передела.

Список литературы

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. Митрофанова Н.М., Чурюмова Т.А. Сталь ЭК164 – конструкционный материал оболочек твэлов реакторов БН // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2019, вып. 2 (98), С. 100–109.
3. Кинёв Е.А., Панченко В.Л. Распухание улучшенной стали X16H15M2ГТФР при скорости набора дозы от 1×10^{-8} до $1,7 \times 10^{-6}$ сна/с // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2017, № 1. С. 63–70.
4. Кинёв Е.А. Корреляция высокодозового радиационного распухания стали класса 16Cr-15Ni с размером зерна // Перспективные материалы. 2019, № 3, С. 39–46.
5. 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.

6. *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.

7. *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.