

Экспериментальное исследование изменения свойств стали 08X18H12T в процессе эксплуатации главного циркуляционного трубопровода охлаждения АЭС

Л. А. Сосновский^а, А. В. Богданович^б, В. Г. Барсуков^б

^а Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

^б Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь

Представлены результаты экспериментального исследования характеристик трещиностойкости и твердости стали 08X18H12T на образцах, вырезанных из труб в исходном состоянии и после 100 тыс. ч эксплуатации.

Ключевые слова: АЭС, трубопровод, эксплуатационная наработка, компактный образец, коэффициент интенсивности напряжений, утяжка, твердость.

Введение. Для изучения влияния эксплуатационной наработки на трещиностойкость нержавеющей стали 08X18H12T использовали образцы, вырезанные из труб Ду 550×30 1-го контура главного циркуляционного трубопровода Ново-Воронежской АЭС (1-й энергоблок) в исходном состоянии и после 100 тыс. ч эксплуатации.

Испытания на циклическую трещиностойкость компактных образцов толщиной 20 мм при внецентренном растяжении проводили с частотой 20 Гц, асимметрией цикл 0,1 в условиях комнатной температуры на испытательной машине ЦДМ-10Пу в соответствии с требованиями РД 50-345-82.

Проводили сравнение результатов испытаний образцов с ориентацией фронта развития трещины (ФРТ) в окружном и осевом направлениях (табл. 1). Коэффициент влияния эксплуатации $A_{\text{эксп}}$ определяли как отношение значения параметра материала после эксплуатации к таковому материала в исходном состоянии.

Из рис. 1 видно, как изменилась кинетическая диаграмма усталостного разрушения исследуемой стали вследствие влияния эксплуатационной наработки. На диаграмме можно выделить три участка, два из которых являются чувствительными к эксплуатационной наработке, а один – не реагирующий на эксплуатационное воздействие. Так, в области малых скоростей роста трещины (менее $2 \cdot 10^{-8}$ м/цикл) в металле после эксплуатации она выше, чем в металле в состоянии поставки. В диапазоне скоростей роста трещины $\sim 2 \cdot 10^{-8} \dots 2 \cdot 10^{-6}$ м/цикл (при значениях коэффициента интенсивности напряжений (КИН) от ~ 18 до $50 \dots 55$ МПа $\sqrt{\text{м}}$) имеет место слияние областей рассеяния диаграмм усталостного разрушения испытанных образцов в состоянии поставки и после 100 тыс. ч эксплуатации.

Анализ третьего участка диаграммы при скорости роста трещины более $2 \cdot 10^{-6}$ м/цикл показывает, что в материале после эксплуатации она выше, чем в исходном материале. Наибольшего значения предельная скорость роста

Т а б л и ц а 1

Влияние эксплуатационной наработки на характеристики трещиностойкости стали 08X18H12T

Параметр	Состояние материала		$A_{\text{экс}}$
	Исходное	После 100 тыс. ч эксплуатации	
K_{th}^F , МПа $\sqrt{м}$	8,04	2,88	0,36
	8,92	4,23	0,47
K_{fc}^F , МПа $\sqrt{м}$	106,0	100,2	0,94
	99,2	97,3	0,98
v , м/цикл, при $K_{I \max}^F \approx 10$ МПа $\sqrt{м}$	$6,8 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-9}$	7,35
	$4,2 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	6,19
v , м/цикл, при $K_{I \max}^F \approx 35$ МПа $\sqrt{м}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	0,82
	$3 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	0,87
v_c , м/цикл	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	1,72
	$6,95 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	1,72
φ_f , мм	0,28	0,21	0,75
	0,275	0,205	0,75
φ_c , мм	2,81	2,44	0,87
	2,26	1,82	0,81
φ_s , мм	-2,20	-1,61	0,73
	-1,77	-1,51	0,85
m_1	0,468	0,380	0,81
	0,472	0,400	0,85
K_{th}^φ , МПа $\sqrt{м}$	16,6	24,6	1,48
	16,8	26,2	1,56
m_2	0,180	0,141	0,78
	0,157	0,152	0,97
K_w , МПа $\sqrt{м}$	56,6	65,22	1,15
	58,24	66,75	1,15

Примечание. 1. Над чертой приведены данные, полученные в окружном направлении ФРТ, под чертой – в осевом; 2. v , v_c – скорость роста трещины и ее предельное значение соответственно; φ_f – значение утяжки образца, соответствующее переходу от упругой деформации к пластической; φ_s – максимальное уширение образца.

трещин достигает в образцах с ФРТ в осевом направлении для материала после эксплуатации (рис. 1): предельное значение скорости роста трещины в образцах с ФРТ в окружном направлении возросло на 41,9%, в образцах с ФРТ в осевом направлении – на 46,5%. Существенны эксплуатационные воздействия на значения КИН, близкие к пороговым. Так, пороговые значения КИН K_{th}^F в образцах с ФРТ в окружном направлении уменьшились на

64,2%, с ФРТ в осевом направлении – на 52,6% (табл. 1). С ростом численных значений КИН влияние эксплуатационных факторов понижается, и предельные значения КИН K_{fc}^F уменьшаются лишь на 1,9...6,3%.

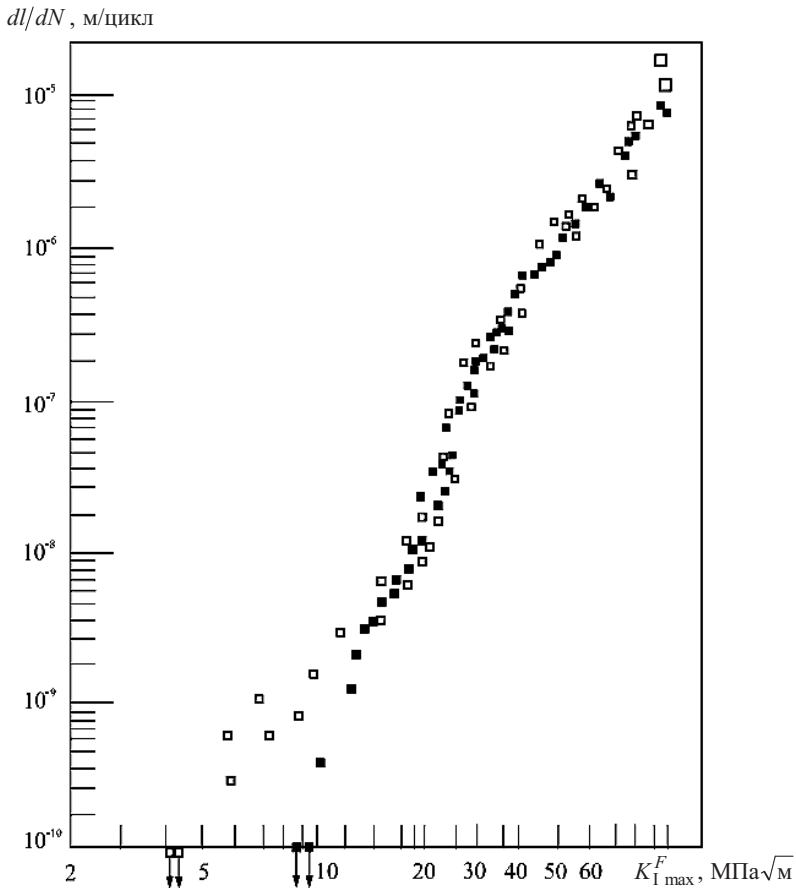


Рис. 1. Влияние эксплуатационной наработки на экспериментальную диаграмму коэффициент интенсивности напряжений – скорость роста усталостной трещины для стали 08X18H12T с ФРТ в осевом направлении: ■ – исходное состояние; □ – после 100 тыс. ч эксплуатации.

Эксплуатационные факторы влияют также на пластические свойства исследованной стали. В соответствии с методикой [1–3] диаграмму циклического упругопластического разрушения образца с трещиной (ЦУПРОТ) для стали 08X18H12T строили по результатам проведенных испытаний на трещиностойкость компактных образцов и измерения утяжки образцов в зоне развития трещины, откладывая по оси абсцисс утяжку образца, по оси ординат – соответствующую ей величину КИН $K_{I\max}^F$, вычисленную по следующей формуле с учетом предложенной поправки на пластичность [1–3]:

$$K_{I\max}^F = \frac{P_{\max}}{t_0 \sqrt{B}} \omega_F^{1/2} Y(\omega_F); \quad (1)$$

$$Y(\omega_F) = 29,6 - 185,5(\omega_F) + 655,7(\omega_F)^2 - 1017(\omega_F)^3 + 638,9(\omega_F)^4, \quad (2)$$

где Y – поправочная функция, учитывающая не только геометрию образца и схему его нагружения, но и интегрально величину пластической деформации в опасном сечении; ω_F – локальная мера поврежденности образца с трещиной, $\omega_F = F_l/F_0$; F_0 – номинальная (до деформации) площадь опасного сечения образца; F_l – поврежденная трещиной длиной l площадь, определенная с учетом пластической деформации сечения; P_{\max} – максимальная нагрузка цикла; l – измеренная длина трещины; t_0 , B – размеры опасного сечения образца.

Диаграмма ЦУПРОТ (рис. 2) иллюстрирует снижение пластических свойств и охрупчивание стали 08X18H12T под действием эксплуатационных факторов, причем снижение предельной величины утяжки φ_c в образцах составляет 12,8...19,5% (табл. 1).

Аппроксимацию экспериментальных точек, расположенных в нижней части диаграммы ЦУПРОТ – кривой циклического упругопластического разрушения (при утяжке $\varphi < \varphi_c$ и КИН $K_{I\max}^F < K_{fc}^F$), выполняли с помощью двух выражений: (3) и (4) [1–4]. Первое – это степенное уравнение

$$K_1^F = K_{th}^\varphi \varphi^{m_1}, \quad (3)$$

где m_1 – параметр циклического упрочнения ($0 \leq m_1 \leq 1$); K_{th}^φ – порог пластичности, т.е. значение КИН, ниже которого пластические деформации в вершине трещины не влияют на него. Параметры m_1 и K_{th}^φ определяются по экспериментальной зависимости в координатах $\lg K_{I\max}^F - \lg(\varphi/\varphi_{th})$.

Вторая зависимость для описания кривой циклического упругопластического разрушения имеет вид

$$K_1^F = K_w \left(\frac{\psi - \psi_t}{\psi_c - \psi} \right)^{m_2} \quad \text{при} \quad \psi_t < \psi < \psi_c, \quad (4)$$

где K_w – параметр, подлежащий определению; m_2 – параметр упрочнения; ψ_t – относительная утяжка образца, соответствующая началу текучести материала при осевом растяжении.

Если $K_1^F = K_w$, получим $2\psi = \psi_c + \psi_t$ или $\psi = (\psi_c + \psi_t)/2$. Следовательно, параметр K_w – это такое значение КИН, которое соответствует относительной величине утяжки $\psi = (\psi_c + \psi_t)/2$. А поскольку $\psi_t \rightarrow 0$, и для пластичных материалов имеем $\psi_c \gg \psi_t$, параметр K_w можно определить как значение K_1^F , которое соответствует половине предельной утяжки ($\psi_c/2$). Практически значение K_w определяется так же, как величина соответствующая $\lg[(\psi - \psi_t)/(\psi_c - \psi)] = 0$ при представлении кривой в координатах $\lg K_1^F - \lg[(\psi - \psi_t)/(\psi_c - \psi)]$, значение параметра m_2 можно найти из этого же графика как тангенс угла наклона полученной прямой к оси абсцисс.

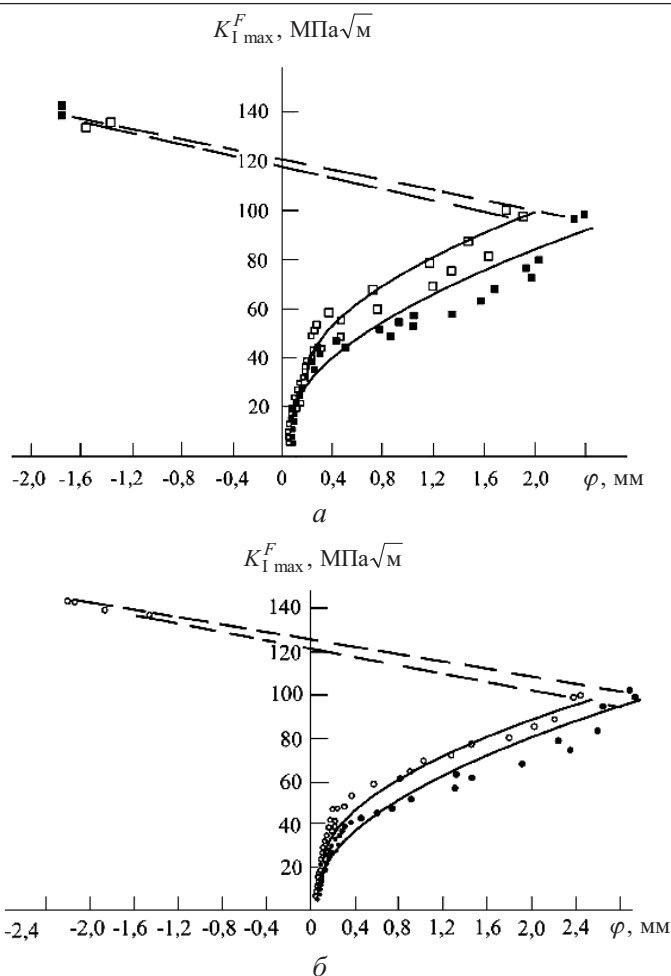


Рис. 2. Диаграмма $K_{I \max}^F - \varphi$ стали 08X18H12T в зависимости от эксплуатационной наработки для образцов с ФРТ в окружном (●), осевом (■) направлении в исходном состоянии (а) и в окружном (○), осевом (□) после эксплуатационной наработки (б).

Обработка опытных точек для исследуемой стали в состоянии поставки и после 100 тыс. ч эксплуатации позволяет оценить параметры приведенных уравнений (3), (4) и установить влияние на них эксплуатационной наработки. Так, после эксплуатации коэффициент упрочнения m_1 уменьшился на 15,3...18,8%, порог чувствительности КИН к пластическим деформациям K_{th}^{φ} увеличился на 32,5...35,9%, коэффициент упрочнения m_2 также уменьшился на 3,2...21,6%, а параметр K_w увеличился на 14,6...15,2% в зависимости от направления развития трещины (табл. 1).

В качестве примера на рис. 3 представлена регрессионная зависимость КИН – относительная утяжка в двойных логарифмических координатах $\lg K_I^F - \lg[(\psi - \psi_t)/(\psi_c - \psi)]$ для образцов стали 08X18H12T с ориентацией трещины в окружном направлении после наработки 100 тыс. ч. Для приведенной здесь линии регрессии коэффициент корреляции составляет 0,963.

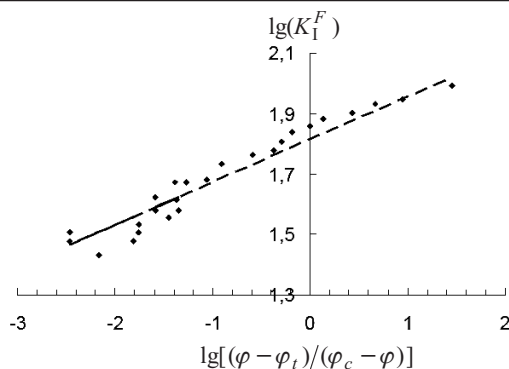


Рис. 3. Экспериментальная зависимость КИН K_I^F – относительная утяжка $(\psi - \psi_t)/(\psi_c - \psi)$ для компактных образцов с трещиной, ориентированной в окружном направлении трубы (сталь 08X18H12Т после эксплуатации).

Измерение твердости по Виккерсу проводили по ГОСТ 2999-75 на приборе ТП-7Р-1 с испытательной нагрузкой 196 Н (20 кгс) при комнатной температуре, число измерений в исследуемой зоне составляет 100.

Для исследования анизотропии механических свойств металла при измерении твердости было принято: d_1 , d_2 – размеры диагонали отпечатка пирамиды соответственно в окружном направлении и направлении оси трубы. Результаты измерений представлены на рис. 4 в виде эмпирических функций распределения величин d_1 и d_2 на нормальной вероятностной бумаге.

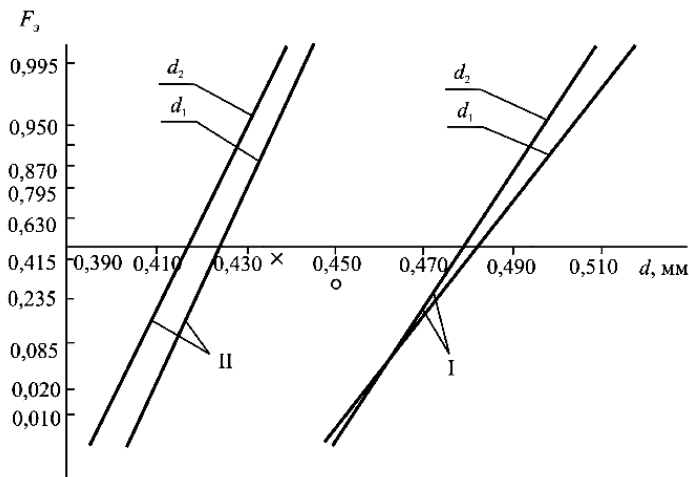


Рис. 4. Эмпирическая функция распределения размеров отпечатка алмазной пирамиды при пробе на твердость по Виккерсу на образцах стали 08X18H12Т в исходном состоянии (I) и после эксплуатации (II).

Результаты влияния эксплуатации на твердость стали 08X18H12Т приведены в табл. 2. Учет такого влияния осуществляли с помощью коэффициента влияния эксплуатации $A_{\text{эксп}}$, определяемого по соотношению $A_{\text{эксп}} = d'/d$ (d' , d – длина диагонали отпечатка на образце стали соответственно в исходном состоянии и после эксплуатационной наработки, измеряемая в мм).

Т а б л и ц а 2

Результаты исследований влияния эксплуатации на твердость стали 08X18H12Т по Виккерсу

Характеристика	Состояние стали	Вероятность P		
		0,03	0,5	0,97
HV_1 , МПа	До эксплуатации	1725	1564	1425
	После эксплуатации	2152	2012	1886
$A_{\text{эксп}}$		1,247	1,286	1,323
HV_2 , МПа	До эксплуатации	1725	1584	1466
	После эксплуатации	2249	2090	1957
$A_{\text{эксп}}$		1,304	1,319	1,335

В табл. 2 приняты следующие обозначения: HV_1 , HV_2 – твердость по Виккерсу, определенная соответственно в окружном и осевом направлении; $A_{\text{эксп}}$ – коэффициент влияния эксплуатации.

Выводы

1. После 100 тыс. ч эксплуатации предельные значения КИН K_{fc}^F уменьшаются лишь на ~2...6%. Это свидетельствует о том, что несущая способность исследованных труб по критерию трещиностойкости не исчерпана, поэтому целесообразно рассмотреть вопрос о продлении их срока эксплуатации (с дополнительным анализом изменения других служебных свойств стали).

2. Скорость роста усталостных макротрещин в средней части кинетической диаграммы усталостного разрушения (при значениях КИН от ~18 до 50...55 МПа $\sqrt{м}$) после эксплуатации практически не изменилась по сравнению со скоростью роста трещины в исходном материале.

3. После эксплуатации пороговые значения КИН K_{th} уменьшились на ~50...60% при соответствующем увеличении скорости роста особо малых трещин, что связано с процессами охрупчивания стали в процессе длительной эксплуатации. Результаты испытаний подтвердили, что характеристика пластичности – остаточная утяжка поперечного сечения испытанных образцов уменьшилась на ~12...20%, а средняя твердость HV повысилась после 100 тыс. ч эксплуатации на ~30%, что также свидетельствует об охрупчивании металла при эксплуатации.

Таким образом, при продлении срока эксплуатации труб из стали 08X18H12Т, работающих в 1-м контуре АЭС, следует принимать специальные меры по обнаружению и устранению особо малых начальных трещин. Этот вопрос требует дополнительного исследования для выяснения условий перехода малых трещин в большие, которые могут представлять реальную опасность.

Резюме

Наведено результати експериментального дослідження характеристик тріщиностійкості та твердості сталі 08Х18Н12Т на зразках, вирізаних із труб у початковому стані і після 100 тис. годин експлуатації.

1. *Сасноускі Л. А.* Дыяграма цыклічнага пругкапластычнага дэфармавання узору з трэшчынай і яе характэрныя кропкі // Весці АН БССР. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 1990. – № 2. – С. 3 – 7.
2. *Сосновский Л. А., Хамаза Л. А., Бабич Н. К.* Экспериментальное исследование циклической трещиностойкости стали 20 // Пробл. прочности. – 1990. – № 6. – С. 34 – 38.
3. *Сосновский Л. А., Богданович А. В.* Анализ диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной. Сообщ. 1 // Там же. – 1995. – № 5-6. – С. 39 – 51.
4. *Сосновский Л. А., Богданович А. В.* Анализ диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной. Сообщ. 2 // Там же. – С. 52 – 61.

Поступила 21. 06. 2009