

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 539.4;621.039.531

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-153-161>

Поступила в редакцию 14.11.2019

Received 14.11.2019

**А. В. Богданович***Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь***ОЦЕНКА РЕСУРСА ТРУБ ГЛАВНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА  
АЭС ПО КРИТЕРИЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ  
ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ**

**Аннотация.** Приводятся результаты экспериментального определения характеристик циклической трещиностойкости образцов из нержавеющей пластичной стали 08X18H12T. Компактные образцы толщиной 20 мм, вырезанные из труб Ду 550×30 первого контура главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ), исследовались при внецентренном растяжении в исходном состоянии и после 100 тыс. ч эксплуатации в условиях Ново-Воронежской АЭС. С использованием нового инженерного подхода, основанного на измерении утяжки образца и построении диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной в координатах «утяжка – коэффициент интенсивности напряжений, вычисленный с учетом поправки на пластичность», дана расчетная оценка ресурса труб Ду 550×30 ГЦТ АЭС из стали 08X18H12T по критерию циклической трещиностойкости с учетом эксплуатационной деградации свойств, вызванной наработкой 100 тыс. ч. Определен ресурс (живучесть), выраженный в количестве циклов изменения внутреннего давления, для трубы с наиболее опасными дефектами (поверхностная полуэллиптическая трещина и комбинированный дефект «питтинг + трещина»). Выполнен анализ влияния уровня начальной поврежденности и вида опасного дефекта на живучесть труб. Полученные результаты могут использоваться для анализа поврежденности и прогнозирования ресурса труб из пластичных металлов и сплавов в системах охлаждения реакторов, а также магистральных трубопроводов транспорта углеводородов.

**Ключевые слова:** трубопровод, трещиностойкость, ресурс, длительная эксплуатация, коэффициент интенсивности напряжений, утяжка, скорость роста трещины

**Для цитирования:** Богданович, А. В. Оценка ресурса труб главного циркуляционного трубопровода АЭС по критерию трещиностойкости с учетом эксплуатационной деградации свойств / А. В. Богданович // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 153–161. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-153-161>

**Alexander V. Bogdanovich***Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus***ESTIMATION OF THE RESOURCE OF PIPES OF THE MAIN CIRCULATION PIPELINE OF A NPP  
BY THE CRITERION OF CRACK RESISTANCE WITH ACCOUNT OF OPERATIONAL DEGRADATION  
OF PROPERTIES**

**Abstract.** The results of an experimental determination of the characteristics of cyclic crack growth resistance of specimens made of stainless steel 08Kh18N12T are given. Compact samples 20 mm thick cut from Du 550–30 pipes of the primary circuit of the main circulation pipeline (MCP) were studied under eccentric tension in the initial state and after 100 thousand hours of operation in the conditions of the Novo-Voronezh NPP. Using a new engineering approach based on measuring the specimen tightening and constructing a cyclic elastoplastic fracture diagram for a specimen with a crack in the coordinates “tightening – the stress intensity factor, calculated taking into account the plasticity correction”, a calculated life estimation is given for the pipe of Du 550–30 MCP NPP, made of 08Kh18N12T steel, according to the criterion of cyclic crack growth resistance, taking into account operational degradation of properties caused by the running time of 100 thousand hours. The life (survivability), expressed in a number of cycles of change in internal pressure, for a pipe with the most dangerous defects (surface semi-elliptical crack and combined defect “pitting + crack”) is determined. An analysis of the influence of the level of initial damage and the type of hazardous defect on the survivability of the pipes is made. The results can be used to analyze damage and predict the life of pipes made of ductile metals and alloys, in cooling systems of reactors, as well as main pipelines of hydrocarbon transport.

**Keywords:** pipeline, crack resistance, life, long-term operation, stress intensity factor, tightening, crack growth rate

**For citation:** Bogdanovich A. V. Estimation of the resource of pipes of the main circulation pipeline of a NPP by the criterion of crack resistance with account of operational degradation of properties. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 153–161 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-153-161>

**Введение.** Сосуды и трубопроводы занимают центральное место в проблеме безопасности и ресурса эксплуатации энергоблока АЭС, поскольку они являются наиболее многочисленной группой конструкций энергоблока; имеют большие запасы упругой энергии и оказывают наибольшее влияние на ядерную, радиационную и техническую безопасности станции; их замена или ремонт связаны, как правило, с большими материальными затратами [1].

На стадии проектно-конструкторских работ материалы сосудов и трубопроводов выбираются таким образом, чтобы их прочность обеспечивалась на протяжении всего срока эксплуатации, при этом в элементах не допускаются не только зарождение каких-либо трещин, но даже переход сечения стенки сосуда или трубопровода в пластическое состояние. Требование недопустимости разрушения в условиях эксплуатации для оборудования и трубопроводов АЭС содержится в ряде нормативных документов (ОПБ-88/97 «Общие положения по обеспечению безопасности атомных станций», Москва, 1998; [2]; Код ASME. US Nuclear Regulatory, USA; Код RSEM. EDF. Electricité de France и др.). В этих нормативных документах приведены также технические средства, обеспечивающие указанную норму. Однако во многих странах мира независимо от типа и конструктивных особенностей, условий эксплуатации на АЭС ежегодно обнаруживают повреждения конструктивных элементов, в том числе и трещины. Наиболее опасные из этих трещин провоцируют образование течей или даже полное разрушение конструктивного элемента, что может привести к человеческим жертвам (например, на АЭС «Михама» в Японии в 2004 г.).

Типичными эксплуатационными непроектными процессами повреждения для оборудования АЭС (в том числе трубопроводов охлаждения, теплообменных труб, пластин и корпусов парогенераторов) являются: коррозионное растрескивание под напряжением; межкристаллитная коррозия; коррозионно-механическая усталость и износ; фреттинг-коррозия; радиационное охрупчивание; развитие скрытых дефектов сплошности металла [1]. Эти процессы обуславливают деградацию механических свойств металлических материалов, из которых изготовлены конструктивные элементы оборудования и трубопроводов. При этом наиболее опасными являются трещины, которые нередко образуются в местах концентрации напряжений. В качестве примера на рис. 1 представлены фото дефектной зоны теплообменных труб 60-96 и 60-102 (сталь 08X18H10T) парогенератора №3 Балтийской АЭС. В ходе технической экспертизы было установлено, что причиной коррозионной язвы, на дне которой зародилась усталостная трещина, яви-

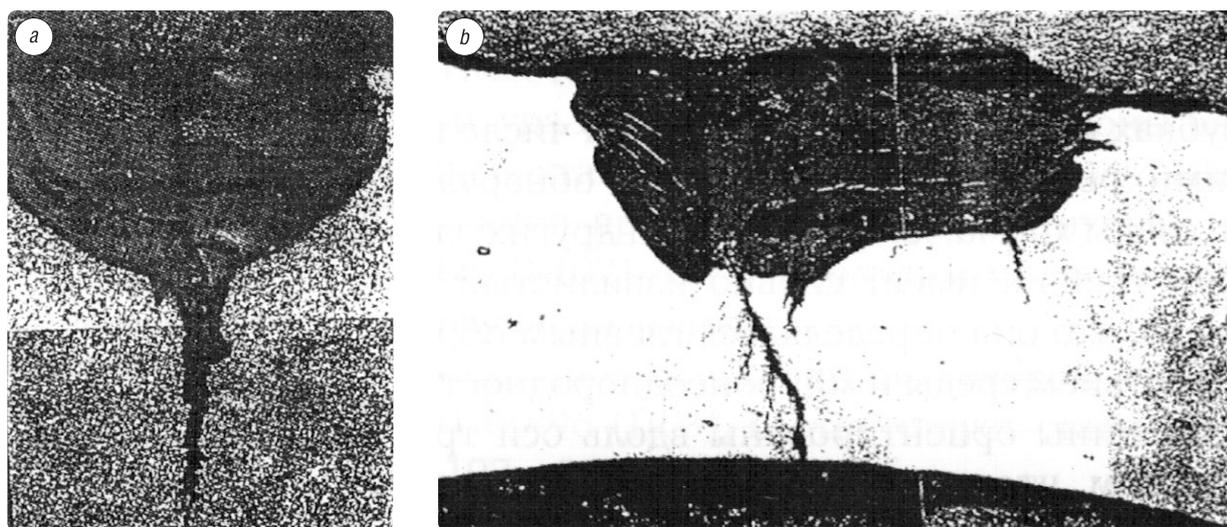


Рис. 1. Микроструктура дефектной зоны с коррозионной язвой и трещиной на участках теплообменных труб 60-96 (внутренняя сторона трубы) между дистанционирующими решетками 2 и 3 (а) и 60-102 (наружная сторона трубы) под дистанционирующей решеткой 3 (б) парогенератора №3 Балтийской АЭС [1]

Fig. 1. The microstructure of the defective zone with a corrosive ulcer and a crack in the sections of the heat-exchange pipes 60-96 (inner side of the pipe) between the spacer grids 2 and 3 (a) and 60-102 (the outer side of the pipe) under the spacer grid 3 (b) of steam generator No. 3 Baltic NPP [1]

лось попадание продуктов коррозии из конденсатно-питательного тракта и их накопление в виде отложений и шлама [1].

*Цель настоящей работы* – оценка ресурса труб АЭС по критерию циклической трещиностойкости на примере труб главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) с учетом эксплуатационной деградации свойств.

**Влияние эксплуатационных факторов на характеристики трещиностойкости материала труб ГЦТ АЭС.** Для изучения влияния эксплуатационной наработки на характеристики циклической трещиностойкости при изготовлении компактных образцов применяли вырезки труб Ду 550×30 из нержавеющей стали 08X18H12T первого контура ГЦТ Ново-Воронежской АЭС (реакторная установка ВВЭР-440) в исходном состоянии и после 100 тыс. ч эксплуатации. Ограниченное количество металла после эксплуатации, полученного с АЭС, позволило изготовить образцы с направлением фронта развития трещины (ФРТ) только в окружном и осевом направлениях.

Учитывая, что испытанию подвергали пластичную сталь, проводили оценку применимости основных формул линейной механики разрушения. Соблюдение условий плоской деформации проверяли по критериям (ГОСТ 25.506-85 «Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении»; МР 1-95 «Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении / Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. Методические рекомендации», с. 7–82):

$$K_I \leq K_I^* = \sqrt{t_0 \sigma_{0,2}^2 / 2,5}; \quad (1)$$

$$\psi = \frac{t_0 - t_\phi}{t_0} \cdot 100 \% \leq 1,5 \%, \quad (2)$$

где  $K_I$  – коэффициент интенсивности напряжений (КИН), МПа  $\sqrt{м}$ ;  $t_0$  – номинальная толщина компактного образца, м;  $t_\phi$  – толщина компактного образца с учетом упругопластической деформации, м;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести материала, МПа;  $\psi$  – относительная утяжка поперечного сечения образца (рис. 2, а).

Оказалось, что для исследуемой пластичной стали в верхней части кинетической диаграммы усталостного разрушения условия (1), (2) не выполняются, поэтому был применен подход [3], согласно которому для вычисления КИН используются формулы линейной механики разрушения, но с поправкой на пластичность. Например, для компактного образца (см. рис. 2, а)

$$K_{I \max}^F = \frac{P_{\max}}{t_0 \sqrt{B}} \omega_F^{1/2} Y(\omega_F), \quad (3)$$

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

где  $P_{\max}$  – максимальная нагрузка цикла, Н;  $t_0$ ,  $B$  – размеры опасного сечения образца, м (см. рис. 2, а);  $Y(\omega_F)$  – поправочная функция, которая учитывает геометрию образца и схему его нагружения, а также интегрально величину пластической деформации в опасном сечении;  $\omega_F = F_l/F_0$  – локальная мера поврежденности;  $F_0$  – номинальная (до деформации) площадь опасного сечения образца, м<sup>2</sup>;  $F_l$  – площадь, м<sup>2</sup>, поврежденная трещиной длиной  $l$ , м, и определенная с учетом пластической деформации сечения.

В соответствии с подходом [3] при испытаниях компактных образцов определяют поперечную составляющую пластической деформации образца в зоне развития трещины (утяжку  $\phi$ ) как разность номинального  $t_0$  и текущего  $t_\phi$  значений толщины образца, то есть  $\phi = t_0 - t_\phi$  (см. рис. 2, а), ее относительная величина (относительная утяжка)  $\psi = \phi/t_0$ . При этом весь процесс упругопластического деформирования и разрушения описывается с помощью диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной (диаграммы ЦУПРОТ), которую строят в координатах КИН  $K_I^F$  – относительная  $\psi$ - или абсолютная  $\phi$ -утяжка (как показано на рис. 2, б).

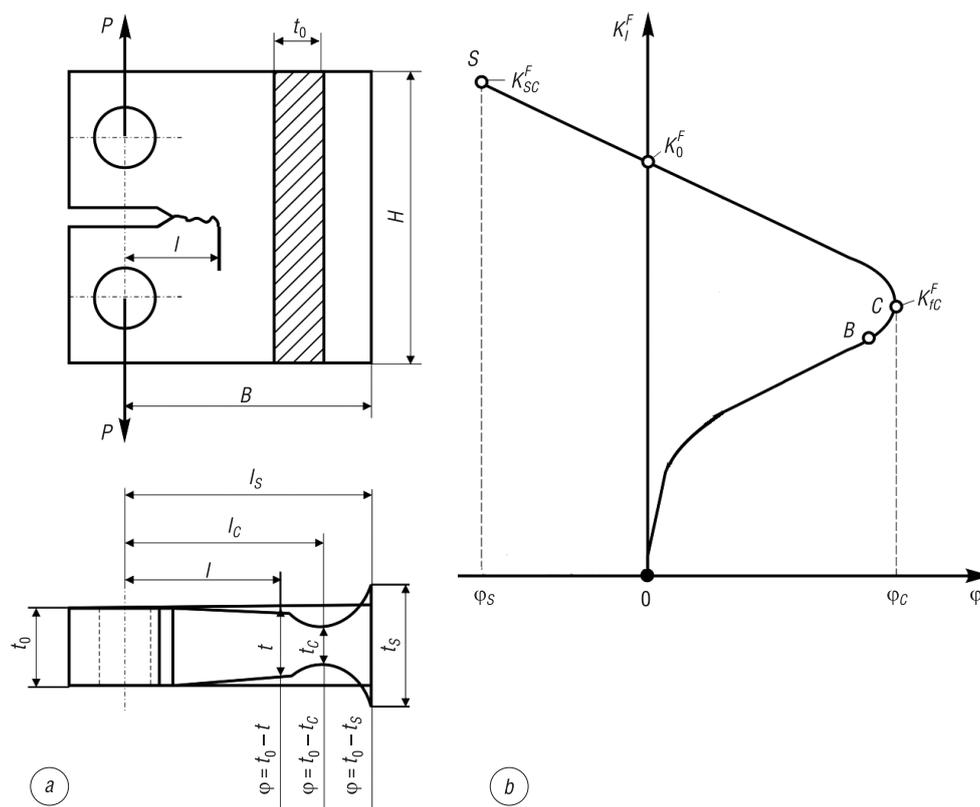


Рис. 2. Схемы нагружения компактного образца и измерения утяжки (а) и диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной (диаграммы ЦУПРОТ, б)

Fig. 2. Schemes: a – loading of a compact specimen and measurement of tightening; b – cyclic elastoplastic fracture diagram for a specimen with a crack (CEPF-diagram)

Испытания на циклическую трещиностойкость компактных образцов, вырезанных из труб Ду  $550 \times 30$  ГЦТ, толщиной 20 мм при внецентренном растяжении проводили с частотой 20 Гц, асимметрией цикла 0,1, при комнатной температуре на испытательной машине ЦДМ-10Пу в соответствии с требованиями МР 1-95.

Результаты испытаний приведены в виде кинетической диаграммы усталостного разрушения на рис. 3 (для образцов с ФРТ в осевом направлении), а численные значения характеристик трещиностойкости даны в таблице. Коэффициент влияния эксплуатации  $A_{\text{экспл}}$  определяли как отношение значения параметра материала после эксплуатации к значению данного параметра для материала в исходном состоянии.

Анализируя полученные результаты, отметим, что при развитии трещин как в окружном, так и в осевом направлениях можно выделить на диаграмме усталостного разрушения три участка, два из которых являются чувствительными к эксплуатационной наработке, а один – не реагирует на эксплуатационное воздействие. Так, в области малых скоростей роста трещины (менее  $2 \cdot 10^{-8}$  м/цикл) металл, бывший в эксплуатации, имеет скорость роста трещины выше, чем металл в состоянии поставки. При этом для образцов с ФРТ в окружном направлении это превышение имеет большее абсолютное значение, чем для образцов с ФРТ в осевом направлении (таблица). В диапазоне скоростей роста трещины от  $\sim 2 \cdot 10^{-8}$  м/цикл до  $2 \cdot 10^{-6}$  м/цикл (при значениях КИН от  $\sim 18$  до 50–55 МПа $\sqrt{\text{м}}$ ) происходит слияние областей рассеяния диаграмм усталостного разрушения испытанных образцов как в состоянии поставки, так и после эксплуатации. Третий участок диаграмм при скорости роста трещины более  $2 \cdot 10^{-6}$  м/цикл также наглядно демонстрирует превышение скорости роста трещины в материале после эксплуатации по сравнению со скоростью роста трещины в исходном материале.

Автором установлено, что наибольшее значение предельная скорость роста трещин имеет в образцах с ФРТ в осевом направлении, изготовленных из материала, бывшего в эксплуатации;

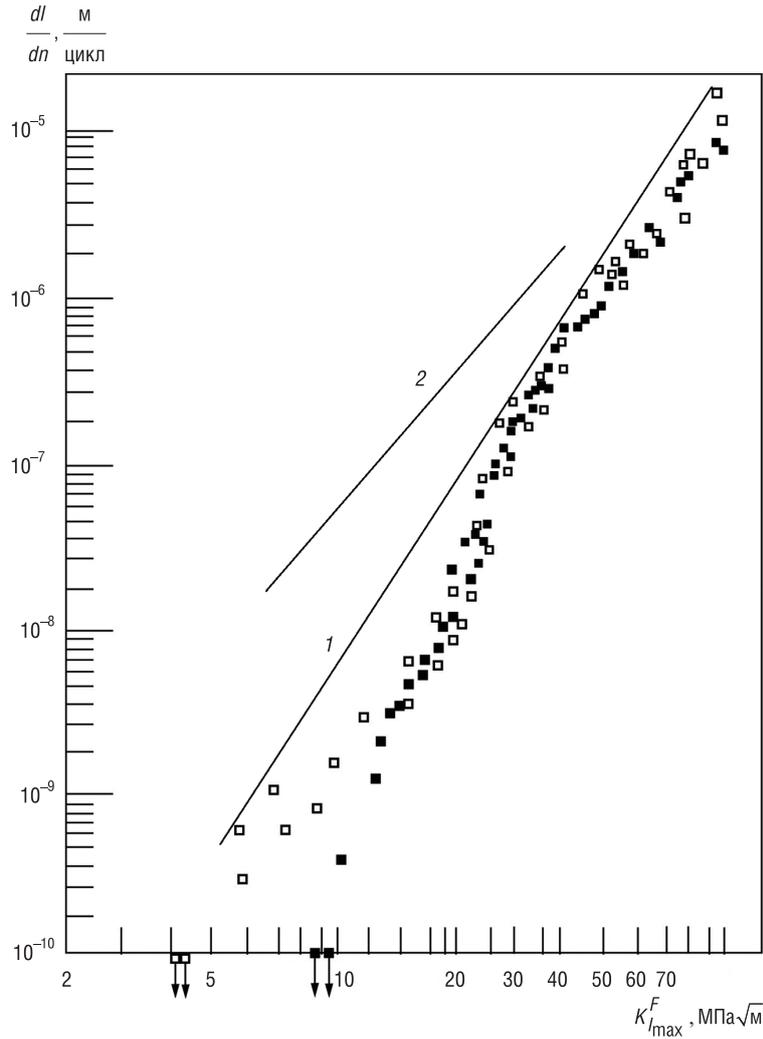


Рис. 3. Экспериментальная кинетическая диаграмма усталостного разрушения стали 08X18N12T в зависимости от эксплуатационной нагрузки с фронтом развития трещины в осевом направлении: ■ – исходное состояние; □ – после 100 тыс. ч эксплуатации; 1 – верхняя огибающая экспериментальных результатов; 2 – нормативная кривая [4]

Fig. 3. Experimental kinetic diagram of fatigue fracture for 08Kh18N12T steel depending on the operating time with front of crack development in the axial direction: ■ – initial state; □ – after 100 thousand hours of operation; 1 – upper envelope of the experimental results; 2 – normative curve [4]

предельное значение скорости роста трещины в образцах с ФРТ в окружном направлении возросло на 41,9 %, а в образцах с ФРТ в осевом направлении – на 46,5 %.

Большое влияние оказали эксплуатационные воздействия на значения КИН в пороговой и припороговой областях. Так, пороговые значения КИН в образцах с ФРТ в окружном направлении снизились на 64,2 %, а с ФРТ в осевом направлении – на 52,6 % (см. таблицу). С возрастанием численных значений КИН влияние эксплуатационных факторов уменьшается, предельные значения КИН  $K_{fc}^F$  снижаются лишь на 6,3 % для образцов с ФРТ в окружном направлении и на 1,9 % для образцов с ФРТ в осевом направлении.

Влияние эксплуатационных факторов сказывается и на пластических свойствах исследованной стали. Изменение величины утяжки под действием эксплуатационных факторов (см. таблицу) показывает, что влияние длительной эксплуатации ведет к уменьшению утяжки, то есть способствует охрупчиванию металла.

На рис. 3 для сравнения изображена также нормативная кривая – диаграмма усталостного разрушения, определенная документом М-02-91 «Методика определения допустимых размеров

**Влияние эксплуатационной наработки на характеристики трещиностойкости стали 08X18N12T [4]**  
**Influence of operating time on the crack resistance characteristics of 08Kh18N12T steel [4]**

Параметр	Направление ФРТ	Состояние материала		Коэффициент влияния эксплуатации $A_{\text{экспл}}$
		исходное	после 100 тыс. ч эксплуатации	
Пороговый КИН $K_{I_{th}}^F$ , МПа $\sqrt{\text{м}}$	Окружное	8,04	2,88	0,36
	Осевое	8,92	4,23	0,47
Предельный КИН (циклическая вязкость разрушения) $K_{I_{fc}}^F$ , МПа $\sqrt{\text{м}}$	Окружное	106,0	100,2	0,94
	Осевое	99,2	97,3	0,98
Скорость роста трещины $v$ , м/цикл при $K_{I_{\text{max}}}^F \approx 10$ МПа $\sqrt{\text{м}}$	Окружное	$6,8 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-9}$	7,35
	Осевое	$4,2 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	6,19
Скорость роста трещины $v$ , м/цикл при $K_{I_{\text{max}}}^F \approx 35$ МПа $\sqrt{\text{м}}$	Окружное	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	0,82
	Осевое	$3 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	0,87
Предельная скорость роста трещины $v_c$ , м/цикл	Окружное	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	1,72
	Осевое	$6,95 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	1,72
Предельная утяжка образца $\varphi_c$ , мм	Окружное	2,81	2,44	0,87
	Осевое	2,26	1,82	0,81
Предельное уширение образца $\varphi_s$ , мм	Окружное	-2,20	-1,61	0,73
	Осевое	-1,77	-1,51	0,85

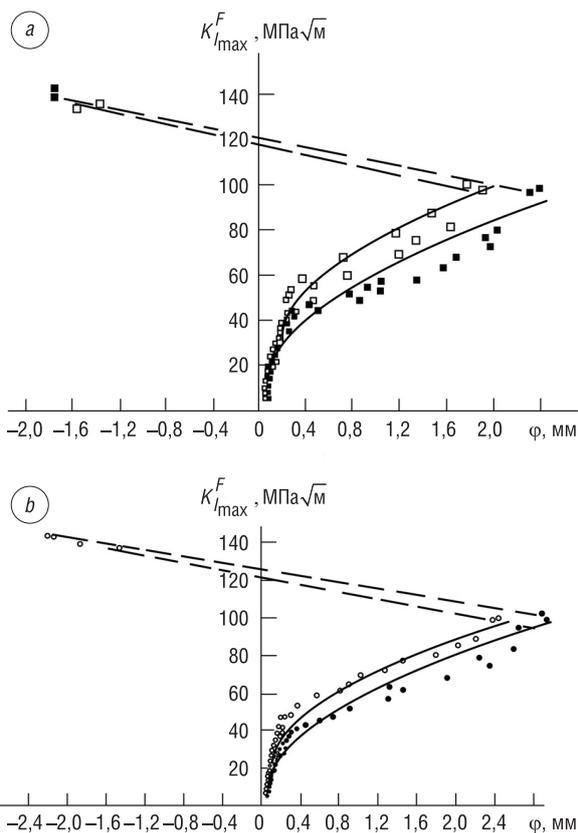


Рис. 4. Диаграмма  $K_{I_{\text{max}}}^F$  –  $\varphi$  стали 08X18N12T в зависимости от эксплуатационной наработки для образцов с ФРТ в направлении: ● – окружном, ■ – осевом в исходном состоянии (а) и ○ – окружном, □ – осевом после эксплуатационной наработки (б) [4]

Fig. 4. The diagram  $K_{I_{\text{max}}}^F$  –  $\varphi$  of 08Kh18N12T steel depending on the operating time for specimens with front of crack development in the direction: ● – circumferential, ■ – axial in the initial state (a) and ○ – circumferential, □ – axial after operational time (b) [4]

несплошности металла оборудования и трубопроводов во время эксплуатации АЭС». Видно, что полученные экспериментальные результаты лежат ниже нормативной кривой, что свидетельствует о том, что длительная эксплуатация в условиях АЭС не привела к опасному нарушению несущей способности материала труб по критерию циклической трещиностойкости.

Диаграмму ЦУПРОТ для стали 08X18N12T строили по результатам проведенных испытаний на циклическую трещиностойкость компактных образцов и измерения утяжки образцов в зоне развития усталостной трещины, откладывая по оси абсцисс утяжку образца, а по оси ординат – величину КИН  $K_{I_{\text{max}}}^F$ , соответствующую ей и вычисленную по формуле (3) с учетом предложенной поправки на пластичность. Эта диаграмма, приведенная на рис. 4, подтверждает процесс охрупчивания стали 08X18N12T под действием эксплуатационных факторов, причем снижение предельной величины утяжки в образцах с ФРТ в окружном направлении составляет 12,8 %, а в образцах с ФРТ в осевом направлении – 19,5 % (см. таблицу).

**Определение ресурса труб ГЦТ АЭС при наличии трещинообразных дефектов.** Для оценки ресурса труб при регулярном нагружении по критерию трещиностойкости (живучести) с учетом влияния эксплуатационных процессов деградации свойств материала будем использовать формулу

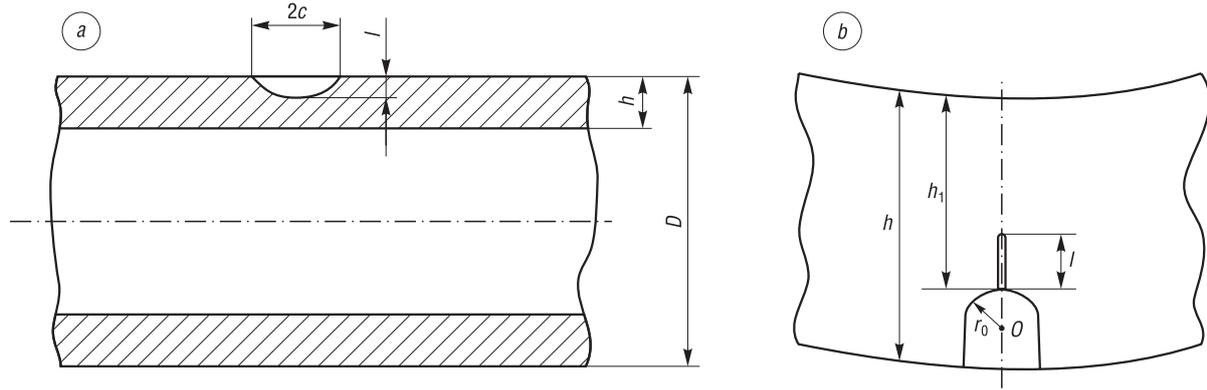


Рис. 5. Схемы: развития поверхностной усталостной трещины в трубе (а); фрагмента трубы с комбинированным дефектом «питтинг + трещина» (b)

Fig. 5. Schemes: development of a surface fatigue crack in a pipe (a); pipe fragment with a combined defect “pitting + crack” (b)

$$N_{ж} = \frac{(1 - \omega_F)^{m_k(t)+1}}{C_k(t)[m_k(t) + 1] (K_{I_{max}} - K_{th}(t))^{m_k(t)}}, \quad (5)$$

где  $C_k$  и  $m_k$  – параметры (постоянные материала), определяемые по кинетической диаграмме усталостного разрушения в координатах скорость роста трещины  $v = d(1 - \omega_F)/dn$  – максимальный КИН  $K_{I_{max}}$  (или его размах  $\Delta K_I$ ), то есть по смыслу и по размерности параметры  $C_k$  и  $m_k$  соответственно тождественны известным параметрам  $C_k$  и  $m_k$  уравнения Пэриса;  $N_6$  – длительность в циклах одного блока нагружения;  $K_{th}$  – пороговый КИН; параметр  $t$  в скобках обозначает, что данная характеристика определена с учетом фактического времени эксплуатации нефтепровода и соответствующего влияния эксплуатационных процессов деградации.

Различают поверхностные и подповерхностные трещинообразные дефекты труб, но поскольку подповерхностные дефекты опасного размера выявляют еще на этапе тщательного входного контроля, среди эксплуатационных дефектов преобладают поверхностные, которые, согласно нормам [2], принято схематизировать в виде полуэллиптических трещин глубиной  $l$ , полудлиной  $c$  при соотношении  $l/c = 2/3$  (рис. 5, а). Такие трещины, ориентированные вдоль оси трубопровода, являются наиболее опасными.

Преобразовав формулу для КИН в трубе с трещиной (см. рис. 5, а), рекомендуемую в нормативном документе РД 39-00 147 105-001-91 «Руководящий документ. Методика оценки статической прочности и циклической долговечности магистральных нефтепроводов», путем замены меры поврежденности  $\omega_l = l/h$  на меру  $\omega_F$  имеем

$$K_{I_{max}}^F = \frac{p_{max}(D - 2h)}{2\sqrt{h}} \omega_F^{1/4} Y(\omega_F), \quad (6)$$

где  $p_{max}$  – максимальное значение внутреннего давления в трубе, МПа;  $D$  – наружный диаметр, м;  $h$  – толщина стенки трубы, м;  $Y(\omega_F)$  – поправочный коэффициент:

$$Y(\omega_F) = 1,99 - 0,41\omega_F^{1/2} + 18,7\omega_F - 38,48\omega_F^{3/2} + 53,85\omega_F^2. \quad (7)$$

Меру поврежденности  $\omega_F$  можно найти следующим образом [3]:

$$\omega_F = \left(\frac{l}{h}\right)^2. \quad (8)$$

Как уже было указано, нередко коррозионные язвы (питтинги) становятся очагами усталостных трещин, в результате чего образуется опасный комбинированный дефект «питтинг + трещина». Будем моделировать зону, занятую поврежденным коррозией материалом, U-образным вырезом радиусом  $r_0$ , из центра которого растет усталостная трещина глубиной  $l$  (рис. 5, б). Формула для КИН такого дефекта определяется с учетом меры поврежденности  $\omega_F$ , вычисляемой по выражению (8)

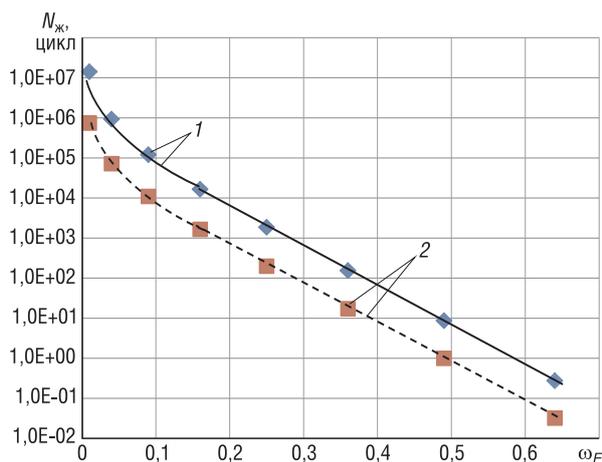


Рис. 6. Расчетные зависимости ресурса (живучести) трубы Ду 550×30 ГЦТ АЭС из стали 08X18N12T в состоянии после 100 тыс. ч эксплуатации от уровня поврежденности при наличии поверхностной усталостной трещины (1) и комбинированного дефекта «питтинг + трещина» (2)

Fig. 6. The calculated dependences of the resource (survivability) of a Du 550×30 pipe of NPP main circulation pipeline made of 08Kh18N12T steel in a state after 100 thousand hours of operation on the level of damage in the presence of a surface fatigue crack (1) and a combined “pitting + crack” defect (2)

рабочего внутреннего давления составляют всего 45,1 МПа при пределе текучести материала ~300 МПа [1], видно, что при наличии трещинообразных дефектов, даже если уровень поврежденности составляет всего 0,1, живучесть трубы до образования течи составит ~10...100 тыс. циклов перемены рабочего давления (в зависимости от типа дефекта). Комбинированный дефект существенно более опасен, чем обычная полуэллиптическая трещина, – на промежутке изменения  $\omega_F$  от 0,1 до 0,6 разница в живучести трубы с рассматриваемыми дефектами составляет почти 10 раз.

**Заключение.** Выполнена расчетная оценка ресурса (живучести) трубы Ду 550×30 ГЦТ АЭС из стали 08X18N12T при регулярном циклическом нагружении внутренним давлением при наличии поверхностной полуэллиптической трещины и комбинированного дефекта «питтинг + трещина». При этом использовались экспериментальные значения характеристик циклической трещиностойкости исследуемой стали после 100 тыс. ч эксплуатации. Установлено, что при рабочем внутреннем давлении  $p_{\max} = 12,26$  МПа и наличии трещинообразных дефектов, даже если уровень поврежденности составляет всего 0,1, живучесть трубы до образования течи составит ~10...100 тыс. циклов перемены рабочего давления (в зависимости от типа дефекта). Комбинированный дефект существенно более опасен, чем обычная полуэллиптическая трещина: на промежутке изменения  $\omega_F$  от 0,1 до 0,6 разница в живучести трубы с рассматриваемыми дефектами составляет почти 10 раз.

Полученные результаты могут использоваться для анализа поврежденности и прогнозирования ресурса труб из пластичных металлов и сплавов в системах охлаждения реакторов, а также магистральных трубопроводов транспорта углеводородов.

#### Список использованных источников

1. Аркадов, Г. В. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы) / Г. В. Аркадов, А. Ф. Гетман, А. Н. Родионов. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 424 с.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Металлургия, 1989. – 525 с.

$$K_{I_{\max}}^F = \frac{p_{\max}(D-2h)}{2\sqrt{h}} \sqrt{\pi} \omega_F^{1/4} Y(\omega_F). \quad (9)$$

Расчет ресурса по формуле (5) выполнен для трубы с поверхностной полуэллиптической трещиной и для трубы с комбинированным дефектом «питтинг + трещина». Геометрические размеры рассматриваемой трубы Ду 550×30 таковы:  $D = 550$  мм,  $h = 30$  мм. Нагруженность ее характеризуется рабочим внутренним давлением  $p_{\max} = 12,26$  МПа [1]. Параметры  $C_k$  и  $m_k$  были определены по верхней огибающей 1 экспериментальных результатов кинетической диаграммы усталостного разрушения (см. рис. 3), их значения равны:  $C_k = 9 \cdot 10^{-12}$ ,  $m_k = 3,705$ . Пороговое значение КИН в осевом направлении после 100 тыс. ч эксплуатации составило  $4,23 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (см. таблицу).

На рис. 6 представлены результаты расчета ресурса, выраженные числом циклов до наступления предельного состояния, в зависимости от уровня поврежденности трубы поверхностной полуэллиптической трещиной (кривая 1) и комбинированным дефектом «питтинг + трещина» (кривая 2). Несмотря на то, что напряжения в трубе в осевом направлении от

3. Сосновский, Л. А. Живучесть линейной части нефтепровода / Л. А. Сосновский, А. В. Богданович, А. М. Боровский. – Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 2004. – 112 с.

4. Комплексное экспериментальное исследование свойств стали 08Х18Н12Т в связи с длительной эксплуатацией ГЦТ АЭС / Л. А. Сосновский [и др.] // Вест. Акад. наук БССР. Сер. физ.-тэхн. навук. – 1991. – № 1. – С. 42–52.

### References

1. Arkadov G. V., Getman A. F., Rodionov A. N. *Reliability of NPP Equipment and Pipelines and Optimization of their Life Cycle (Probabilistic Methods)*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 424 p. (in Russian).

2. *Standards for Calculating the Strength of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants*. Moscow, Metallurgia Publ., 1989. 525 p. (in Russian).

3. Sosnovskii L. A., Bogdanovich A. V., Bordoovskii A. M. *The Survivability of the Linear Part of the Pipeline*. Gomel, S&P Group “Tribo-Fatigue”, 2004. 112 p. (in Russian).

4. Sosnovskii L. A., Hamaza L. A., Getman A. F., Babich N. K., Bogdanovich A. V. A comprehensive experimental study of the properties of 08Kh18N12T steel in connection with the long-term operation of the MCP of NPP. *Vesti Akademii nauk BSSR. Seriya fizika-technichnykh nauk* [Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Physical-technical series], 1991, no. 1, pp. 42–52 (in Russian).

### Информация об авторе

Богданович Александр Вальдемарович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4–406, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bogal@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-9074-0878>

### Information about the author

Alexander V. Bogdanovich – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Belarusian State University (4, room 406, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogal@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-9074-0878>