



## Об актуальности контроля остаточных напряжений и их снижения

**В.В. Потапов<sup>1</sup>, Д.А. Кузьмин<sup>1</sup> , А.Ф. Гетман<sup>1</sup>, А.Ю. Кузьмичевский<sup>1</sup> ,  
А.В. Камышев<sup>2</sup>, Л.А. Пасманик<sup>2</sup>, В.Д. Ровинский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (АО «ВНИИАЭС»),  
г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Инженерное предприятие «ИНКОТЕС» (ООО «ИНКОТЕС»), г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
 AYKuzmichevskiy@vniiaes.ru

**Аннотация.** Цель исследования – показать существенное влияние учета фактических значений остаточных напряжений на прочность и ресурс безопасной эксплуатации объектов атомной энергетики. Для определения прочности и ресурса использовались общепринятые подходы физики прочности и механики разрушения. Исследована степень влияния остаточных напряжений на прочность и ресурс элементов трубопроводов в случае циклически действующей нагрузки, при статической нагрузке, когда есть опасность хрупкого разрушения, и в случае коррозионного воздействия. Объектами исследования являлись трубопроводы атомных электростанций. Отмечено, что современное состояние науки и техники позволило создать методику неразрушающего контроля механических напряжений, действующих в металлоконструкциях, основанную на использовании метода акустоупругости. В настоящее время на базе этого метода разработана и аттестована для применения в области использования атомной энергии методика выполнения измерений остаточных сварочных и монтажных напряжений в трубопроводах. Методика измерений предусматривает определение мембранных и изгибных напряжений в кольцевых сечениях, расположенных на прямолинейных участках трубопроводов. Значения напряжений в конструктивных элементах трубопроводов и остаточных сварочных напряжений в наплавленном металле сварных соединений определяются с применением соотношений, основанных на использовании принципа уравновешивания. Показана актуальность введения в порядок контроля технического состояния трубопроводов и оборудования атомных электростанций процедуры определения фактического уровня остаточных напряжений, позволяющей существенно повысить достоверность оценки их прочности и ресурса. Обосновано, что для реализации процедуры определения фактического уровня остаточных напряжений необходимо использовать систему неразрушающего контроля остаточных сварочных и монтажных напряжений с использованием метода акустоупругости, основанную на методике измерений, позволяющей определять фактические значения остаточных напряжений с установленными характеристиками погрешности.

**Ключевые слова:** атомная электрическая станция, метод акустоупругости, неразрушающий контроль, ресурс трубопроводов, остаточные напряжения, расчеты на прочность.

**Для цитирования:** Потапов В.В., Кузьмин Д.А., Гетман А.Ф., Кузьмичевский А.Ю., Камышев А.В., Пасманик Л.А., Ровинский В.Д. Об актуальности контроля остаточных напряжений и необходимости их снижения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):68-75. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-09>

**For citation:** Potapov V.V., Kuzmin D.A., Getman A.F., Kuzmichevskiy A.Yu., Kamyshev A.V., Pasmanik L.A., Rovinskiy V.D. Relevance of monitoring residual stresses and the need to reduce them. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):68-75 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-09>

### Relevance of monitoring residual stresses and the need to reduce them

**Vladimir V. Potapov<sup>1</sup>, Dmitry A. Kuzmin<sup>1</sup> , Alexander F. Getman<sup>1</sup>,  
Alexander Yu. Kuzmichevskiy<sup>1</sup> , Arkady V. Kamyshev<sup>2</sup>, Lev A. Pasmanik<sup>2</sup>,  
Viktor D. Rovinskiy<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> JSC «All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation» (JSC VNIIAES), Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Engineering company «ENCOTES» (ENCOTES LLC), Nizhny Novgorod, Russian Federation

AYKuzmichevskiy@vniiaes.ru

**Annotation.** The objective of the study is to show the significant impact of taking into account the actual values of residual stresses on the strength and resource of safe operation of nuclear power facilities. Generally accepted approaches of strength physics and fracture mechanics were used to determine strength and service life. The degree of influence of residual stresses on the strength and service life of pipeline elements in the case of a cyclically acting load, under static load, when there is a danger of brittle fracture, and in the case of corrosion is investigated. The objects of the study were pipelines of nuclear power plants. It is noted that the current state of science and technology has made it possible to create a technique for non-destructive testing of mechanical stresses acting in

metal structures based on the use of the acoustoelasticity method. Currently, on the basis of this method, a method for measuring residual welding and installation stresses in pipelines has been developed and certified for use in the field of atomic energy use. The measurement technique provides for the determination of membrane and bending stresses in annular sections located on rectilinear sections of pipelines. The values of stresses in the structural elements of pipelines and residual welding stresses in the deposited metal of welded joints are determined using ratios based on the use of the balancing principle. The relevance of introducing into the procedure for monitoring the technical condition of pipelines and equipment of nuclear power plants the procedure for determining the actual level of residual stresses, which significantly increases the reliability of the assessment of their strength and service life, is shown. It is proved that in order to implement the procedure for determining the actual level of residual stresses, it is necessary to use a non-destructive testing system for residual welding and installation stresses using the acoustoelasticity method based on a measurement technique that allows determining the actual values of residual stresses with established error characteristics.

**Keywords:** acoustoelastic method, nondestructive testing, pipeline resource, nuclear power plant, residual stresses, strength calculation.

## Введение

Остаточные напряжения (далее – ОН) возникают в элементах конструкций вследствие натяга при монтаже трубопроводов, локальной пластической деформации и неравномерного термического воздействия на оборудование.

При разработке норм расчета на прочность<sup>1,2</sup> в середине XX в. отсутствовали научно-технические решения для создания методов неразрушающего контроля фактических значений ОН в конструкциях. С учетом этого действующие нормативные документы предусматривали при расчете на сопротивление усталости сварных соединений, принимать, ОН в сварных швах равными пределу текучести. ОН также учитывались при расчете на сопротивление хрупкому разрушению элементов присоединенного оборудования. В частности, например, в рекомендациях по учету ОН при расчете на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов<sup>3</sup>, величину ОН после термического отжига и отпуска предлагалось принимать равной 30% от предела текучести.

В то же время, с учетом многофакторности процесса монтажа, фактические значения ОН могли существенно отличаться от рекомендуемых значений и, как следствие, приводить к недостоверной оценке остаточного ресурса элементов оборудования и трубопроводов.

Современное состояние науки и техники позволило создать метод и аппаратное обеспечение неразрушающего контроля фактических значений ОН при оценке остаточного ресурса, основанные на использовании явления акустоупругости, устанавливающего связь скоростей распространения объемных упругих волн со значениями механических напряжений [1].

<sup>1</sup> Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – Правила и нормы в атомной энергетике (ПНАЭГ-7-002-86). – Госатом-энергонадзор СССР. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

<sup>2</sup> Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на прочность. – ГОСТ Р 59115.9-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. – Москва, 2022. – 113 с.

<sup>3</sup> Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет (РД ЭО 1.1.3.99.0871-2012). – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2012.

Разработан порядок использования метода акустоупругости для измерения мембранных и изгибных напряжений, определяемых продольными силами и изгибающими моментами в сечениях трубопровода [2,3,4]. Также разработан порядок использования метода акустоупругости и принципа уравновешивания для определения остаточных сварочных напряжений в наплавленном металле сварных соединений [5,6]. Разработана и аттестована для применения в области использования атомной энергии соответствующая методика выполнения измерений<sup>4</sup>. Указанная методика может быть положена в основу системы неразрушающего контроля фактических значений ОН, что позволит обеспечить повышение достоверности оценки напряженно-деформированного состояния элементов оборудования и трубопроводов при расчетах прочности и ресурса.

В настоящей статье исследована степень влияния ОН на прочность и ресурс элементов трубопроводов в случае циклически действующей нагрузки, при статической нагрузке, когда есть опасность хрупкого разрушения, и в случае коррозионного воздействия, а также влияние ОН на кинетику роста трещин. При проведении исследования сопоставлялись результаты оценки ресурса при отсутствии ОН и при значениях ОН, равных пределу текучести.

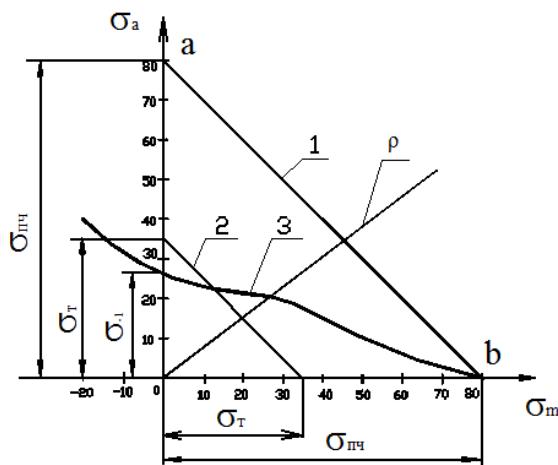
## Сопротивление усталости

Рассмотрим количественно влияние остаточных напряжений, равных пределу текучести, на амплитуду разрушающего циклического напряжения  $\sigma_a$ , а также на уменьшение количества циклов до разрушения  $N_p$  при этом же остаточном напряжении. Для простоты и повышения общности анализа использовали диаграмму

<sup>4</sup> Монтажные и остаточные сварочные напряжения в трубопроводах атомных электростанций. Методика измерений с использованием метода акустоупругости (МТ 1.1.4.02.002.2114-2023). – Росатом. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений в области использования атомной энергии. – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2023. – Режим доступа: [https://fif.atomstandard.ru/atom/?CLASS\\_ID=atSimpleObjView&MODEL\\_ID=atMMethod&DOCUMENT\\_ID=atSimpleObjView\\_139711838032592&OBJECT\\_ID=394](https://fif.atomstandard.ru/atom/?CLASS_ID=atSimpleObjView&MODEL_ID=atMMethod&DOCUMENT_ID=atSimpleObjView_139711838032592&OBJECT_ID=394) (дата обращения 10.01.2024).

Хея-Зодерберга для стали 45, приведенную на рисунке 1<sup>5</sup>.

На рисунке 1 по горизонтальной оси откладывали среднее напряжение цикла  $\sigma_m$ , по вертикальной — амплитуду циклического напряжения  $\sigma_a$ .



**Рисунок 1.** Диаграмма Хея-Зодерберга для стали 45 при  $N_p = 5 \cdot 10^6$ : 1 – Уравнение прямой  $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_{\text{пч}}$  (предел прочности); 2 – Уравнение прямой  $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_z$  (предел выносливости); 3 – Экспериментальная кривая предела выносливости, полученная при разных амплитудах и постоянных составляющих цикла  $\rho = \sigma_a / \sigma_m$  на одной и той же базе  $N_p = 5 \cdot 10^6$ . Ордината при абсциссе  $\sigma_m = 0$  представляет собой предел выносливости при симметричном цикле нагружения,  $\rho = \infty$  обозначается через  $\sigma_{-1}$

**Figure 1.** The Hay-Zoderberg diagram for steel 45 at  $N_p = 5 \cdot 10^6$ : 1 – Equation of the straight line  $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_{\text{пп}}$  (tensile strength); 2 – Equation of the line  $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_z$  (endurance limit); 3 – An experimental curve of the endurance limit obtained at different amplitudes and constant component cycles  $\rho = \sigma_a / \sigma_m$  on the same base  $N_p = 5 \cdot 10^6$ . The ordinate at abscissa  $\sigma_m = 0$  represents the endurance limit for a symmetrical loading cycle,  $\rho = \infty$  is denoted by  $\sigma_{-1}$

При  $\sigma_m = 0$  величина  $\sigma_a = \sigma_{-1} = 27$  МПа.

При  $\sigma_m = \sigma_r$ , то есть пределу текучести ( $R_{P0.2}^T$ ),  $\sigma_a = 0,74\sigma_r = 20$  МПа.

Для оценки сокращения числа циклов до разрушения в случае остаточных напряжений на уровне предела текучести по сравнению с отсутствием остаточных напряжений, воспользуемся кривой усталости (кривой Веллера) из норм расчета на прочность углеродистых и легированных сталей с  $\sigma_F > R_{P0.2}^T/R_m^T \leq 0,7$  до  $T=623$  К ( $350$  °C) <sup>6</sup> (рис. 2).

В связи с тем, что кривые на рисунках 1 и 2 взяты из разных источников, для оценки величины сокращения числа циклов до разрушения, воспользуемся относительным сокращением амплитуды напряжения на 0,26% для исходного числа циклов до разрушения, равном, как указано на рисунке 1,  $N_p = 5 \cdot 10^5$ .

Приняв, что наклон кривой усталости при наличии среднего напряжения цикла, равного пределу текучести, останется таким же, как и при нулевом среднем напряжении цикла, получим, что число циклов до разрушения при наличии среднего напряжения цикла  $\sigma_m = R_{p0,2}$ , сократится примерно в 12 раз, то есть с  $N_p$  (при  $\sigma_m = 0$ ) =  $5 \cdot 10^5$  до  $N_p$  (при  $\sigma_m = R_{p0,2}$ ) =  $4 \cdot 10^4$  (рис. 2).

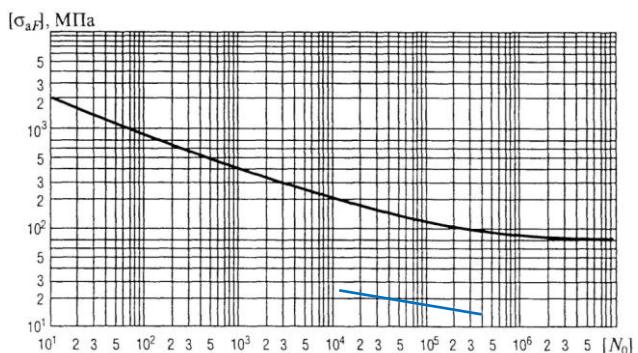


Рисунок 2. Расчетная кривая усталости углеродистых и

## легированных сталей

Таким образом:

Таким образом.

1. Среднее напряжение цикла  $\sigma_m$  может оказывать существенное влияние на разрушающую амплитуду напряжения  $\sigma_a$  и число циклов до разрушения  $N_p$ . Так при  $\sigma_m = \sigma_t$ , то есть пределу текучести, разрушающая амплитуда уменьшается на 26%, а число циклов до разрушения уменьшится в 12 раз по сравнению с исходным состоянием при нулевом среднем напряжении цикла.

2. Как видно из диаграммы Хея-Зодерберга (см. рис. 1) при приближении среднего напряжения цикла к пределу прочности, амплитуда разрушающего напряжения стремится к нулю.

## Циклическая трещиностойкость

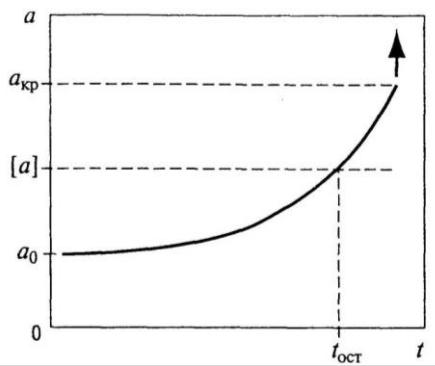
При наличии трещины ресурс конструкции определяется скоростью роста трещины. В общем виде скорость роста трещины  $da/dN$  зависит от коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$ , уравнение (1):

$$\frac{da}{dN} = f(K_1), \quad (1)$$

где  $a$  размер трещины в направлении толщины стенки трубопровода или корпуса сосуда давления;

$N$  = циклы нагружения

Если при эксплуатации обнаружена трещина с размером  $a_0$  и известен допускаемый во время эксплуатации размер  $[a]$ , то ресурс можно определить из уравнения (1) (рис. 3).



**Рисунок 3.** Рост несплошности во время эксплуатации:  
 $a_0$  – размер обнаруженной несплошности;  $[a]$  – допустимый во время эксплуатации размер несплошности;  
 $a_{kp}$  – критический размер несплошности, при достижении которого происходит быстрое, окончательное разрушение конструкции;  $t_{ост}$  – остаточный ресурс конструкции с несплошностью.

**Figure 3.** The growth of metal discontinuity (crack) during operation:  $a_0$  – size of the detected discontinuity;  $[a]$  – permissible discontinuity size during operation;  $a_{kp}$  – the critical size of discontinuity, upon reaching which rapid, final destruction of the structure occurs;  $t_{ост}$  – residual life of a structure with a discontinuity

При циклическом нагружении зависимость между скоростью роста трещины и размахом коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K_1$  имеет вид уравнения (2)<sup>7</sup> [7]:

$$\frac{da}{dN} = C_0 \left( \frac{\Delta K_1}{\sqrt{1-R}} \right)^m, \quad (2)$$

где  $N$  – число циклов нагружения;

$C_0$  и  $m$  – константы материала;

$R$  – коэффициент асимметрии цикла.

Влияние коррозионной среды и температуры испытания (эксплуатации) может быть учтено с помощью коэффициентов  $C_0$  и  $m$ . Коэффициент асимметрии цикла определяется максимальным  $K_{max}$  и минимальным  $K_{min}$  значениями коэффициентов интенсивности напряжения в цикле  $R = K_{min}/K_{max}$ .

Для расчета  $K_{max}$  и  $K_{min}$  выделяют циклы нагружения, как при расчете на сопротивление усталости, и для каждого  $i$ -го цикла определяют  $(\sigma_{np})_{maxi}$  и  $(\sigma_{np})_{mini}$ .

Значения  $(\sigma_{np})_{maxi}$  и  $(\sigma_{np})_{mini}$  определяют с учетом остаточных напряжений, действующих по направлениям главных напряжений от усилий. При этом остаточные напряжения сжатия не учитывают.

Напряжения  $|(\sigma_{np})_{maxi}|$  в расчете кинетики несплошностей принимают равными не более  $R_{p0,2}$  при температуре 20°C при сохранении размаха напряжений. Каждый  $i$ -й цикл из этой группы циклов нагружения характеризуется максимальным  $K_{maxi}$  и минимальным  $K_{mini}$  для заданной точки контура.

Коэффициент асимметрии  $i$ -го цикла  $R_i$  ( $R_i > 1$ ) определяется по формуле (3):

$$R_i = \frac{(\sigma_{np})_{mini}}{(\sigma_{np})_{maxi}} = \frac{K_{min_i}}{K_{max_i}}. \quad (3)$$

Для циклов нагружения, которые характеризуются значениями  $R < -1$ , в расчете принимают  $R = -1$ .

Для  $i$ -го цикла нагружения рост несплошности от значения  $a_{i-1}$  до значения  $a_i$  рассчитывают по уравнению (4):

$$N_i = \frac{1}{C_0} \int_{a_{i-1}}^{a_i} (1-R_i)^{\frac{m}{2}} \Delta K_i^{-m} da, \quad (4)$$

где  $a$ , м – размер несплошности;  
 $\Delta K_i$ , МПа·м<sup>1/2</sup>.

В таблице 1 приведены значения  $C_0$ ,  $m$  для нескольких классов стали при  $da/dN \leq 10^{-5}$  м/цикл,  $R = 0$ ,  $T \leq 350^\circ\text{C}$  [7].

**Таблица 1.** Константы для расчета кинетики трещин  
**Table 1.** Constants for calculating fracture kinetics

Класс стали	$m$	$C_0$
Легированные стали типа 10ГН2МФА, 15Х2НМФА и их сварные соединения	2,6	$5,8 \cdot 10^{-11}$
Нелегированные стали типа 22К и их сварные соединения	2,9	$3 \cdot 10^{-11}$
Коррозийно-стойкие austenитные стали типа 0Х18Н10Т	2,9	4,02

При расчете роста несплошности в деталях из легированных сталей типа 15Х2НМФА и их сварных соединений с учетом контакта несплошности с обессоленной водной средой при температуре до 300°C значения констант  $C_0$  и  $m$  выбирают по диаграмме усталостного разрушения, приведенной в нормативных документах, или методике М-02-91<sup>7</sup>.

Если для подобного расчета для сталей типа 15Х2НМФА использовать константы из таблицы 1, значение коэффициента  $C_0$  необходимо увеличить в 10 раз.

Для хромоникелевых коррозионностойких сталей типа 08Х18Н10Т, их сварных соединений и наплавок в одной рабочей среде значение коэффициента  $C_0$  (табл. 1) увеличивают в 2 раза, а при контакте несплошностей в деталях из тех же сталей с обессоленной водной средой кипящих реакторов (водой, паром, пароводяной смесью) коэффициент  $C_0$  увеличивают в 10 раз. Допускается использование экспериментально обоснованных диаграмм усталостного разрушения в рабочей среде заданных параметров с учетом механических факторов  $R$  и  $\Delta K$ .

Влияние нейтронного облучения при расчете несплошностей не учитывается. Уравнение (4) применимо при  $\Delta K_i \geq (10^{-11}/C_0)^{1/m}$ .

Как следует из уравнения (2), остаточный ресурс конструкции с трещиной определяется скоростью роста трещины, а также критическим размером трещины  $a_{kp}$ : чем больше  $a_{kp}$ , тем больше остаточный ресурс.

<sup>7</sup> Методика определения допустимых размеров несплошностей во время эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС (М-02-91). Москва, 1991.

Оценим изменение скорости роста трещины при появлении остаточных напряжений (ОН) на уровне предела текучести  $OH = R_{p0,2}$  по сравнению, когда остаточные напряжения равны нулю:  $OH = 0$ .

Из уравнения (4) следует, что отношение скорости роста трещины при  $OH=R_{p0,2}$  к скорости роста трещины при  $OH=0$  равно – уравнение (5):

$$\frac{\left(\frac{da}{dN}\right)_{OH=R_{p0,2}}}{\left(\frac{da}{dN}\right)_{OH=0}} = \frac{\left\{1/\left(1-R_{OH=R_{p0,2}}\right)\right\}^{m/2}}{\left\{1/\left(1-R_{OH=0}\right)\right\}^{m/2}} = 28,5 \quad (5)$$

Таким образом, скорость роста трещины при остаточных напряжениях, равных пределу текучести, по сравнению, когда эти напряжения равны нулю, увеличивается в 28,2 раза.

При вычислениях учили, что коэффициент  $m = 2,9$  при  $OH=0$  цикл будет пульсирующим, то есть  $R=0$ , а при  $OH = R_{p0,2}$  коэффициент  $R$  принимали равным 0,9.

Если коэффициент асимметрии цикла принять 0,8, то при тех же остальных значениях, скорость роста трещины увеличится также значительно – в 10,3 раза.

Влияние коррозионной среды видно в уравнении (6), если в уравнение (5) ввести коэффициенты, отвечающие за влияние коррозионной среды:

$$\frac{\left(\frac{da}{dN}\right)_{OH=R_{p0,2}}}{\left(\frac{da}{dN}\right)_{OH=0}} = \left(C_{kopp}/C_0\right) \frac{\left\{1/\left(1-R_{OH=R_{p0,2}}\right)\right\}^{m/2}}{\left\{1/\left(1-R_{OH=0}\right)\right\}^{m/2}}. \quad (6)$$

Если принять  $(C_{kopp}/C_0) = 10$  (влияние среды описано выше), то при  $R = 0,9$  скорость увеличится в 282 раза, а при  $R = 0,8$  – в 103 раза.

### Влияние остаточных напряжений на хрупкое разрушение

Хрупкое разрушение – это разрушение детали без заметных пластических деформаций. Если конструкция сделана из пластичного материала (а таковым являются практически все конструкционные стали, используемые в атомной энергетике), то хрупкое разрушение может реализоваться только при напряжениях ниже предела текучести. В работах [7,8] разрушающие напряжения  $\sigma_{kp}$ , при которых реализуются хрупкие разрушения, оцениваются величинами, удовлетворяющими условию (7):

$$\sigma_{kp} \leq 0,8R_{p0,2} \quad (7)$$

Такое резкое снижение прочности конструкции возможно только при следующих условиях:

- 1) наличие в ней дефекта сплошности (трещина и т.п.);
- 2) реализация в конструкции таких условий, при которых она становится чувствительной к дефектам сплошности.

На чувствительность к несплошностям конструкционных сталей влияет большое число факторов: технология изготовления, температура эксплуатации, способ нагружения, размеры конструкции, форма и размеры несплошности, окружающая среда, ионизирующее излучение и др. На рисунке 4 представлены результаты испытаний механических свойств стали 22К размером 20x50 мм с боковыми надрезами глубиной 2,5 мм и шириной 0,2 мм в зависимости от температуры испытания  $T$  [8].

В области температуры  $T_{kp1}$  происходит резкое изменение доли волокнистого излома  $F_0$  при испытаниях ударной вязкости. При температуре  $T_{kp2}$  резко меняется вязкость разрушения  $K_{lc}$  и разрушающее напряжение  $\sigma_{kp}$ . Область слева от  $T_{kp2}$  называют областью хрупкого состояния стали, область справа от  $T_{kp1}$  – областью вязких состояний, а температура  $T_{kp1}$  и  $T_{kp2}$  – критическими температурами хрупкости.

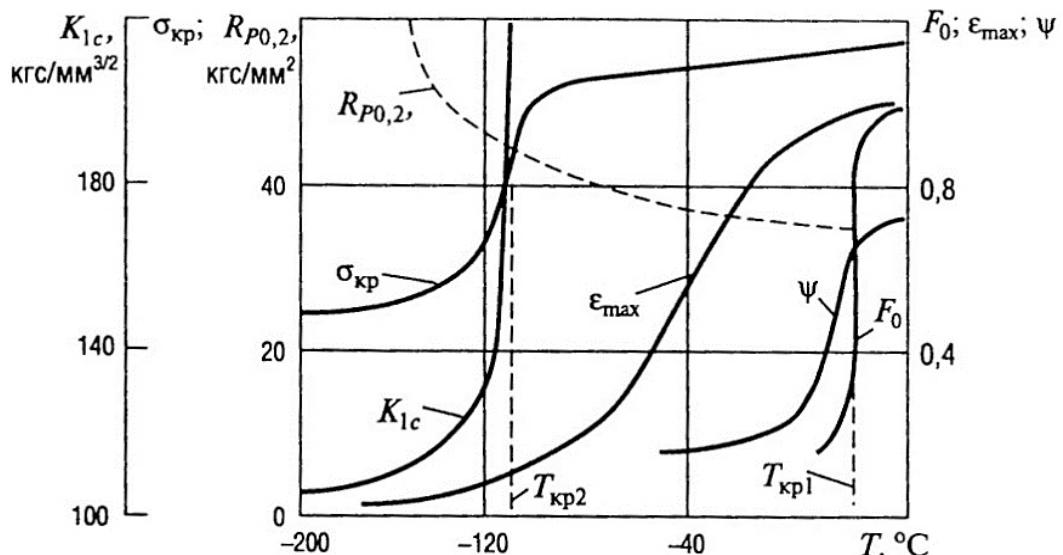


Рисунок 4. Температурные зависимости механических характеристик  
Figure 4. Temperature dependences of mechanical characteristics

Повышение чувствительности сталей к несплошностям обусловлено уменьшением запаса пластичности и температуры эксплуатации, увеличением размеров конструкции, размеров несплошности, коррозионной агрессивности среды (для поверхностных несплошностей), скорости приложения нагрузки, напряжений, времени эксплуатации; радиационным облучением (например, нейtronами с энергией  $E > 0,5$  МэВ); переходом от статической к циклически повторяющейся нагрузке.

Следует подчеркнуть, что само по себе повышение чувствительности конструкции к несплошностям, переход материала конструкции в хрупкое состояние не является опасным. Опасность возникает только тогда, когда в конструкции имеются дефекты сплошности опасных размеров.

Таким образом, в случае хрупкого состояния наличие остаточных напряжений на уровне предела текучести может привести элемент конструкции к разрушению; конструкция может не иметь ресурса и разрушиться в ходе первого нагружения.

## Выводы

Выполнен анализ прочности и ресурса по критериям сопротивления зарождению трещины усталости, сопротивления хрупкому разрушению и трещиностойкости при отсутствии и наличии коррозионной среды. Во всех случаях определяли влияние остаточных напряжений на уровне предела текучести путем сравнения со случаем, когда остаточные напряжения равны нулю. Показано существенное влияние остаточных напряжений на прочность и ресурс, требующее введения в обязательном порядке контроля уровня остаточных напряжений в элементах трубопроводов и оборудования, и их снижения, если это влияние существенное.

При этом показано:

1. Среднее напряжение цикла  $\sigma_m$  может оказывать существенное влияние на разрушающую амплитуду

напряжения  $\sigma_a$  и число циклов до разрушения  $N_p$ . Так при  $\sigma_m = R_{p0,2}$ , разрушающая амплитуда уменьшается на 26%, а число циклов до разрушения уменьшится в 12 раз по сравнению с исходным состоянием при нулевом среднем напряжении цикла.

2. Как видно из диаграммы Хея-Зодерберга (рисунок 1) при приближении среднего напряжения цикла к пределу прочности, амплитуда разрушающего напряжения стремится к нулю.

3. Скорость роста трещины при остаточных напряжениях, равных пределу текучести, по сравнению со случаем, когда остаточные напряжения равны нулю, увеличивается в 28 раз. Если коэффициент асимметрии цикла принять 0,8, то при тех же остаточных значениях, скорость роста трещины увеличится в 10,3 раза.

4. Учет влияния коррозионной среды показывает, что указанная выше скорость роста дефектов может увеличиться соответственно в 280 раз, и в 103 раза.

5. В случае хрупкого состояния наличие остаточных напряжений на уровне предела текучести может привести элемент конструкции к разрушению; конструкция может не иметь ресурса и разрушиться в ходе первого нагружения.

6. Существенное влияние остаточных напряжений на прочность и ресурс требует рассмотреть возможность введения в порядок контроля технического состояния трубопроводов определение уровня остаточных напряжений в элементах трубопроводов и оборудования.

7. Для оценки фактического уровня остаточных напряжений необходимо использовать систему неразрушающего контроля, основанную на использовании метода акустоупругости, позволяющей определять фактические значения остаточных напряжений с установленными характеристиками погрешности измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с. Режим доступа: <http://vibro.donntu.ru/books/700.html?lang=ru> (дата обращения 10.01.2024).  
Nikitina N.E. Acoustoelasticity. Practical application experience. Nizhny Novgorod: TALAM, 2005. 208 p. (In Russ.) Available at: <http://vibro.donntu.ru/books/700.html?lang=ru> (accessed: 10.01.2024).
2. Камышев А.В., Миронов Н.А., Пасманик Л.А., Модестов В.С., Пивков А.В. Метод расчетно-инструментальной оценки напряженно-деформированного состояния элементов трубопроводов с использованием силовых граничных условий. *Контроль. Диагностика.* 2015;9:45–51. <https://doi.org/10.14489/td.2015.09.pp.045-051>  
Kamyshev A.V., Mironov N.A., Pasmanik L.A., Modestov V.S., Pivkov A.V. Calculated-instrumental method for estimation of stress-strain state of the elements of pipeline systems using the power of boundary conditions. *Control. Diagnostics.* 2015;9:45–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.14489/td.2015.09.pp.045-051>
3. Камышев А.В., Пасманик Л.А., Смирнов В.А., Модестов В.С., Пивков А.В. Расчетно-инструментальный метод оценки напряженно-деформированного состояния с определением силовых граничных условий методом акустоупругости и его применение для анализа повреждаемости сварного соединения №111 парогенераторов АЭС с РУ ВВЭР. *Тяжелое машиностроение.* 2016;1-2:11-18. Режим доступа: <https://cniitmash.com/tm/arxiv/2016/01-02-2016.html> (дата обращения 10.01.2024).  
Kamyshev A.V., Pasmanik L.A., Smirnov V.A., Modestov V.S., Pivkov A.V. Calculated-instrumental method for estimation of the stress-strain state with definition of force boundary conditions by the acoustoelasticity method and its application for analysis of damage to weld. *Russian journal of heavy machinery.* 2016;1-2:11-18. (In Russ.) Available at: <https://cniitmash.com/tm/arxiv/2016/01-02-2016.html> (accessed: 10.01.2024).

4. Махутов Н.А., Пасманик Л.А., Камышев А.В. Метод акустоупругости для оценки напряженно-деформированного состояния и безопасности элементов трубопроводных систем. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2018;1:19–29. Режим доступа: <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J1640152X> (дата обращения 10.01.2024).

Makhutov N.A., Pasmanik L.A., Kamyshev A.V. Application of the acoustoelasticity method for estimation of stress-strain state and safety of the components of pipeline systems. Safety and emergencies problems. 2018;1:19–29. (In Russ.) Available at: <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J1640152X> (accessed: 10.01.2024).

5. Камышев А.В., Данилов А.В., Пасманик Л.А. [и др.] Применение метода акустоупругости для определения остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях. В *мире неразрушающего контроля*. 2020;23(3):10–17. <https://doi.org/10.12737/1609-3178-2020-10-17>

Kamyshev A.V., Danilov A.V., Pasmanik L.A. [et. al.] Apply the Acoustoelastic Method to Determine Residual Stresses in Welded Joints. *NDT World*. 2020;23(3):10–17. <https://doi.org/10.12737/1609-3178-2020-10-17>

6. Камышев А.В., Пасманик Л.А., Ровинский В.Д., Гетман А.Ф., Губа С.В. Способ определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов (варианты). Патент RU 2711082 C1 Российская Федерация, МПК G01N 29/07 (2006.01). № 2019110165/28. Заявлен: 05.04.2019. Опубликован: 15.01.2020. 6 с. Режим доступа: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1\\_20200115](https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115) (дата обращения 10.01.2024).

Kamyshev A.V. Pasmanik L.A., Rovinskij V.D., Getman A.F., Guba S.V. Method for determination of residual stresses in weld metal welded joints of pipelines (versions). Patent Russia RU 2711082 C1: 15.01.2020. (In Russ.) Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1\\_20200115](https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115) (accessed: 10.01.2024).

7. Гетман А.Ф. Теории и технологии обеспечения прочности технических объектов. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2019. 629 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01010147510> (дата обращения 10.01.2024).

Getman A.F. Theories and technologies for ensuring the strength of technical objects. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2019. 629. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01010147510> (accessed: 10.01.2024).

8. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. Москва: Машиностроение, 1981. 272 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001044626> (дата обращения: 10.01.2024).

Makhutov N.A. Deformation criteria of destruction and calculation of structural elements for strength. Moscow: Mashinostroenie 1981. 272 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001044626> (accessed: 10.01.2024).

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Потапов В.В.** – общее руководство и планирование исследования, подготовка и согласование заключения;

**Кузьмин Д.А.** – разработка теории, изучение тематического материала, систематизация информации, проведение исследований, написание текста статьи, анализ результатов;

**Гетман А.Ф.** – постановка задач, определение методики исследования, написание текста статьи;

**Кузьмичевский А.Ю.** – разработка теории, изучение тематического материала, систематизация информации, проведение научных исследований, написание текста статьи, анализ результатов;

**Камышев А.В.** – предоставление материалов авторских исследований по теме, анализ достоверности и сходимости результатов;

**Пасманик Л.А.** – предоставление материалов авторских исследований по теме, анализ достоверности и сходимости результатов;

**Ровинский В.Д.** – общее руководство и планирование исследования, подготовка и согласование заключения.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Без дополнительного финансирования.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Владимир Вячеславович Потапов**, кандидат технических наук, заместитель директора ВНИИАЭС-НТП, директор отделения управления ресурсом АЭС, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация. e-mail: VVPotapov@vniiaes.ru

**Дмитрий Александрович Кузьмин**, кандидат технических наук, руководитель департамента прочностной надежности оборудования и трубопроводов АЭС, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2618-9724>

e-mail: DAKuzmin@vniiaes.ru

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Potapov V.V.** – general management and planning of the study, preparation and approval of the conclusion;

**Kuzmin D.A.** – development of theory, study of thematic material, systematization of information, conducting scientific research, writing the text of the article, analyzing the results;

**Getman A. F.** – setting the objectives, defining the research methodology, writing the text of the article;

**Kuzmichevskiy A.Yu.** – development of theory, study of thematic material, systematization of information, conducting scientific research, writing the text of the article, analyzing the results;

**Kamyshev A.V.** – provision of author's research materials on the problem under study, analysis of reliability and convergence of results;

**Pasmanik L.A.** – provision of author's research materials on the problem under study, analysis of reliability and convergence of results;

**Rovinskiy V.D.** – general management and planning of the study, preparation and approval of the conclusion.

#### FUNDING:

No additional funding.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Vladimir V. Potapov**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of VNIIAES-STD, Director of the Department of NPP Resource Management, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation. e-mail: VVPotapov@vniiaes.ru

**Dmitry A. Kuzmin** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Strength Reliability of NPP Equipment and Pipelines, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2618-9724>

e-mail: DAKuzmin@vniiaes.ru

**Александр Федорович Гетман**, доктор технических наук, профессор, руководитель проекта, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация.  
e-mail: AFGetman@vniiaes.ru

**Александр Юрьевич Кузьмичевский**, кандидат технических наук, руководитель направления по риск-анализу технического состояния оборудования и трубопроводов АЭС, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0285-0351>

e-mail: AYKuzmichevskiy@vniiaes.ru

**Аркадий Вадимович Камышев**, кандидат технических наук, начальник отдела новой техники, ООО «ИНКОТЕС», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.  
e-mail: kamyshev@encotes.ru

**Лев Абрамович Пасманик**, заместитель генерального директора по развитию, ООО «ИНКОТЕС», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.  
e-mail: pla@encotes.ru

**Виктор Донатович Ровинский**, генеральный директор, ООО «ИНКОТЕС», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.  
e-mail: info@encotes.ru

**Alexander F. Getman**, Dr. Sci. (Engn.), Professor, Project Manager, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation.  
e-mail: AFGetman@vniiaes.ru

**Alexander Yu. Kuzmichevskiy**, Cand. Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Eng.), Head of Risk Analysis of Technical Condition of NPP Equipment and Pipelines, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0285-0351>

e-mail: AYKuzmichevskiy@vniiaes.ru

**Arkady V. Kamyshev**, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of New Technology, ENCOTES LLC, Nizhniy Novgorod, Russian Federation.  
e-mail: kamyshev@encotes.ru

**Lev A. Pasmanik**, Deputy General Director for Development, ENCOTES LLC, Nizhniy Novgorod, Russian Federation.  
e-mail: pla@encotes.ru

**Viktor D. Rovinskiy**, General Director, ENCOTES LLC, Nizhniy Novgorod, Russian Federation.  
e-mail: info@encotes.ru

Поступила в редакцию 12.01.2024

После доработки 01.03.2024

Принята к публикации 05.03.2024

Received 12.01.2024

Revision 01.03.2024

Accepted 05.03.2024