

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕФЕКТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.С. Миленин, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, Н.И. Пивторак

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Применительно к сварным трубопроводным элементам и сосудам давления, эксплуатируемый при повышенных температурах, предложена численная методика анализа остаточной статической прочности и работоспособности с учетом обнаруженных при технической диагностике дефектов коррозионно-эрозионной потери металла. Для анализа неоднородного напряженно-деформированного состояния в области геометрического концентратора наряду с общепринятыми подходами статистической механики, заключающимися в оценке вероятности разрушения с помощью интегрирования поля напряжений в рамках распределения Вейбулла, был предложен подход аналогичного рассмотрения поля интенсивности пластических деформаций. Это позволяет корректно учитывать кинетику совместного развития необратимых деформаций мгновенной пластичности и ползучести, которая определяет предельное состояние дефектной конструкции под действием конкретной системы эксплуатационного температурно-силового воздействия. Данная методология была реализована на основе комплекса конечно-элементных моделей прогнозирования совместного развития напряженно-деформированного состояния и докритического повреждения трубопроводных элементов с поверхностными дефектами потери металла. Для адекватного количественного прогнозирования вероятности разрушения дефектных трубопроводов из различных материалов были получены значения параметров Вейбулла в зависимости от свойств материала и температуры. Получены эквивалентные диаграммы допустимости дефекта локального утонения стенки трубопроводного элемента при различных условиях эксплуатации. Показано соответствие предложенных методик требованиям актуальных нормативных документов. Библиогр. 20, рис. 13.

Ключевые слова: трубопроводный элемент, коррозионно-эрозионный дефект, статическая прочность, вязкое разрушение, вероятность разрушения

Одним из этапов технической диагностики фактического состояния ответственных трубопроводных элементов и сосудов давления является аналитическая оценка их остаточной прочности и работоспособности с учетом обнаруженных дефектов. В случае если рассматриваемый объект эксплуатируется при высоких температурах, необходимо принимать во внимание склонность используемых материалов к высокотемпературной деградации как при расчете их несущей способности, так и при оценке остаточного ресурса. Например, применительно к трубопроводам тепловых электростанций, в случае транспорта жидкостей-теплоносителей, температура которых может достигать 450...580 °С (а согласно новейшим зарубежным проектам – до 700 °С), прочность трубопровода существенно снижается, особенно при наличии локальных концентраторов напряжений (геометрических или обусловленных приобретенной дефектностью). Кроме того, известно, что фактором, ограничивающим ресурс технологических трубопроводов при высокотемпературной эксплуатации, является интенсивное развитие деформаций ползучести, которая приводит к зарождению и развитию докритического повреждения материала и дальнейшему формированию макроскопических дефектов [1]. Поэтому вопро-

сы анализа состояния и оценки остаточного ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводных элементов (ТЭ) в условиях высокотемпературной нагрузки связано с необходимостью прогнозирования докритического повреждения материала и формулировки соответствующих критериев предельного состояния.

Эта задача существенно усложняется при наличии в металле трубопровода дефектов несплошности, в частности, трехмерных коррозионно-эрозионных утонений, вызывающих формирование пространственно неоднородного поля напряжений в стенке конструкции. В таком случае использование упрощенных методик инженерной механики может давать слишком консервативные результаты расчетов прочности, поэтому рациональным является конечно-элементное описание совместного развития напряженно-деформированного состояния (НДС) и докритического повреждения материала вплоть до достижения предельного состояния. Для этого необходима разработка соответствующих моделей поведения упруго-пластической среды, учитывающих различные типы деформирования (упругого, мгновенной пластичности, ползучести, обусловленного структурными превращениями и зарождением микронесплошности материала при докритическом повреждении)

и неравномерное несущее сечение конструкции в процессе разрушения. Кроме того, использование такого подхода позволяет минимально схематизировать реальную геометрию конструкции, в том числе, учитывать наличие локальных коррозионно-эрозионных утонений стенки трубы, обнаруженных во время диагностики ее состояния.

К основным механизмам зарождения несплошности металлов технологических трубопроводов высокого давления, эксплуатируемых при высоких температурах, является вязкое разрушение, которое характеризуется зарождением и развитием пористости материала при определенном уровне накопленных пластических деформаций [2]. Предельное развитие такого типа разрушения в зависимости от величины накопленных необратимых деформаций ползучести определяет остаточный ресурс трубопровода в зависимости от его текущего состояния и условий эксплуатации. Максимальное время до наступления предельного состояния трубопровода может служить характеристикой степени эксплуатационного повреждения типа коррозионно-эрозионных потерь металла. Однако неравномерность распределения напряжений и различная склонность металла к разрушению при одинаковых условиях внешней нагрузки требует использования консервативных предположений, в частности, коэффициентов запаса по разным входным данным. Альтернативным подходом является применение интегральных характеристик склонности конструкции к разрушению, в частности, вероятностный анализ на основе статистики Вейбулла [3]. Но классические модели статистической теории прочности Вейбулла, предусматривающие зависимость вероятности разрушения от величины напряжений в материале, не применимы для описания высокотемпературного нагружения, так как развитие деформаций ползучести не сопровождается соответствующим повышением напряжений. Поэтому необходимо создание альтернативных подходов, рассматривающих пластическую деформацию, как меру склонности к разрушению. Для адекватных количественных оценок вероятности разрушения элементов технологических трубопроводов необходимо определить соответствующие параметры статистической теории разрушения как функции свойств материала и температуры.

Целью настоящей работы является построение комплексной конечно-элементной модели развития НДС технологических ТЭ с обнаруженными коррозионно-эрозионными утонениями стенки, реализация методики статистического анализа НДС таких конструкций для оценки остаточной прочности и определения характерных особен-

ностей влияния условий эксплуатации и степени коррозионно-эрозионного износа на склонность трубопровода к разрушению.

С практической точки зрения, одним из важных механизмов разрушения сварных ТЭ и сосудов давления в условиях эксплуатации при повышенных температурах и существенной силовой нагрузке (в частности, внутренним давлением), когда реализуются условия развитого пластического течения по механизму ползучести, является вязкое разрушение. Так, в процессе накопления необратимых деформаций мгновенной пластичности ϵ^{mp} и ползучести ϵ^c может быть достигнута предельная деформационная способность материала, что приводит к транскристаллитному разрушению металла по механизму порообразования. Согласно гипотезе Леметра [4], зарождение и дальнейшее развитие докритического повреждения такого типа зависит не от механизма пластического деформирования, а от текущей суммарной величины деформации, то есть для рассматриваемого случая, от $\epsilon^p = (\epsilon^{mp} + \epsilon^c)$. Поэтому моделирование НДС конструкции в конкретных условиях эксплуатации должно учитывать как процесс сварки для прогнозирования остаточного состояния после монтажа, так и особенности общего развития необратимых деформаций мгновенной пластичности и ползучести совместно с неравномерно распределенным докритическим повреждением металла в процессе эксплуатации данного ТЭ. Фактическое температурное поле в сечении дефектного трубопровода с учетом разницы между температурами окружающей среды и транспортируемого продукта определялось на основе численного решения нестационарного уравнения теплопроводности [5]. Компоненты тензора деформаций ϵ_{ij} ($i, j = r, \beta, z$, рис. 1) в рассматриваемом случае представляются в виде суперпозиции следующих компонентов [6]:

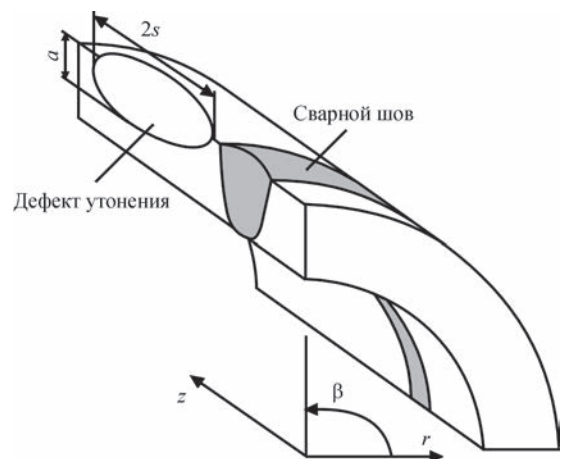


Рис. 1. Схема трубопроводного элемента с дефектом локального утонения стенки в области кольцевого сварного шва

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^{mp} + d\varepsilon_{ij}^c + \delta_{ij} (d\varepsilon_T + df/3), \quad (1)$$

где $d\varepsilon_{ij}^e$, $d\varepsilon_{ij}^{mp}$, $d\varepsilon_{ij}^c$, $d\varepsilon_{ij}^T$ – компоненты приращения тензора деформаций, которые определяются упругим механизмом деформирования, мгновенной пластичностью, ползучестью и температурным расширением, соответственно; f – объемная концентрация равномерно распределенных пор вязкого разрушения; δ_{ij} – символ Кронекера, т. е. $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$, если $i \neq j$.

Текущее приращение деформаций ползучести $d\varepsilon_{ij}^c$ за промежуток времени dt , фигурирующий в (1), может быть выражено с помощью функции ползучести $\Omega = \Omega(\sigma_i, T)$ следующим образом [7]:

$$d\varepsilon_{ij}^c = \Omega(\sigma_i, T) (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) dt, \quad (2)$$

где T – текущая температура материала; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; σ_i – интенсивность напряжений; σ – средние напряжения.

На разных этапах деформирования степень ползучести определяется или процессом температурной активации, или уровнем механических напряжений. Поэтому $\Omega(\sigma_i, T)$ представляет собой произведение температурной составляющей $\Omega_1(T) = A \exp [G_c/(T+273)]$ и функции напряжений $\Omega_2(\sigma_i) = \sigma_i^n$, где n, A, G_c – константы [8].

Решение общей задачи напряженно-деформированного и поврежденного состояния материала сварного трубопровода в условиях высокотемпературной эксплуатации было реализовано путем численного прослеживания деформаций термопластичности и ползучести в рамках конечно-элементной краевой задачи. В этом случае, приращение общих деформаций в каждом конкретном конечном элементе (КЭ) согласно (1) может быть представлено следующим образом [9]:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} = & \left[\Psi + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) + \\ & + \delta_{ij} (K\sigma + \Delta\varepsilon_T + \Delta f/3) - \\ & - \left[\frac{1}{2G} + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma)^* - (K\sigma)^*, \end{aligned} \quad (3)$$

где $K = \frac{1-2\nu}{E}$ – модуль объемного сжатия; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига; символ «*» относит переменную к предыдущему шагу прослеживания; Ψ – функция состояния материала, в рассматриваемом случае определяется условием пластического течения.

В (3) фигурирует объемная концентрация равномерно распределенных пор f , наличие которой отличает разработанные модели от классических

методов анализа термомодеформированного состояния сплошной среды. Наличие докритической поврежденности не только имеет аддитивную составляющую в тензоре деформаций, но и меняет поверхность текучести материала Φ , для математического описания которой нашли широкое применение подходы Гурсона, Твергаарда и Нидлмана (так называемая ГТН-модель) [10]:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2 - (q_3 f^*)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_T} \right) - 1, \quad (4)$$

где $q_1 = 1,5, q_2 = 1, q_3 = 1,5$ – константы; f^* – эквивалентная концентрация пор; σ_T – предел текучести материала.

Эквивалентная концентрация пор f^* в (4), учитывающая взаимодействие между отдельными несплошностями, оценивается на основе следующих соотношений:

$$f^* = \begin{cases} f, & \text{если } f \leq f_c; \\ f_c + \frac{f_u - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c), & \text{если } f > f_c, \end{cases} \quad (5)$$

где f_c – критическая концентрация несплошностей, до которой отдельные поры не взаимодействуют, принято считать $f_c = 0,15$; f_u – концентрация пор, при которой происходит разрушение конечного элемента; $f_u^* = 1/q_1$.

Для корректного описания предельного состояния рассматриваемых конструкций необходимо учитывать деформационное упрочнение металла в условиях статической эксплуатационной нагрузки, а именно, изменение его предела текучести согласно следующему соотношению [11]:

$$\sigma_T = \sigma_T^0 \left\{ 1 + c_1 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) + c_2 \left[\ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]^2 \right\} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right)^m \right], \quad (6)$$

где c_1, c_2, m – константы; точкой над переменной обозначено дифференцирование по времени.

Для оценки зарождения пор вязкого разрушения при пластическом течении материала в неизотермическом случае использовался деформационный критерий, согласно которому в некотором объеме металла появляется начальная пористость с концентрацией f_0 при выполнении следующего условия:

$$\chi_k = \int \frac{d\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c(T)} > 1, \quad (7)$$

где $d\varepsilon_i^p = \sqrt{2/3} \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}$; $\varepsilon_c(T)$ – критическая величина пластических деформаций.

Дальнейший рост концентрации пор вязкого разрушения в процессе пластического деформи-

рования металла подчиняется закону Райса–Трейси, а именно [12]:

$$df = \begin{cases} 1,28 \exp\left(\frac{3}{2} r_{st}\right) d\varepsilon_i^p, & \text{если } r_{st} = \frac{\sigma}{\sigma_i} > 1; \\ 1,28 (r_{st})^{1/4} \exp\left(\frac{3}{2} r_{st}\right) d\varepsilon_i^p, & \text{если } \frac{1}{3} \leq r_{st} \leq 1. \end{cases} \quad (8)$$

Решение краевой задачи нестационарной термопластичности проводилось путем прослеживания общего развития упруго-пластических деформаций, докритического и критического разрушения по вязкому механизму на основе конечно-элементной пространственной модели. Реализация численного прослеживания связана с нелинейностью в физических процессах пластического деформирования и разрушения. Для формального решения нелинейных задач были реализованы соответствующие итерационные процессы, которые позволяют находить состояние конечного элемента, соответствующего условию равновесия. Был использован подход, предложенный В.И. Махненко, и заключающийся в рассмотрении функции состояния материала Ψ , удовлетворяющей следующим условиям на поверхности текучести [13]:

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \\ &= \sigma_\tau \sqrt{1 + (q_3 f^*)^2 - 2q_1 f^* \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_\tau}\right)}; \\ \Psi &> \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s; \end{aligned} \quad (9)$$

состояние $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимо.

Реализация условий (9) происходит на каждом шаге прослеживания итерационным методом с учетом соответствующей зависимости $\sigma_s(T, \varepsilon^p)$. Компоненты тензора напряжений удовлетворяют уравнениям статики для внутренних КЭ и граничным условиям – для поверхностных. В свою очередь, компоненты вектора перемещения $\Delta U = (\Delta U, \Delta V, \Delta W)$ удовлетворяют соответствующим условиям на границе. Разрешающая система уравнений в переменных вектора приращения перемещений в узлах КЭ на каждом шаге прослеживания и Ψ -итераций определяется минимизацией следующего функционала:

$$\Delta_1 = -\frac{1}{2} \sum_V (\sigma_{ij} + J_{ij}) \Delta \varepsilon_{ij} V_{m,n,r} + \sum_{S_p} P_i \Delta U_i \Delta S_P^{m,n,r}, \quad (10)$$

где \sum_V – оператор суммы по внутренним КЭ; $\sum_{S_p}^V$ – оператор суммы по поверхностным КЭ, на которых заданы компоненты силового вектора P_i .

В качестве критерия зарождения макроскопического разрушения использовалась условие хрупко-вязкого разрушения, которое заключается в выполнении одного из трех соотношений [14]:

$$\begin{aligned} \left(\Psi - \frac{1}{2G}\right)_{KP} &\geq \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1,5\sigma_i} \approx \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1,5\sigma_s(\varepsilon_p, T)}; \\ f^* \rightarrow f_d^* &= \frac{1}{q_1} \exp\left(-\frac{3q_2\sigma}{2\sigma_\tau}\right); \\ \frac{\sigma_1}{1 - 2f/3} &> S_K, \end{aligned} \quad (11)$$

где S_K – напряжение микроскола; индекс «*» относит переменную к предыдущему шагу прослеживания; ε_f – предельная деформационная способность материала; σ_1 – главные напряжения, полученные при конечно-элементном анализе с учетом деформационного упрочнения материала.

Считалось, что КЭ, для которого выполняется одно из условий (11), теряет свою несущую способность, и на его месте формируется макроскопическая несплошность. Дальнейшее нагружение конструкции и развитие макроразрушения, в итоге приводит к лавинообразной потере несущей способности материала в рамках итерационного процесса (9), что можно интерпретировать, как спонтанное разрушение конструкции.

Интегральные вероятностные подходы анализа НДС ответственных конструкций с точки зрения их склонности к разрушению, зачастую, базируются на статистической теории прочности Вейбулла [15]. Она предусматривает, что вероятность инициирования повреждения p является функцией напряженного состояния и может быть выражена с помощью трехпараметрического распределения Вейбулла (σ -метод):

$$p = 1 - \exp\left[-\int_S \left(\frac{\sigma_1 - A_\sigma}{B_\sigma}\right)^{\eta_\sigma} \frac{dS}{S_0}\right], (\sigma_1 > A_\sigma), \quad (12)$$

где S – площадь сечения трубы; S_0 – константа материала, характеризующая пространственный масштаб перехода микроповреждения в макроскопический дефект; $A_\sigma, B_\sigma, \eta_\sigma$ – параметры Вейбулла.

Применимость σ -метода (12) ограничена природой докритического повреждения материала, а именно: если предельному состоянию конструкции будет предшествовать ее существенное пластическое деформирование, вероятность отказа в соответствии с (12) будет почти неизменной из-за незначительного изменения напряжений, тогда как склонность к разрушению будет расти по мере накопления деформаций. Например, известно, что развитие деформаций ползучести в трубах при высокотемпературной эксплуатации приводит к ини-

цированию и накоплению докритической пористости, но при этом не наблюдается соответствующего увеличения напряжений. Более того, при этом имеет место релаксация напряжений определенного типа (например, остаточные напряжения в зоне сварки). Поэтому можно сделать вывод о том, что модели типа (12) применимы для конструкций, предельное состояние которых определяется хрупкими или вязко-хрупкими механизмами макроразрушения (материалы, охрупченные в результате радиационного облучения или насыщения водородом и т. д.), и некоторые из них уже нашли свое применение [16].

Так как предельное состояние трубопровода с выявленной локальной потерей металла преимущественно зависит от вязкого макроразрушения (особенно для пластичных металлов или при высокотемпературной эксплуатации), альтернативой (12) есть модель Вейбулла, основанная на анализе деформированного состояния конструкции (ε -метод):

$$p = 1 - \exp \left[- \int_S \left(\frac{\varepsilon_i - A_\varepsilon}{B_\varepsilon} \right)^{\eta_\varepsilon} \frac{dS}{S_0} \right], (\varepsilon_i > A_\varepsilon), \quad (13)$$

где ε – поле интенсивности деформаций, полученных при конечно-элементном анализе; A_ε , B_ε , η_ε – параметры Вейбулла.

Для корректной количественной вероятностной интерпретации НДС дефектного ТЭ согласно (12) или (13) значения параметров Вейбулла должны быть определены на основе серии экспериментальных испытаний или моделирования. Численное прогнозирование является более эффективным с позиции себестоимости и трудоемкости, но требует использования соответствующей методологии конечно-элементного анализа, учитывающей закономерности взаимного развития НДС и докритического повреждения в условиях существенного развития деформаций разного типа, в частности, в рамках приведенных выше моделей, которые были реализованы в виде соответствующих моделей программного пакета Weld Predictions [17, 18]. Определение параметров Вейбулла A_i , B_i , η_i ($i = \eta, \varepsilon$) необходимо для получения корректных количественных результатов вероятностной оценки статической прочности трубопроводов с локальной коррозионно-эрозивной потерей металла. Для этого некоторому состоянию напряжений (деформаций) характерной дефектной трубы должно быть поставлено в соответствие значение вероятности аварийной ситуации с последующим решением обратной задачи определения параметров Вейбулла. Так, при увеличении внутреннего давления можно выделить несколько стадий развития состояния трубопро-

вода, а именно: зарождение микроповреждения в соответствии с (7), инициирование макроразрушения согласно (11), спонтанного роста макроскопического дефекта (трещины, пластической неустойчивости). Первый этап может быть описан вероятностью разрушения $p = 0,01 \dots 0,05$, второй этап – $p = 0,90 \dots 0,95$, третий – $p \sim 1,0$. Наиболее рациональным подходом является анализ второго этапа, так как по сравнению с первым это позволяет учесть больше характеристик материала и применять менее консервативные процедуры, а по сравнению с третьим – не требует сложного рассмотрения развития макроскопического дефекта.

Для упрощения исследований был сделан ряд предположений. Так, коэффициент A_ε характеризует возможность разрушения при сравнительно низких напряжениях. Теоретически существует ненулевая вероятность инициирования разрушения при напряжениях, близких к нулю ($A_\varepsilon = 0$), но этот подход не является рациональным для решения прикладных задач. Более рациональное предположение, которое было использовано в этом исследовании, заключается в том, что вероятностный характер разрушения проявляется при напряжениях, превышающих $\sigma_{flow} = (\sigma_B + \sigma_T)/2$. Этот подход эффективен для статистического анализа сварных конструкций, но достаточно чувствителен к особенностям математического описания.

Что касается величины A_ε , то предполагалось, что для конструкционных материалов ненулевая вероятность разрушения появляется при макроскопическом пластическом деформировании, то есть $A_\varepsilon \approx 0,887\sigma_T/E$, но это значение незначительно по сравнению с интенсивностью пластической деформации в предельном состоянии конструкции, поэтому для упрощения можно считать $A_\varepsilon = 0$. Значение η_σ принимается в диапазоне 3–4, что соответствует значению η_ε около 5. Соответственно, целью анализа полей напряжений и деформаций в дефектной трубе под предельным давлением является определение параметров B_σ и B_ε распределений Вейбулла (12) и (13) в зависимости от свойств материала трубы, что позволит проводить необходимые количественные оценки вероятности разрушения трубопровода с выявленными коррозионно-эрозивными дефектами.

Так, для стальных труб была проведена серия численных экспериментов предельного состояния в зависимости от свойств материала и размера полуэллиптических поверхностных дефектов (входные данные расчетов следующие: $D \times t = 1420 \times 20$ мм, $E = 210$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 300 \dots 600$ МПа, $f_0 = 0,01$, $S_K = 1000$ МПа, $\varepsilon_c = 0,01$). Решение обратной задачи показало, что зависимости консервативных значений параметров Вейбулла B_σ и B_ε от предела

текучести σ_T трубной стали квазилинейны (рис. 2) и незначительно зависят от размера дефекта (диапазон рассматриваемых размеров дефектов $a = 3 \dots 17$ мм, $2s = 20 \dots 200$ мм, $2u = 20 \dots 200$ мм) [3]. Подобные результаты получены для алюминиевых сплавов различной прочности (рис. 3). При необходимости такие зависимости можно получить для других характеристик трубопроводных материалов (например, ε_c, f_0, E), чтобы выявить влияние свойств материала на вероятность разрушения трубопровода под действием определенной системы внешней нагрузки.

Для проверки правильности предположения о математическом выражении интегральных законов (12) и (13), а также полученных значений коэффициентов Вейбулла, были проведены статистические лабораторные исследования по одноосному нагружению алюминиевых образцов из сплава АМг6. Результаты испытаний показывают существенный разброс статической прочности образцов, но распределение соответствует функции

Вейбулла, что было проверено критерием достоверности Колмогорова–Смирнова. Как показано на рис. 4, σ -метод ($A_\sigma = 318$ МПа, $B_\sigma = 360$ МПа, $\eta_\sigma = 4,0$) хорошо коррелирует с экспериментальными данными (уровень значимости α около 0,5), тогда как ε -метод ($A_\varepsilon = 0,004$, $B_\varepsilon = 1,98$, $\eta_\varepsilon = 5,0$) характеризуется хоть и меньшим, но удовлетворительным соответствием ($\alpha = 0,05$).

Для случая высокотемпературной эксплуатации трубопроводов с выявленной дефектностью потери металла (например, эрозии) для оценки вероятности разрушения возможно использование исключительно ε -метода (13) с учетом кинетики накопления деформаций ползучести. Поскольку свойства материала и его склонность к деформации по механизму ползучести зависят от температуры, следует также ожидать зависимость коэффициентов Вейбулла от температуры. Так, для 15Х2НМФА и 10ГН2МФА, которые широко применяются для изготовления технологических трубопроводов АЭС и ТЭС на при-

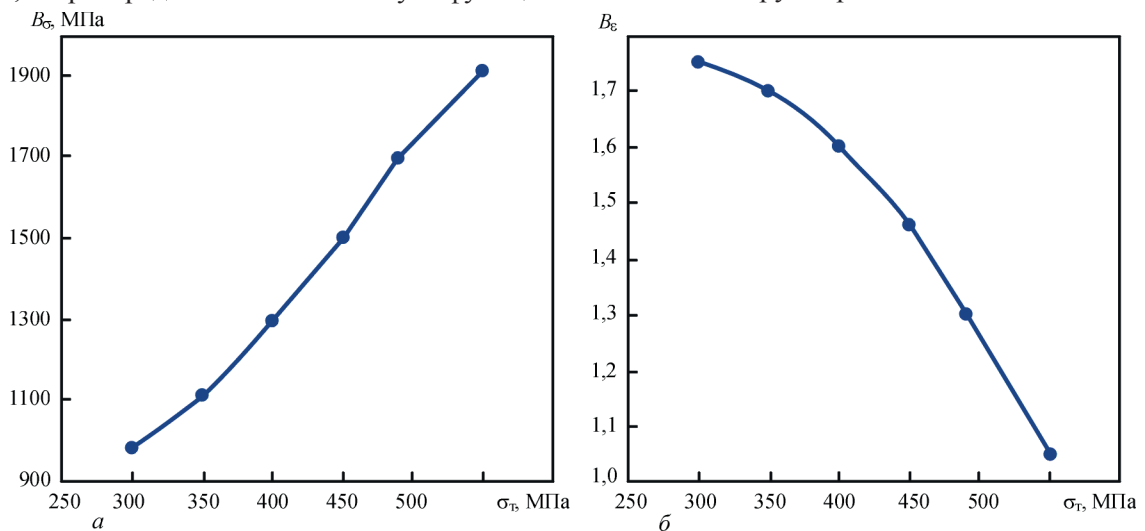


Рис. 2. Зависимости консервативных значений параметра Вейбулла B_σ (а) и B_ε (б) от предела текучести σ_T материала дефектного участка трубопровода (стали) [3]

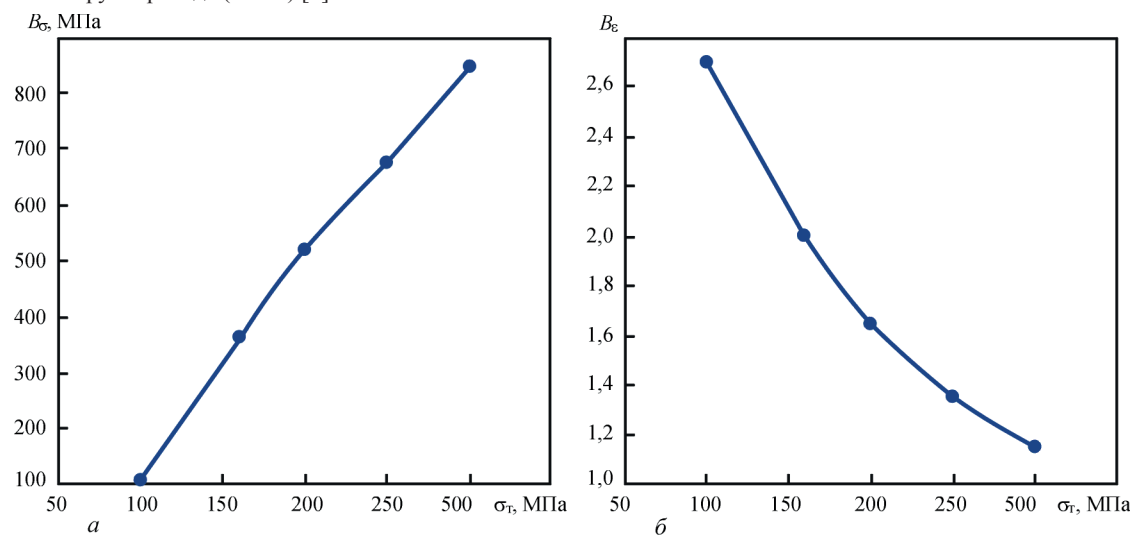


Рис. 3. Зависимости консервативных значений параметра Вейбулла B_σ (а) и B_ε (б) от предела текучести σ_T материала дефектного участка трубопровода (алюминиевые сплавы) [3]

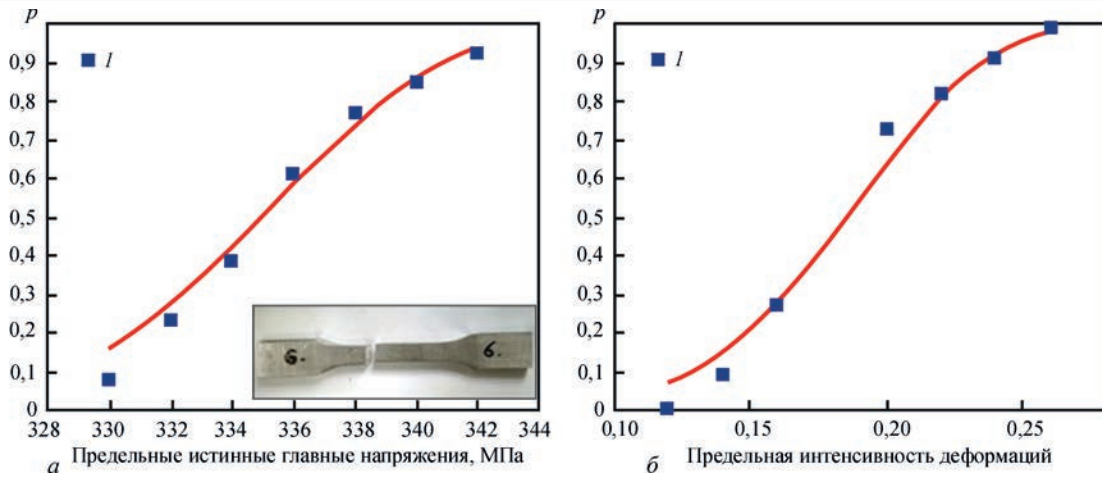


Рис. 4. Сравнение результатов статистической лабораторной проверки вероятности p разрушения алюминиевых образцов (I) в зависимости от предельных главных напряжений (a) и интенсивности деформации (b) с численным прогнозированием в соответствии с разработанными моделями (сплошная кривая)

мере элемента технологического трубопровода с полуэллиптическим дефектом утонения стенки были исследованы закономерности предельного состояния в условиях совместного действия внутреннего давления и высокой температуры. Для этого было исследовано предельное состояние ТЭ ($D \times t = 300 \times 15$ мм) с полуэллиптическим дефектом утонения на внешней поверхности трубы. Коэффициенты функций ползучести следующие [13]: 15X2НМФА – $n = 5,0$, $G_c = -101069$ °C; $A = \exp(69,40)$; 10ГН2МФА – $n = 4,2$, $G_c = -61955$ °C, $A = \exp(34,78)$. Как показали результаты решения температурной задачи, переменная толщина трубы приводит к формированию некоторого градиента температур в области дефекта, что имеет влияние на кинетику накопления деформаций высокотемпературной ползучести, особенно в случае глубокого дефекта. Так, относительно трубопровода из стали 15X2НМФА с внешним полуэллиптическим дефектом, концентратор напряжений в области геометрической аномалии вызывает формирование локально повышенных деформаций (рис. 5). При этом, чем меньше температура эксплуатации трубопровода, тем более локализованным является поле деформаций: на периферии дефекта относительно низкие эксплуатационные напряжения не приводят к существенному увеличению деформаций ползучести, тогда как в области концентратора за то же время уровень деформаций соответствует предельному состоянию, а повышение температуры от 600 до 650 °C приводит к увеличению области локально повышенных деформаций на 40 мм.

Таким образом, различная температура эксплуатации вызывает изменение в распределении накопленных деформаций ползучести в области дефекта утонения стенки трубы, что приводит к различной склонности конструкции к зарождению

и развитию вязкого разрушения. Полученное конечно-элементным расчетом распределение деформаций в стенке трубопровода с полуэллиптическим дефектом локального утонения позволило решить обратную задачу предельного состояния путем постановки в соответствие выполнения критерия (12) вероятности разрушения 0,95 и определить функциональные зависимости параметра B_ϵ от типа материала и температуры эксплуатации. Как показано на рис. 6 как для стали 15X2НМФА, так и для 10ГН2МФА зависимости B_ϵ от температуры квазилинейны для выбранного температурного диапазона. При этом изменение размера дефекта незначительно влияет на значение параметров Вейбулла.

Расчет кинетики поля деформаций в сечении ТЭ с обнаруженными дефектами коррозионно-эрозионных потерь металла позволяет прогнозировать склонность конструкции к зарождению вязкого разрушения и работоспособность с пози-

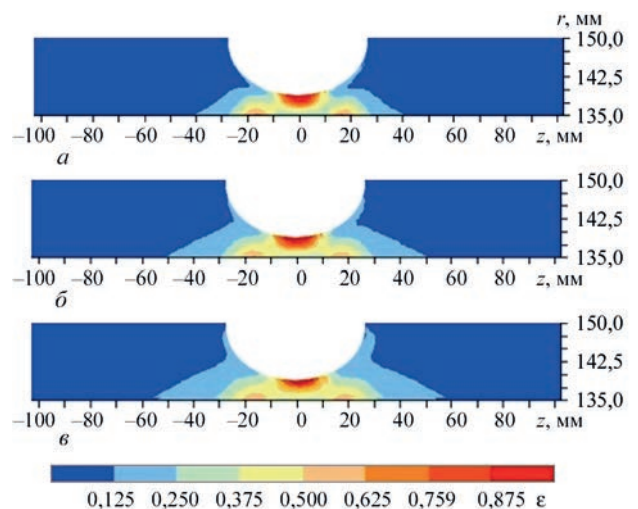


Рис. 5. Распределение интенсивности пластических деформаций в стенке дефектного трубопровода из стали 15X2НМФА при критическом развитии деформаций ползучести: a – 600 °C; b – 620; v – 650

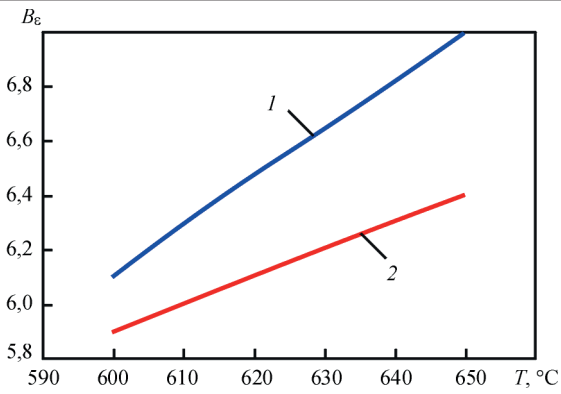


Рис. 6. Зависимости параметра Вейбулла B_e от температуры T для сталей: 1 – 10ГН2МФА; 2 – 15Х2НМФА

ции вероятности макроразрушения. Предложенный подход конечно-элементного расчета в соответствии с описанными выше моделями, дает возможность с минимальной консервативностью описать фактическую геометрию дефектного участка трубопровода (с минимальной схематизацией дефекта) и учесть специфику взаимного влияния текущего НДС и критического повреждения материала ТЭ. Таким образом, интегрирование поля интенсивности пластических деформаций в рамках статистики Вейбулла для вычисления вероятности разрушения в соответствии с системой входных данных по свойствам материала конструкции и условий внешней эксплуатационной нагрузки в рамках реализуемой методологии позволяет с достаточным уровнем консервативности интерпретировать сложное НДС конструкции.

В качестве примера использования этого подхода был рассмотрен элемент магистрального трубопровода из стали 17Г1С-У с полуэллиптическим поверхностным дефектом (входные данные расчетов следующие: $D \times t = 1420 \times 20$ мм, $E = 210$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 300 \dots 600$ МПа, $f_0 = 0,01$, $S_K = 1000$ МПа, $\epsilon_c = 0,01$). В зависимости от раз-

мера дефекта утонения и поверхности его расположения вероятность разрушения от величины внутреннего давления имеет характерный нелинейный вид (рис. 7). При этом следует отметить, что предложенный подход достаточно чувствителен к изменению геометрии дефектного участка ТЭ и соответствующие изменения в полученных значениях вероятности разрушения p позволяют оценить остаточную статическую прочность конструкции как в рабочем диапазоне внутренних давлений P , так и при нагрузке, близкой к предельной.

Практический интерес представляет сравнение результатов расчетов в рамках приведенной численной методики оценки предельного состояния дефектного трубопровода и нормативных документов. Так, в частности, норвежский стандарт DNV-RP-F101 (1999) [19] разработан для оценки поврежденности магистральных трубопроводов различного типа и позиционируется его создателями как наиболее универсальный, с точки зрения марки стали трубопровода. В Украине для анализа допустимости характерных дефектов трубопроводов совместно Институтом проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины и Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины разработан нормативный документ ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008 [20]. На рис. 8 приведено сравнение результатов вероятностного анализа состояния элемента магистрального трубопровода ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) с изолированным дефектом коррозионной потери металла различной глубины a ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм) с требованиями стандартов DNV-RP-F101 и ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008. Как видно из приведенных данных, высокое соответствие между кривой $P_{0,002}$ (состояние конструкции соответствует вероятности разруше-

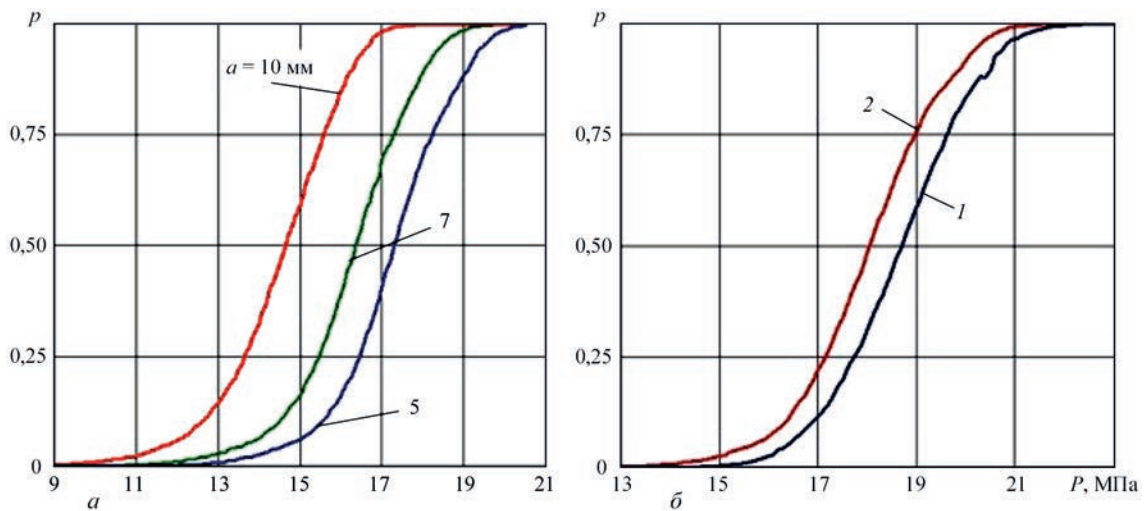


Рис. 7. Зависимости вероятности разрушения p трубопроводного элемента ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) с изолированным дефектом коррозионной потери металла от давления P : a – дефекты различной глубины a ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм) на наружной поверхности трубы; b – дефект ($2s \times 2u \times a = 50 \times 50 \times 5$ мм) на внутренней (1) и внешней (2) поверхности трубы

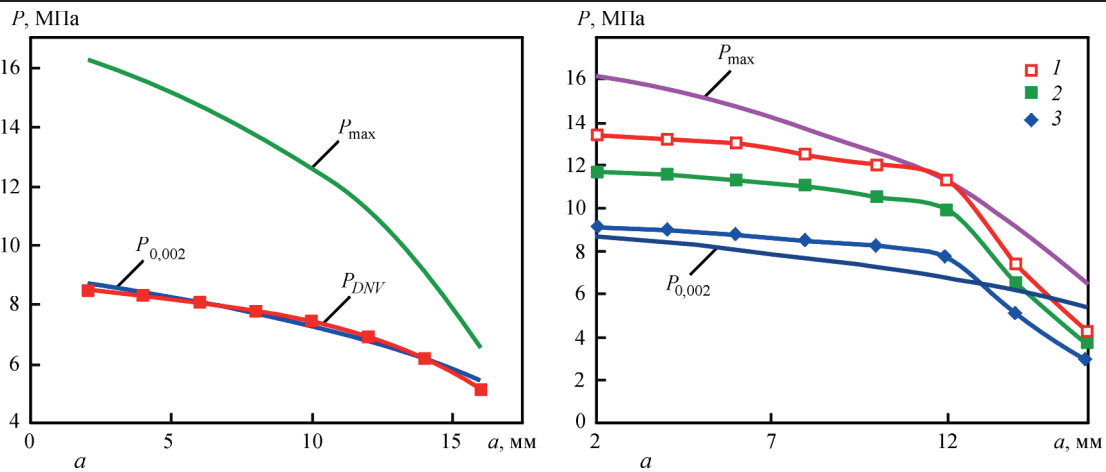


Рис. 8. Сравнение результатов вероятностного анализа состояния элемента магистрального трубопровода ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) с изолированным дефектом коррозионной потери металла различной глубины a ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм) с требованиями актуальных стандартов: a – DNV-RP-F101; b – ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008 (1 – умеренный; 2 – существенный; 3 – критический)

ния $p = 0,002$) и предельной кривой, рассчитанной в соответствии с методиками DNV-RP-F101. При этом кривая предельной нагрузки P_{max} существенно отличается формой и диапазоном значений давления. Согласно ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008, кривая $P_{0,002}$ достаточно точно описывает состояние дефектного трубопровода с дефектом утонения в случае, если он относится к незначительным. Но следует отметить, что другие категории дефектов (умеренный, значительный, критический) ложатся в диапазоне $P_{0,002} - P_{max}$. Это означает, что каждая из категорий соответствует своему значению вероятности разрушения, которое коррелирует с соответствующей степенью консервативности требований ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008. Заметное несоответствие между разработанной численной методикой и ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008 наблюдается при существенных значениях глубины дефекта a , при которых численная оценка показывает менее консервативные результаты. Это объясняется тем, что при разработке требований стандарта учитывался переход от вязкого к

хрупкому разрушению при расчете коэффициентов интенсивности напряжений в области дефекта, и исходя из результатов расчетов, а также сравнения с DNV-RP-F101, условия этого перехода являются избыточно консервативными, и влияние хрупкого механизма разрушения не столь важно даже при увеличенной концентрации напряжений в области глубокого дефекта утонения. Но в случае необходимого соответствия между результатами конечно-элементного расчета и требованиями ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008 применимость разработанной методики можно ограничить глубинами дефектов не более половины толщины стенки трубопровода.

Таким образом, в зависимости от требований к вероятности разрушения конкретного ТЭ (максимальной допустимой вероятности разрушения) на основе предложенного подхода возможно построение эквивалентных диаграмм зависимости максимального допустимого давления в трубопроводе от размеров коррозионно-эрозионных потерь металла. Примеры таких диаграмм для рассмотренного выше случая магистрального трубопро-

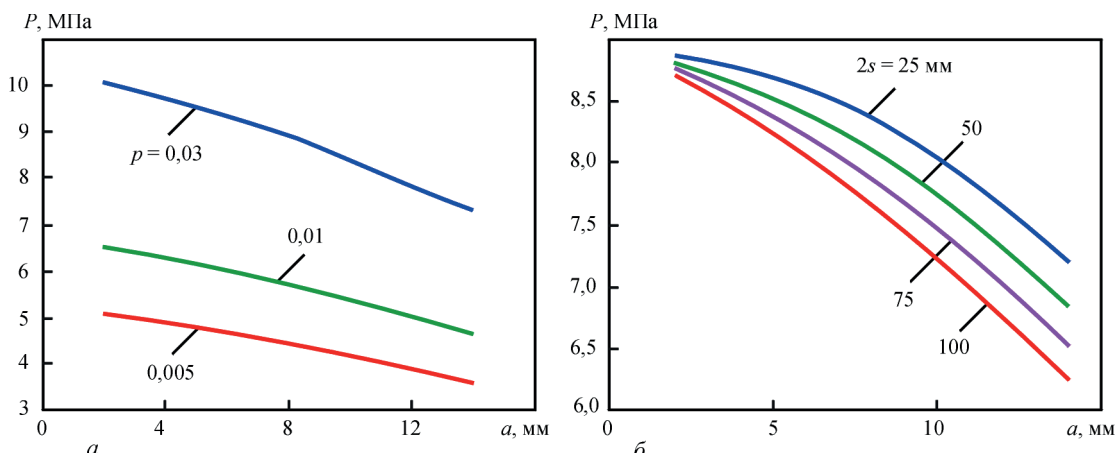


Рис. 9. Эквивалентные кривые допустимости дефекта локального утонения стенки трубопроводного элемента ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У): a – в зависимости от критической величины вероятности разрушения ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм); b – в зависимости от длины дефекта утонения ($p = 0,01, 2u = 50$ мм)

вода с внешним дефектом утонения приведены на рис. 9. Более полно такие данные могут быть представлены в виде поверхностных диаграмм (рис. 10), связывающих длину и глубину дефекта с давлением, которое гарантирует необходимую вероятность аварийной ситуации.

В отличие от рассмотренного выше случая низкотемпературной нагрузки ТЭ с выявленными дефектами локального коррозионно-эрозионного утонения стенки, конкретная система температурно-силовых условий внешней нагрузки определяет не только собственно статическую прочность, но и работоспособность конструкции по причине деградации материала и накопления докритического повреждения. Поэтому наличие локального концентратора напряжений в виде поверхностной геометрической аномалии имеет принципиально иное воздействие на состояние ТЭ с позиции его долгосрочной эксплуатации в условиях высокотемпературной нагрузки. Неоднородность поля напряжений и докритического повреждения обуславливает целесообразность использования именно интегральных методик анализа состояния трубопровода, в частности, с помощью расчета вероятности по модели Вейбулла. Как уже отмечалось выше, классические модели статистической теории прочности Вейбулла, которые заключаются в интегрировании поля главных напряжений, не могут быть применены в случае развитых деформаций ползучести. Но использование альтернативного подхода (13) позволяет реализовать прослеживание состояния исследуемого трубопровода и вероятности его разрушения по мере накопления докритического разрушения.

Так, на примере элемента технологического трубопровода из стали 15Х2НМФА ($D \times t = 300 \times 15$ мм) с полуэллиптическим дефектом ло-

кального утонения стенки на внешней поверхности трубы было исследовано влияние длины дефекта (при фиксированной глубине $a = 7$ мм) и времени выдержки при температуре $T = 625$ °С на предельное внутреннее давление P_{max} . Как показали результаты расчетов (рис. 11), указанные параметры имеют существенное нелинейное влияние на текущую остаточную прочность дефектного ТЭ. Это обусловлено нелинейностью роста концентрации докритического повреждения металла в соответствии с законом Райса–Трейси (8) в процессе высокотемпературного деформирования металла трубопровода.

На основе результатов конечно-элементного решения краевой задачи упруго-пластического деформирования металла ТЭ при совместном воздействии внутреннего давления и температуры интегрированием поля интенсивности деформаций в рамках (13) были получены характерные зависимости вероятности разрушения трубопроводного элемента с локальной полуэллиптической потерей металла на наружной поверхности (рис. 12). Эти результаты

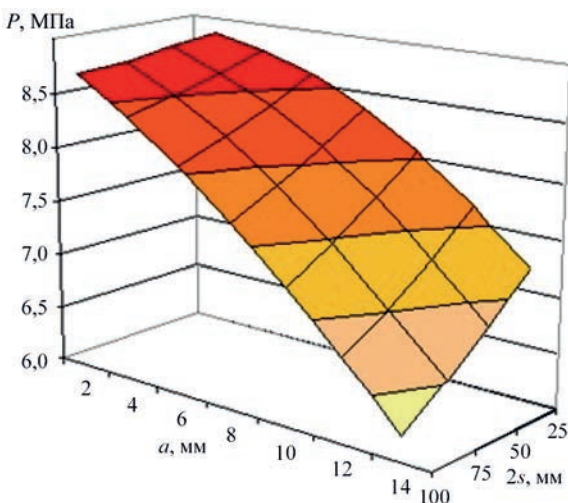


Рис. 10. Эквивалентная поверхность допустимости дефекта локального утонения стенки трубопроводного элемента в зависимости от внутреннего давления P , длины $2s$ и глубины a дефекта ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У, $p = 0,01$, $2u = 50$ мм)

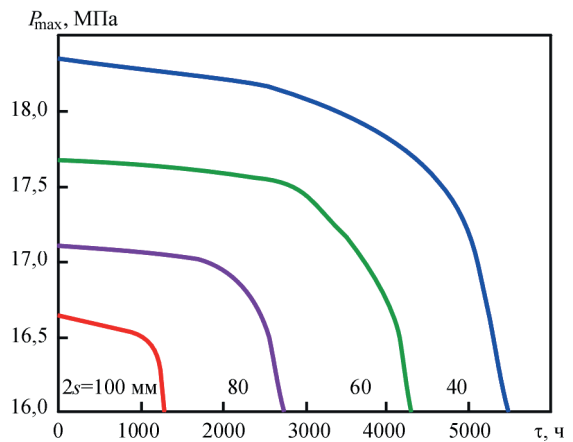


Рис. 11. Результаты численной оценки влияния длины дефекта утонения стенки трубопроводного элемента из стали 15Х2НМФА ($D \times t = 300 \times 15$ мм, $a = 7$ мм) и времени выдержки при температуре $T = 625$ °С на предельное внутреннее давление P_{max}

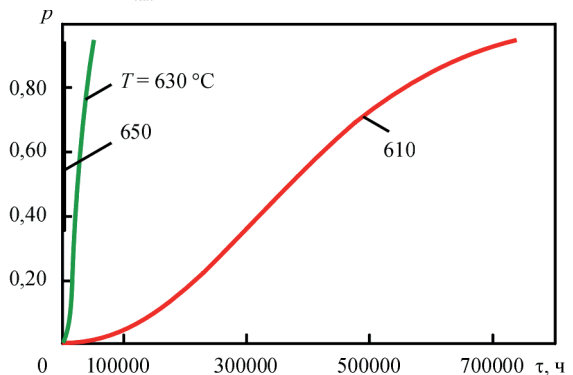


Рис. 12. Зависимость вероятности разрушения p трубопроводного элемента ($D \times t = 300 \times 15$ мм, 15Х2МФА) с эрозионным дефектом ($2s \times 2u \times a = 50 \times 50 \times 7$ мм) от времени высокотемпературной эксплуатации τ при внутреннем давлении $P = 8$ МПа

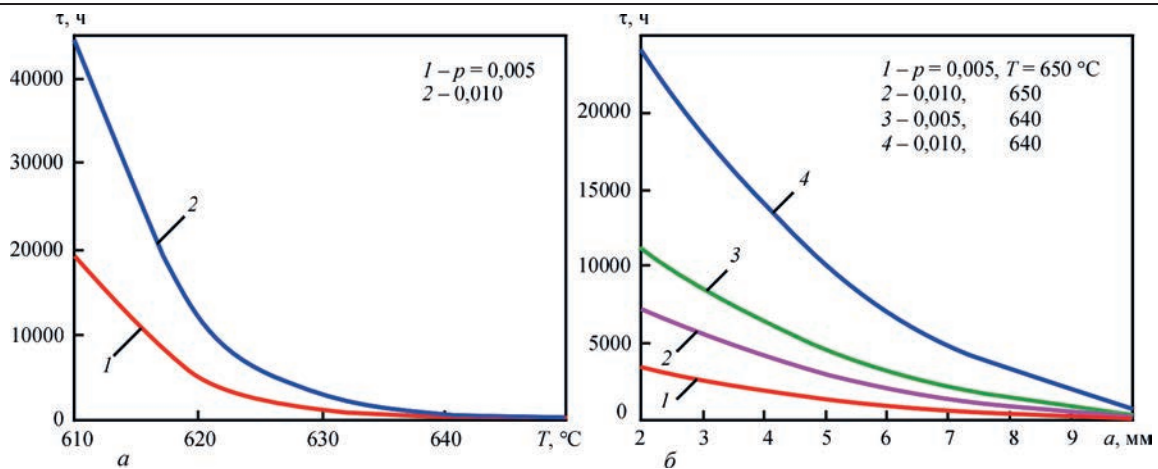


Рис. 13. Эквивалентные диаграммы допустимости дефекта локального утонения стенки трубопроводного элемента ($D \times t = 300 \times 15$ мм, 15X2МФА) с эрозионным дефектом ($2s \times 2u = 50 \times 50$ мм) от температуры эксплуатации (а) и глубины дефекта (б) показывают высокую чувствительность текущей склонности конструкции к разрушению от температуры эксплуатации T : увеличение T с 610 до 630 °С уменьшает предельный срок эксплуатации более чем в 10 раз с соответствующим изменением вероятности разрушения на начальных этапах эксплуатации.

Аналогично, как и для рассмотренных выше случаев коррозионно-эрозионного повреждения элементов магистральных трубопроводов, возможно обобщение результатов анализа влияния дефектности типа локальной потери металла на работоспособность элемента технологического трубопровода в процессе высокотемпературной эксплуатации. Примеры таких диаграмм для рассмотренного ТЭ из стали 15X2МФА ($D \times t = 300 \times 15$ мм) с эрозионным дефектом ($2s \times 2u = 50 \times 50$ мм) как функций температуры эксплуатации и глубины дефекта приведены на рис. 13.

Выводы

1. Разработан комплекс математических моделей и программных средств их реализации для численного прогнозирования совместных процессов термомодеформирования и докритического разрушения металла ответственных сварных ТЭ в процессе высокотемпературной эксплуатации. Предложены критерии зарождения микро- и макроразрушения конструкции при пластическом течении материала по вязкому и хрупко-вязкому механизмам с учетом необратимых деформаций ползучести.

2. Предложена статистическая методика определения склонности к разрушению ТЭ с обнаруженными дефектами локального коррозионно-эрозионного утонения стенки на основе расчетных полей деформаций, накопленных в результате действия внутреннего давления. В основу методики положено интегрирование определенного численно поля интенсивности пластических деформаций в рамках трехпараметрической ста-

тистики Вейбулла для расчета вероятности разрушения. Показано применимость этого подхода для анализа статической прочности и работоспособности трубопроводов, функционирующих при высоких температурах в условиях интенсивного развития деформаций ползучести.

3. На основе результатов статистической обработки результатов решения обратной задачи предельного состояния трубопроводных элементов из трубных сталей и алюминиевых сплавов определены функциональные зависимости параметров Вейбулла от предела текучести металла. Для нержавеющей сталей 15X2МФА и 10ГН2МФА получены температурные зависимости коэффициентов Вейбулла для проведения расчетов вероятности разрушения трубопроводов в процессе высокотемпературной эксплуатации.

4. На примере характерного элемента магистрального трубопровода из стали 17Г1С-У исследованы особенности влияния дефектности типа локальной потери металла на вероятность разрушения под действием внутреннего давления. Показано, что предложенный подход достаточно чувствителен к изменению геометрии дефектного участка трубопровода, и соответствующие изменения в полученных значениях вероятности разрушения позволяют оценить остаточную статическую прочность конструкции как в рабочем диапазоне внутреннего давления, так и при нагрузке, близкой к предельной. Построены эквивалентные диаграммы статической прочности ТЭ с выявленными дефектами локального утонения металла, которые связывают внутреннее давление, размеры дефекта и требуемый уровень вероятности разрушения конструкции. Показано соответствие между результатами расчета допустимости состояния дефектного трубопровода с методиками стандартов DNV-RP-F101 и ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008 (при небольших глубинах дефектов).

5. Исследованы особенности развития докритического разрушения и предельного состояния трубопроводных элементов из нержавеющей стали в процессе высокотемпературного нагружения. Показана существенная чувствительность склонности конструкции к разрушению от температуры эксплуатации и градиента напряжений, вызванного наличием дефекта утонения. Для трубопроводов из стали 15X2НМФА предложены эквивалентные диаграммы допустимости дефектов в зависимости от их размеров, температуры и давления в трубопроводе с учетом максимально допустимой вероятности разрушения.

Список литературы / References

1. Березина Т.Г., Бугай Н.В., Трунин И.И. (1991) *Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок*. Киев, Техника.
2. Xue J.-L., Zhou C.-Y., Peng J. (2015) Ultimate creep load and safety assessment of P91 steel pipe with local wall thinning at high temperature. *International Journal of Mechanical Sciences*, **93**, 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.01.010>
3. Milenin A., Velikoivanenko E., Rozyuka G., Pivtorak N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **171**, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>
4. Lemaitre J., Desmorat R. (2005) *Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*. Berlin, Springer-Verlag.
5. Radaj D. (1992) *Heat Effects of Welding. Temperature Field, Residual Stress, Distortion*. Berlin, Springer Verlag.
6. Makhnenko V. (2013). Problems of examination of modern critical welded structures. *The Paton Welding J.*, **5**, 21–28.
7. Wei Y., Zhang L., Au F.T.K. et al. (2016) Thermal creep and relaxation of prestressing steel. *Construction and Building Materials*, **128**, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.068>
8. Lemaitre J., Chaboche J.L. (1988) *Mecanique des Materiaux Solides. English edition*. Cambridge, Cambridge Univ. Press.
9. Махненко В.И. (1976) *Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций*. Киев, Наукова думка.
10. Xue L. (2008) Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 3343–3366. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.07.022>
11. Cowper, G.R., Symonds, P.S. (1958) *Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams*. Brown Univ. Applied Mathematics Report.
12. Huang Y. (1991). Accurate dilatation rate for spherical voids in triaxial stress fields. *Journal of Applied Mechanics (ASME Transactions)*, **58**, 1084–1086. doi:10.1115/1.2897686.
13. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
14. Velikoivanenko E., Milenin A., Rozyuka G., Pivtorak N. (2015) Evaluation of operability of the main pipeline with local wall thinning at repair by arc surfacing. *The Paton Welding Journal*, **1**, 18–23. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.01.03>
15. Moshayedi H., Sattari-Far I. (2017). The dependence of Weibull parameters on preloads and its implication on brittle fracture probability prediction using a local criterion. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **87**, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.10.005>
16. Qian G., Niffenegger M. (2013) Procedures, methods and computer codes for the probabilistic assessment of reactor pressure vessels subjected to pressurized thermal shocks. *Nuclear Engineering and Design*, **258**, 35–50. <http://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.01.030>
17. Velikoivanenko E.A., Milenin A.S., Popov A.V. et al. (2014) Methods and Technologies of Parallel Computing for Mathematical Modeling of Stress-Strain State of Constructions Taking into Account Ductile Fracture. *Journal of Automation and Information Sciences*, **46**, 11, 23–35. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v46.i11.30>
18. Velikoivanenko E.A., Milenin A.S., Popov A.V. et al. (2019) Methods of Numerical Forecasting of Serviceability of Welded Structures on Computers of Hybrid Architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, **55**, **1**, 117–127. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>
19. Bjornoy O. (ed.) (2004) Recommended Practice, DNV-RP-F101. *Corroded Pipelines*. Novik, Det Norske Veritas.
20. (2008) DSTU-N B В.2.3-21:2008 *Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами*. Київ, Мінрегіонбуд України.
20. (2008) DSTU N B В.2.3-21:2008. *Guidelines. Determination of the remaining strength of trunk pipelines containing defects*. Kyiv, Minregionbud Ukraine [in Ukrainian].

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАЛИШКОВОЇ МІЦНОСТІ ДЕФЕКТНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЗА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Стосовно зварних трубопровідних елементів та посудин тиску, що експлуатуються за підвищених температур, запропонована чисельна методика аналізу залишкової статичної міцності і роботоздатності з урахуванням виявлених технічною діагностикою дефектів корозійно-ерозійної втрати металу. Для аналізу неоднорідного напружено-деформованого стану в області геометричного концентратора поряд із загальноприйнятими підходами статистичної механіки, що полягають в оцінці ймовірності руйнування за допомогою інтегрування поля напружень в рамках розподілу Вейбулла, було запропоновано підхід аналогічного розгляду поля інтенсивності пластичних деформацій. Це дозволяє коректно враховувати кінетику спільного розвитку незворотних деформацій миттєвої пластичності і повзучості, яка визначає граничний стан дефектної конструкції під дією конкретної системи експлуатаційного температурно-силового впливу. Дана методологія була реалізована на основі комплексу скінченно-елементних моделей прогнозування спільного розвитку напружено-деформованого стану та докритичного пошкодження трубопровідних елементів з поверхневими дефектами втрати металу. Для адекватного кількісного прогнозування ймовірності руйнування дефектних трубопроводів з різних матеріалів були отримані значення параметрів Вейбулла в залежності від властивостей матеріалу і температури. Отримано еквіймовірнісні діаграми допус-

мости дефекту локального стоншення стінки трубопровідного елемента за різних умов експлуатації. Показано відповідність запропонованих методик вимогам актуальних нормативних документів. Бібліогр. 20, рис. 13.

Ключові слова: трубопровідний елемент, корозійно-ерозійний дефект, статична міцність, в'язке руйнування, ймовірність руйнування

STATISTICAL ANALYSIS OF RESIDUAL STRENGTH OF DEFECTIVE PIPELINES IN HIGH-TEMPERATURE SERVICE

A.S. Milenin, E.A. Velikoivanenko, G.F. Rozynka, N.I. Pivtorak

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office @paton.kiev.ua

A numerical procedure of analysis of residual static strength and performance, allowing for defects of corrosion-erosion loss of metal detected during technical diagnostics, was proposed for welded pipeline elements and pressure vessels, operating at higher temperatures. For analysis of non-uniform stress-strain state in the region of the geometrical stress-raiser, alongside the universally accepted statistical mechanics approaches, consisting in evaluation of fracture probability by integration of the stress field within Weibull distribution, an approach of similar consideration of the field of plastic deformation intensity was proposed. This allows correct evaluation of the kinetics of simultaneous development of irreversible deformations of instantaneous plasticity and creep, which determines the limiting state of the defective structure under the impact of a specific system of operational temperature-force impact. This methodology was realized on the base of a complex of finite-element models for prediction of simultaneous development of the stress-strain state and subcritical damage of pipeline elements with surface metal loss defects. For adequate quantitative prediction of the probability of failure of defective pipelines from different materials, values of Weibull parameters were obtained, depending on the material properties and temperature. Equivalence diagrams of admissibility of the defect of local wall thinning of a pipeline element under different operational conditions were derived. Correspondence of the proposed procedures to the requirements of current normative documents is shown. 20 Ref., 13 Fig.

Keywords: pipeline element, corrosion-erosion defect, static strength, tough fracture, fracture probability

Поступила в редакцію 25.02.2019



Навчальний центр підприємства «ДП-ТЕСТ»
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики
Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

III НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
з міжнародною участю

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ В КОНТЕКСТІ АСОЦІЙОВАНОГО ЧЛЕНСТВА УКРАЇНИ В ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ

17-20 вересня 2019 р.

Основні теми:

- законодавство в сфері неруйнівного контролю;
- технічні регламенти;
- метрологія і стандартизація;
- навчання та сертифікація персоналу;
- функціонування лабораторії неруйнівного контролю;
- сучасні засоби, приладдя, системи неруйнівного контролю.

В рамках події відбудеться низка практичних семінарів з демонстрацією новітнього обладнання та засобів контролю, круглі столи з дискусійних питань роботи служб неруйнівного контролю на підприємствах України.

Адреса оргкомітету:

03061, м.Київ, вул. Патріотів 103

Тел./факс:(044) 239-12-50, e-mail: support@ndt-ua.com, http://www.dp-test.com

Місце проведення:

Готель «VitaPark Аквадар». Україна, Черкаська обл., смт. Маньківка, вул. Лісова, 1.