

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОРРОЗИОННО-ЭРОЗИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. С. МИЛЕНИН, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, Г. Ф. РОЗЫНКА, Н. И. ПИВТОРАК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Разработан комплекс моделей численного прогнозирования докритического повреждения и предельного состояния сварных трубопроводных элементов в условиях высокотемпературной эксплуатации, учитывающих особенности монтажной сварки и наличие изолированного дефекта локального утонения стенки коррозионно-эрозионной природы. На примере характерного трубопровода из нержавеющей стали исследованы особенности текущего и предельного состояния сварных конструкций в условиях развитых деформаций ползучести. Показано влияние дефекта локального утонения стенки трубопроводного элемента на закономерности докритического и макроскопического повреждения металла при сложном температурно-силовом воздействии. Библиогр. 11, рис. 7.

Ключевые слова: докритическое повреждение, деформации ползучести, трубопроводный элемент, дефект утонения стенки, предельное состояние, численное прогнозирование

Экспертный анализ результатов инструментально-го мониторинга состояния ответственных трубопроводов, эксплуатирующихся при высоких температурах и высоком внутреннем давлении, является основанием продолжения ресурса на сверхпроектные сроки, а также, в случае обнаружения дефектов несплошности металла, позволяет подтвердить необходимую статическую прочность и работоспособность. Наличие локальных геометрических и структурных неоднородностей, в частности, в области монтажных или ремонтных сварных швов, усложняет оценку фактического и предельного состояния конструкций и их сопротивляемости разрушению. Кроме того, совместное воздействие высоких температур и внешнего усилия (внутреннего давления) определяет сложный механизм развития необратимых деформаций мгновенной пластичности и ползучести, которые приводят к зарождению и накоплению докритического повреждения материала вплоть до его предельного состояния и макроскопического разрушения.

Как показывает практика эксплуатации трубопроводов атомных и тепловых электростанций, в диапазоне температур 550...650 °С процессы ползучести оказывают существенное влияние на длительную прочность, особенно в случае наличия концентраторов напряжений в области геометрических аномалий (трещин, локальных коррозионно-эрозионных утонений) или конструктивных неоднородностей (мест стыков разнотолщинных элементов, трубопроводной арматуры, прочее) [1, 2]. Накопление необратимых деформаций ползучести может повлечь зарожде-

ние и развитие равномерно распределенной поврежденности материала труб с сопутствующим снижением их несущей способности. Инструментальный контроль докритической поврежденности достаточно сложен, так как нарушение сплошности материала происходит в микроскопическом масштабе. В силу особенностей зарождения микроразрушенности, интенсивность ее развития может быть обнаружена методом акустической эмиссии [3], но этот метод не получил достаточно широкого распространения, поэтому рациональным является применение методов численного прогнозирования. Решение данной задачи осложняется нелинейной взаимозависимостью между процессами термомодеформирования и разрушения, поэтому актуальна разработка методов и средств прогнозирования состояния и работоспособности ответственных (в том числе сварных) конструкций при сложном температурно-силовом эксплуатационном воздействии.

В рамках настоящей работы на примере трубопроводных элементов (ТЭ) с обнаруженными при дефектоскопии локальными коррозионно-эрозионными потерями металла в области кольцевых монтажных сварных швов исследованы особенности зарождения и развития докритической и макроскопической поврежденности металла, определяющие предельное состояние и работоспособность конструкции в условиях высокотемпературной эксплуатации.

Согласно классическим представлениям механики сплошных сред развитие деформаций ползучести является многоэтапным процессом

(см. рис. 1) и включает неустановившуюся (I), стационарную (II) и ускоренную (III) ползучесть [4]. Следует отметить, что с практической точки зрения наиболее важными являются этапы II и III, проявляющиеся при высоких механических напряжениях, так как процесс температурной активации ползучести на этапе I превалирует в относительно небольшом диапазоне температур и при низких нагрузках. По мере накопления необратимых деформаций мгновенной пластичности ε^{mp} и ползучести ε^c может быть достигнута предельная деформационная способность материала, что имеет своим следствием зарождение микропористости по механизму вязкого разрушения. При относительно низкой температуре ползучесть редко приводит к макроразрушению характерных конструкционных материалов, тогда как ее повышение ведет к увеличению вклада этого механизма деформирования в процессы нарушения сплошности. Развита высокая температурная ползучесть, обусловленная существенными внешними усилиями, ведет к транскристаллитному разрушению металла по механизму порообразования. Согласно гипотезе Лемэтра [5], зарождение и дальнейшее развитие докритической поврежденности такого типа зависит не от механизма пластического деформирования, а от текущей суммарной величины деформации, т.е. для рассматриваемого случая от $\varepsilon^p = (\varepsilon^{mp} + \varepsilon^c)$. Поэтому моделирование напряженно-деформированного состояния конструкции в конкретных условиях эксплуатации должно учитывать особенности совместного развития необратимых деформаций мгновенной пластичности и ползучести наряду с неравномерно распределенной докритической поврежденностью металла в процессе эксплуатации рассматриваемого ТЭ.

Приращение компонентов тензора деформаций ε_{ij} в общем случае представимо в виде суммы следующих составляющих:

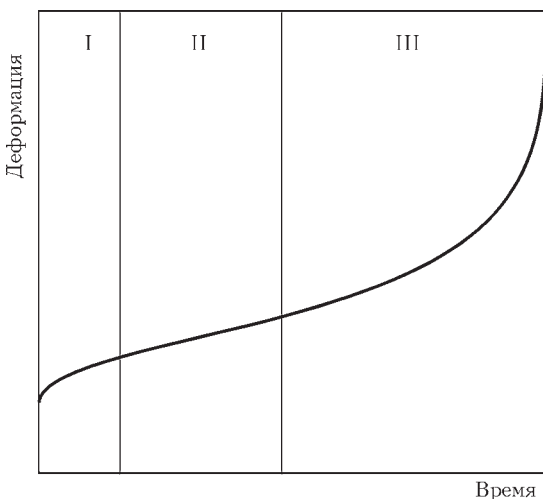


Рис. 1. Схематическая кривая ползучести для конструкционной стали при постоянном растягивающем усилии и постоянной температуре (I, II, III – различные этапы высокотемпературного деформирования)

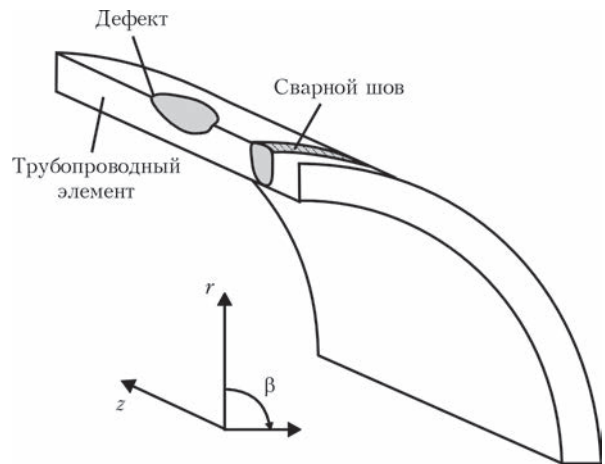


Рис. 2. Схема трубопроводного элемента с локальным дефектом потери металла на внешней поверхности

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

где $d\varepsilon_{ij}^e$, $d\varepsilon_{ij}^{mp}$, $d\varepsilon_{ij}^c$, $\delta_{ij}d\varepsilon_T$, $\delta_{ij}df/3$ – компоненты приращения тензора деформаций, которые обусловлены упругим механизмом деформирования, мгновенной пластичностью, ползучестью, термическим расширением и докритическим разрушением, соответственно, $i, j = r, \beta, z$ (рис. 2).

Приращение деформации ползучести $d\varepsilon_{ij}^c$ за промежуток времени dt , фигурирующее в (1), может быть выражено с помощью функции ползучести $\Omega = \Omega(\sigma_i, T)$ следующим образом [6]:

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

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

Как было показано выше, на различных этапах деформирования степень ползучести определяется либо процессом температурной активации, либо величиной механических напряжений. Поэтому $\Omega(\sigma_i, T)$ представима в виде произведения температурной составляющей Ω_1 (функция Аррениуса) и функции напряжений Ω_2 (уравнение Бейли–Нортон):

$$\Omega(\sigma_i, T) = \Omega_1(T) \cdot \Omega_2(\sigma_i), \quad (3)$$

$$\text{где } \Omega_1(T) = A \exp\left(\frac{G_c}{T + 273}\right); \quad \Omega_2(\sigma_i) = \sigma_i^n; \quad (4)$$

n, A, G_c – константы.

Согласно теории пластического течения, развитие пластичности определяется интенсивностью напряженного состояния по отношению к поверхности текучести материала Φ . Для поврежденного материала эта поверхность может быть описана в рамках модели Гурсона–Твергаарда–Нидлмана [7]:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_T}\right)^2 - (q_3 f')^2 + 2q_1 f' \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_T}\right) - 1, \quad (5)$$

где q_1, q_2, q_3 – константы; f' – эквивалентная концентрация равномерно распределенных пор до критического разрушения материала; σ_T – предел текучести.

Величина эквивалентной концентрации пор, фигурирующая в (5), определяется следующим образом:

$$f' = \begin{cases} f, & \text{если } f \leq f_c; \\ f_c + \frac{f_w' - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c), & \text{если } f > f_c, \end{cases} \quad (6)$$

где f_c – критическое значение концентрации несплошности, до которого отдельные поры не взаимодействуют, принято считать равным 0,15; f_F – концентрация пор, при которой происходит макроразрушение; $f_w' = 1/q_1$.

Следует отметить, что предельный переход $f' \rightarrow 0$ переводит условия пластического течения (5), (6) в критерий Мизеса, что необходимо учитывать при построении континуальных моделей напряженно-деформированного и поврежденного состояний конструкции.

Критерием локального зарождения вязкого разрушения в изначально неповрежденном материале в настоящей работе принят модифицированный закон Джонсона–Кука в следующей формулировке [8]:

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

где ε_c – критическая величина интенсивности пластических деформаций ε_i^p , являющаяся характеристикой конкретного материала.

Выполнение (7) в какой-либо области рассматриваемой конструкции означает появление микропористости вязкого разрушения с объемной концентрацией несплошности f_0 . Рост концентрации пор вязкого разрушения при последующем пластическом течении металла определяется законом Райса–Трейси [9]:

$$df = f_0 K_1 \exp\left(K_2 \frac{\sigma}{\sigma_i}\right) d\varepsilon_i^p, \quad (8)$$

где K_1, K_2 – константы.

Решение совместной задачи напряженно-деформированного и поврежденного состояний материала сварного трубопровода в условиях монтажной сварки и последующей 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 согласно (1) может быть представлено следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} = & \left[\Psi + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma \right) + \\ & + \delta_{ij} \left(K \sigma + \Delta\varepsilon_T + \Delta f / 3 \right) - \\ & - \left[\frac{1}{2G} + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma \right)^* - (K \sigma)^*, \end{aligned} \quad (9)$$

где Ψ – функция состояния упруго-пластического материала, определяющая степень развития пластического течения; δ_{ij} – символ Кронекера; K – модуль объемного сжатия; G – модуль сдвига, символ «*» относит переменную или выражение к предыдущему шагу прослеживания.

Нелинейность по пластическому деформированию решается путем итерирования по функции Ψ до выполнения условий равновесия, исходя из следующих допущений [10]:

$$\begin{aligned} \Psi = & \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T(T) \times \\ & \times \sqrt{1 + (q_3 f')^2 - 2q_1 f' \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_T}\right)}; \\ \Psi > & \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s; \end{aligned} \quad (10)$$

состояние $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимо.

Существенное развитие докритического разрушения в конечном элементе может привести к потере его несущей способности, т. е. макроскопическому разрушению из-за пластической неустойчивости, значительного снижения несущего нетто-сечения в результате порообразования или микроскола. Поэтому в качестве критерия разрушения некоторого конечного элемента предложено использовать численный критерий хрупко-вязкого разрушения в следующей формулировке:

$$\begin{aligned} \left(\Psi - \frac{1}{2G} \right)_{KP} & \geq \frac{\varepsilon_f - (\varepsilon^p)'}{1,5\sigma_s(\varepsilon^p, T)}; \\ f' = & \frac{1}{q_1} \exp\left(-\frac{3q_2\sigma}{2\sigma_T}\right); \\ \frac{\sigma_1}{1 - 2f/3} & > S_K, \end{aligned} \quad (11)$$

где S_K – напряжения микроскола; ε_f – предельная деформационная способность материала.

Изложенная выше методология позволила провести исследования особенностей докритического повреждения металла ответственных сварных ТЭ в условиях развитой высокотемпературной ползучести с учетом возможного обнаружения дефектов коррозионно-эрозионной природы. В качестве примера был рассмотрен участок трубопровода из нержавеющей стали 15Х2МФА диаметром $D = 300$ мм, толщиной стенки $\delta = 15$ мм с кольце-

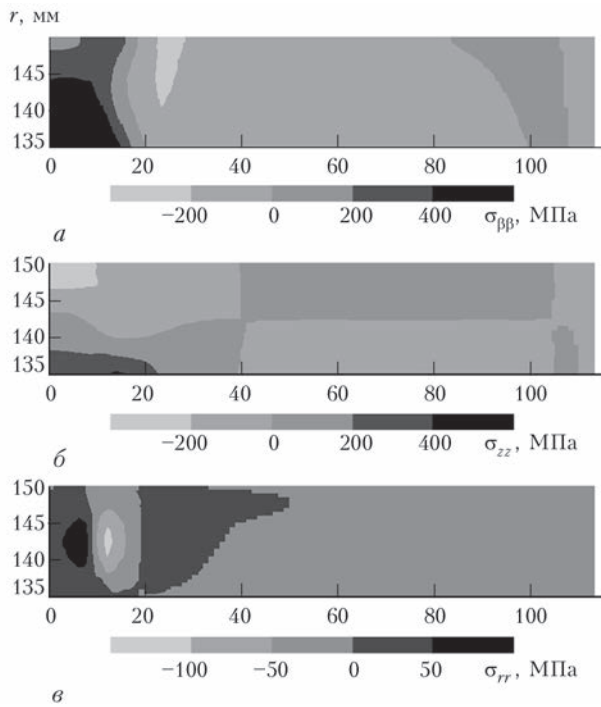


Рис. 3. Поля остаточных сварочных напряжений в области кольцевого монтажного соединения трубопроводного элемента, полученные посредством численного моделирования: а – $\sigma_{\phi\phi}$; б – σ_{zz} ; в – σ_{rr}

вым монтажным сварным швом. Свойства данной стали приведены, в частности, в работе [11], коэффициенты функции ползучести (3), (4) приняты следующими: $n = 5$, $G_c = -101069$, $A = 1,4 \cdot 10^{30}$. Были рассмотрены две характерные ситуации со-

стояния трубопровода в условиях высокотемпературной эксплуатации: бездефектный случай и при наличии в области кольцевого шва поверхностного коррозионно-эрозионного дефекта локального утонения стенки полуэллиптической формы (см. рис. 2). Для корректного учета влияния монтажа на остаточное состояние и работоспособность рассматриваемой конструкции было проведено моделирование кинетики физических процессов при сварке плавлением, что позволило получить распределение послесварочных напряжений в области неразъемного соединения (см. рис. 3), а также структурное и поврежденное состояния металла в области шва и зоны термического влияния.

Был проведен комплекс численных исследований особенностей накопления докритической поврежденности металла ТЭ с указанными выше параметрами в зависимости от условий эксплуатации, а также от его фактического состояния. Так, расчет развития равномерно распределенной пористости в условиях статического нагружения внутренним давлением показал характерную кинетику роста объемной концентрации несплошности f (рис. 4, а), которая соответствует имеющимся в литературе данным натурных измерений средствами акустической эмиссии. Как видно из приведенных результатов, рост внутреннего давления от 15 до 30 МПа существенно меняет склонность металла конструкции к докритическому повреждению (время эксплуатации до

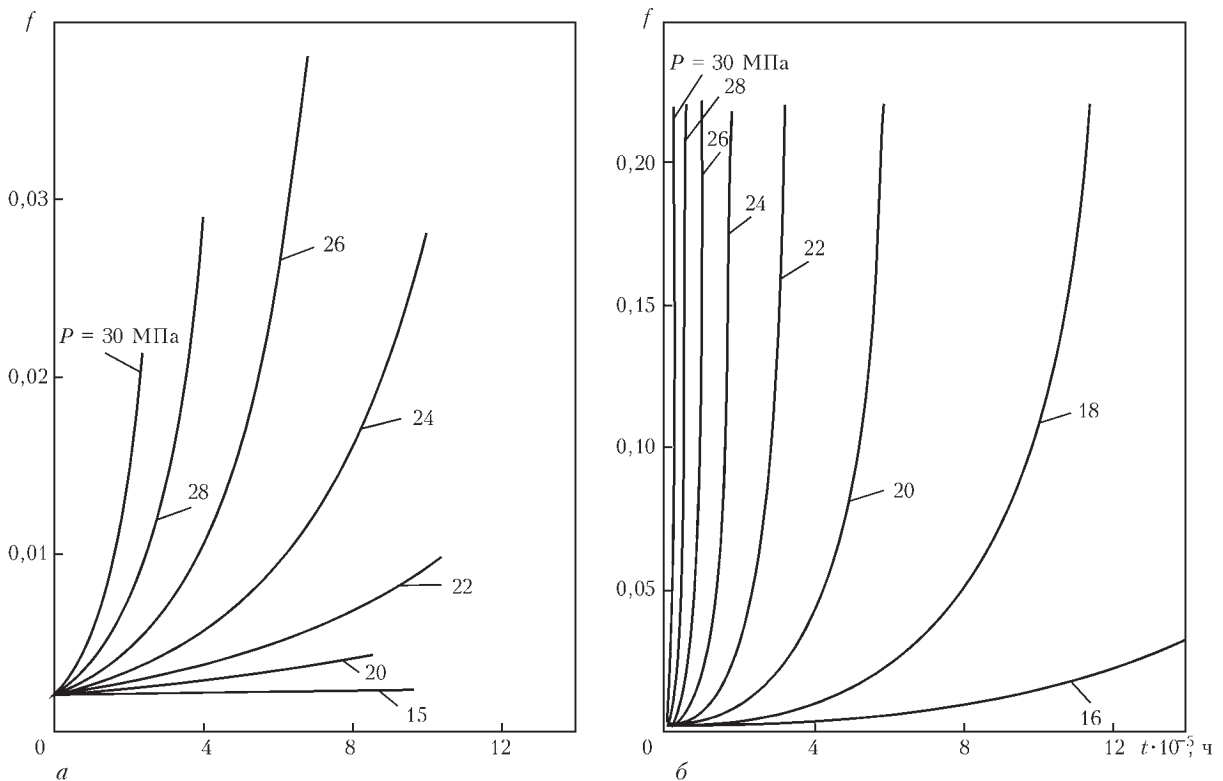


Рис. 4. Зависимость концентрации пор вязкого разрушения f от времени эксплуатации t трубопроводного элемента из стали 15Х2МФА ($D \times \delta = 300 \times 15$ мм) для бездефектного случая (а) и при наличии дефекта локального утонения размером $a \times 2s = 5 \times 100$ мм (б) при различных значениях внутреннего давления и температуре 650 °С

макроскопического разрушения t_k уменьшается более чем в три раза), что связано с более интенсивным пластическим деформированием по механизму высокотемпературной ползучести. Наличие дефекта локального утонения размером $a \times 2s = 5 \times 100$ мм вызывает значительное увеличение интенсивности роста докритического повреждения металла трубопровода в результате формирования концентратора напряжений и соответствующего роста деформаций диффузионной ползучести (см. рис. 4, б). При этом, максимальная концентрация поврежденности материала бездефектного ТЭ характерно ниже, чем в случае конструкции с дефектом утонения, что объясняется локальностью разрушения в последнем случае: труба без выраженного концентратора напряжений получает практически равномерное по всему поперечному сечению повреждение (за исключением области сварного соединения), поэтому снижение несущей способности конструкции имеет место при большем давлении, но при меньшем максимальном f .

Аналогичное влияние на кинетику накопления докритической поврежденности металла ТЭ оказывает величина рабочего давления P , т. е. чем выше рабочее давление, тем меньшая концентрация равномерно распределенной поврежденности необходима для достижения предельного состояния конструкции (рис. 5). Это обусловлено тем, что при более высоких P для достижения предель-

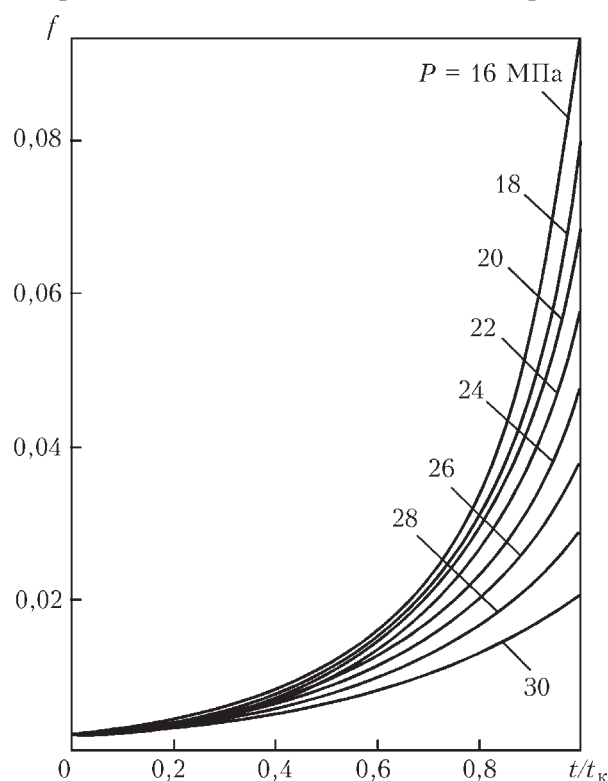


Рис. 5. Кинетика накопления докритической поврежденности металла трубопроводного элемента (без дефекта утонения стенки) при температуре 650 °С в координатах относительного времени t/t_k

ных истинных напряжений (и соответствующих деформаций) необходимы меньшие значения величины фактического нетто-сечения конструкции.

С точки зрения применения данной методики при экспертизе состояния реальных конструкций важна оценка влияния размеров обнаруженных дефектов на их работоспособность. Применительно к сварным ТЭ с дефектами коррозионно-эрозийной природы разработанный подход позволяет с минимальной консервативностью оценивать время высокотемпературной эксплуатации с учетом фактических характеристик материала (параметров сопротивления различным видам разрушения) и развития деформаций ползучести. Так, применительно к указанному выше случаю участка трубопровода из стали 15Х2МФА с полуэллиптическим дефектом утонения глубиной $a = 8$ мм в области кольцевого монтажного сварного соединения при температуре эксплуатации 650 °С и внутреннем давлении $P = 8$ МПа изменение длины дефекта $2s$ от 30 до 150 мм снижает время эксплуатации более чем в 3 раза (рис. 6). Глубина утонения в рассматриваемом случае еще более значительно влияет на предельное значение времени эксплуатации дефектного участка трубопровода t_k (см. рис. 7): в зависимости от внутреннего давления P величина t_k может снижаться на несколько порядков при увеличении длины дефекта с 2 до 11 мм ($2s = 30$ мм, температура эксплуатации 650 °С). Из этого можно сделать вывод о том, что в условиях развитой ползучести размеры дефектов утонения более существенно влияют на остаточную прочность ТЭ в сравнении с низкотемпературными условиями эксплуатации, например, элементов магистральных трубопроводных систем, для которых предельное состояние обу-

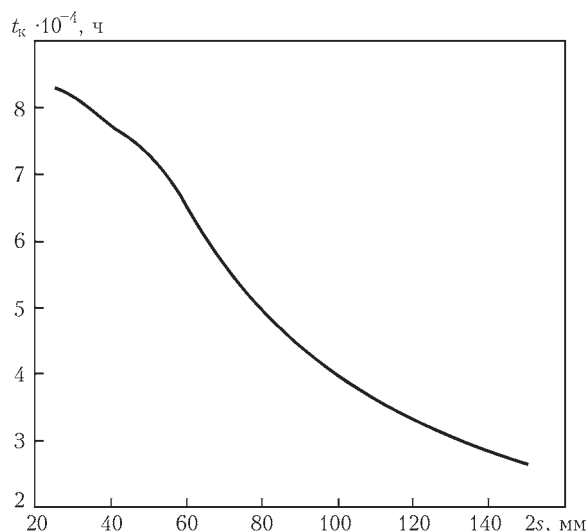


Рис. 6. Зависимость времени до макроскопического разрушения трубопроводного элемента t_k от длины дефекта утонения $2s$ в области сварного шва (глубина дефекта $a = 8$ мм, температура эксплуатации 650 °С)

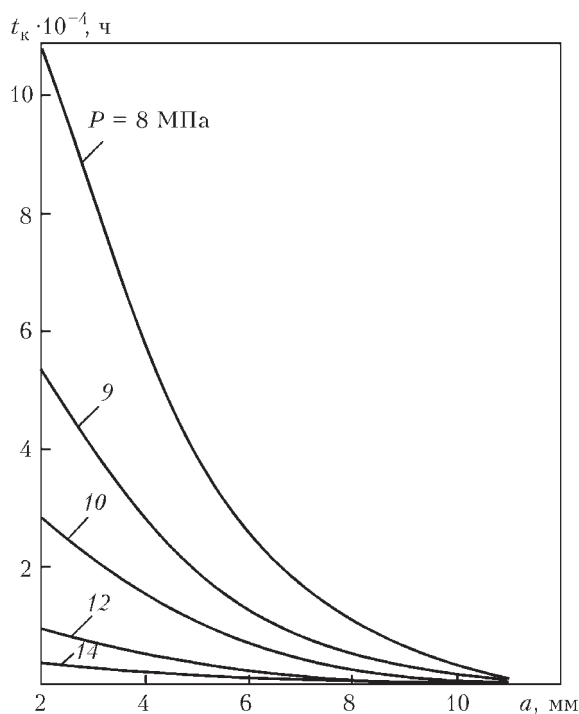


Рис. 7. Зависимости величины времени до макроскопического разрушения трубопроводного элемента t_k от глубины дефекта утонения a в области сварного монтажного шва при различных значениях внутреннего давления (длина дефекта $2s = 30$ мм, температура эксплуатации 650 °C)

словлено интенсивностью деформаций мгновенной пластичности.

Выводы

1. Разработан комплекс моделей численного прогнозирования докритического повреждения материала сварных трубопроводных элементов в условиях высокотемпературной эксплуатации учитывающих особенности монтажной сварки, а также возможное наличие дефекта локального утонения стенки коррозионно-эрозийной природы. Предложен численный критерий предельного состояния конструкции в зависимости от системы нагрузок и степени микроскопической поврежденности материала, вызванной интенсивным деформированием по механизму мгновенной пластичности и ползучести.

2. На примере трубопровода из нержавеющей стали 15Х2МФА диаметром 300 мм, толщиной стенки 15 мм с кольцевым монтажным сварным швом исследованы характерные особенности текущего и предельного состояний трубопроводного элемента. Показано, что рост внутреннего давления от 15 до 30 МПа существенно меняет склонность металла конструкции к докритическому повреждению вследствие более интенсивного пластического деформирования по механизму высокотемпературной ползучести.

3. На основе результатов численных расчетов проанализировано влияние дефекта локального утонения стенки рассматриваемого трубопрово-

дного элемента на текущее и предельное поврежденное состояние конструкции. Показано, что в условиях развитой ползучести размеры дефектов утонения более существенно влияют на остаточную прочность трубопровода в сравнении с низкотемпературными условиями эксплуатации, например, элементов магистральных трубопроводных систем.

Список литературы

1. Jelwan J., Chowdhury M., Pearce G. (2013) Design for creep: A critical examination of some methods. *Engineering Failure Analysis*, **27**, 350–372.
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.
3. Недосека А. Я., Недосека С. А., Смоголь Ю. А. и др. (2014) Длительная прочность материалов, работающих при высоких температурах, по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 17–21.
4. 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.
5. Lemaitre J., Desmorat R. (2005) *Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*. Berlin, Springer-Verlag.
6. Махненко В. И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
7. Xue L. (2008) Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 3343–3366.
8. Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф., Миленин А. С. и др. (2015) Оценка работоспособности магистрального трубопровода с локальным утонением стенки при ремонте дуговой наплавкой. *Автоматическая сварка*, **1**, 22–27.
9. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. (1993) *Физико-механическое моделирование процессов разрушения*. Санкт-Петербург, Политехника.
10. Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф., Миленин А. С. и др. (2013) Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях. *Автоматическая сварка*, **9**, 26–31.
11. Неймарк Б. Е. (ред.) (1967) *Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике*. Справочник. Москва–Ленинград, Энергия.

Reference

1. Jelwan, J., Chowdhury, M., Pearce, G. (2013) Design for creep: A critical examination of some methods. *Engineering Failure Analysis*, **27**, 350-372.
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. *Int. J. of Mechanical Sci.*, **93**, 136-153.
3. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Smogol, Yu.A. et al. (2014) Long-term strength of materials operating at high temperatures by acoustic emission data. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 17-21 [in Russian].
4. 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.
5. Lemaitre, J., Desmorat, R. (2005) *Engineering damage mechanics. Ductile, creep, fatigue and brittle failures*. Berlin, Springer-Verlag.
6. Makhnenko, V.I. (2006) *Safe operating life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Xue, L. (2008) Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 3343-3366.

8. Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F., Milenin, A.S. et al. (2015) Evaluation of operability of the main pipeline with local wall thinning at repair by arc surfacing. *The Paton Welding J.*, **1**, 18-23 [in Russian].
9. Karzov, G.P., Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A. (1993) *Physical-mechanical modeling of fracture processes*. Saint-Petersburg, Politekhnikha [in Russian].
10. Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F., Milenin, A.S. et al. (2013) Modelling of processes of nucleation and development of ductile fracture pores in welded structures. *The Paton Welding J.*, **9**, 24-29 [in Russian].
11. (1967) *Physical properties of steels and alloys applied in power engineering*. Ed. by B.E.Nejmarka. In: Refer.book. Moscow-Leningrad, Energiya [in Russian].

О. С. МІЛЕНІН, О. А. ВЕЛИКОІВАНЕНКО,
Г. П. РОЗИНКА, Н. І. ПІВТОРАК

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м.Київ-150,
вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ТРУБОПРОВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ КОРОЗІЙНО-ЕРОЗІЙНИМИ ДЕФЕКТАМИ В УМОВАХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Розроблено комплекс моделей чисельного прогнозування докритичного пошкодження та граничного стану зварних трубопровідних елементів в умовах високотемпературної експлуатації, що враховують особливості монтажного зварювання та наявність ізольованого дефекту локального стоншення стінки корозійно-ерозійної природи. На прикладі характерного трубопроводу з нержавіючої сталі досліджено особливості поточного та граничного станів зварних конструкцій в умовах розвинених деформацій повзучості. Показано вплив дефекту локального стоншення стінки трубопровідного елемента на закономірності докритичного

і макроскопічного пошкодження металу при складному температурно-силовому впливі. Бібліогр. 11, іл. 7.

Ключові слова: докритичне пошкодження, деформації повзучості, трубопровідний елемент, дефект стоншення стінки, граничний стан, чисельне прогнозування

A. S. MILENIN, E. A. VELIKOVANENKO,
G. PH. ROZYINKA, N.I. PIVTORAK

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, 11 Kazimir
Malevich str., 03150, Kiev, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

METHODOLOGY OF NUMERICAL PREDICTION OF SERVICEABILITY OF PIPELINE ELEMENTS WITH CORROSION-EROSION DEFECTS UNDER CONDITIONS OF HIGH-TEMPERATURE OPERATION

A complex of models of numerical prediction of subcritical damage and limiting state of welded pipeline elements under conditions of high-temperature operation, taking into account the features of site welding and the presence of an isolated defect of local wall thinning of the corrosion-erosive nature, was developed. The characteristics of current and limited state of welded structures under the conditions of propagated creep deformations were investigated using the example of a characteristic pipeline of stainless steel. The influence of a local wall thinning defect of a pipeline element on the regularities of subcritical and macroscopic metal damage was shown at a complex temperature-force action. 11 – Ref., 7 – Fig.

Keywords: subcritical damage, creep deformations, pipeline element, wall thinning defect, limited state, numerical prediction

Поступила в редакцію
05.09.2017

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Титан 2018: производство и применение в Украине»

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 11–13 июня 2018 г.

Председатели программного комитета:
академик Б. Е. Патон, проф. В. А. Богуслаев



Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ
АО «Мотор Сич»
Запорожский национальный технический университет
Международная Ассоциация «Сварка»



Тематика конференции

- Применение изделий и конструкций из титановых сплавов в авиа-двигателестроении и других отраслях промышленности.
- Литейные технологии.
- Аддитивные технологии в производстве изделий из титановых сплавов.
- Новые сплавы на основе титана и его интерметаллидных соединений.
- Прогрессивные технологии и оборудование для получения слитков титана и сплавов на его основе.
- Деформационная обработка титана.
- Структура и свойства титановых сплавов.
- Прогрессивные технологии сварки и пайки изделий из титановых сплавов.

Подача заявок для участия в конференції и отправка докладов до 15 марта 2018 г.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, отд. № 51,
ул. Казимира Малевича, 11,
г. Киев, 03680, Украина.
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, 205-22-98
E-mail: journal@paton.kiev.ua, lanagrig@gmail.com
www.pwi-scientists.com/rus/titan2018



Информационная поддержка – журналы
«Автоматическая сварка»
и «Современная электрометаллургия».