

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ДОКРИТИЧЕСКОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

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

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Разработан комплекс математических моделей и программных средств их реализации для численного прогнозирования совместных процессов термомодеформирования и докритического разрушения металла ответственных сварных конструкций в условиях сварки и под действием переменного силового воздействия. Предложены критерии зарождения микро- и макроразрушения при пластическом течении материала по вязкому и хрупко-вязкому механизмам. На примере элементов трубопроводов с изолированными и множественными дефектами коррозионного утонения стенки в области монтажной (ремонтной) сварки исследованы особенности зарождения и развития докритического разрушения под действием малоциклового внешнего силового воздействия. Библиогр. 20, рис. 7.

*Ключевые слова:* докритическое повреждение, вязкое разрушение, ультрамалоцикловая и малоцикловая усталость, трубопроводный элемент, монтажная и ремонтная сварка

Техническая диагностика и оценка работоспособности ответственных сварных конструкций предполагает проведение всестороннего анализа их фактического состояния неразрушающими методами контроля с целью выявления, прежде всего, дефектов несплошности, возникших в процессе эксплуатации [1–3]. И если обнаружение макроскопических дефектов (трещин, пор, локальных коррозионных потерь металла) не вызывает принципиальных сложностей, то дефектоскопия рассеянной докритической микроповрежденности (ДМ) металла сопряжена с объективными сложностями, связанными с ее микромасштабностью. Хотя наличие на отдельных участках конструкции ДМ не приводит к существенному снижению ее несущей способности, свойства металла при накоплении поврежденности меняются, и для проведения аналитических оценок в рамках процедур технической диагностики необходимо использование методик, учитывающих особенности состояния металла на различных участках и его влияние на эксплуатационные характеристики конструкции в целом.

Появление рассеянной поврежденности металла может быть обусловлено рядом факторов различной природы: интенсивным пластическим деформированием, усталостным нагружением, высокой концентрацией диффузионного водорода, радиационным облучением и др. [4–6]. При этом накопление ДМ под действием регулярных эксплуатационных воздействий учитывается при разработке конструкционных решений как деградация материала, что позволяет консервативно оценивать их текущее состояние. Но если

конструкция подвергалась существенному нерегулярному воздействию природного или техногенного характера (оползни, землетрясения, перегрузка при пусконаладочных работах и т.п.), то необходимо оценить степень повреждения, которое получил материал. Наличие монтажных или ремонтных сварных швов усложняет такой анализ, так как сварные соединения являются местами локальной химической и структурной неоднородности, а также характеризуются остаточным напряженно-деформированным состоянием, обусловленным накопленными в процессе сварки пластическими деформациями, которые зависят от технологических параметров сварки. Поэтому разработки математических моделей накопления ДМ ответственных сварных конструкций, в частности, для характерных случаев существенного внешнего статического, статически переменного или усталостного воздействия, вызывающего пластическое течение металла и нарушение его сплошности, являются актуальными и практически важными.

Трубопроводные элементы и сосуды давления являются одними из самых распространенных типов сварных конструкций, зачастую, предполагающих долгосрочную эксплуатацию в условиях внешнего силового нагружения и агрессивного коррозионного воздействия. Допустимость формирующихся при этом эксплуатационных дефектов определяется на основе актуальных нормативных документов и стандартов исходя из предположений об известных закономерностях деградации свойств материала конструкции во времени [7, 8]. Избыточ-

ное нагружение, которое сопровождается пластическим деформированием металла, может вызывать зарождение ДМ по вязкому механизму разрушения, уменьшая площадь эффективного поперечного сечения конструкции, что не учитывается в соответствующих методиках оценки состояния трубопроводов и сосудов давления.

Авторами в рамках предыдущих исследований были предложены подходы численного анализа предельного состояния сварных трубопроводных элементов с дефектами локальной коррозии металла в области металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) [9, 10]. С их помощью было исследовано влияние послесварочного напряженного состояния на склонность металла конструкции к зарождению и развитию разрушения в области дефекта. В частности, показано, что взаимодействие полей напряжений и пластических деформаций в области геометрического концентратора и места сварки может иметь негативное влияние на статическую прочность конструкции. Но важные с практической точки зрения задачи оценки работоспособности трубопроводных элементов с коррозионными дефектами несплошности в области монтажной или ремонтной сварки в условиях ультрамалоцикловой и малоцикловой нагрузок требуют дальнейшего развития данных методик.

Целью настоящей работы является разработка методов и соответствующих математических моделей процессов зарождения и развития ДМ в металле ответственных сварных конструкций под воздействием ультрамалоциклового и малоциклового нагружения с точки зрения оценки их состояния, а также исследование на примере трубопроводных элементов с коррозионными дефектами несплошности в области монтажной или ремонтной сварки характерных особенностей влияния сварки на работоспособность дефектных конструкций.

Известно, что механизм усталостного разрушения при ультрамалоцикловом и малоцикловом нагружении связан с накоплением и развитием ДМ на каждом из циклов пластического деформирования металла. При континуальном описании этого процесса принято использовать мезомасштабное приближение, основанное на моделях вязкого разрушения сплошной среды [11, 12]. Для прогнозирования данных процессов необходимо корректно описать этапы вязкого разрушения с учетом неизоотермического состояния материала при сварке. Для этого модели разрушения должны быть объединены с соответствующими моделями кинетики температурного и напряженно-деформированного состояний при сварке и циклическом нагружении, что позволит получить полную систему взаимосвязанных физико-механических процессов, имеющих место в металле трубопровода.

Кинетика температурного поля при монтажной и ремонтной дуговой сварке может быть описана с помощью нестационарного уравнения теплопроводности, в многомерном случае представимого в виде [13]:

$$c\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T)\nabla T], \quad (1)$$

где  $c\gamma$ ,  $\lambda$  – объемная теплоемкость и теплопроводность металла, соответственно;  $T$  – температура конструкции в момент времени  $t$  в точке с координатами  $(r, \beta, z)$ , согласно схеме, представленной на рис. 1.

Для решения уравнения (1) и адекватного учета особенностей технологического процесса сварки необходима постановка граничных условий, которые для рассматриваемого случая имеют следующий вид:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_T(T - T_0) + \varepsilon_0\sigma_{SB}(T^4 - T_0^4) - q, \quad (2)$$

где  $n$  – нормаль к поверхности конструкции;  $\alpha_T$  – коэффициент поверхностной теплоотдачи;  $\varepsilon_0$  – степень черноты поверхности трубопровода;  $\sigma_{SB}$  – константа Стефана–Больцмана;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $q$  – поверхностный поток тепла от источника сварочного нагрева в рассматриваемой области поверхности.

Конечно-разностное решение задачи (1)–(2) позволяет оценивать распределение температур в процессе сварки с учетом конкретных технологических параметров. Расчетная кинетика температурного состояния конструкции при сварке лежит в основе численной оценки напряженно-деформированного и поврежденного состояний трубопроводного элемента. Компоненты тензора деформаций  $\varepsilon_{ij}(i, j = r, \beta, z)$  в рассматриваемом случае представимы в виде суперпозиции следующих слагаемых:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij}(d\varepsilon_{ij}^T + df/3), \quad (3)$$

где  $d\varepsilon_{ij}^e$ ,  $d\varepsilon_{ij}^p$ ,  $d\varepsilon_{ij}^T$  – компоненты приращения тензора деформаций, которые определяются упругим

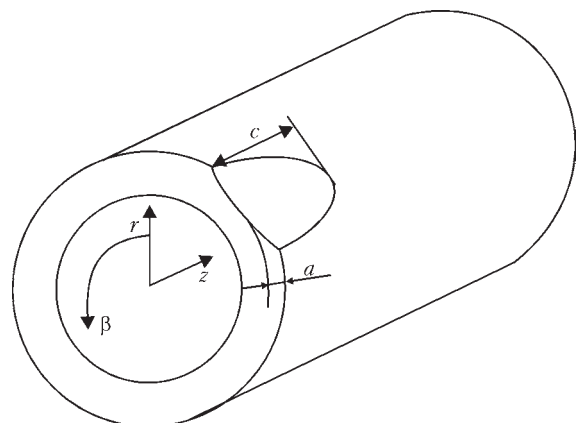


Рис. 1. Схема участка трубопровода с внешним полуэллиптическим дефектом локального утонения стенки

механизмом деформирования, пластическим течением и температурным расширением, соответственно;  $f$  – объемная концентрация равномерно распределенных пор вязкого разрушения.

В выражении (3) фигурирует объемная концентрация равномерно распределенных пор  $f$ , наличие которой отличает разработанные модели от классических методов анализа термомодеформированного состояния сплошной среды. Наличие ДМ не только имеет аддитивную составляющую в тензоре деформаций, но и меняет поверхность текучести материала  $\Phi$ , для математического описания которой нашли широкое применение подходы Гурсона, Твергаарда и Нидлмана (так называемая ГТН модель) [14]:

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

где  $q_1 = 1,5$ ,  $q_2 = 1$ ,  $q_3 = 1,5$  – константы;  $f^*$  – эквивалентная концентрация пор;  $\sigma_T$  – предел текучести материала;  $\sigma_m = (\sigma_{rr} + \sigma_{\beta\beta} + \sigma_{zz})/3$  – среднее значение нормальных компонент тензора напряжений  $\sigma_{ij}$ ;  $\sigma_i = \sqrt{\sigma_{ij} \sigma_{ij}}/2$  – интенсивность напряжений.

Эквивалентная концентрация пор  $f^*$  в (4), учитывающая взаимодействие между отдельными несплошностями, оценивается на основе следующих соотношений [15]:

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

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

Как видно из (4), предельный переход  $f^* \rightarrow 0$  переводит ГТН модель в условие текучести Мизеса. Также для корректного описания предельного состояния рассматриваемых конструкций необходимо учитывать деформационное упрочнение металла в условиях статического и циклического эксплуатационного нагружения, а именно, изменение его предела текучести согласно следующему соотношению [16]:

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

где  $c_1 = 2,149 \cdot 10^{-3}$ ;  $c_2 = 9,112 \cdot 10^{-2}$ ;  $\varepsilon_0 = 1,540 \cdot 10^{-4}$ ,  $m = 0,14$  – константы; точкой над переменной обозначено дифференцирование по времени.

Для оценки зарождения пор вязкого разрушения при пластическом течении материала в неизотермическом случае использовался модифициро-

ванный критерий Джонсона–Кука [9], согласно которому в некотором объеме металла появляется начальная пористость с концентрацией  $f_0$  при выполнении следующего условия:

$$\chi_k = \int \frac{d\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c(T)} > 1, \quad (6)$$

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

Критическая пластическая деформация  $\varepsilon_c$  в (6) может быть вычислена согласно следующему соотношению:

$$\varepsilon_c(T) = \left[ d_1 + d_2 \exp \left( -d_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_i} \right) \right] \exp \left\{ \left[ \frac{\sigma_T - \sigma_T(T)}{B_f} \right]^\xi \right\},$$

где  $d_1, d_2, d_3, B_f, \xi$  – константы.

Дальнейший рост концентрации пор вязкого разрушения в процессе пластического деформирования металла, в частности, при эксплуатационном статическом или циклическом нагружении, подчиняется закону Райса–Трэйси, а именно [17]:

$$df = k_{ms} f_0 K_1 \exp \left( K_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_i} \right) d\varepsilon_i^p, \quad (7)$$

где  $k_{ms}$  – коэффициент, учитывающий пластическое микродеформирование металла;  $K_1 = 0,28$ ,  $K_2 = 1,5$  – константы.

Конечно-элементное решение краевой задачи нестационарной термопластичности проводилось путем прослеживания совместного развития упруго-пластических деформаций, докритического и критического разрушения по вязкому механизму. Реализация такого численного прослеживания связана с двумя нелинейностями по физическим процессам: пластическому деформированию и разрушению. Для формального решения этих нелинейных задач были реализованы соответствующие итерационные процессы, позволяющие находить состояние конечного элемента, удовлетворяющее уравнениям равновесия и условию (4). Так, для решения нелинейности по пластическому деформированию был использован подход, предложенный В. И. Махненко [18, 19], а именно, рассмотрение функции состояния материала  $\Psi$ , удовлетворяющей следующим условиям:

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T \sqrt{1 + (q_3 f^*)^2 - 2q_1 f^* \cosh \left( q_2 \frac{3\sigma_m}{2\sigma_T} \right)}, \quad (8)$$

$$\Psi > \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s,$$

состояние  $\sigma_i > \sigma_s$  недопустимо,

где  $G = 0,5 E/(1 + \nu)$ ;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Основная сложность при моделировании циклического нагружения заключается в том, что небольшие изменения состояния металла на одном цикле нагружения, а именно, накопление и рост ДМ, вызывают изменение поверхности текущей согласно (4), что вызывает изменение петли пластического деформирования. Но при этом на каждом этапе нагрузки необходимо определить равновесное состояние поврежденности и соответствующее ему распределение напряжений и деформаций. Для этого из предположения, что стационарное состояние характеризуется пренебрежимо малой скоростью роста ДМ по (7), предлагается проводить следующий итерационный процесс по функции  $\Psi_K$ :

$$F = \begin{cases} F + dF, \text{ если } f_0 K_1 \exp(K_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_i}) d\varepsilon_i^p = \\ = \Psi_K \leq \Psi_K^0 \approx 10^{-5}, \\ F, \text{ если } \Psi_K > \Psi_K^0, \end{cases} \quad (9)$$

где  $F$  – система внешних силовых нагрузок, действующих на конструкцию;  $dF$  – приращение силовых нагрузок в процессе численного прослеживания.

Таким образом, решение задач (8)–(9) на каждом этапе прослеживания позволяет с контролируемой степенью точности определять степень поврежденности материала сварной конструкции с учетом ее геометрических особенностей. В качестве критерия зарождения макроскопического разрушения использовалось условие хрупко-вязкого разрушения, а именно, выполнение одного из трех условий:

$$\left( \Psi - \frac{1}{2G} \right)_{KP} \geq \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1,5\sigma_i} \approx \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1,5\sigma_s(\varepsilon_p, T)},$$

$$f^* \rightarrow f_d^* = \frac{2q_1}{q_3} \cosh\left(\frac{3q_2\sigma_m}{2\sigma_T}\right), \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_1}{1 - 2f/3} > S_K,$$

где  $S_K$  – напряжение микроскола; индекс «\*» относит переменную к предыдущему шагу прослеживания;  $\varepsilon_f$  – предельная деформационная способность материала.

В случае, если для некоторого конечного элемента выполняется одно из условий (10), считалось, что данный конечный элемент теряет свою несущую способность и на его месте сформировалась макроскопическая несплошность. Дальнейшее нагружение конструкции и развитие макро-разрушения в итоге приводит к лавинообразной потере несущей способности материала в рамках

итерационного процесса (9), что можно интерпретировать как спонтанное разрушение конструкции. В зависимости от точности имеющихся данных и от производственной необходимости предельным состоянием ответственной конструкции можно считать либо момент зарождения первой макронесплошности, либо ее спонтанное разрушение.

Посредством данной численной методики в рамках настоящей работы было проведено исследование особенностей взаимного влияния дефектов локальной потери металла и областей монтажной и ремонтной сварки. Для этого были рассмотрены три характерных примера, а именно:

- 1) изолированный дефект утонения в области монтажного кольцевого шва (рис. 2, а);
- 2) изолированный дефект утонения на внутренней поверхности трубопровода в области многопроходной ремонтной наплавки локальной потери металла (рис. 2, б);
- 3) множественный дефект утонения стенки на внешней поверхности трубы в области многопроходной ремонтной наплавки локальной потери металла (рис. 2, в).

Без существенного ограничения общности считалось, что рассматриваемый трубопровод (диаметром  $D = 1420$  мм и с толщиной стенки  $\delta = 20$  мм) подвержен переменному внутреннему давлению  $P(t)$ , которое меняется во времени  $t$  по синусоидальному закону:

$$P(t) = P_0 + dP \sin\left(2\pi \frac{t}{\tau}\right),$$

где  $\tau$  – период колебаний давления.

Значения расчетных параметров принимались следующими:  $f_0 = 0,01$ ,  $B_f = \sigma_r$ ,  $\xi = 3$ ,  $k_{ms} = 7$ ; мате-

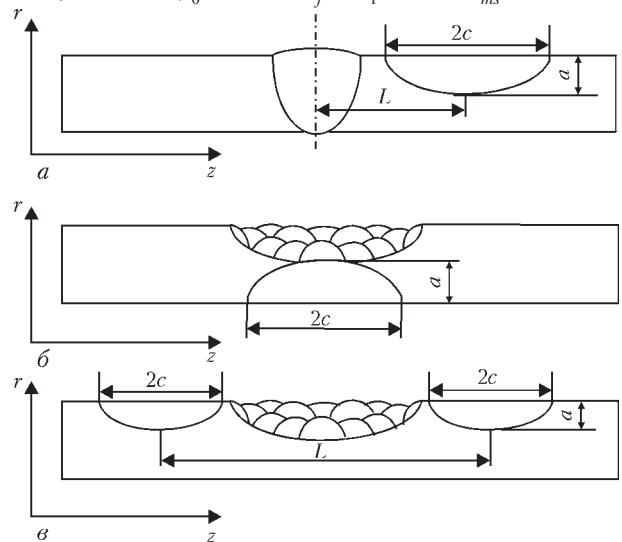


Рис. 2. Схемы различных видов коррозионной дефектности в области монтажной или ремонтной сварки: а–б – изолированный дефект утонения в области соответственно монтажного кольцевого шва и в области многопроходной ремонтной наплавки локальной потери металла; в – множественный дефект утонения стенки трубы в области многопроходной ремонтной наплавки локальной потери металла

риал трубопровода – сталь 09Г2С, свойства которой приведены, в частности, в работе [20].

Как показали результаты численных исследований, основанных на изложенной выше методологии, взаимодействие эксплуатационных напряжений в области геометрического концентратора и полей остаточных послесварочных напряжений (рис. 3) имеет влияние на характер развития ДМ и предельное количество циклов  $N_f$ , после которых в конструкции появляются первые макронесплошности. Так, при цикле внутреннего давления ( $P_0 = 8,0$  МПа,  $dP = 2,6$  МПа,  $\tau = 60$  с), когда реализуются условия ультрамалоциклового усталости (количество циклов не более  $10^3$ ), зависимость  $N_f$  от глубины дефекта  $a$  имеет квазилинейную зависимость в диапазоне значений  $N_f = 320...360$  циклов (рис. 4, а). При тех же условиях дефект в области сварочной наплавки имеет схожий диапазон предельных значений  $N_f$  (отличие объясняется внутренним расположением дефекта, что делает дефект менее опасным как с точки зрения статической прочности конструкции, так и с позиции ее сопротивления усталости), но характеризуется существенной нелинейностью (рис. 4, б). Это связано с тем, что увеличение глубины утонения стенки трубопровода под областью ремонтной наплавки, с одной стороны, вызывает увеличение напряжений в области геометрического концентратора, с другой стороны, уменьшает количество наплавленного металла и снижает уровень послесварочных напряжений.

Исследования более сложного случая множественной коррозионной поврежденности (пример 3) показали, что наличие двух симметричных относительно области многопроходной наплавки дефектов вызывает существенное (более чем в 4 раза) снижение стойкости трубопровода к усталостному разрушению несмотря на относительно большое расстояние между ними (рис. 5). Это объясняется тем, что ослабленная ремонтной сваркой область способствует общему сни-

жению жесткости стенки, формированию более высоких областей напряжений и, соответственно, более высокой концентрации пор вязкого разрушения. Для демонстрации этого было проведено дополнительное исследование кинетики ДМ с множественной коррозионной поврежденностью ( $a = 10$  мм,  $2c = 40$  мм) для меньших нагрузок ( $P_0 = 7,0$  МПа,  $dP = 1,8$  МПа). Как показано на рис. 6, это вызывает постепенное накопление пластических деформаций и распространение площа-

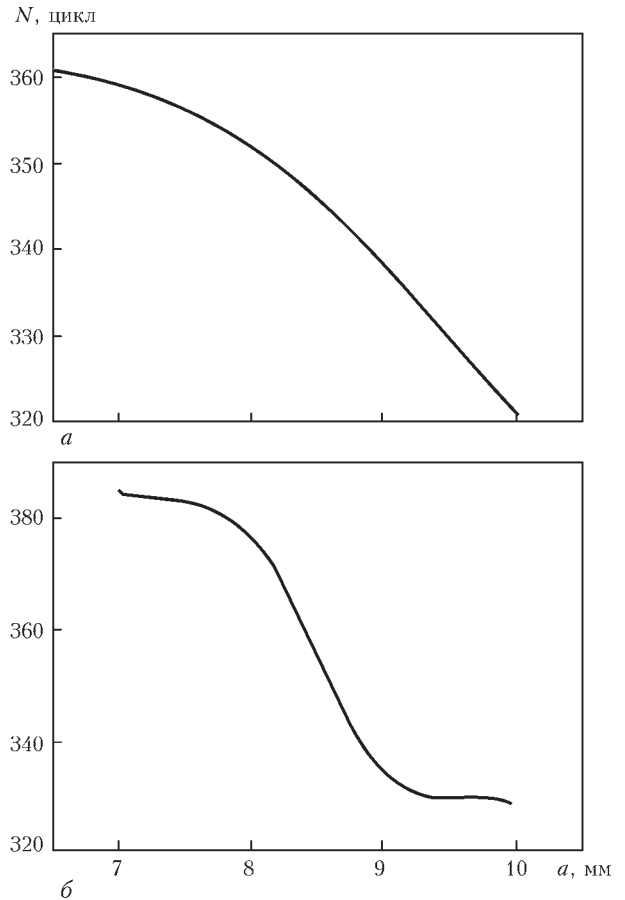


Рис. 4. Зависимость предельного количества циклов нагружения  $N_f$  от глубины дефекта утонения длиной  $2c = 40$  мм в области монтажного шва (а) и многопроходной ремонтной сварочной наплавки (б)

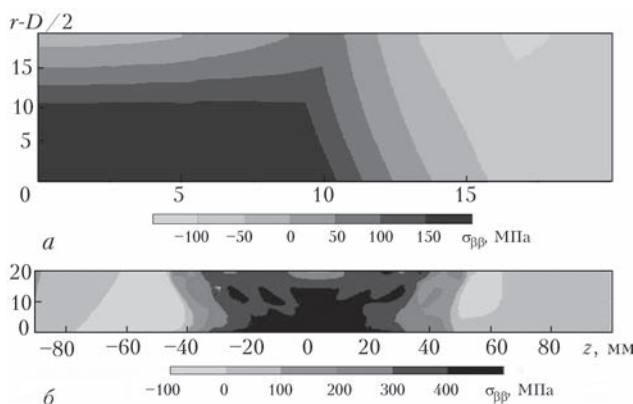


Рис. 3. Результаты моделирования поля окружных напряжений  $\sigma_{\phi\phi}$  в области монтажной сварки (а) и многопроходной ремонтной наплавки дефекта локального утонения стенки трубопровода (б)

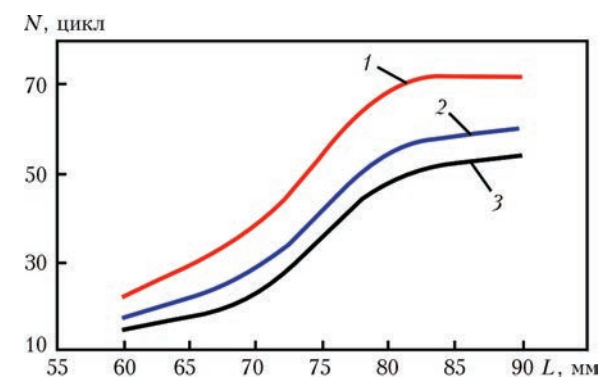


Рис. 5. Зависимости количества циклов нагружения внутренним давлением участка трубопровода с областью ремонтной сварочной наплавки до зарождения макроразрушения  $N_f$  от глубины дефектов утонения  $a$  и расстояния между ними  $L$  ( $2c = 40$  мм): 1 –  $a = 8$ ; 2 – 10; 3 – 12 мм

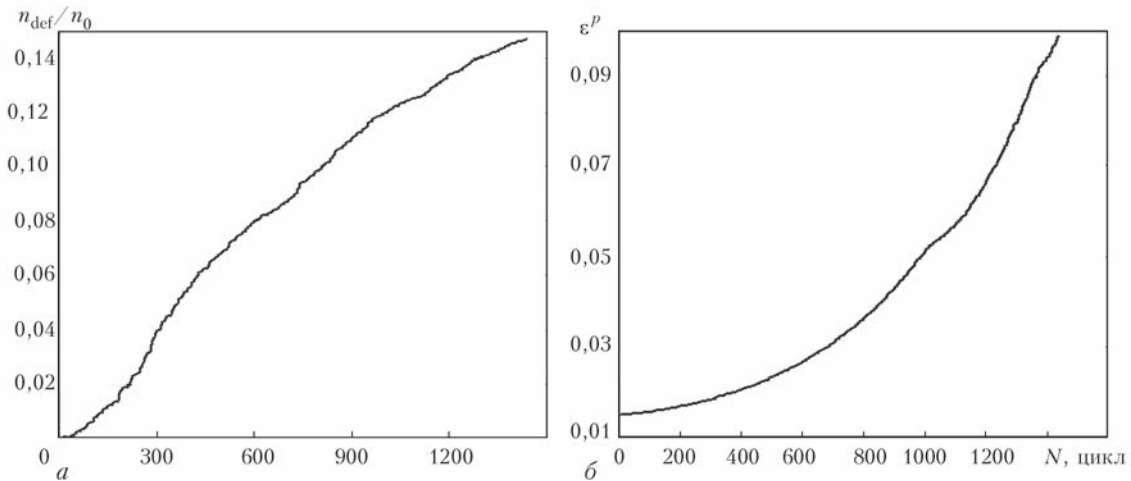


Рис. 6. Кинетика накопления пластических деформаций (а) и относительной поврежденности (б) от количества циклов нагружения трубопровода с множественной коррозионной поврежденностью ( $a \times 2c = 10 \text{ мм} \times 40 \text{ мм}$ ,  $L = 60 \text{ мм}$ ) в области ремонтной наплавки

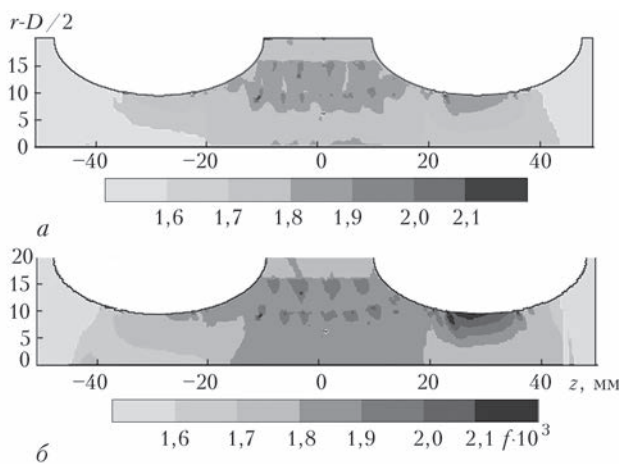


Рис. 7. Распределение поврежденности трубопровода в области множественного дефекта коррозионной потери металла ( $a \times 2c = 10 \text{ мм} \times 40 \text{ мм}$ ,  $L = 60 \text{ мм}$ ) через 10 (а) и 1000 (б) циклов нагружения

ди зарождения пор вязкого разрушения. При этом, как показано на рис. 7, в области одного из дефектов формируется область высокой концентрации ДМ, что обусловлено асимметрией наложения валиков ремонтной наплавки (и, соответственно, более высокими остаточными напряжениями на периферии этого дефекта, см. рис. 4, б), а также формированием общей области поврежденности между дефектами утонения и участком ремонта с концентрацией пор  $f > 1,8 \cdot 10^{-3}$ .

### Выводы

Разработан комплекс математических моделей и программных средств их реализации для численного прогнозирования совместных процессов термомодеформирования и докритического разрушения металла ответственных сварных конструкций в условиях сварки и под действием переменного силового воздействия. Предложены критерии зарождения микро- и макроразрушения конструкции при пластическом течении материала по вязкому и хрупко-вязкому механизмам.

На основе результатов численного анализа накопления пластических деформаций в условиях ультрамалоциклового и малоциклового нагружения переменным внутренним давлением трубопроводного элемента с множественным коррозионным повреждением в области ремонтной наплавки показано, что наличие локальных геометрических концентраторов напряжений в области сварки существенно снижает стойкость к критическому разрушению металла под действием ультрамалоциклового нагружения. При этом зарождение разрушения происходит по тому же сценарию, что и в случае статического нагружения: докритическая поврежденность развивается в области сварки и распространяется на основной металл конструкции по мере накопления пластических деформаций и развития пористости вязкого разрушения.

Показано, что ослабленная ремонтной сваркой область при наличии на периферии множественных дефектов локальной потери металла способствует общему снижению жесткости стенки и формированию областей более высоких напряжений и, соответственно, более высокой концентрации пор вязкого разрушения в условиях циклического нагружения. Как результат, величина предельного количества циклов нагружения снижается более чем в 5 раз по сравнению с аналогичной конструкцией с одиночным дефектом в области монтажной или ремонтной сварки.

1. Lam C. Statistical Analyses of Incidents on Onshore Gas Transmission Pipelines Based on PHMSA Database / C. Lam, W. Zhou // Pressure Vessels and Piping. – 2016. – № 6. – P. 1–56.
2. Best practice for risk based inspection as a part of plant integrity management. Contract research report 363/2001 / B. Wintle, B. W. Kenzie, G. J. Amphlett [et al.]. – Merseyside: Health and Safety Executive, 2003. – 186 p.
3. Escoe A. K. Piping and pipelines. Assessment Guide / A. K. Escoe. – Texas: Gulf Professional Publishing, 2006. – 555 p.

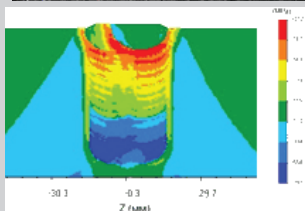
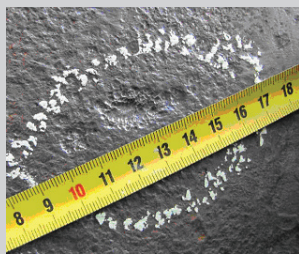
4. Kondo D. Basic concepts and models in continuum damage mechanics / D. Kondo, H. Welemane, F. Cormery // *Revue europeenne de genie civil*. – 2007. – Vol. 11, № 7–8. – P. 927–943.
5. Klingbeil D. Gurson-based modeling of ductile damage and failure during cyclic loading processes at large deformation / D. Klingbeil, B. Svendsen, F. Reusch. // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2016. – Vol. 160. – P. 95–123.
6. Portnykh I. A. Characteristics of radiation porosity and structural phase state of reactor austenitic 07Cr–16Cr–19Ni–2Mo–2Mn–Ti–Si–V–P–B Steel after neutron irradiation at a temperature of 440 ... 600 °C to damaging doses of 36–94 dpa / I. A. Portnykh, V. L. Panchenko. // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2016. – Vol. 117, Is. 6. – P. 611–623.
7. Fitness-for-Service. American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. First edition. Washington: API Publications and Distribution, 2000. – 625 p.
8. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – 91 с.
9. Оценка работоспособности магистрального трубопровода с локальным утонением стенки при ремонте дуговой наплавкой / Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, А. С. Миленин [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 2015. – № 1. – С. 22–27.
10. Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях / Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, А. С. Миленин [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 2013. – № 9. – С. 26–31.
11. Jean Lemaitre Rodrigue Desmorat. *Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 292 p.
12. Xue L. A unified expression for low cycle fatigue and extremely low cycle fatigue and its implication for monotonic loading / L. Xue // *International Journal of Fatigue*. – 2008. – Vol. 30. – P. 1691–1698.
13. Фролов В. Теория сварочных процессов / В. Фролов. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
14. Xue L. Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials / L. Xue // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2008. – № 75. – P. 3343–3366.
15. Needleman A. Void growth in an elastic-plastic medium / A. Needleman // *Journal of Applied Mechanics*. – 1972. – № 39. – P. 964–970.
16. Huh H. Crash-Worthiness Assessment of Thin-Walled Structures with the High-Strength Steel Sheet / H. Huh, W. J. Kang // *Int. J. of Vehicle Design*. – 2002. – Vol. 30, № 1–2. – P. 1–21.
17. Карзов Г. П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения / Г. П. Карзов, Б. З. Марголин, В. А. Швецова. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
18. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций / В. И. Махненко. – К.: Наукова думка, 1976. – 320 с.
19. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – К.: Наукова думка, 2006. – 618 с.
20. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник; под ред. Б. Е. Неймарка. – М.: Энергия, 1967. – 240 с.

A set of mathematical models and their implementation software was developed for numerical prediction of joint processes of thermal deformation and subcritical fracture of metal in critical welded structures in welding and under variable force impact. Criteria of micro- and macrofracture initiation at plastic flow of material by ductile and brittle-ductile mechanisms are proposed. Features of initiation and propagation of subcritical fracture at low-cycle external force impact were studied in the case of pipeline elements with isolated and multiple defects of corrosion wall thinning in the area of erection (repair) welding. 20 References, 7 Figures.

*Keywords*: Subcritical damage, ductile fracture, ultralow-cycle and low-cycle fatigue, pipeline element, erection and repair welding

Поступила в редакцию  
18.10.2016

**Отдел «Математических методов исследования физико-химических процессов при сварке и спецэлектрометаллургии» Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины**



предлагает следующие услуги в области технической диагностики ответственных конструкций и математического моделирования в сварке и родственных технологиях:

- моделирование напряженно-деформированного состояния сварных конструкций при монтажных и ремонтных работах, а также в процессе эксплуатации;
- экспертный анализ прочности и остаточного ресурса ответственных сварных конструкций по результатам неразрушающего контроля;
- создание инженерного проблемно-ориентированного программного обеспечения для моделирования технологических процессов и оценки работоспособности ответственных сварных конструкций;
- разработка необходимой конструкторской и технической документации.

За подробной информацией обращайтесь по телефону: +38 (044) 200-65-57; e-mail: d34@paton.kiev.ua