

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОБНАРУЖЕННЫМИ КОРРОЗИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

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](mailto:office@paton.kiev.ua)

Гарантирование необходимой остаточной прочности и работоспособности трубопроводов с коррозионными дефектами, обнаруженными при дефектоскопии, предполагает выполнение критериев предельного состояния, которые связывают свойства материала труб и фактическую геометрию конструкции с системой эксплуатационных нагрузок. Одним из путей снижения консервативности соответствующего экспертного анализа является непосредственный учет естественного разброса физико-механических свойств материала. В данной работе предлагается численный подход статистического прогнозирования предельного состояния трубопроводов с дефектами локального утонения стенки, который основан на рассмотрении естественной пространственной неоднородности свойств материала (таких как предел текучести, напряжение микроразрушения, начальная концентрация пористости вязкого разрушения, критическое значение пластической деформации и т. д.) в рамках конечно-элементного описания совместного развития напряженно-деформированного состояния и вязкого докритического повреждения с использованием метода Монте-Карло. Показано, что этот подход характеризуется меньшей консервативностью в сравнении с общепринятыми детерминированными методами, которые предполагают рассмотрение однородных свойств материала. При этом статистический анализ остается достаточно точным для решения характерных задач технической диагностики объектов повышенной опасности. Библиогр. 10, табл. 2, рис. 7.

*Ключевые слова:* трубопровод, дефект коррозионной потери металла, предельное состояние, вероятность разрушения, метод Монте-Карло, вязкое разрушение

Статистическое прогнозирование прочности и надежности ответственных конструкций является практической альтернативой детерминированным методам проектирования и экспертного анализа фактического состояния. Это, в частности, позволяет избежать консервативного предположения о том, что большинство параметров конструкции и свойств материала являются известными постоянными, и учитывать неопределенность входных данных. Применительно к оценке состояния магистральных и технологических трубопроводов под внутренним давлением, одной из характерных задач является определение прочности и надежности с учетом наличия эксплуатационных дефектов, таких как коррозионные (эрозионные) потери металла. Концентрация напряжений в области утонения стенки вызывает увеличение склонности материала к зарождению и распространению разрушения при сравнительно низкой внешней нагрузке. Существует ряд стандартных алгоритмов, позволяющих оценить уровень снижения прочности дефектного трубопроводного элемента (ТЭ) с обнаруженной в процессе дефектоскопии коррозионно-эрозионной потерей металла [1–3]. Используемые критерии предельного состояния требуют определенного набора входных параметров, таких как физико-механические свойства материала, фактическая геометрия конструкции,

характеристики сопротивления определенному типу разрушения; кроме того, обычно делается предположение об однородности материала и его изотропности.

Для снижения консервативности оценки предельного состояния ТЭ с коррозионными повреждениями с учетом стохастического пространственного распределения свойств материала могут быть использованы методы статистической теории прочности, наиболее простым из которых является метод Монте-Карло. Но реализация этого подхода требует точного описания докритического и критического разрушения ТЭ под действием эксплуатационной нагрузки (внутреннего давления  $P$ ), а также соответствующего высокопроизводительного программного обеспечения.

В рамках данной работы предложен комплексный подход численного прогнозирования прочности и надежности трубопроводов с обнаруженными дефектами коррозионной потери металла с пространственно неоднородными свойствами посредством метода Монте-Карло для реализации статистического анализа прочности наряду с конечно-элементным описанием состояния конкретной конструкции.

Первым этапом разработки указанной методологии было построение соответствующего конечно-элементного описания напряженно-де-

А.С. Миленин <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>

© А.С. Миленин, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, Н.И. Пивторак, 2019

формированного состояния (НДС) и рассеянной поврежденности металла конструкции в процессе монтажной сварки и последующей эксплуатации. Применительно к рассматриваемой задаче прогнозирования предельного давления  $P_r$  в ТЭ с изолированным поверхностным дефектом локального утонения стенки показало свою эффективность конечно-элементное описание НДС металла в условиях внешнего температурного и силового воздействия наряду с моделированием зарождения и развития вязкого разрушения. Так, кинетика температурного поля при монтажной сварке, которая моделировалась для учета остаточного послесварочного состояния, оценивалась путем численного решения нестационарного уравнения теплопроводности под действием нормально распределенного поверхностного источника тепла (что является общепринятым, в частности, при рассмотрении технологического процесса дуговой сварки) [4]. Прогнозирование развития НДС трубопроводного элемента с полуэллиптическим поверхностным утонением стенки (рис. 1) заключается в реализации прослеживания развития деформаций различной природы совместно с докритическим разрушением по вязкому механизму, которое представляет собой зарождение и развитие микропористости материала. При этом необходимо учитывать упругую и пластическую составляющую тензора деформаций, температурное расширение материала, а также деформацию, обусловленную наличием пор вязкого разрушения. В предыдущих работах авторов было показано, что в этом случае взаимосвязь между компонентами тензора деформаций  $\varepsilon_{ij}$  (в цилиндрической системе координат  $i, j = r, \beta, z$ ) и напряжений  $\sigma_j$  определяется законом Гука и ассоциированным законом пластического течения, исходя из следующего соотношения [5]:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m) - \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m)^* + \delta_{ij}(K\sigma_m + \Delta\varepsilon_T + \Delta f/3) + (K\sigma_m)^*, \quad (1)$$

где  $\Delta_j$  – символ Кронекера;  $K = (1-2\nu)/E$  – модуль объемного сжатия;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $G = 0,5E/(1+\nu)$  – модуль сдвига; символ «\*» относит переменную к предыдущему шагу прослеживания;  $f$  – объемная концентрация пор вязкого разрушения;  $\sigma_m$  – мембранные напряжения;  $\varepsilon_T$  – температурные деформации;  $\Psi$  – функция состояния материала, которая определяется итерационным методом исходя из следующих условий [6]:

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

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

состояние  $\sigma_i > \sigma_s$  недопустимо,

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\sigma_s$  – поверхность текучести материала.

Зарождение и развитие докритического разрушения по вязкому механизму может быть описано в рамках модели Гурсона–Твергаарда–Нидлмана и закона Райса–Трейси [7, 8], при этом предельное состояние ТЭ соответствует выполнению одного из трех условий [9]:

$$\Psi - \frac{1}{2G} \geq \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1,5\sigma_s(\varepsilon_p, T)}, f^* \rightarrow 2\frac{q_1}{q_3} \cosh\left(1,5q_2\frac{\sigma_m}{\sigma_T}\right),$$

$$\frac{3\sigma_1}{3-2f} > S_K, \quad (3)$$

где  $S_K$  – напряжения микроскола;  $q_1, q_2, q_3$  – константы;  $\varepsilon_p$  – суммарная пластическая деформация;  $\varepsilon_f$  – предельная деформационная способность материала.

Неопределенность входных данных вызывает разброс значений расчетного предельного внутреннего давления  $P_r$  в ТЭ с дефектом утонения. Для формального описания этого явления может быть использован алгоритм, основанный на прямом методе Монте-Карло, в рамках которого принимается, что вероятность разрушения трубопровода  $p$  при некотором внутреннем давлении  $P$  определяется частотой достижения предельного состояния согласно (3) в рамках репрезентативной выборки равновероятных комбинаций свойств материала трубы, т. е.

$$p(P) = N_p/N_r, \quad (4)$$

где  $N_p$  – количество испытаний, при котором конструкция достигла предельного состояния при давлениях, меньших или равных  $P$ ;  $N_r$  – общее количество испытаний в рамках репрезентативной выборки.

Одной из основных задач при этом является определение необходимого количества испытаний  $N_r$ , достаточных для репрезентативной выборки входных данных. Для этого предложен следующий итерационный алгоритм:

1. При относительно небольшом начальном количестве численных экспериментов  $N_0$  определяется зависимость  $p_0(P)$ .

2. Следующее значение  $N_1$  равняется удвоенному значению предыдущего ( $N_1 = 2N_0$ ) и для  $N_1$  определяется зависимость  $p_1(P)$ .

3. Если среднеквадратичное отклонение  $p_0$  от  $p_1$  превышает предельное значение  $\Delta_c$ , то реализуется следующий шаг итерационного алгоритма, т. е.  $N_2 = 2N_1$  с последующим расчетом  $p_2$ , и определяется среднеквадратичное отклонение  $p_1$  от  $p_2$ .

4. Если на некотором шаге  $k$  отклонение  $p_{k-1}$  от  $p_k$  становится меньше, чем  $\Delta_c$ , делается вывод, что число испытаний  $N_{k-1}$  достаточно для репрезентативной выборки ( $N_{k-1} = N_r$ ) и принимается, что  $p_{k-1}$

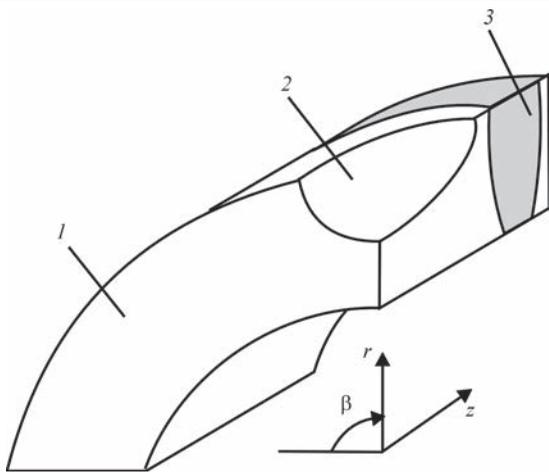


Рис. 1. Схема участка трубопровода с внешним полуэллиптическим дефектом локальной коррозионной потери металла на периферии кольцевого сварного шва: 1 – трубопровод; 2 – дефект; 3 – сварной шов

является истинным значением вероятности разрушения, т. е.  $p_{k-1}(P) = p(P)$ .

Для формального описания пространственной неоднородности таких свойств материала, как предел текучести и модуль Юнга, принято использовать нормальное распределение, т. е. плотность вероятности характеристики  $X$  принять конкретное значение  $X_{ijk}(i, j, k = r, \beta, z)$  может быть представлена в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial X_{ijk}} = \frac{1}{\beta_X \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(X_{ijk} - \alpha_X)^2}{2\beta_X^2} \right], (i, j, k = r, \beta, z), (5)$$

где  $\alpha_X, \beta_X$  – коэффициенты нормального распределения для некоторой характеристики  $X$ .

Применительно к различным параметрам сопротивляемости материала разрушению, зачастую применяется закон распределения Вейбулла, поэтому в рассматриваемой задаче некоторая величина  $Y$  в точке с координатами  $(i, j, k)$  принимает конкретное значение  $Y_{ijk}$  согласно следующему соотношению:

$$Y_{ijk} = \left[ -\ln(1 - RND) \right]^{\frac{1}{\eta_Y}} (B_Y - A_Y) + A_Y, (i, j, k = r, \beta, z), (6)$$

где  $A_Y, B_Y, \eta_Y$  – коэффициенты Вейбулла для характеристики  $Y$ ;  $RND$  – произвольное число из диапазона  $[0; 1]$ .

Применение прямого метода Монте-Карло является достаточно трудоемким и требует значитель-

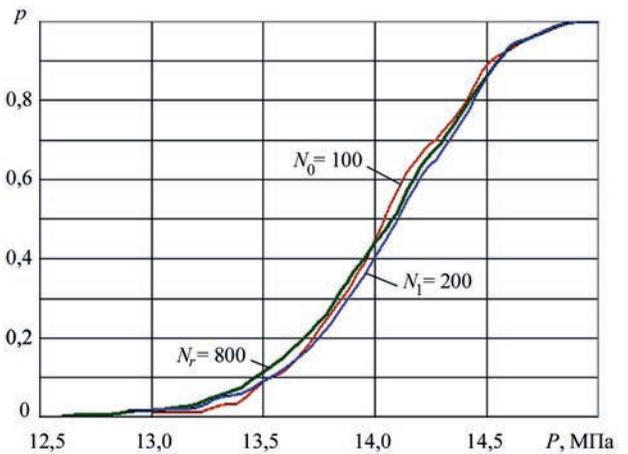


Рис. 2. Зависимости вероятности разрушения трубопровода  $p$  ( $D \times t = 1420 \times 20$  мм, сталь 17Г1С-У) с внешним коррозионным дефектом ( $2s \times 2c \times a = 20 \times 20 \times 10$  мм) от внутреннего давления  $P$  при различном количестве испытаний по методу Монте-Карло ( $N_0 = 100$  – начальное значение;  $N_1 = 200$  – вторая итерация;  $N_r = 800$  – репрезентативная выборка)

ных вычислительных ресурсов. Поэтому для реализации предложенных алгоритмов были использованы специализированные программные средства параллельных вычислений, адаптированных для использования на компьютерных комплексах многопроцессорной и гибридной архитектур [10].

В качестве примера применения разработанного численного подхода был рассмотрен стальной элемент магистрального трубопровода (внешний диаметр  $D = 1420$  мм, толщина стенки  $t = 20$  мм) с изолированным дефектом локального утонения стенки полуэллиптической формы на внешней поверхности трубы (длина  $2s = 20$  мм, ширина  $2c = 20$  мм, глубина  $a = 10$  мм). Материал трубопровода – трубная сталь 17Г1С-У ( $E = 206$  ГПа,  $\nu = 0,3$ ,  $\sigma_T = 365 \dots 490$  МПа,  $S_K = 800 \dots 1000$  МПа). В качестве критерия зарождения пор вязкого разрушения принят деформационный критерий: в изначально неповрежденном металле конструкции зарождается равномерно распределенная несплошность некоторой концентрации  $f_0$  в случае, если интегральная интенсивность пластических деформаций превышает некоторое критическое значение  $\epsilon_c$ . Значения этих характеристик материала ТЭ приняты следующие:  $f_0 = 0,001 \dots 0,010$ ,  $\epsilon_c = 0,001 \dots 0,050$ . Коэффициенты распределений данных величин приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты распределения физико-механических характеристик материала трубопровода

Характеристика материала	Нормальное распределение		Распределение Вейбулла		
	$\alpha$ , МПа	$\beta$ , МПа	$A$ , МПа	$B$ , МПа	$\eta$
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	408	10,34	–	–	–
Начальная концентрация пор вязкого разрушения $f_0$	–	–	0,0001	$3,97 \cdot 10^{-4}$	2
Критическая деформация разрушения $\epsilon_c$	–	–	0,001	$6,10 \cdot 10^{-3}$	4
Напряжение микроскола $S_K$ , МПа	–	–	800	972	4

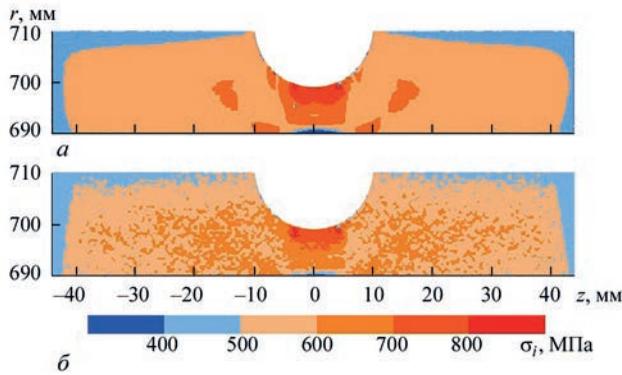


Рис. 3. Примеры распределения интенсивности напряжений в трубопроводе ( $D \times t = 1420 \times 20$  мм, сталь 17Г1С-У) с внешним коррозионным дефектом ( $2s \times 2c \times a = 20 \times 20 \times 10$  мм) при предельном внутреннем давлении  $P_r = 14,0$  МПа: а – традиционный расчет с постоянными свойствами материала; б – расчет согласно алгоритму Монте-Карло

Результаты расчетов показали быструю сходимость итерационного алгоритма определения репрезентативной выборки (рис. 2): если на начальных этапах ( $N_0 = 100, N_1 = 200$ ) среднеквадратичное отклонение может достигать 40 %, то при количестве численных экспериментов, равном 800, дальнейшее увеличение выборки не вызывает существенного роста отклонения ( $\Delta < \Delta_c = 0,01$ ).

На рис. 3 приведены расчетные поля интенсивности напряжений в случае традиционного расчета предельного состояния трубопровода с обнаруженным полуэллиптическим дефектом локальной потери металла (рис. 3, а) в предположении об однородности свойств материала ТЭ и одного из вариантов стохастического распределения свойств в рамках репрезентативной выборки по методу Монте-Карло (рис. 3, б). Из этих данных можно сделать вывод о том, что, несмотря на схожие в целом распределения главных напряжений, учет возможного разброса входных данных позволяет дополнительно рассмотреть локально более высокие напряжения на периферии

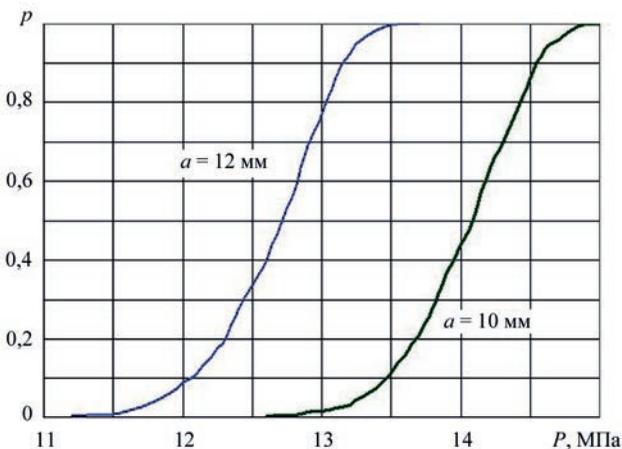


Рис. 4. Зависимость вероятности  $p$  разрушения ТЭ с локальным дефектом утонения различной глубины  $a$  от внутреннего давления  $P$

дефекта, обусловленные относительно небольшими скачками механических свойств (прежде всего, предела текучести).

Так как вязкое разрушение и соответствующее ему предельное состояние конструкции носит локальный характер, то учет пространственной неопределенности свойств имеет ощутимое влияние на оценку величины предельного давления  $P_r$ : как показано на рис. 4, диапазон  $P$ , для которого  $0,0 < p < 1,0$ , составляет 12,6...14,9 МПа. Следует также отметить, что точность входных данных (возможный разброс свойств материала) определяет форму кривой  $p(P)$ , т. е. степень отклонения вероятностного подхода от детерминированного. В случае, если разброс свойств материала уменьшается (табл. 2, рис. 5, а), то характер зависимости  $p(P)$  так-

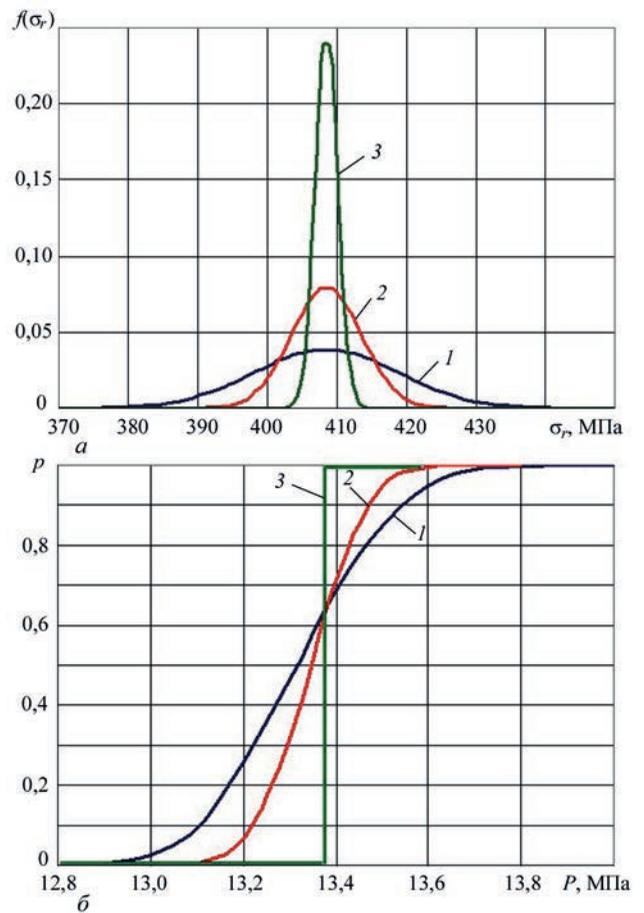


Рис. 5. Плотность нормального распределения значений предела текучести  $\sigma_r$  в зависимости от параметров (см. табл. 2) – а и соответствующие зависимости вероятности разрушения  $p$  трубопроводного элемента ( $D \times t = 1420 \times 20$  мм, сталь 17Г1С-У) с внешним коррозионным дефектом ( $2s \times 2c \times a = 20 \times 20 \times 10$  мм) от внутреннего давления  $P$  – б

Таблица 2. Различные варианты функции пространственного распределения предела текучести в сечении трубопровода (нормальный закон распределения)

Номер варианта	$\alpha$ , МПа	$\beta$ , МПа
1	408	10,34
2	408	5,05
3	408	1,60

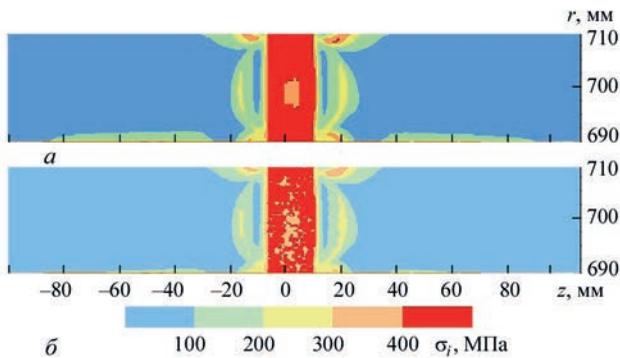


Рис. 6. Примеры распределения интенсивности остаточных напряжений в области кольцевого шва трубопроводного элемента ( $D \times t = 1420 \times 20$  мм, сталь 17Г1С-У): а – традиционный расчет с постоянными свойствами материала; б – расчет с учетом пространственной неоднородности свойств по методу Монте-Карло

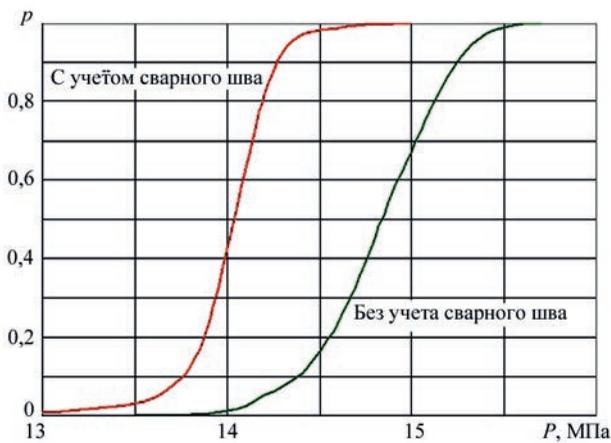


Рис. 7. Влияние кольцевого сварного шва на вероятность разрушения  $p$  элемента магистрального трубопровода ( $D \times t = 1420 \times 20$  мм, сталь 17Г1С-У) с поверхностной потерей металла ( $2s \times 2c \times a = 20 \times 20 \times 10$  мм)

же меняется (рис. 5, б), угол ее наклона увеличивается, стремясь к  $90^\circ$ , что соответствует функции Хевисайда или детерминированному состоянию.

Как было показано авторами в предыдущих работах [5, 9], в случае расположения дефектов локального утонения стенки на периферии сварных швов (в частности, кольцевых монтажных соединений трубопроводов), их взаимодействие приводит к снижению предельного давления в дефектной трубе. Это обусловлено более высокой жесткостью напряженного состояния в области сварки, что вызывает более интенсивный рост докритической поврежденности по вязкому механизму. Применительно к рассматриваемой задаче, стохастическая пространственная неоднородность материала проявляется как на стадии нагружения ТЭ внутренним давлением, так и при формировании полей остаточных напряжений после сварки (рис. 6). Влияние сварного соединения в этом случае проявляется не только в снижении величины предельного давления, но и в повышении склонности конструкции к разрушению (рис. 7): нали-

чие сварного шва вызывает смещение кривой  $p(P)$  вдоль оси давления и увеличивает угол ее наклона в сравнении с трубой без сварного шва.

### Выводы

1. На основе принципов термомеханики упругопластической среды наряду с основными закономерностями вязкого разрушения разработаны математические и компьютерные модели совместного развития напряжений, деформаций и докритического повреждения характерных элементов трубопроводов при сварке и дальнейшей эксплуатации. Прямой алгоритм метода Монте-Карло был реализован для учета стохастического пространственного распределения механических свойств материала, таких как предел текучести, напряжение микросколла, параметры склонности к вязкому разрушению и т. д. Для рациональной реализации численных алгоритмов использовались методы параллельных и гибридных вычислений.

2. Показано, что стохастическое распределение свойств материала сварных ТЭ с обнаруженными коррозионными утонениями стенки приводит к значительной локальной нелинейности полей напряжений и деформаций (как остаточных, так и эксплуатационных).

3. На примере элемента магистрального трубопровода с полуэллиптической локальной потерей металла исследованы характерные особенности влияния входных параметров на решение задачи статистической прочности под действием внутреннего давления. Показана удовлетворительная сходимость решения задачи вероятности разрушения с увеличением количества численных экспериментов до репрезентативной выборки. Использование конечно-элементной модели напряженно-деформированного состояния наряду с прогнозированием зарождения и развития докритического разрушения материала по вязкому механизму позволило учитывать как геометрические особенности конструкции, так и полноту входных данных.

### Список литературы / References

1. Bjornoy O.H., Marley M.J. (2001) Assessment of corroded pipelines: Past, Present and Future. *Proc. of 11th International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, June 17–22*, 1, 93–101.
2. (2008) ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 *Настанова. Визначення залишкової міцності магистральних трубопроводів з дефектами*. Київ, Мінрегіонбуд України.  
(2008) DSTU-N B V.2.3-21:2008: Directive. Definition of residual strength of main pipelines with defects. Kyiv, Minregionbud Ukraine [in Ukrainian].
3. Bjornoy O. (Ed.). (2004) Recommended Practice, DNV-RP-F101. *Corroded Pipelines*. Hovik, Det Norske Veritas.
4. Milenin O.S. (2017) Numerical prediction of the current and limiting states of pipelines with detected flaws of corrosion wall thinning. *Journal of hydrocarbon power engineering*, 4(1), 26–37.

5. Великоиваненко Е.А., Миленин А.С., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. (2013) Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях. *Автоматическая сварка*, **9**, 26–31.  
Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Rozyinka, G.F., Pivtorak, N.I. (2013) Modelling of processes of nucleation and development of ductile fracture pores in welded structures. *The Paton Welding J.*, **9**, 24-29.
6. Makhnenko V. (2013) Problems of examination of modern critical welded structures. *The Paton Welding Journal*, **5**, 21–28.
7. Benallal A., Desmorat R., Fournage M. (2014) An assessment of the role of the third stress invariant in the Gurson approach for ductile fracture. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, **47**, 400–414. <https://doi.org/10.1016/j.euro-mechsol.2014.02.009>.
8. Chen Z., Butcher C. (2013) *Micromechanics Modelling of Ductile Fracture*. Netherlands, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6098-1>.
9. Milenin A., Velikoivanenko E., Rozyinka G., Pivtorak N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **171C**, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>.
10. 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>.

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОЇ МІЦНОСТІ ТРУБОПРОВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИЯВЛЕНИМИ КОРОЗІЙНИМИ ДЕФЕКТАМИ НА ОСНОВІ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

О.С. Міленін, О.А. Великоиваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Пивторак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Гарантування необхідної залишкової міцності та роботоздатності трубопроводів з корозійними дефектами, виявленими при дефектоскопії, передбачає виконання критеріїв граничного стану, які пов'язують властивості матеріалу труб і фактичну геометрію конструкції з системою експлуатаційних навантажень. Одним із шляхів зниження консервативності відповідного експертного аналізу є безпосереднє врахування природного розкиду фізико-механічних властивостей матеріалу. У даній роботі пропонується чисельний підхід статистичного прогнозування граничного стану трубопроводів з дефектами локального стоншення стінки, який базується на розгляді природної просторової неоднорідності властивостей матеріалу (таких як границя текучості, напруження мікроруйнування, початкова концентрація пористості в'язкого руйнування, критичне значення пластичної деформації і т. ін.) в рамках скінченно-елементного описання спільного розвитку напружено-деформованого стану та в'язкого докритичного пошкодження з використанням методу Монте-Карло. Показано, що цей підхід характеризується меншою консервативністю в порівнянні з загальноприйнятими детермінованими методами, які передбачають розгляд однорідних властивостей матеріалу. При цьому статистичний аналіз залишається достатньо точним для розв'язання характерних задач технічної діагностики об'єктів підвищеної небезпеки. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 7.

*Ключові слова:* трубопровід, дефект корозійної втрати металу, граничний стан, ймовірність руйнування, метод Монте-Карло, в'язке руйнування

## PREDICTION OF RESIDUAL STRENGTH OF PIPELINE ELEMENTS WITH DETECTED CORROSION DEFECTS BASED ON MONTE-CARLO METHOD

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

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Evaluation of residual strength and performance of pipelines with corrosion defects, found at flaw detection, envisages meeting the limiting state criteria, which correlate the properties of pipe material and actual geometry of the structure with service load system. One of the ways to lower the conservatism of the respective numerical analysis is to directly take into account the natural scatter of physico-mechanical properties of the material. This paper proposes the numerical approach to statistical analysis of the limiting state of pipelines with defects of local thinning of the wall, which is based on consideration of the natural spatial non-uniformity of material properties (such as yield limit, microfracture stress, initial concentration of nuclei porosity of plastic deformation, critical value of plastic deformation, etc.) within the finite-element description of simultaneous development of the stress-strain state and ductile subcritical damage, using Monte-Carlo method. It is shown that this approach is characterized by lower conservatism, compared to generally-accepted deterministic methods, which imply consideration of uniform material properties. Here, statistical analysis remains sufficiently accurate for solving the characteristic problems of technical diagnostics of high hazard facilities. 10 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

*Keywords:* pipeline, defect of corrosion loss of metal, limiting state, fracture probability, Monte-Carlo method, ductile fracture

Поступила в редакцію  
20.09.2019

Щорічна конференція-виставка  
«**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ-2020**»  
Травень 2020 р., Київ, «Асоціація «ОКО»  
<http://www.ndt.com.ua>