

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОБНАРУЖЕННЫМИ ДЕФЕКТАМИ УТОНЕНИЯ

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

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

Разработана и реализована методика численного анализа предельного состояния трубопроводных элементов с поверхностными геометрическими аномалиями типа локальной коррозионной потери металла с учетом вероятностного характера разрушения конструкций в сложном напряженно-деформированном состоянии исходя из предположения о преимущественно вязком механизме разрушения при этом. На примере элементов морских магистральных трубопроводов с дефектами различного размера были определены вероятностные параметры разрушения и исследованы особенности влияния различной степени поврежденности на несущую способность дефектных конструкций. Показана универсальность предложенного подхода, позволяющего с использованием современных методов численного анализа напряженно-деформированного состояния проводить необходимые расчеты вероятности аварийной ситуации на ответственных промышленных объектах. Библиогр. 17, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: трубопровод, локальная потеря металла, предельное состояние, вязкое разрушение, вероятность аварийной ситуации, параметры Вейбулла

Диагностика технического состояния сварных трубопроводов и сосудов давления, работающих при существенных внешних нагрузках и в условиях агрессивных сред, является ключевым аспектом гарантирования их безопасной эксплуатации [1–3]. Так как области применения таких конструкций (атомная и тепловая энергетика, трубопроводный транспорт) предполагают высокие требования к их долгосрочной надежности, важным является точное определение предельного состояния исходя из известной степени эксплуатационной поврежденности, к которой прежде всего следует отнести локальные поверхностные коррозионные потери металла [4]. Возникающие при этом трехмерные геометрические аномалии являются концентраторами напряжений, в результате чего предельная эксплуатационная нагрузка и соответствующий коэффициент запаса прочности конструкции могут выйти за пределы допустимых значений, определяемых требованиями актуальных нормативных документов [5, 6]. Характерными толстостенными конструкциями такого типа являются морские магистральные трубопроводы (ММТ), давление в которых может достигать 10...25 МПа. При этом наличие агрессивных сред как с внешней стороны трубопровода (морская вода), так и с внутренней (транспортируемые углеводороды с остаточной влагой и жидкой фазой), наряду с естественными трудностями при ремонтно-восстановительных работах на больших глубинах определяет необходимость минимально консервативных оценок допустимости фактического и прогнозируемого состояний дефектных участков ММТ.

Снижение консервативности анализа состояния рассматриваемых конструкций в сравнении с актуальными отечественными и зарубежными нормативными документами может быть достигнуто, в частности, минимальной схематизацией фактической геометрии участка трубопровода с обнаруженными дефектами, прогнозированием процессов разрушения с учетом фактических характеристик металла, моделированием напряженно-деформированного состояния в области геометрических аномалий. Кроме того, могут быть использованы вероятностные подходы оценки работоспособности конструкций как для описания стохастического характера зарождения разрушения, так и для учета требований риск-анализа в комплексе мероприятий по обеспечению безопасности промышленных объектов [7].

Целью настоящей работы является разработка алгоритма вероятностной оценки состояния элементов трубопроводных систем с дефектами локального утонения стенок, основанного на численном анализе предельного состояния дефектной конструкции с учетом характерных механизмов разрушения.

Нарушение сплошности металла конструкции под действием внешнего силового нагружения в общем случае инициируется на локальных структурных или физико-химических неоднородностях материала. Численный анализ такого состояния должен учитывать различие пространственных масштабов процессов разрушения (микроуровень) и кинетики полей напряжений и деформаций под действием эксплуатационных нагрузок (макроуровень). Одним из подходов, позволяю-



щих описать процесс зарождения разрушения конструкционных элементов в неравномерном поле механических напряжений, является вероятностный метод расчета по принципу слабого звена. В этом случае предполагается, что вероятность p_i потери несущей способности конструкции в конкретной небольшой области (в которой значение градиента напряжений невелико) описывается трехпараметрической функцией Вейбулла [8, 9]:

$$p_i = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_1 - A}{B} \right)^m \right], \sigma_1 > A, \quad (1)$$

где σ_1 – главные напряжения; A, B, m – параметры Вейбулла.

Интегрирование всего поля напряжений по площади S самого слабого поперечного сечения позволяет определить суммарную вероятность разрушения конструкции p исходя из следующего соотношения:

$$p = 1 - \exp \left[- \int_S \left(\frac{\sigma_1 - A}{B} \right)^m \frac{dS}{S_0} \right], \sigma_1 > A, \quad (2)$$

где S_0 – константа материала, характеризующая пространственный масштаб перехода микроповреждений в макродефект.

Точность количественной оценки вероятности согласно выражению (2) зависит от адекватности используемых коэффициентов Вейбулла конкретной задаче. Соответственно, определение значений A, B, m может базироваться либо на статистическом анализе данных большого количества экспериментов по разрушению идентичного материала, либо на численном исследовании предельного состояния конструкции по результатам ее технической диагностики. Второй подход является менее трудоемким, хотя и более консервативным с точки зрения границ применимости численных методов определения напряженно-деформированного и предельного состояний дефектной конструкции с учетом развития ее эксплуатационной поврежденности различной природы.

Характерным механизмом разрушения толстостенных трубопроводов из высокопрочных сталей в отсутствие острых концентраторов является вязкое разрушение, обусловленное зарождением и развитием пор материала и состоящее из следующих последовательных этапов [10–13]:

- зарождение пор вязкого разрушения при развитии пластическом течении металла конструкции в области геометрических концентраторов;

- увеличение размеров пор при пластическом деформировании;

- взаимодействие и объединение пор вязкого разрушения;

- зарождение макродефекта и связанное с ним снижение несущей способности как дефектного участка, так и конструкции в целом;

- развитие макродефекта.

Указанные этапы вязкого разрушения имеют различную физико-механическую природу, поэтому для определения характеристик предельного состояния трубопроводного элемента необходимо построение соответствующей комплексной модели.

Принято считать, что зарождение пор в области структурных дефектов и неоднородностей (так называемые первичные поры) связано с существенным развитием пластических деформаций, которое может быть описано посредством параметра Одквиста [8]:

$$\kappa = \int d\varepsilon_i^p, \quad (3)$$

где $d\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}$; $d\varepsilon_{ij}^p$ – компоненты тензора приращений пластических деформаций, $i, j = r, \varphi, z$ – пространственные координаты цилиндрической системы координат (рис. 1).

Соответственно, условием зарождения пор с начальной объемной концентрацией f_0 в рассматриваемой области конструкции является превышение текущего значения параметра Одквиста критической величины κ_c .

Дальнейший рост зародившихся пор зависит от жесткости напряженного состояния и интенсивности пластического деформирования металла и описывается законом Райса–Трейси, а именно [8]:

$$df = f_0 K_1 \exp(K_2 R_\sigma) d\varepsilon_i^p, \quad (4)$$

где f – текущая объемная концентрация пор вязкого разрушения; $R_\sigma = \sigma_m / \sigma_i$ – параметр жесткости напряженного состояния; $\sigma_m = (\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{zz})/3$ – мембранное напряжение; $\sigma_i = \sqrt{0,5 \sigma_{ij} \sigma_{ij}}$ – интенсивность напряжений; $K_1 = 0,28, K_2 = 1,5$ – константы.

Небольшие значения R_σ в рассматриваемой области конструкции (что типично для трубопроводных элементов с плавными геометрическими концентраторами) и, как следствие, низкая скорость роста пор согласно (4), являются предпосылками для альтернативного механизма развития пористости, а именно появления вторичных несплошностей. Согласно материалам, представленным в [8], скорость зарождения вторичных сферических пор зависит от концентрации включений в металле конструкции и развития пластических деформаций по следующему закону:

$$f = f_0 + f_i \exp \left(- \frac{\kappa'}{\kappa - \kappa_c} \right), \quad (5)$$

где f_i – объемная концентрация включений; κ' – константа материала, характеризующая максимально возможное приращение параметра Одквиста.



Анализ напряженно-деформированного состояния конструкции с позиций вязкого разрушения в данной работе проводили на основе численного решения краевой задачи упруго-пластического деформирования среды переменного несущего нетто-сечения путем прослеживания упруго-пластических деформаций и концентрации пор вязкого разрушения при нагружении конструкции до предельного состояния в рамках конечно-элементной модели [13, 14]. Связь напряжений и деформаций определялась законом Гука и ассоциированным законом пластического течения исходя из следующих соотношений:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m) + \delta_{ij} (K \sigma_m + \Delta f / 3) - \frac{1}{2G} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m)^* + (K \sigma_m)^*, \quad (6)$$

где $K = \frac{1-2\nu}{E}$, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; Ψ – функция состояния материала, определяемая условием пластического течения согласно критерию Мизеса с дополнительным учетом уменьшения несущего нетто-сечения конечного элемента в результате формирования несплошности в рамках модели Гурсона–Твергаарда:

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T \sqrt{1 + (q_3 f^*)^2 - 2q_1 f^* \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma_m}{2\sigma_T}\right)}; \quad (7)$$

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

где $q_1 = 1,5$, $q_2 = 1$, $q_3 = 1,5$ – константы; f^* – эквивалентная объемная концентрация пор, учитывающая их взаимодействие в конечном элементе.

Величина эквивалентной концентрации пор, фигурирующая в выражении (7), определяется из следующего соотношения, предложенного Твергаардом и Нидлманом [7]:

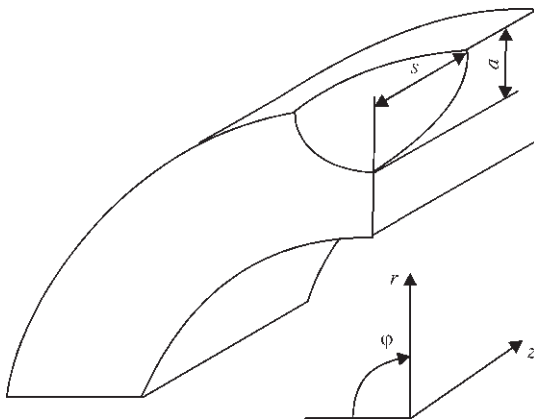


Рис. 1. Схема участка трубопровода с внешним полуэллиптическим дефектом локального утонения стенки (с учетом плоскостей симметрии)

$$f^* = \begin{cases} f, & \text{если } f \leq f_c; \\ f_c + \frac{f_u - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c), & \text{если } f > f_c, \end{cases} \quad (8)$$

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

Предельное состояние каждого конечного элемента определяется двумя возможными механизмами разрушения [15] (пластической неустойчивостью в случае $\Psi \rightarrow \infty$ согласно условию Макклиттока и микросколом) и может быть описано следующим критерием:

$$\Psi > \frac{1}{2G} + \frac{\varepsilon_f - \kappa^*}{1,5\sigma_s(\kappa, T)} \begin{cases} \text{пластическая} \\ \text{неустойчивость;} \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_1}{1-2f/3} > S_K \text{ — разрушение микросколом.}$$

Проверку точности изложенной методики проводили с помощью данных экспериментальных исследований величины предельного давления толстостенных труб ($D \times t = 76,2 \times 8,97$ мм, сталь 20, $\sigma_T = 336$ МПа) с внешними дефектами утонения полусферической формы различного размера [16]. Следует отметить, что рассматриваемые трубные образцы без дефектов выдерживают давление $P_{\max}^0 = 110$ МПа по экспериментальным данным (114 МПа согласно результатам расчета по изложенной методике). Сравнение численных и экспериментально определенных значений максимального давления P_{\max} и снижения несущей способности P_{\max} / P_{\max}^0 образцов с изолированными поверхностными дефектами утонения стенки показало небольшое относительное отклонение около 7 % (табл. 1).

Коэффициент A в выражениях (1), (2) характеризует возможность разрушения конечного элемента при относительно низких напряжениях. Теоретически существует ненулевая вероятность зарождения разрушений при напряжениях, близких к нулю ($A = 0$), но для решения прикладных задач такой подход не является рациональным. Для снижения трудоемкости численного исследования предполагается, что вероятностный характер разрушения проявляется при напряжениях, превышающих напряжение пластического течения σ_{flow} , которое зависит от прочностных свойств конкретного материала, а именно $\sigma_{flow} = (\sigma_B + \sigma_T) / 2$. В свою очередь значение m для описания разрушения конструкционных сталей принимается равным 3...4. Таким образом, целью анализа полей напряжений в конструкции в предельном состоянии



Таблица 1. Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований влияния глубины поверхностного дефекта полусферического сечения на предельное давление в толстостенной трубе

Глубина дефекта, мм	Экспериментальные данные [16]		Результаты моделирования	
	P_{max} , МПа	P_{max} / P_{max}^0	P_{max} , МПа	P_{max} / P_{max}^0
4,0	91,8	0,835	88,0	0,772
4,5	85,3	0,775	85,5	0,750
5,0	82,8	0,753	83,5	0,733

является определение параметра B распределения Вейбулла, что позволит проводить необходимые количественные оценки вероятности аварийной ситуации на дефектном участке трубопровода.

Предельное состояние дефектной конструкции характеризуется двумя этапами нарушения целостности, а именно зарождением микропор при развитом пластическом течении металла и началом разрушения конечных элементов (образованием макродефектов) [10]. В первом случае вероятность аварийной ситуации принимается равной минимально возможной при типичных лабораторных исследованиях образцов на разрыв ($p = 0,01 \dots 0,05$), во втором случае состояние конструкции недопустимо ($p = 0,95$).

В качестве примера использования данной методики для анализа вероятности аварийной ситуации был рассмотрен случай прямолинейного толстостенного трубопроводного элемента (сталь Х80) с внешним полуэллиптическим поверхностным дефектом. Его предельное состояние анализировалось варьированием внутреннего давления, критическим сечением принималось продольное сечение по оси симметрии дефекта (область максимального утонения стенки).

Параметры расчета

Предел текучести стали σ_T , МПа	560
Предел прочности стали σ_B , МПа	630
Коэффициент Пуассона ν	0,3
Модуль Юнга E , ГПа	205
Толщина стенки трубы t , мм	39
Диаметр трубы D , мм	800
Коэффициент Вейбулла m	4
Коэффициент Вейбулла A , МПа	595
Критическое значение параметра Одквиста k_c	0,01
Начальная концентрация пор при зарождении f_0	0,05
Константа материала S_0 , мм	1

С целью корректного определения параметра Вейбулла B провели комплекс расчетов предельного давления, которое может выдержать рассматриваемая труба с внешними поверхностными дефектами различных размеров. На рис. 2, *a* приведен пример распределения главных напряжений в критическом сечении трубы с дефектом длиной 100 мм, шириной 40 мм и глубиной 14 мм

при внутреннем давлении 59,3 МПа, при котором появились первые макропоры (один из конечных элементов потерял несущую способность). Из показанных распределений видно, что область высоких напряжений ($\sigma_1 > A = 595$ МПа) ограничена длиной дефекта, что является характерным размером области ненулевых вероятностей локального разрушения согласно (1). Соответственно, если считать, что это напряженное состояние соответствует вероятности разрушения 0,95, то значение коэффициента B составляет 1580 МПа. Для альтернативного предположения, что предельное состояние характеризуется зарождением первых микропор, для которого вероятность разрушения равна 0,05, расчет показал $B = 4300$ МПа. Из этого, в частности, следует вывод, что первый подход является более консервативным, поэтому использование этого критерия предельного состояния конструкции является более рациональным.

В табл. 2 приведены результаты расчета коэффициентов Вейбулла B для такой же трубы, но с дефектами других размеров. Как видно из приведенных данных, влияние изолированных геометрических аномалий в рассмотренных диапазонах варьирования на значение этого коэффициента невелико и связано со спецификой конечно-элементного разбиения области дефекта. Это подтверждает тот факт, что коэффициент B является характеристикой материала для конкретного характера напряженного состояния и масштабности задачи. Рассмотренный диапазон изменения геометрических размеров поверхностных дефектов является достаточно репрезентативным для настоящего исследования, так как для менее глубоких дефектов влияние концентратора существенно

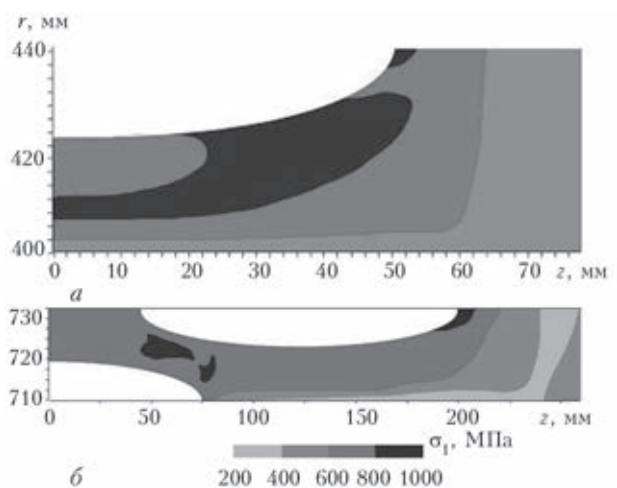


Рис. 2. Распределение главных напряжений: *a* – в области изолированного дефекта утонения стенки трубопровода $D \times t = 800 \times 39$ мм (сталь Х80) под действием предельного давления 59,2 МПа; *б* – в области множественного дефекта утонения стенки трубопровода $D \times t = 1420 \times 25$ мм (сталь Х60) под действием предельного давления 14,4 МПа ($0r$ – ось симметрии)

Т а б л и ц а 2. Значения коэффициента распределения Вейбулла B для дефектов различных размеров на поверхности трубопровода из стали X80, $D \times t = 800 \times 39$ мм

Глубина дефекта a , мм	Условие предельного состояния по зарождению микропор ($p = 0,05$) для дефектов разной длины $2s$, мм			Условие предельного состояния по макроразрушению ($p = 0,95$) для дефектов разной длины $2s$, мм		
	100	150	200	100	150	200
6	4660	4460	4630	1680	1650	1690
10	4210	4600	4780	1650	1650	1800
14	4300	4500	4640	1580	1830	1890

снижается и сравнимая по величине вероятность разрушения конструкции появляется на периферии дефекта, а более обширные коррозионные повреждения можно отнести к общей коррозии и большее влияние на результат расчета будет оказывать масштабный эффект, а не концентрация напряжений. Поэтому для исследования вероятности разрушения могут быть рекомендованы минимальные значения коэффициентов, в рассматриваемом случае это $B = 1580$ МПа. В качестве примера расчета вероятности разрушения дефектного участка ММТ на рис. 3 приведены зависимости вероятности разрушения от внутреннего давления вплоть до предельного для рассматриваемого трубопровода с дефектами различной глубины при постоянных глубине и ширине, равных 150 и 40 мм соответственно. Для типичных рабочих диапазонов эксплуатационных нагрузок до 22 МПа величина вероятности разрушения не превышает $4 \cdot 10^{-4}$, что является допустимым с точки зрения суммарного риска аварийной ситуации ММТ. При анализе предельного состояния на основе конкретного значения расчетной вероятности необходимо принимать во внимание два важных аспекта:

– в расчет значений внутренних давлений в трубопроводе не включаются различные коэффициенты запаса, принятые в практике проектирования трубопроводных систем, что должно учитываться при определении предельно допустимой вероятности аварийной ситуации для конкретного

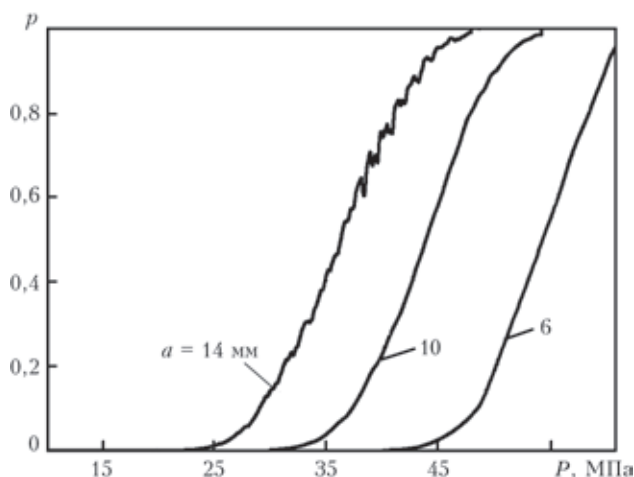


Рис. 3. Зависимость вероятности разрушения трубопровода ($D \times t = 800 \times 39$ мм, сталь X80) с дефектами утонения стенки различной глубины от внутреннего давления

участка ММТ в рамках соответствующих процедур риск-анализа;

– в настоящем исследовании не учитывается возможность расположения дефекта в области окружных сварных швов, что может иметь дополнительное негативное воздействие на предельное состояние конструкции; методика оценки влияния локального напряженно-деформированного состояния и накопленной в процессе сварки поврежденности на особенности вязкого разрушения трубопроводов с поверхностными дефектами рассмотрена авторами в работе [17].

Для оценки влияния прочностных характеристик конкретной стали ММТ на процессы вязкого разрушения и вероятность аварийной ситуации был проведен комплекс аналогичных численных исследований для сталей различного класса прочности (предела прочности). Это позволило определить зависимость параметра Вейбулла B от предела прочности используемой стали (рис. 4). При этом не было обнаружено существенного влияния величины дефекта или типоразмера труб на величину этого коэффициента, из чего можно сделать вывод, что параметр B является характеристикой механических свойств материала трубопровода, а геометрический и масштабный факторы корректно описываются интегральным функционалом решением задачи определения напряженно-деформированного состояния конструкции. Как показано на рис. 5, класс прочности стали существенно влияет на вероятность разрушения в об-

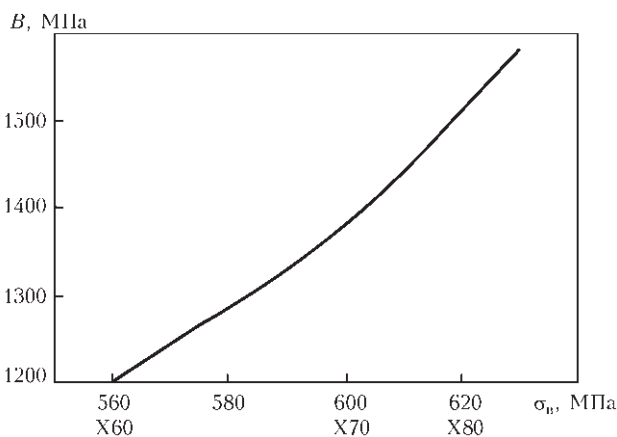


Рис. 4. Зависимость консервативного значения параметра Вейбулла от предела прочности (класса прочности) стали трубопровода



ласти дефектов утонения: вероятность разрушения трубопроводных элементов $D \times t = 800 \times 39$ мм с внешним дефектом утонения стенки из сталей X60 и X80 может отличаться в 10 раз в зависимости от приложенного внутреннего давления.

При анализе состояния дефектных трубопроводных элементов со сложным многоочаговым повреждением, в частности, множественной язвенной коррозией, состоящей из нескольких близко расположенных полуэллиптических дефектов, актуальные стандарты предписывают схематизировать множественный дефект как один, охватывающий всю поврежденность в целом. Разработанная методика вероятностной оценки рассматривает конструкцию в ее фактическом состоянии поврежденности, учитывая переменную толщину стенки по всей области вероятного разрушения. В качестве примера сложного эксплуатационного повреждения рассматриваемой трубы ниже приведен случай трех симметрично расположенных дефектов на различных поверхностях трубопровода, размеры которых одинаковы (длина 150 мм, глубина 10 мм, ширина 40 мм), что не ограничивает общности данного анализа. На рис. 2, б показаны поля главных напряжений для множественного дефекта при предельном давлении 14,4 МПа. Как видно из приведенных данных, взаимное расположение дефектов таково, что наблюдается явное взаимодействие полей напряжений, которое вызывает формирование общей области существенного пластического течения, где зарождается поврежденность как по вязкому механизму, так и по микросколу. При этом величина вероятности при различных давлениях (рис. 6) иллюстрирует развитие этого взаимодействия: чем выше давление, тем больше проявляется ослабление трубопровода в области наложения дефектов и тем более чувствительной является показанная зависимость к увеличению давления. При этом снижение несущей способности трубопровода с множественным коррозионным повреждением составило около 20 % по сравнению с одиночным дефектом такого же размера (предельное давление $P_{\max} = 18,2$) и более 30 % в сравнении с бездефектным состоянием ($P_{\max} = 20,8$ МПа).

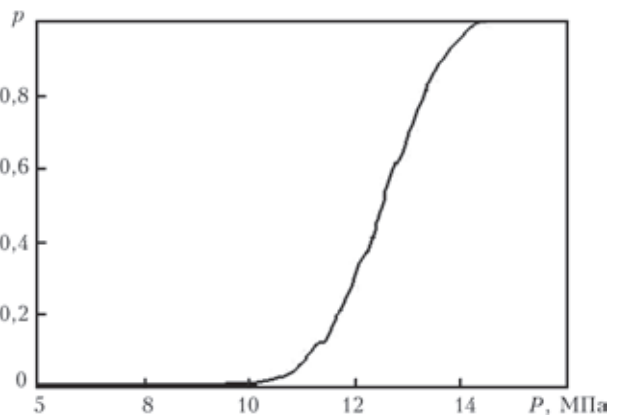


Рис. 6. Зависимость вероятности разрушения трубопровода $D \times t = 1420 \times 25$ мм (сталь X60) с многоочаговым дефектом утонения стенки от внутреннего давления

Рис. 5. Сравнение зависимостей вероятности разрушения трубопровода с дефектом локальной потери металла $2s \times a = 150 \times 14$ мм при различных прочностных свойствах стали конструкции: 1 – $\sigma_B = 560$ МПа; 2 – 630

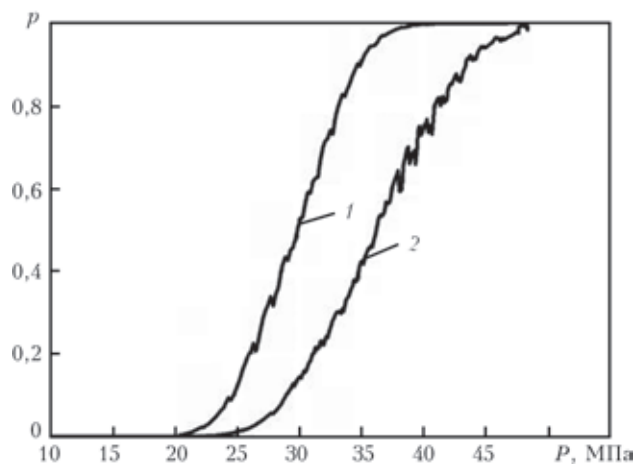


Рис. 5. Сравнение зависимостей вероятности разрушения трубопровода с дефектом локальной потери металла $2s \times a = 150 \times 14$ мм при различных прочностных свойствах стали конструкции: 1 – $\sigma_B = 560$ МПа; 2 – 630

Выводы

Предложен методологический подход численной оценки вероятности разрушения толстостенных трубопроводных элементов с поверхностными дефектами локальной потери металла. В основу подхода положен анализ предельного состояния конструкции под действием внутреннего давления, исходя из предположения о преимущественно вязком характере разрушения конструкции в области геометрической аномалии. Показано, что консервативным условием достижения предельного состояния конструкции является формирование первых макропор.

Получена зависимость параметра Вейбулла B , необходимая для количественной оценки вероятности разрушения трубопровода с локальным утонением стенки, от класса прочности (предела прочности) стали. Показано, что этот параметр является характеристикой механических свойств материала и может быть использован для вероятностного анализа состояния трубопроводов из труб различных типоразмеров и характера коррозионной поврежденности.

Исследовано предельное состояние трубопровода с многоочаговым коррозионным повреждением внутренней и внешней поверхности трубы. Показано значительное влияние близко расположенных дефектов как на несущую способность трубопровода, так и на характер предельного состояния и разрушения. Это проявляется в формировании общей области микроповрежденности металла по всей зоне коррозионного поражения и соответствующем влиянии масштабного фактора на вероятность разрушения.



1. *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.*
2. *Muhlbauer Kent. W. Pipeline Risk Management Manual. Ideas, Techniques, and Resources. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2004. – 422 p.*
3. *Bjornoy O. H., Marley M.J. Assessment of corroded pipelines: Past, Present and Future / Proc. of 11th Intern. Offshore and Polar Engineering conf. Stavanger, Norway, June 17–22, 2001. – №1. – P. 93–101.*
4. *Janelle J. L. An overview and validation of the fitness-for-service assessment procedures for local thin areas. – Thesis for the degree Master of Science – Mechanical Engineering. The Graduate Faculty of the University of Akron, 2005. – 264 p.*
5. *ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – 91 с.*
6. *Fitness-for-Service. American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. First edition. Washington: API Publications and Distribution, 2000. – 625 p.*
7. *Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Олейник О. И. Риск-анализ как средство формализации принятия решений о внеплановом ремонте сварных конструкций // Автомат. сварка. – 2008. – № 5. – С. 5–10.*
8. *Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability / J. of Applied Mechanics. – 1951. – № 9. – P. 293–297.*
9. *Local approach to fracture // C. Berdin, J. Besson, S. Bugat et al. – Paris: Les Presses de l’Ecole des Mines, 2004. – 89 p.*
10. *Ductile fracture initiation, propagation and arrest in cylindrical vessels / W. A. Maxey, J. F. Kiefner, R. J. Eiber et al. // Fracture Toughness, Proc. of the 1971 National Symp. On Fracture Mechanics, 31 Aug. – 02 Sept. 1971, Urbana-Champaign, USA. – Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1972. – P. 70–81.*
11. *Gurson A. I. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part 1 – yield criteria and flow rules for porous ductile media // J. of Engineering Materials and Technology. – 1977. – №1. – P. 2–15.*
12. *Махненко В. И. Проблемы экспертизы современных сварных конструкций ответственного назначения // Автомат. сварка. – 2013. – №5. – С. 22–29.*
13. *Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – С.-Пб.: Политехника, 1993. – 391 с.*
14. *Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.*
15. *Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 618 с.*
16. *Wu D., Huang Z., Chen L. A study of the limit pressures of thick walled pipes with part-through slots on the outside surface // Int. J. Pres. Ves. and Piping. – 1985. – № 20. – P. 207–221.*
17. *Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях / Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, А. С. Миленин и др. // Автомат. сварка. – 2013. – № 9. – С. 26–31.*

A procedure has been developed and realized for numerical analysis of limit state of pipeline elements with surface geometrical anomalies of the type of local corrosion loss of metal, allowing for probabilistic nature of structure failure in the complex stress-strain state, while proceeding from the assumption of predominantly viscous failure mode. The case of off-shore main pipeline elements with defects of various sizes was used to determine probabilistic failure parameters and to study the features of the influence of various extent of damage on load-carrying capacity of structures with defects. Versatility of the proposed approach was demonstrated, allowing application of modern methods of numerical analysis of the stress-strain state to perform the required calculations of the probability of emergency conditions in critical industrial facilities. 17 References, 2 Tables.

К е у в о р д с : pipeline, local metal loss, limit state, ductile fracture, emergency probability, Weibull parameters

*Поступила в редакцию
12.01.2014*

НОВА КНИГА

Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання / В. М. Учанін. – Львів: СПОЛОМ, 2013. – 268 с.

Монографія присвячена розробці вихрострумових перетворювачів (ВСП) подвійного диференціювання. Як утворювальний елемент для їх побудови розглянуто особливості анаксіальних ВСП.

Проаналізовано конструкції і механізми формування сигналів від дефектів у ВСП подвійного диференціювання. Подано результати досліджень, які засвідчують їх можливості для розв’язання найскладніших задач неруйнівного контролю.

Для наукових співробітників і інженерів, що займаються дослідженням і розробкою методів і засобів неруйнівного контролю, а також аспірантів і студентів вузів зі спеціальностей «Методи неруйнівного контролю» і «Діагностика матеріалів і конструкцій».