

ЧИСЛЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ БАНДАЖАМИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

С целью исследования характерных особенностей напряженно-деформированного и предельного состояний дефектного участка магистрального трубопровода, несущая способность которого была восстановлена с помощью композиционного бандажа, а также для прогнозирования эффективности ремонта, был разработан соответствующий комплекс математических моделей, позволяющий проводить необходимый анализ состояния составной конструкции такого рода с учетом зарождения и развития повреждения в микро- и макромасштабе. На примере элемента магистрального трубопровода с множественными коррозионными дефектами продемонстрированы характерные особенности его напряженно-деформированного, поврежденного и предельного состояний, определяющих эффективность ремонта посредством бандажей из волокнистых композитов. Библиогр. 15, табл. 4, рис. 7.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, композиционный бандаж, дефект коррозионного утонения, эффективность ремонта

Накопление эксплуатационной поврежденности магистральных трубопроводов и элементов технологических трубопроводных систем является одним из основных факторов снижения их работоспособности и возникновения аварийных ситуаций. Поэтому проведение регулярной технической диагностики их состояния и восстановление несущей способности дефектных участков является необходимым условием безопасной долгосрочной эксплуатации [1–3]. Распространенными дефектами трубопроводов являются локальные коррозионные потери металла, которые формируют плавные концентраторы напряжений, и в случае существенного развития коррозионных процессов, могут приводить к снижению несущей способности конструкции, течи или разрушению трубопровода. При этом к наиболее опасным относятся множественные локальные утонения стенки, которые могут поражать протяженные участки конструкции.

Одним из современных методов восстановления несущей способности трубопроводных элементов с обнаруженными неглубокими множественными коррозионными повреждениями является усиление посредством бандажей из композиционных материалов (КМ) [4, 5]. Это позволяет достаточно эффективно разгружать трубопроводные элементы (табл. 1). При этом трудоемкость и финансовые затраты на ремонт композиционными бандажами (КБ) существенно меньше, чем в случае использования металлических муфт [6]. Кроме того, установка КБ возможна на локальные гибы трубопроводов, на области отводов,

тройников, другой трубопроводной арматуры, а также на усиления монтажных сварных швов. К недостаткам этой технологии можно отнести относительно небольшую долговечность КМ в условиях действия агрессивных сред, сложности в прогнозировании деградации свойств композита во времени. Кроме того, расчеты усиленной конструкции на статическую прочность требуют взаимосвязанных моделей развития напряженно-деформированного и поврежденного состояний при достижении предельных нагрузок от внутреннего давления в трубопроводе. Данная работа посвящена разработке методологических подходов описания предельного состояния волокнистых КМ применительно к проблеме эффективности разгрузки дефектных участков трубопроводов посредством КБ.

Поведение КМ в процессе нагружения определяется как физико-механическими свойствами отдельных компонентов, так и их структурой. Математическое описание таких макроскопических характеристик состояния сплошной среды, как механические напряжения и деформации принято рассматривать в рамках моделей однородного анизотропного материала [7], что при достаточном объеме экспериментальных исследований позволяет с высокой точностью прогнозировать развитие полей напряжений и деформаций при различных системах нагружения. Но прогнозирование предельного состояния конструкций из КМ предполагает моделирование процессов зарождения и развития разрушения, которые проявляются в мезо- и микромасштабе. В этом случае приближение однородно-

Таблица 1. Характеристики ремонта магистральных трубопроводов посредством композиционных бандажей в сравнении с другими методами [6]

Классификация		Давление, МПа	Окружные напряжения, МПа	Разрушение
Дефектная труба	А (труба из стали API 5L X65, 762×17,5 мм с локальным утонением по основному металлу)	17,15	373,70	Да
	В (труба с локальным утонением по окружному сварному шву)	17,84	388,65	->-
	С (труба с V-образным надрезом по основному металлу)	8,72	190,06	->-
Восстановленная труба	Металлический бандаж (А)	30,77	670,53	Нет
	Металлический бандаж (В)	30,18	657,72	->-
	Эпоксидно-стекловолоконный бандаж (А)	29,40	640,63	->-
	Эпоксидно-стекловолоконный бандаж (В)	29,89	651,31	->-
	Эпоксидно-стекловолоконный бандаж (С)	30,28	659,85	->-
	Композиционный бандаж «Clock-spring» (А)	25,87	563,76	Да (течь)
	Композиционный бандаж «Clock-spring»(В)	28,42	619,28	Нет
	Наплавка (А)	28,32	617,15	->-
Наплавка (В)	28,32	617,15	->-	

го материала не позволяет выявить специфику взаимодействия компонентов композита, разрушения отдельных микро- и макроячеек, распределения докритической поврежденности, поэтому требуется моделирование материала как разнородного. Но так как в современных КМ используются компоненты микро- и наноразмеров, то математическое описание без определенного упрощения потребовало бы значительных мощностей аппаратных средств расчета и длительного времени проведения численных экспериментов.

В рамках настоящего исследования был реализован алгоритм двухуровневого анализа состояния КБ, установленного на элемент трубопровода с множественной коррозионной поврежденностью (рис. 1), в рамках которого вначале решалась задача прогнозирования напряженно-деформированного состояния (НДС) (макроуровень), затем для каждого конечного элемента определялась степень повреждения в предположении регулярности структуры яче-

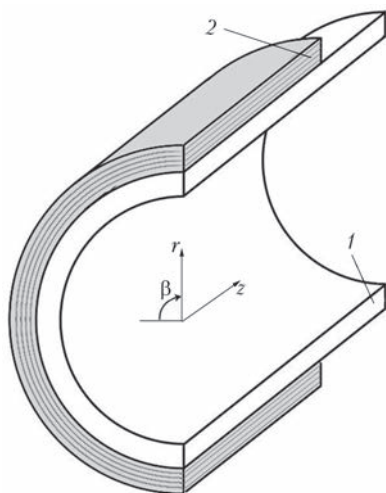


Рис. 1. Схема трубопроводного элемента (1) с установленным на него композиционным бандажом (2)

ек (мезоуровень). Связь между уровнями такого анализа реализуется путем передачи некоторого объема расчетных данных на каждом последующем этапе численного прослеживания. Так, решением задачи упругопластического деформирования сложной цилиндрической конструкции, состоящей из металлического трубопровода с множественными локальными полуэллиптическими поверхностными аномалиями геометрии и слоя анизотропного КМ, в рамках макроскопического анализа является поле перемещений узлов конечно-элементного разбиения. Кроме того, при определенном значении истинных напряжений в конечном элементе происходит его разрушение, что математически может быть описано «обнулением» элемента, т.е. заменой его свойств на свойства воздуха и соответствующим решением уравнения равновесия для оценки перераспределения напряжений и деформаций, вызванного локальным разрушением. Поле перемещений узловых точек композиционной части конструкции передается для решения задач НДС регулярных ячеек в рамках мезозадачи в неоднородной изотропной постановке. В этом случае каждый конечный элемент представляется суперпозицией матрицы (в рассматриваемом случае эпоксидной смолы) и армирующего компонента (стекловолокна) с соответствующими свойствами и собственным, более мелким разбиением на конечные элементы, которое позволяет с достаточной точностью описать особенности состояния КМ. Постановка граничных условий в перемещениях, линейно интерполированных по значениям в угловых точках, позволяет восстановить специфику распределения напряжений в неоднородной задаче (без предположения об усредненном значении, необходимом заложенном в решение макрозадачи). Соответственно полю

напряжений в каждой регулярной ячейке оценивается ее поврежденность путем аналогичного «обнуления» конечных элементов эпоксидной матрицы или стекловолокна, которая определяет несущее нетто-сечение конечного элемента при решении макрозадачи на следующем этапе прослеживания (рис. 2).

Предельное состояние трубопроводного элемента определяется зарождением и развитием макроскопического (критического) разрушения конструкции. Так как в рассматриваемом случае дефектный элемент не характеризуется острыми геометрическими концентраторами, то докритическое и критическое разрушение материала определяется вязким механизмом, заключающимся в зарождении и развитии равномерно распределенных микропор при интенсивном пластическом деформировании металла. В рамках данного исследования считается, что поведение металла трубопровода описывается упругопластическим поведением с условием текучести по закону Мизеса и упрочнением, тогда как компоненты КМ являются полностью упругими с идеальной адгезией между собой и металлом. При этом наличие несплошности материала в результате разрушения вызывает снижение несущего нетто-сечения отдельных конечных элементов, что необходимо учитывать в рамках постановки задачи численного прогнозирования напряженно-деформированного и предельного состояний трубопровода с КБ. Так, было принято, что зарождение пор вязкого разрушения определенной концентрации f_0 имеет место при выполнении модифицированного критерия Джонсона–Кука:

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

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; ε_c – критическая величина пластических деформаций.

Дальнейший рост зародившейся несплошности может быть описан посредством закона Рай-

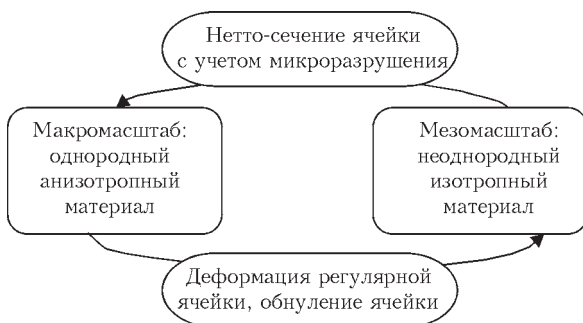


Рис. 2. Принципиальная блок-схема расчетной модели поведения композиционного материала при нагружении вплоть до предельных значений силового воздействия

са–Трейси [8], связывающего скорость роста концентрации пор вязкого разрушения с жесткостью напряженного состояния материала и интенсивностью накопленных пластических деформаций.

Наличие несплошности влияет на поведение материала конструкции при воздействии внешнего силового нагружения. Признанным подходом, позволяющим учесть эту особенность, является использование континуальных моделей описания поверхности текучести несплошного материала, в частности, модели Гурсона–Твергаарда–Нидлмана, в рамках которой поверхность текучести имеет следующее математическое выражение [8]:

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

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

Конечно-элементное рассмотрение совместной задачи кинетики напряженно-деформированного и поврежденного состояний трубопроводного элемента с КБ предполагает, что приращение компонент тензора деформаций в пределах конечного элемента представляет собой суперпозицию следующих составляющих:

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

де $d\varepsilon_{ij}^e, d\varepsilon_{ij}^p, \delta_{ij} df/3$ – компоненты приращения тензора деформаций, которые определяются вязким механизмом деформирования, пластическим течением и пористостью соответственно.

Зависимость деформаций от напряжений описывается законом Гука и ассоциированным законом пластического течения [9, 10]:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Psi \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m \right) + \delta_{ij} \left(K \sigma_m + \Delta f/3 \right) - \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m \right)^* + \left(K \sigma_m \right)^*, \quad (4)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, т. е. $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$, если $i \neq j$; $K = (1-2\nu)/E$ – модуль объемного сжатия; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона, $G = E/2(1 + \nu)$ – модуль сдвига; символ «*» относит переменную к предыдущему шагу прослеживания; Ψ – функция состояния материала, которая определяет условия пластического течения в соответствии с формой поверхности текучести (2):

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

$$\Psi > \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s, \quad (5)$$

состояние $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимо.

Исходя из изложенного, критерий разрушения стенки трубы по условию пластической неустойчивости может быть сформулирован следующим образом [8]:

$$\Psi > \frac{1}{2G} + \frac{\varepsilon_c - \kappa^*}{1,5\sigma_i(\kappa, T)(1-2f/3)}, \quad (6)$$

где κ^* – параметр Одквиста.

Кроме того, существенное развитие пористости металла конструкции вызывает значительное увеличение истинных напряжений, которое может быть математически ограничено условием $\sigma_s \rightarrow 0$ и из выражения (2) определяется величина критической объемной концентрации пор f_d^* , эквивалентной предельному состоянию и ограничивающей применимость указанных моделей условием пластической неустойчивости:

$$f^* \rightarrow f_d^* = \frac{2q_1}{q_3} \cosh\left(\frac{3q_2\sigma_m}{2\sigma_T}\right). \quad (7)$$

В случае, если значения истинных главных напряжений превышают величины микроскола S_K , то в металле реализуется хрупкий механизм локального разрушения:

$$\frac{\sigma_1}{1-2f/3} \geq S_K. \quad (8)$$

Одним из важных этапов решения данной задачи является математическое описание усредненных свойств КМ в приближении однородной анизотропной среды. Следует отметить, что имеющиеся экспериментальные данные по одноосному растяжению образцов из волокнистых КМ представляют собой значения конкретных механических характеристик материала в различных направлениях относительно расположения волокон. Поэтому для непосредственного использования таких данных без их дополнительной интерпретации в рамках данной модели на каждом этапе прослеживания определяется преимущественное направление деформирования для каждого конечного элемента и соответственно ему выбираются конкретные значения упругих констант.

Так, в зависимости от объемного содержания материала матрицы V_m и волокнистого наполнителя V_f значение модуля Юнга вдоль и поперек волокон вычисляется согласно правилу смесей [7]:

$$E_T = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)}, \quad (9)$$

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f),$$

где E_m, E_f – модули Юнга материала матрицы и волокон соответственно; E_T, E_L – модули Юнга условно однородного анизотропного КМ вдоль и поперек волокон, соответственно.

Для определения коэффициента Пуассона может быть использована зависимость Уитни и Райли [7]:

$$v_{LT} = \frac{v_m - \{2(v_m - v_f)\}}{E_m(1 - V_f)(1 - v_f - 2v_f^2) + \dots} \frac{(1 - v_m^2)E_f V_f \dots}{+ E_f \{V_f(1 - v_m - 2v_m^2) + (1 + v_m)\}}, \quad (10)$$

$$v_{TL} = v_m V_m + v_f V_f,$$

где v_{LT}, v_{TL} – коэффициенты Пуассона для направления вдоль и поперек волокон, соответственно; v_m, v_f – коэффициент Пуассона материала матрицы и волокон, соответственно.

В качестве примера на рис. 3 приведена типичная экспериментальная зависимость модуля Юнга для системы «эпоксидная смола–стекловолокно» [7]. Введение поправки на конкретные значения коэффициентов по направлениям вдоль и поперек направления волокон согласно (9) позволяет восстановить упругие свойства КМ выбранной системы при различной комбинации составляющих его компонентов и конкретного направления деформирования.

В механике разрушения КМ при статическом силовом воздействии существует ряд критериев, основанных на различных параметрах состояния материала. В частности, внимания заслуживает критерий, являющийся модификацией формулы Хофмана для материалов при преимущественно растягивающем внешнем усилии [7]:

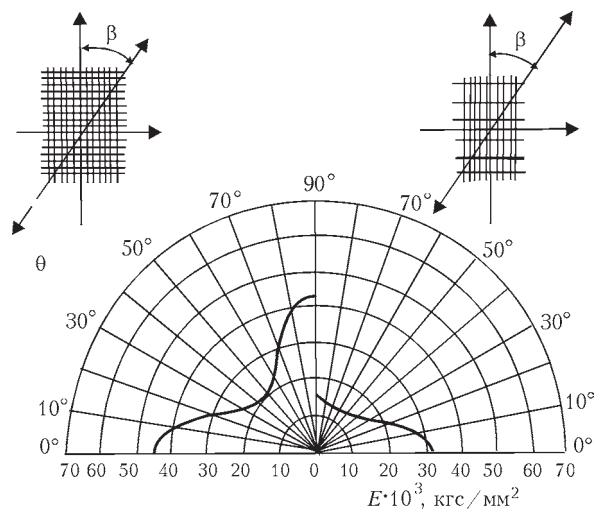


Рис. 3. Изменение модуля Юнга в зависимости от направления растяжения образцов из стекловолоконного композита с матрицей из эпоксидной смолы с параллельным (слева) и перпендикулярным расположением слоев (справа) [7]

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{xx}}{X}\right)\left(\frac{\sigma_{yy}}{Y}\right) + \left(\frac{\sigma_{yy}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S}\right)^2 = 1, (11)$$

где X, Y, S – параметры прочности конкретного КМ в зависимости от механических свойств и соотношения составляющих компонентов.

Таким образом, разработанная методика оценки НДС системы «трубопровод–композиционный бандаж» позволяет эффективно учитывать как влияние внешнего силового воздействия на систему, так и развитие разрушения в бандаже и трубопроводе вплоть до наступления предельного состояния. Верификация разработанных моделей была проведена на основе экспериментальных данных, полученных авторами [11] при лабораторных испытаниях на статическую прочность дефектных трубопроводных элементов с КБ. Как показывают результаты сравнения, приведенные в табл. 2, численная оценка предельного давления в трубе с полуэллиптическим дефектом на внешней поверхности, усиленной бандажом из КМ, соответствует экспериментальным результатам.

Также следует подчеркнуть, что интенсификация докритической поврежденности усиливающего элемента даже без его видимого макро разрушения снижает несущую способность и эффективность разгружающего действия КБ. Из этого можно заключить, что общепринятый метод экспериментального определения эффективности ремонта трубопроводов усилением, который заключается в сравнении предельных давлений для дефектного элемента без усиления и с бандажом, определенных при лабораторных испытаниях, не в полной мере отображает его работоспособность в рабочем диапазоне давлений, так как в этом случае накопление докритической поврежденности может быть незначительным и эффективность разгружения максимальна, а по мере приближения к предельному значению P эффективность КБ снижается вплоть до значений, близких к нулю, при макро разрушении усиливающей конструкции.

Как показывают экспериментальные исследования по одноосному нагружению образцов из типичных КМ, их разрушение начинается при относительно небольших нагрузках и постепенно накапливается по мере увеличения нагрузки вплоть до полного разрушения образца. Авторами

работы [12] был предложен параметр докритической поврежденности материала ξ , представляющий собой отношение площади ΔS образовавшихся микронесплошностей к объему V , в котором они зародились:

$$\xi = \Delta S / V. (12)$$

Применение такого количественного параметра удобно при использовании методов акустической эмиссии для оценки степени докритической поврежденности материалов. В качестве примера на рис. 4 приведены данные испытаний образцов из КМ системы «эпоксидная смола–стекловолокно», из которых видна нелинейность накопления докритических микроповреждений в композите начиная с относительно небольших значений статической нагрузки. Естественно ожидать аналогичное поведение материала КБ, установленного на трубопроводный элемент, при увеличении внутреннего гидростатического давления P в трубопроводе: чем выше P , тем больше микроповреждений накапливается в материале бандажа, уменьшая его фактическое нетто-сечение. Поэтому количественное определение эффективности разгружения дефектного участка трубопровода посредством КБ необходимо основывать на характеристиках состояния трубопровода в рабочем диапазоне внутренних давлений. Для этого может быть использован численный подход, разработанный в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, который базируется на анализе напряженного состояния стенки трубопровода с геометрическими аномалиями с позиции вероятности разрушения. Под эффективностью усиления КБ EPB подразумевается относительное уменьшение вероятности разрушения в результате усиления, а именно [13]

$$EPB = 1 - p/p_0, (13)$$

где p_0, p – вероятность разрушения трубопровода до и после ремонта усилением КБ, соответственно.

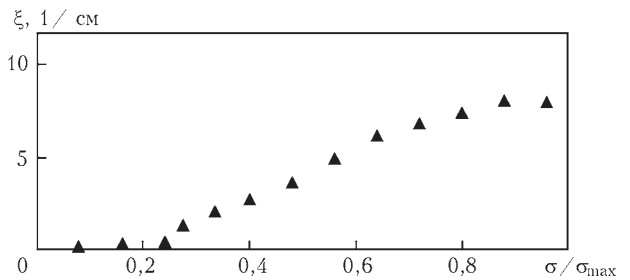


Рис. 4. Зависимость акустико-эмиссионной меры поврежденности композита ξ от приложенной квазистатической нагрузки [12]

Таблица 2. Геометрические параметры дефектных трубопроводных элементов с установленным композиционным бандажом и сравнение экспериментальных и расчетных значений давления разрушения

Номер эксперимента	Толщина стенки трубы, мм	Диаметр трубы, мм	Глубина дефекта, мм	Длина дефекта, мм	Давление разрушения бандажа (эксперимент/расчет), МПа
1	9,9	720	4,8	145	10,7/13,4
2	7,43	530	3,5	146	9,5/10,7

Вероятность разрушения конструкции вычисляется на основе результатов моделирования напряженного состояния стенки трубы путем интегрирования распределения главных напряжений σ_1 по критическому сечению S_c в рамках статистики Вейбулла:

$$p = 1 - \exp \left[- \int_{S_c} \left(\frac{\sigma_1 - A}{B} \right)^m \frac{dS_c}{S_0} \right], (\sigma_1 > A), \quad (14)$$

где S_0 – константа материала; $A = \sigma_{flow} = (\sigma_b + \sigma_r)/2$; $m = 4,0$.

Коэффициент распределения Вейбулла B определяется свойствами материала трубопровода и, как показано авторами в работе [14], может быть оценен исходя из класса прочности стали конструкции.

Использование приведенной методики численного анализа эффективности разгрузки дефектных участков магистральных трубопроводов (МТ) посредством КБ было рассмотрено в рамках следующего примера: на трубопровод из низколегированной стали 17Г1С диаметром 530 мм и толщиной стенки 11,4 мм, на внешней поверхности которого обнаружены шесть дефектов локального утонения полуэллиптической формы длиной $2s = 150$ мм (тангенциальное направление) и глубиной $a = 5$ мм, равномерно распределенных по окружности трубы. Данный участок МТ усилен КБ из стеклоткани (Е-стекло, 7 слоев) с матрицей из эпоксидной смолы, толщина бандажа $\delta_m = 4$ мм. Свойства компонентов КМ и стали трубопровода приведены в табл. 3.

Результаты расчета вероятности разрушения трубопровода как с указанной множественной поврежденностью, так и с дефектами другой глубины (3 и 7 мм), согласно приведенным выше алгоритмам показаны на рис. 5. Из этих данных можно заключить, что наличие композиционного бандажа расширяет диапазон нулевых и низких вероятностей разрушения трубопровода не меняя при этом характера функциональной зависимости. Это объясняется тем, что без учета поврежденности, которая с ростом давления накапливается в композите, конструкция работает как разнородная контактная пара, что эквивалентно некоторому увеличению толщины трубопровода пропорционально соотношению модулей упругости металла МТ и бандажа.

Таблица 3. Механические свойства компонентов композиционного бандажа и стали трубопровода [7, 15]

Материал	E , ГПа	ν	σ_b , МПа	σ_r , МПа
Сталь 17Г1С	205	0,30	530	320
Эпоксидная смола	18,3	0,30	56	–
Е-стекло	54,8	0,25	2100	–

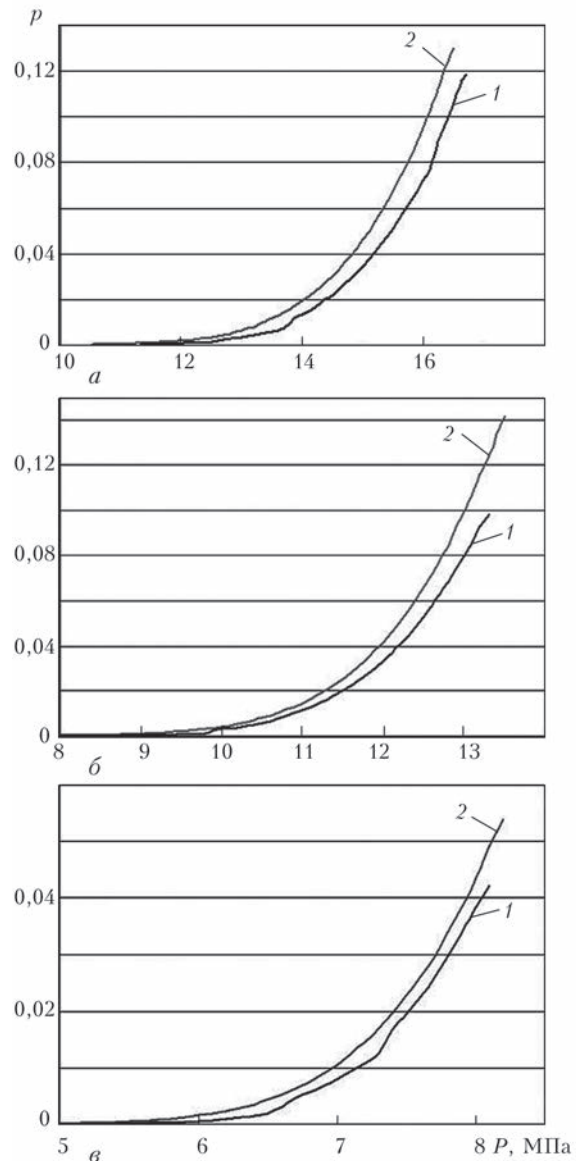


Рис. 5. Зависимости вероятности разрушения p трубопровода с многоочаговым дефектом утонения стенки различной глубины a от внутреннего давления P с усилением (кривая 1) и без усиления КБ (кривая 2), мм: а – 3, б – 5, в – 7

Относительная характеристика эффективности EPB для этих случаев эксплуатационной поврежденности МТ и ремонта усилением КБ более наглядно демонстрирует специфику разгрузки дефектного участка трубопровода (рис. 6).

Так, по мере увеличения внутреннего давления эффективность разгрузки постепенно снижается, что соотносится с накоплением поврежденности в поперечном сечении композита, равной количеству разрушенных на данном этапе нагружения конечных элементов мезоразбиения регулярных ячеек бандажа к общему количеству элементов аналогично характеристике ξ из выражения (12). Кроме того, при достаточно высоких значениях P наблюдается скачкообразное снижение эффективности разгрузки, что объ-

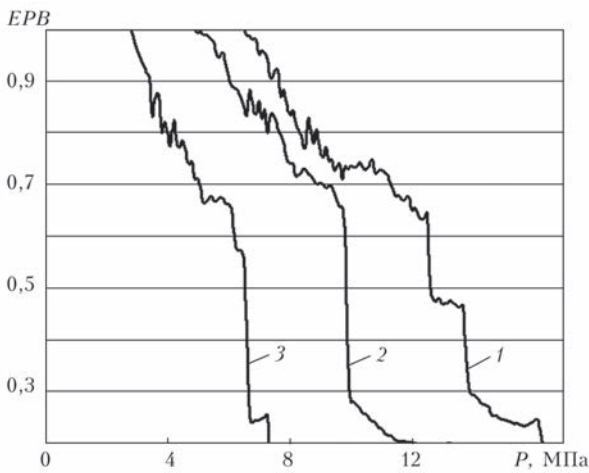


Рис. 6. Зависимость эффективности разгрузки EPB трубопровода с многоочаговым дефектом утонения стенки различной глубины a от внутреннего давления P : 1 – $a = 3$ мм; 2 – 5; 3 – 7

Таблица 4. Влияние количества слоев стеклоткани N и толщины бандажа δ_m на величину условного давления $P_{0,95}$

N	δ_m , мм	$P_{0,95}$, МПа
7	4	8,4
10	4	13,3
7	6	10,8

яняется разрушением волокон и существенным снижением несущей способности бандажа. При этом, чем больше глубина обнаруженных дефектов, тем меньшая докритическая поврежденность предшествует разрушению КБ: меньшая остаточная толщина стенки трубопровода вызывает большое локальное выпучивание в области дефекта, в результате чего разрушение бандажа при высоких внутренних давлениях более локализовано.

Для практического применения изложенной методики удобно рассматривать условное внутреннее давление в трубопроводе P_p , которое соответствует определенной величине эффективности усиления КБ. Это позволяет оптимизировать рассматриваемый метод ремонта с позиций известного диапазона эксплуатационных давлений, предписанных конкретному участку МТ. Так, в рамках численного исследования влияния толщины бандажа и количества слоев стеклоткани в нем на эффективность разгрузки дефектного участка МТ ($a = 5$ мм) показано, что при одинаковой толщине бандажа, но большем количестве слоев стекловолокна, равно как и при увеличении толщины усиливающего слоя КМ, локальное перераспределение напряжений в области дефекта обуславливает рост эффективности разгрузки (рис. 7).

Это можно количественно описать увеличением условного давления $P_{0,95}$, соответствующего эффективности $EPB = 0,95$ (табл. 4.)

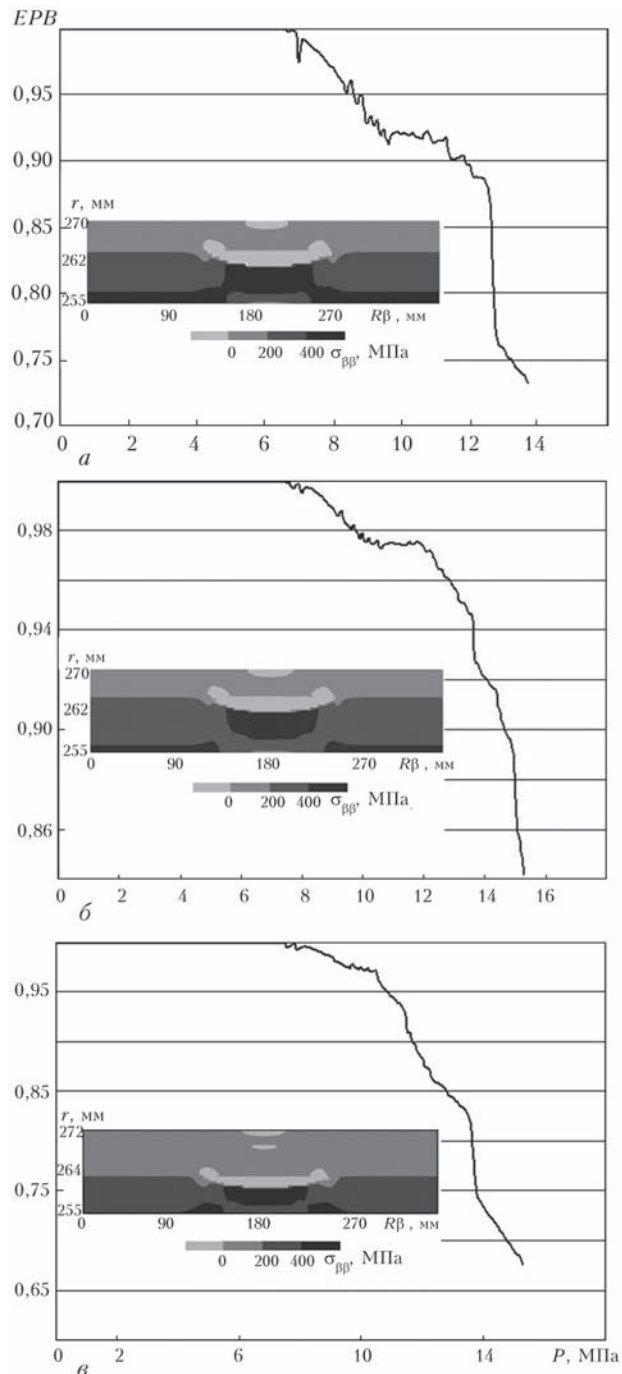


Рис. 7. Влияние количества слоев стеклоткани N в бандаже и его толщины δ_m на распределение тангенциальных напряжений в области каждого дефекта и на зависимость эффективности разгрузки EPB от внутреннего давления в трубопроводе P : а – $N = 7$; $\delta_m = 4$ мм; б – $N = 10$, $\delta_m = 4$ мм; в – $N = 7$; $\delta_m = 6$ мм

Выводы

Разработан и реализован комплекс математических моделей и компьютерных программ для оценки НДС волоконного бандажа, установленного на элемент трубопровода с множественными коррозионными повреждениями, в зависимости от внутреннего давления в трубопроводе и технологических параметров ремонта.

Предложены критерии оценки эффективности усиления элемента трубопровода с обнаруженными дефектами утонения стенки посредством КБ с учетом докритической поврежденности композита, обусловленной действием эксплуатационных нагрузок, на основе вероятностной оценки склонности трубопроводного элемента к разрушению.

Проведен численный анализ особенностей влияния технологических параметров ремонта усилением на эффективность восстановления несущей способности магистрального трубопровода с множественным коррозионным повреждением; на примере бандажа из стекловолоконного композита продемонстрирован характер влияния толщины усиливающего элемента и количества слоев стеклоткани на эффективность восстановления несущей способности дефектного участка трубопровода. Показано влияние докритической поврежденности материала бандажа на эффективность усиления участка магистрального трубопровода с обнаруженной множественной дефектностью коррозионной природы.

1. *Muhlbauer W. Kent. Pipeline Risk Management Manual. Ideas, Techniques, and Resources. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2004. – 422 p.*
2. *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.*
3. *Kiefner J.F., Bruce W.A., Stephens D.R. Pipeline repair manual. – Houston: Technical Toolboxes, Inc., 1994. – 167 p.*
4. *A simple methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins / H.S. da Costa-Mattos, J.M.L. Reis, R.F. Sampaio et al. // Mechanics of Solids in Brazil 2009, H.S. da Costa Mattos & Marcilio*

Alves (Editors), Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2009.

5. *ВРД 39-1.10-013–2000* Руководящий документ по применению композитных материалов фирмы «Порсил ЛТД» (г. Санкт-Петербург) для ремонтных работ на объектах нефтяной и газовой промышленности. – М.: АО «ВНИИСТ», 2000. – 87 с.
6. *Baek J.-H., Kim W.-S., Kim Y.-P. Comparative study for various repair methods of in-service pipeline using full scale burst test // Proc. of 23rd World Gas Conference, Amsterdam 2006, Netherlands.*
7. *Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Мир, 1982. – 232 с.*
8. *Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях / Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, А.С. Миленин и др. // Автомат. сварка. – № 9. – 2013. – С. 26–31.*
9. *Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.*
10. *Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев. Наук. думка, 2006. – 618 с.*
11. *Оценка эффективности композитных бандажей для восстановления дефектных участков трубопроводов / Э.Ф. Гарф, В.А. Нехотящий, Р.И. Дмитриенко и др. // Там же. – 2011. – № 7. – С. 44–49.*
12. *Назарчук З., Скальський В. Методика оцінювання докритичної пошкодженості скловолоконних композитів // Вісник Терноп. нац. техн. ун-ту. – 2011. – Спецвип. – Ч. 1. – С. 7–14.*
13. *Махненко В.И., Миленин А.С. Численный анализ степени усиления стенки трубопровода в зоне дефектов коррозионного утонения посредством муфты-бандажа // Сб. докл. конф. «Прочность материалов и конструкций», 28–30 сентября 2010 г., Киев, Украина, Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАНУ.*
14. *Вероятностная оценка состояния трубопроводных элементов с обнаруженными дефектами утонения / Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, А.С. Миленин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2014. – № 2. – С. 12–18.*
15. *Стали и сплавы. Марочник / Под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гарвасьева. – М.: Интернет инжиниринг, 2001. – 608 с.*

In order to study the characteristic features of stress-strain and limiting states of defective section of main pipeline, the load-carrying capacity of which was restored using a composite band, as well as to predict the effectiveness of repair, a respective complex of mathematical models was developed, which allows performance of required analysis of the state of this kind of composite structure, taking into account initiation and propagation of damage in micro- and macroscale. An element of main pipeline with multiple corrosion damage was used as an example to demonstrate the characteristic features of its stress-strain, damaged and limiting states, determining the effectiveness of repair by applying bands from fibrous composites.

Keywords: main pipeline, composite band, corrosion thinning defect, effectiveness

*Поступила в редакцию
26.01.2016*

**Международная конференция Немецкого союза сварки и родственных процессов DVS
«Современные тенденции в сварке
и соединительных технологиях в 21-ом веке»**

1–3 июня 2016

г. Таллин

Языки конференции: русский, английский, эстонский
Наш первый контакт для Вас, пожалуйста, свяжитесь с нами:

1. Frau Agne Plenaite agne.plenaite@gsi-baltikum.ee LT, ENG
2. Herr Vladimir Beloi vladimir.beloi@tlmk.ee EE, RUS
3. Herr Ilgonis Rungis irungis@3arodskola.lv LV, RUS
4. Frau Irina Pinneker pinneker@slv-rostock.de DE, RUS
5. Herr Sergei Boaga sergei.boaga@gsi-baltikum.ee EE, RUS
6. Herr Dr. Groß hans-g.gross@gsi-baltikum.ee DE, RUS, ENG

