

С. М. Верещака, д-р техн. наук, проф., Д. А. Жигилий, канд. техн. наук, ст. преподаватель, В. В. Данильцев, инженер, А. В. Дейнека, ассистент (Сумский государственный университет, г. Сумы, Украина)

Прочность локальных дефектных участков стальных трубопроводов с ремонтным бандажом из стеклопластика

В процессе эксплуатации на поверхности локальных участков трубопроводов вследствие коррозии или адгезионного износа появляются дефекты, снижающие их прочность и приводящие к аварии всего трубопровода. Разработка эффективных ремонтных конструкций в виде многослойных бандажей из высокопрочных неметаллических материалов, которые будут использоваться для ремонта дефектов трубопроводов и при этом не приводят к остановке процесса транспортировки энергоносителей, представляется актуальной задачей. Вследствие отсутствия уточненных методик оценки влияния дефектов на прочность конструкций значительно возрастает объем ремонтных работ по устранению дефектных участков без особой на то необходимости.

Ключевые слова: ремонт трубопроводов, композитный бандаж, оценка дефектов, натурная тензометрия, модифицированный критерий прочности.

У процесі експлуатації на поверхні локальних ділянок трубопроводів внаслідок корозії або адгезійного зносу з'являються дефекти, які знижують їх міцність і призводять до аварії всього трубопроводу. Розробка ефективних ремонтних конструкцій у вигляді багатошарових бандажів з високоміцних неметалевих матеріалів, які будуть використані для ремонту дефектів трубопроводів і при цьому не призводять до зупинки процесу транспортування енергоносіїв, представляється актуальним завданням. Внаслідок відсутності уточнених методик оцінки впливу дефектів на міцність конструкції значно зростає обсяг ремонтних робіт з усунення дефектних ділянок без особливої на те потреби.

Ключові слова: ремонт трубопроводів, композитний бандаж, оцінка дефектів, натурна тензометрія, модифікований критерій міцності.

Pipe defects appear due to corrosion or adhesive wear under the operation of local sites on the pipe surfaces. They reduce strength and cause an accident the entire pipeline. Developing effective repair of structures by the high-durable non-metallic multi-layered bands to repair defects in pipelines without stopping the process of energy resources transportation is an actual problem. The scope of repair work to eliminate the defective areas significantly increases due to the lack of refined methodologies to assess the defects impact on the pipe strength.

Keywords: pipeline repair, composite bandage, defect assessment, strain gauge full-scale, modified strength criterion.

Введение

Хорошо известно, что объект конкуренции на рынке энергоносителей между отечественными и зарубежными компаниями становятся их запасы и способы транспортировки. Как правило, транспортировка нефти и газа в современном мире осуществляется при помощи магистральных трубопроводов. Надежность трубопроводных систем становится одним из важнейших конкурентных преимуществ и основной составляющих энергетической безопасности государства.

В процессе эксплуатации на поверхности локальных участков трубопроводов вследствие коррозии или адгезионного износа могут появляться дефекты, снижающие их прочность, а иногда, к сожалению, и приводящие к аварии всего трубопровода. Из отчета Ростехнадзора следует, что в период с 1991 по 1996 год доля аварий по причине коррозии в общем балансе аварийности по ОАО «Газпром» составляла около четверти, с 1998 по 2003 год аварии по этой причине составили треть от общего количества, то в 2006–2007 годах они составляли уже более 50 %.

Следует отметить, что ремонт коррозионных участков трубопроводов с применением разного рода сварочных технологий, как правило, приводит к длительной остановке процесса транспортировки энергоносителей и влечет за собой значительные финансовые и материальные убытки. Поэтому разработка эффективных ремонтных конструкций в виде многослойных бандажей из высокопрочных неметаллических материалов, которые будут использоваться для ремонта дефектов трубопроводов и при этом не приводят к остановке процесса транспортировки энергоносителей, представляется актуальной задачей.

В последние годы, наиболее используются композитные бандажи на основе стеклянных и углеродных волокон [1–8], создана нормативная база на ремонт трубопроводов композитными системами [9–12], расширяется номенклатура используемых композитных материалов [7]. Так, например, американская компания ClockSpring разработала уникальную технологию ремонта дефектных участков стальных труб при помощи специальных манжет ClockSpring (clock spring – часовая пружина). Манжета ClockSpring представляет собой однонаправленный композиционный материал

на основе специального стекловолокна с матричной памятью свертывания. Авторы указанной разработки отмечают, что манжета «забирает на себя» 1/6 общей нагрузки, поэтому пределы зоны «первичных» упругих деформаций трубы повышается на 18 %. В Украине для локального ремонта трубопроводов используют композитные бандажы фирмы «Полипромсинтез», изготавливаемые на основе стеклопластиков и полиэфирной смолы.

Теоретические и экспериментальные исследования по оценке прочности системы трубопровод – композитный бандаж, изучению механических свойств композитного бандаж, разработке конструктивно-технологических схем усиления дефектных участков трубопроводов, а также методики их расчета, приведены в работах [13–20].

Разработана технология изготовления композитных бандажей путем многослойного наматывания стеклопластиковой ткани на трубу. Существенное различие физико-механических характеристик материалов трубы и композита, требует более глубокого изучения их совместной работы как в упругой, так пластической области деформирования.

Действующие на сегодняшний день нормы на размеры допустимых дефектов объектов энергетического машиностроения предъявляют достаточно жесткие ограничения к их размерам. Принята следующая классификация дефектов:

- несквозные коррозионного, эрозийного и металлургического типа;
- сквозные плоскостные (отверстия, свищи) и линейные (трещины).

К сожалению, отсутствие уточненных методик оценки влияния дефектов на прочность конструкций приводит к тому, что значительно возрастает объем ремонтных работ по устранению дефектных участков без особой на то необходимости. Уточненная методика оценки влияния обнаруженных дефектов на прочность системы трубопровод – композитный бандаж позволит делать более точный прогноз целесообразности ремонта коррозионных участков трубопроводов.

В этой связи особое внимание следует уделить как теоретическому, так и экспериментальному изучению напряженного состояния в точках сопряженной поверхности стальной трубы и бандаж, а также определению наиболее эффективных критериев прочности, которые с достаточной точностью дадут оценку предельного состояния ремонтных конструкций в процессе их эксплуатации.

Постановка цели исследований

Целью работы является разработка уточненной методики оценки влияния обнаруженных дефектов на прочность системы трубопровод – композитный бандаж, которая даст возможность прогнозировать целесообразность ремонта коррозионных участков трубопроводов.

Объект исследований представлял собой фрагмент стальной бесшовной горячедеформированной трубы – ГОСТ 8731, ГОСТ 8732, из стали марки 09Г2С.

Основная часть

Для достижения поставленной цели исследований с помощью программного комплекса ANSYS изучено напряженное состояние системы «трубопровод – композитный бандаж», что позволяет определить конструктивные параметры композитного бандаж в зависимости от повреждаемости материала трубы и геометрических параметров дефектов. Полученные теоретические результаты и проведенные экспериментальные исследования позволили выбрать критерий прочности и определить величины предельных напряжений в точках сопряжения композитного бандаж и стальной трубы.

Основные характеристики трубы приведены в табл. 2. К трубе длиной 1 м приваривали фланцы. На внешней поверхности трубы с помощью фрезы наносили искусственные дефекты. Общий вид трубы с дефектами и схемой их расположения приведены на рис. 1. Считается, что внутреннее рабочее давление трубы равно 20 МПа.

Представленная труба удовлетворяет требованиям длинной оболочкой. Краевые эффекты, которые возникают в области фланцевых соединений, быстро зату-



Рис. 1. Общий вид стальной трубы с дефектами

Таблица 1. Основные требования к допустимым дефектам по наиболее распространённым стандартам

Типы дефектов	$\delta_{ост}$ на участке с дефектом после зачистки, %	Допустимая площадь дефекта, мм ²	Примечание
Сквозной плоскостной	0	Не более 150	Расстояние между соседними дефектами ≥ 1000 мм $\Sigma\Pi \leq 0,5 m_2$
Несквозные	> 90	≤ 300000	
	80–90	≤ 200000	
	70–80	≤ 150000	
	60–70	≤ 100000	
	50–60	≤ 50000	Размеры повреждений и технология ремонта аналогичны соответствующему типу сквозного дефекта
	<50		

Примечание: $\delta_{ост} = (\delta_{ф} / \delta) \cdot 100$ – относительная толщина стенки трубы на участке с дефектом, $\delta_{ф}$, δ – фактическая и номинальная толщина стенки трубы; $\Sigma\Pi$ – общая площадь участков с дефектами.

хают, и не влияет на напряженное состояние в области нанесенных дефектов.

На поверхность трубы нанесены шесть сегментов выточек шириной 30 мм и кольцевая выточка шириной 50 мм. Минимальная толщина трубы в зоне сегментных и кольцевой выточек варьируется в пределах от 1,6 мм до 3,1 мм.

Напряженно-деформированное состояние трубы исследовали с целью установления совместной работы трубы и бандаж на всех этапах нагружения, соответствующих работе трубопровода. Для измерения относительных деформаций использовали проволоочные тензорезисторы типа КФ4П1-3-200 с базой 3 мм, 5 мм и 10 мм. Розетки состояли из двух тензодатчиков. Среднее значение коэффициентов тензочувствительности $K=2 \times 10^{-6}$. Все тензодатчики включены в электроизмерительную цепь согласно документации на прибор СИИТ-3, к которому они подключаются. Деформации в точках стенки трубы и на поверхности ремонтного бандаж измеряли в продольном и кольцевом направлениях. Схема размещения датчиков приведена на рис. 2.

Испытываемая труба нагружается внутренним давлением. Поскольку стенка трубы ослаблена поверхностными дефектами, при проведении эксперимента создаваемое гидростатическое давление будет ниже рабочего.

Для создания в трубе внутреннего давления в него закачивается вода при помощи плунжерного насоса. Параметры нагружения контролировали высокоточным манометром. Общий вид экспериментального стенда показан на рис. 3. Проведение эксперимента включало три этапа.

На первом этапе изучалось напряженно-деформированное состояние трубы в зонах нанесенных дефектов. Шаг увеличения гидростатического давления составлял 0,2 МПа. При давлении 14,6 МПа в т. 33 появилась трещина в продольном направлении длиной 3 мм и шириной раскрытия 0,5 мм. С появлением трещина началась течь и падение гидростатического давления. Следует отметить, что пластические деформации стали в т. 33 начались при давлении 4,8 МПа, т. е. задолго до наступления разрушающей нагрузки.

Усиление дефектных участков осуществляли путем наложения многослойного бандаж. После подготовки поверхности трубы с помощью пескоструйной обработки, а также сглаживания наносили композитный бандаж. В качестве матрицы стеклопластикового бандаж использовался эпоксидный полимер 5-211Б со следующими параметрами упругости: $E_M=4200$ МПа, $G_M=1500$ МПа, $\nu_M=0,4$. Армирующим элементом композиции является ткань сатиновой структуры Т-10-80. Ткань получена путем переплетения алюмоборосиликатных ниток БС6-26×1×1(Е стекло). Технические постоянные упругости рассматриваемого многослойного композита приведены в табл. 2. Таким образом, стеклопластик

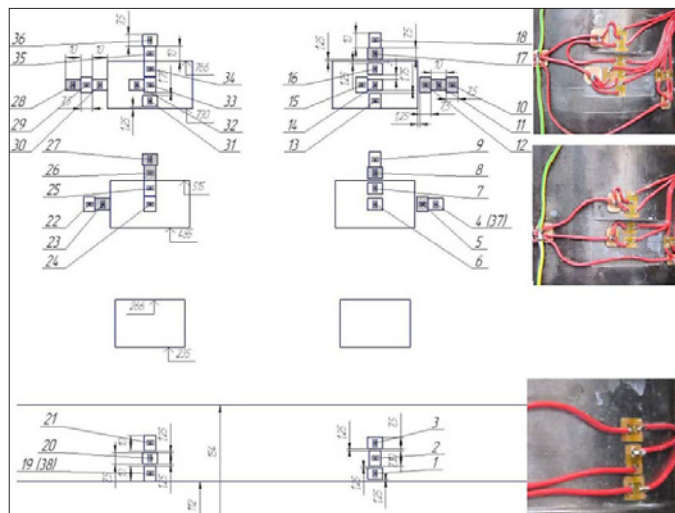


Рис. 2. Схема расположения тензодатчиков на стальной трубе

представляет собой трансверсально изотропный материал и состоит из 25-ти однонаправлено армированных слоев толщиной 0,25 мм. Композитный бандаж укладывался по всей длине трубы и толщина бандаж составляла 6 мм.

Примечание: E_z, E_θ, E_r – модули упругости 1-го рода в продольном, окружном и радиальном направлениях; $G_{\theta z}, G_{rz}, G_{r\theta}$ – модули сдвига;

Таблица 2. Основные геометрические и механические параметры исследуемой трубы

Объем, мм ³	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина корпуса, мм	Механические свойства	
				σ_B , МПа	σ_T , МПа
2,243*107	169	5,8 – 6,2	1000	490	340



Рис. 3. Экспериментальный стенд

$\nu_{z\theta} = \nu_{\theta z}, \nu_{\theta r} = \nu_{r\theta}, \nu_{rz\theta} = \nu_{zr\theta}$ – коэффициенты Пуассона.

После полимеризации бандаж в местах расположения дефектов трубы на внешнюю поверхность бандаж наклеивались тензорезисторы (рис. 4).

На втором этапе исследовалось напряженно-деформированное состояние трубы в зонах нанесенных дефектов. Шаг увеличения гидростатического давления составлял 0,2 МПа. Устройство ремонтного бандаж позволило увеличить гидростатическое давление до рабочей величины, т. е. до 20 МПа. Напряженно-деформированное состояние образца исследовали с целью установления совместной работы трубы и бандаж на всех этапах нагружения, соответствующих работе тру-



Рис. 4. Общий вид расположения тензодатчиков на лицевой поверхности банджа

Таблица 3. Упругие характеристики стеклопластика

Схема армирования	E , МПа	G , МПа	ν_{ij}	ν_{ji}
[[0° / 90°] ₆] _s	$E_z = 24260$	$G_{\theta z} = 4254$	$\nu_{z\theta} = 0,15$	$\nu_{\theta z} = 0,15$
	$E_\theta = 24260$	$G_{rz} = 2947$	$\nu_{zr} = 0,39$	$\nu_{rz} = 0,16$
	$E_r = 9989$	$G_{r\theta} = 2947$	$\nu_{\theta r} = 0,39$	$\nu_{r\theta} = 0,16$

бюпровода. Полученные методом тензометрирования данные свидетельствуют о том, что деформирование банджа происходит совместно с трубой.

Предметом исследования третьего этапа эксперимента был сквозной дефект трубы круглой формы и диаметром 30 мм. Площадь дефекта составила 730 мм². На участок трубы с дефектом был наложен ремонтный бандаж толщиной 10 мм и шириной 400 мм. Физико-механические характеристики стеклопластикового банджа приведены в табл. 3. После полимеризации банджа с шаговой нагрузкой 0,2 МПа проводилось исследование прочности системы трубопровод – композитный бандаж при наличии сквозного дефекта. Уже при гидростатическом давлении 3,5 МПа в зоне контакта композитного банджа и трубы появилась вода и началось падение гидростатического давления.

Для гидростатического давления 3 МПа помощи программного комплекса ANSYS получены графики рис. 5–рис. 11 напряженного состояния системы «трубопровод – композитный бандаж».

Анализ результатов, проведенного численного эксперимента, показал, что максимальные напряжения в композитном бандже возникают в точках поверхности контакта стеклопластик – металл (клеявая прослойка) на границе сквозного дефекта: $\sigma_z = 4,5$ МПа, $\sigma_\theta = 24,5$ МПа, $\sigma_r = 4,2$ МПа, $\tau_{rz} = 1,2$ МПа, $\tau_{r\theta} = 4,1$ МПа.

Для оценки несущей способности рассматриваемой стеклопластиковой оболочки можно использовать модифицированный критерий прочности [21], который включает трансверсальные напряжения и учитывает влияния ослабленного межфазного контакта слоев:

$$R_{11}\sigma_{11} + R_{22}\sigma_{22} + R_{33}\sigma_{33} + R_{1111}\sigma_{11}^2 + R_{2222}\sigma_{22}^2 + R_{3333}\sigma_{33}^2 + 4R_{1212}\sigma_{12}^2 + 4R_{1313}\sigma_{13}^2 + 4R_{2323}\sigma_{23}^2 = 1 \quad (1)$$

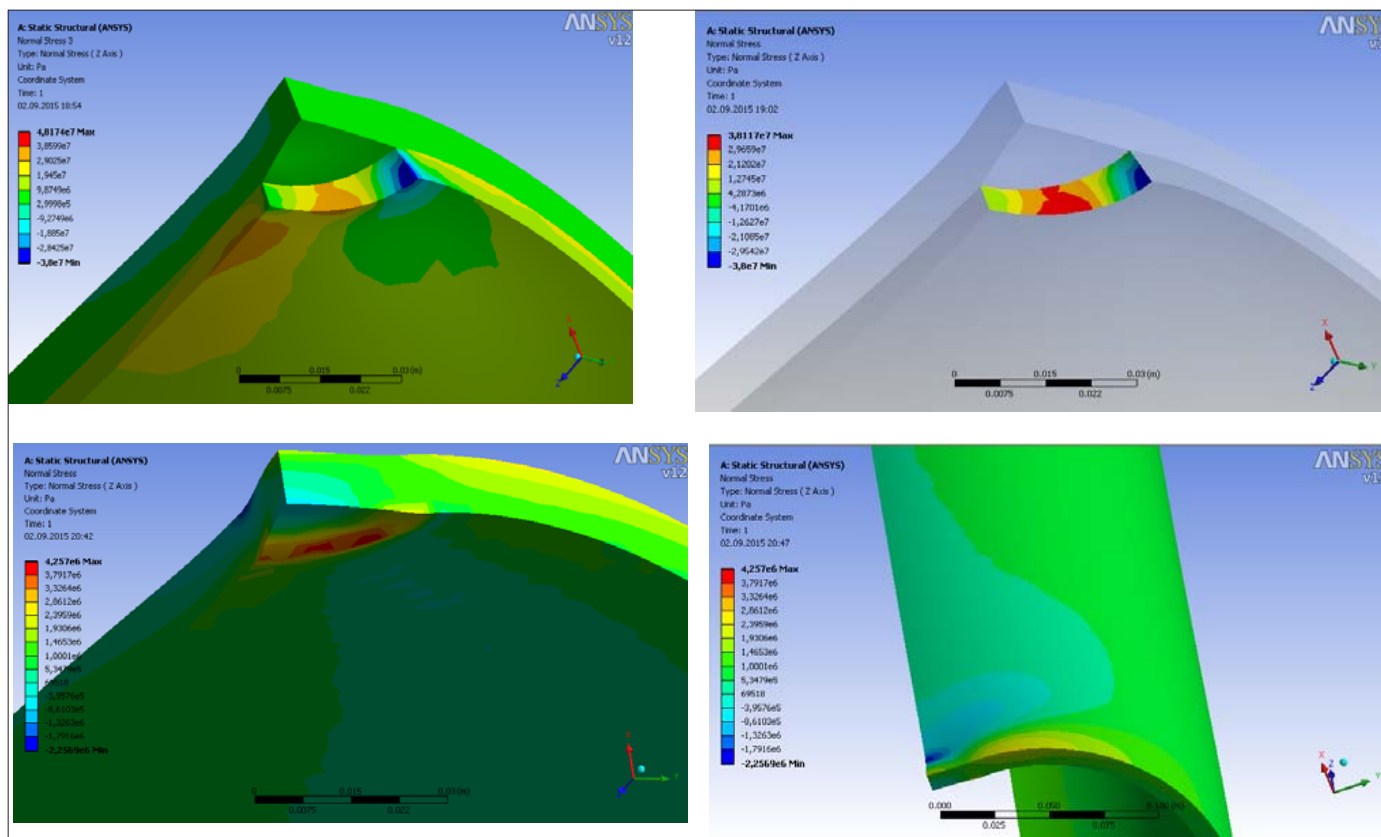


Рис. 5. Распределение нормальных осевых напряжений σ_z

Таблица 4. Значения тензоров поверхности прочности стеклопластика

R_{11} , 1/МПа	R_{22} , 1/МПа	R_{33} , 1/МПа	R_{1111} , 1/(МПа) ²	R_{2222} , 1/(МПа) ²	R_{3333} , 1/(МПа) ²	R_{1212} , 1/(МПа) ²	R_{1313} , 1/(МПа) ²	R_{2323} , 1/(МПа) ²
$0,1056 \cdot 10^{-1}$	$0,1 \cdot 10^{-1}$	$-0,778 \cdot 10^{-1}$	$-0,28 \cdot 10^{-4}$	$-0,31 \cdot 10^{-4}$	$-0,741 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,156 \cdot 10^{-1}$	$0,156 \cdot 10^{-1}$

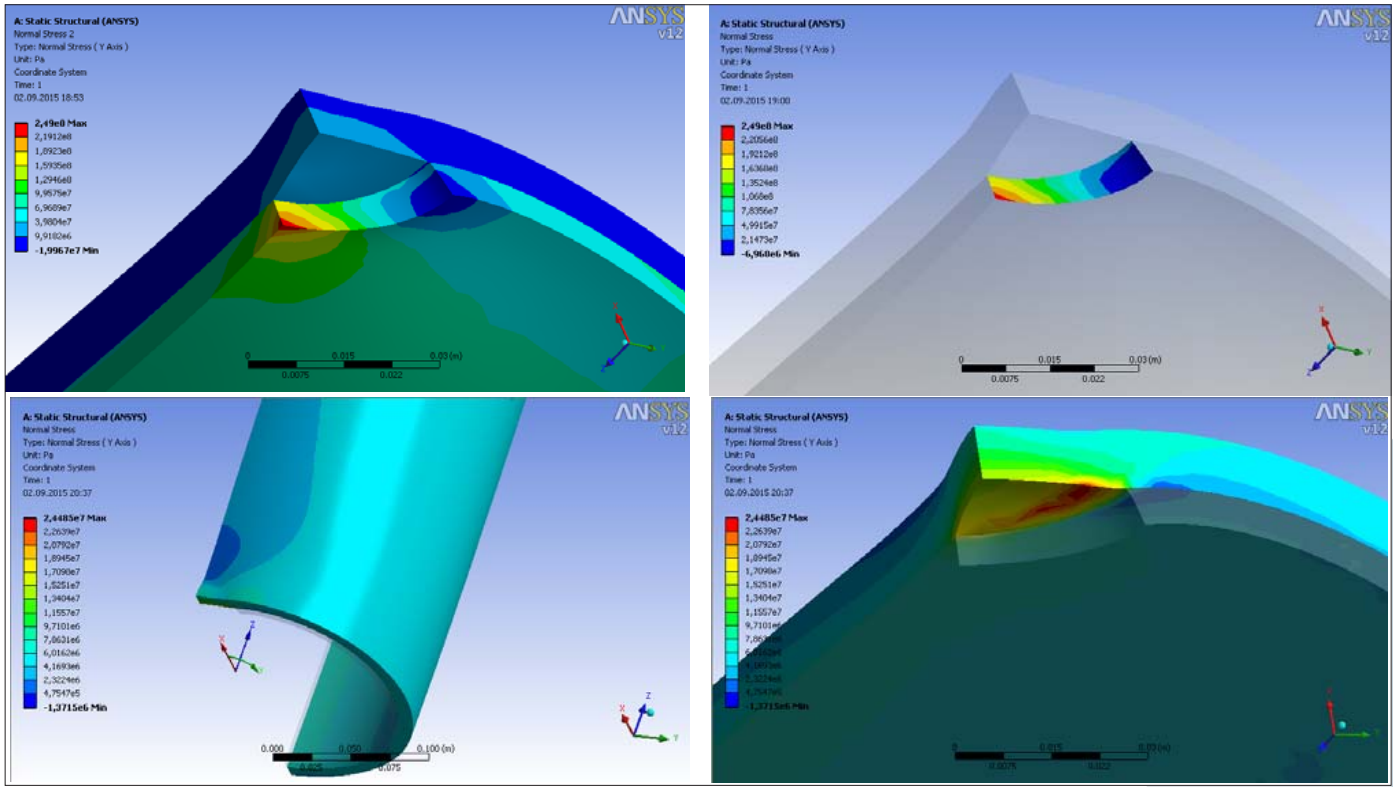


Рис. 6. Распределение нормальных окружных напряжений σ_ϕ

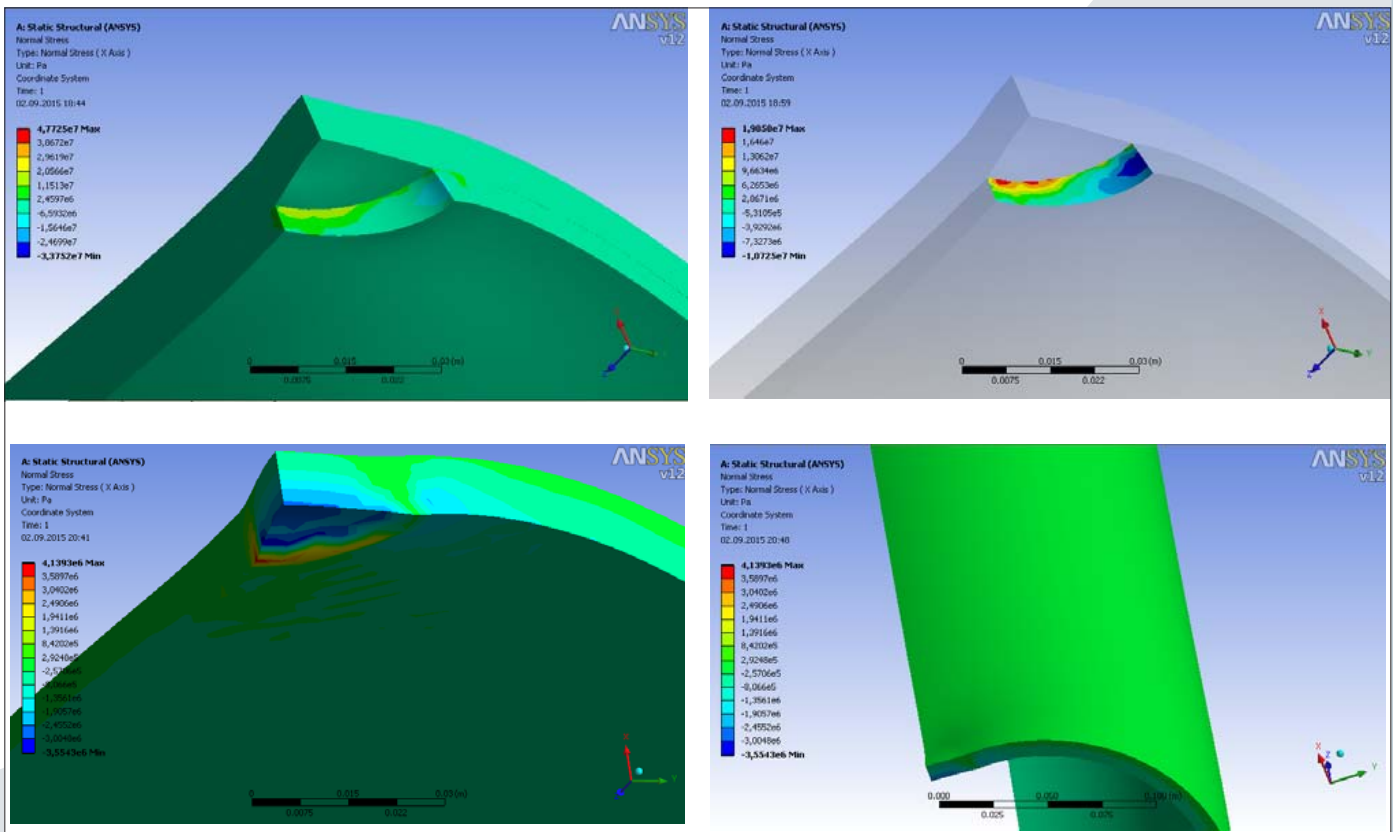


Рис. 7. Распределение нормальных радиальных напряжений σ_r

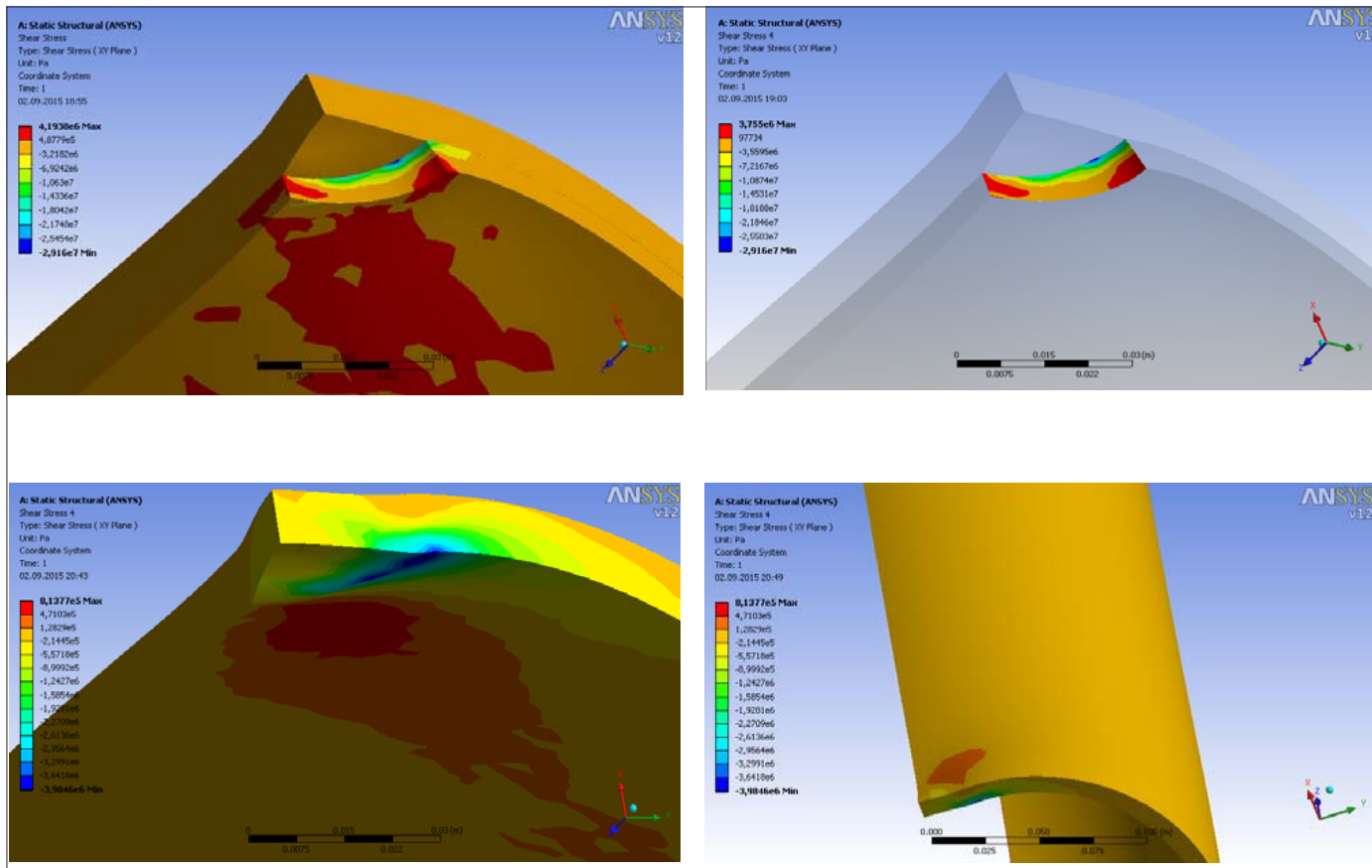


Рис. 8. Распределение касательных напряжений τ_{θ}

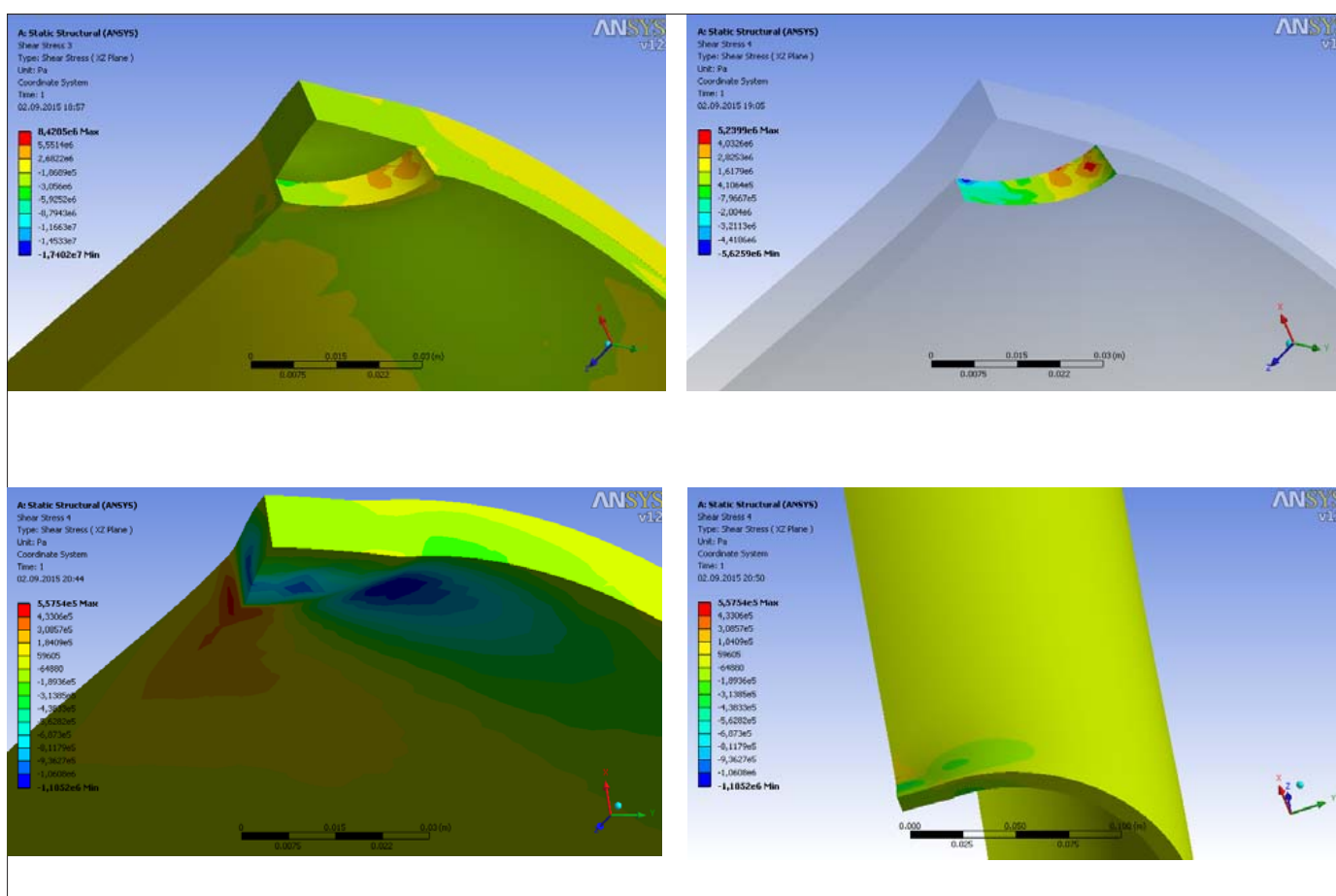


Рис. 9. Распределение касательных напряжений τ_{rz}

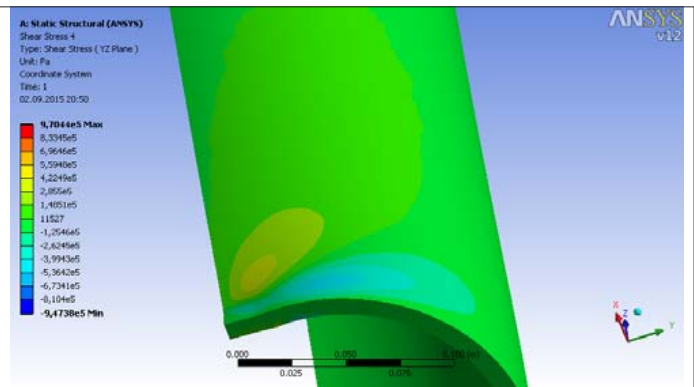
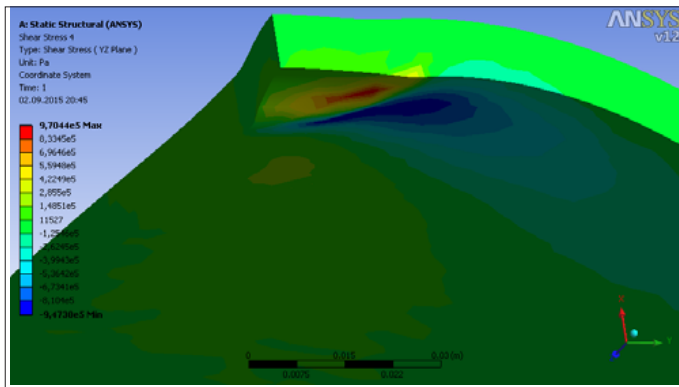
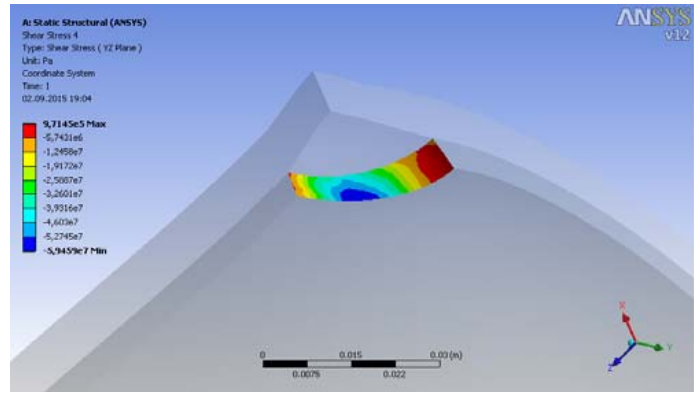
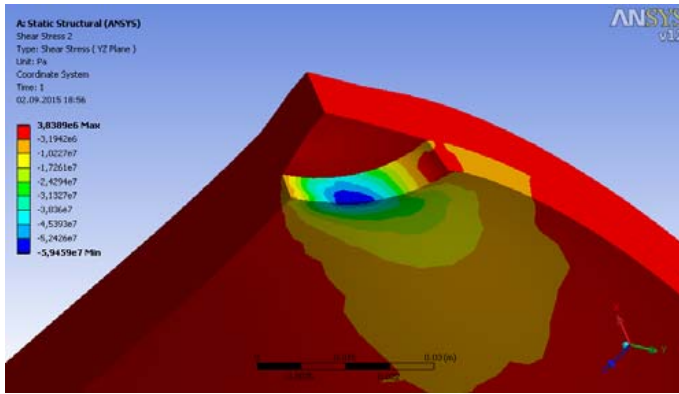


Рис. 10. Распределение касательных напряжений $\tau_{z\theta}$

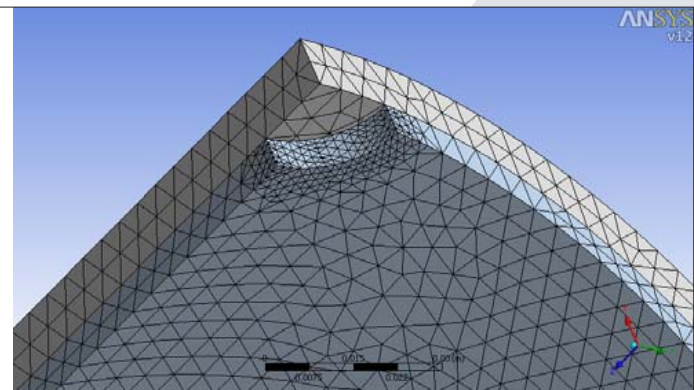
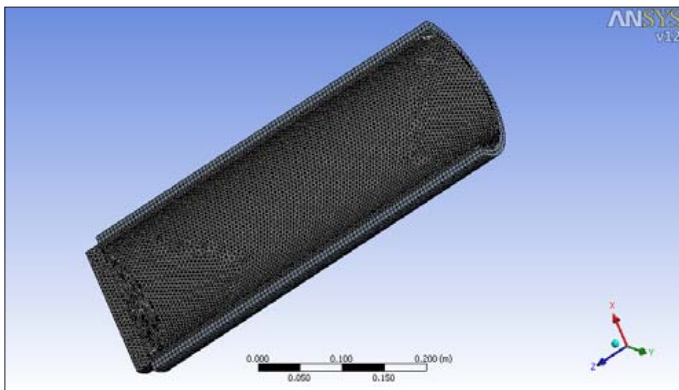


Рис. 11. Математическая модель ремонтного бандажа

где тензоры поверхности прочности имеют вид

$$\begin{aligned}
 R_{11} &= \frac{\sigma_{11}^- - \sigma_{11}^+}{\sigma_{11}^- \sigma_{11}^+}, R_{22} = \frac{\sigma_{22}^- - \sigma_{22}^+}{\sigma_{22}^- \sigma_{22}^+}, \\
 R_{1111} &= \frac{1}{\sigma_{11}^- \sigma_{11}^+}, R_{2222} = \frac{1}{\sigma_{22}^- \sigma_{22}^+}, 4R_{1212} = \frac{1}{\sigma_{12}^- \sigma_{12}^+}, \\
 2R_{1122} &= \frac{R_{11} - R_{22}}{\sigma_{12}^-} + R_{1111} + R_{2222} - \frac{1}{(\sigma_{12}^-)^2}, \\
 R_{33} &= \frac{\sigma_{33}^- - \sigma_{33}^+}{\sigma_{33}^- \sigma_{33}^+}, R_{3333} = \frac{1}{\sigma_{33}^- \sigma_{33}^+}, \\
 4R_{1313} &= \frac{1}{\sigma_{13}^- \sigma_{13}^+}, 4R_{2323} = \frac{1}{\sigma_{23}^- \sigma_{23}^+},
 \end{aligned} \quad (2)$$

Следует отметить, что при переходе к цилиндрической системе координат выполняются тождества:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{11} &= \sigma_z, \quad \sigma_{22} = \sigma_\theta, \quad \sigma_{33} = \sigma_r, \quad \tau_{31} = \tau_{rz}, \\
 \tau_{21} &= \tau_{\theta z}, \quad \tau_{32} = \tau_{r\theta}.
 \end{aligned}$$

При этом считается, что межслойная прочность материала на сдвиг не зависит от знака поперечных касательных напряжений, т.е. $\sigma_{13}^+ = \sigma_{13}^-$; $\sigma_{23}^+ = \sigma_{23}^-$.

Необходимым условием надежной работы таких бандажных систем является обеспечение надежного сцепления бандажа с металлом трубы, т.е. выполнение идеальных условий контакта по сопряженным поверхностям металла и композита. Для оценки несущей способности дефектного участка трубопровода экспериментально определялись следующие

значения пределов прочности бандажа из стеклопластика

$$\sigma_{11}^+ = \sigma_{22}^+ = 200 \text{ МПа}, \sigma_{11}^- = \sigma_{22}^- = -180 \text{ МПа}, \sigma_{33}^- = -90 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{33}^+ = 15 \text{ МПа}, \sigma_{12}^- = \sigma_{12}^+ = 50 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{13}^- = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^- = \sigma_{23}^+ = 8 \text{ МПа}.$$

Значения коэффициентов критерия прочности (1–2) представлены в табл. 4.

Анализируя данные приведенные в табл. 4, следует отметить, что наиболее опасным видом разрушения являются деформации поперечного сдвига и трансверсального отрыва. Теоретическое значение разрушающего гидростатического давления $q_T = 3,35 \text{ МПа}$, что несколько ниже экспериментально полученного разрушающего давления $q_9^* = 3,5 \text{ МПа}$.

Выводы

Проведены экспериментальные и теоретические исследования, разработана методика определения разрушающего гидростатического давления ремонтных композитных бандажей, созданных путем многослойного наматывания стеклопластиковой ткани на трубу в месте дефекта. Чтобы обеспечить возможность перераспределения нагрузок между трубой и композитным бандажом при дальнейшей нагрузке трубопровода внутренним давлением, нужно создать надежное сцепление композитного бандажа с металлом трубы и обеспечить их совместное деформирование за счет повышения адгезионных свойств клеевой прослойки. Эти условия можно выполнить, принимая конструктивные решения при подготовке поверхности участков трубы с дефектами и выполнении композитных бандажей с более эффективными физико-механическими характеристиками.

Список литературы:

1. Ремонт магістральних трубопроводів під тиском / [М. В. Беккер, В. С. Бут, Р. М. Говдяк та ін.]. – К.: Куй, 2008. – 232 с.
2. Mables A. R. Refurbishment of steel tubular pipes using composite materials/ Mables A. R., Dunn K. R., Dodds N., Gibson A. G. // *Plast. Rubber and Comp.* – 2000. – Vol. 29. – P. 558–565.
3. Freire J. L. F. Effectiveness of composite repairs applied to damaged pipeline / Freire J. L. F., Vieira R. D., Diniz J. L. C., Meniconi L. C. // *Exp. Tech. Soc. Exp. Mech.* – 2007. – Vol. 31. – P. 59–66.
4. Mattos H. Sd. C. An alternative methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins / Mattos H. Sd. C., Reis J. M. L., Sampaio R. F., Perrut V. // *Mater. Des.* – 2009. – Vol. 30. – P. 3581–3591.
5. Overwrap composite repairs of offshore risers at topside and splash zone/ [Leong A. Y. L., Leong K. H., Tan Y. C. et al.] // *Proc. Int. Comm. on Composite Materials (ICCM-18)*. – Jeju Island, Korea Int. Comm. on Composite Materials; 21–26, August, 2011.
6. Duell J. M. Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system / Duell J. M., Wilson J. M., Kessler M. R. // *Int. J. Pressure Vessels and Piping*. – 2008. – Vol. 85. – P. 782–788.

7. Alexander C. State of the art assessment of composite systems used to repair transmission pipe lines / Alexander C., Francini B. // *6th Intern. pipeline conf.* 25–29 Sept., 2006. – Calgary, Alberta, Canada, IPC 2006-10484. – 8 p.

8. Бандажная система RES-Q Composite Wrap // Компания T. D. Williamson Inc.: [Электронный ресурс]: <http://www.tdwilliamson.com/en/Products/RehabilitationProducts/CompositeWrap> (дата обращения: 20.01.2014).

9. ASME B 31.4, ASME B 31.8. Classes of ASME Boiler and Pressure vessel Code. – Date 10.05.90.

10. Lukacs J. Experimental and numerical investigations of external reinforced damaged pipelines / Lukacs J., Nagy G., Torok I., Egert J., Pere B. // *Procedia Engin.* – 2010. – Vol. 2. – P. 1191–1200.

11. The American Society of Mechanical Engineers. Repair of Pressure Equipment and Piping. ASME PCC-2-2006. – N. Y.: ASME, 2006.

12. ASTM Committee D20. Standard practice for obtaining hydrostatic or pressure design basis for «fiberglass» (glass-fibre-reinforced thermosetting resin) pipe and fittings. – ASTM D2992-2006. West Conshohocken: Am. Soc. for Testing and Materials, 2006.

13. ISO. Petroleum, petrochemical and natural gas industries – composite repair of pipework – qualification and design, installation, testing and inspection // *ISO/TS 24817*. – London: Int. Organization for Standardization (ISO), 2006.

14. Cunha S. B. Analytical solution for stress, strain and plastic instability of pressurized pipes with volumetric flaws / Cunha S. B., Netto T. A. // *Int. J. Pres. Vessels and Piping*. – 2012. – Vol. 89. – P. 187–202.

15. Szary T. The Finite Element Method Analysis for Assessing the Remaining Strength of Corroded Oil Field Casing and Tubing. PhD thesis. – Freiberg: Geotechnik und Bergbau der Technischen Univ. Bergakademie, 2006.

16. Alexander C. Development of a Composite Repair System for Reinforcing Offshore Risers / Alexander C. – PhD thesis. Texas: Texas A&M Univ., 2007.

17. Shouman A. Compressive strain limits of composite repaired pipelines under combined loading states / Shouman A., Taheri F. // *Composite Structures*. – 2011. – Vol. 93. – P. 1538–1548.

18. Keller M. W. Moisture effects on the thermal and creep performance of carbon fiber/epoxy composites for structural pipeline repair / Keller M. W., Jellison B. D., Ellison T. // *Composites: Part B: Eng.* – 2013. – Vol. 45, Iss. 1. – P. 1173–1180.

19. Kopple M. F. Composite repair of through-wall defects in pipework – analytical and numerical models with respect to ISO/TS24817 / M. F. Kopple, S. Lauterbach, W. Wagner // *Compos. Struct.* – 2013. – Vol. 95. – P. 173–178.

20. Гарф Э. Ф. Оценка прочности и ресурса трубопроводов с эрозионно-коррозионными повреждениями / Э. Ф. Гарф, М. А. Непребский // *Автомат. сварка*. – 2000. – № 9/10. – С. 15–20.

21. Верещака С. М. Нелинейное деформирование и устойчивость многослойных элементов конструкций с дефектами структуры: монография / С. М. Верещака. – Сумы : Изд-во СумГУ, 2009. – 286 с.