

Д.А. БЕСЧЕТНИКОВ, аспирант, НТУ «ХПИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В ОБЛАСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА СТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Исследование напряженно-деформированного состояния в зоне локальных поверхностных дефектов трубопроводных систем является важной экспериментальной задачей, поскольку результаты исследований необходимы для повышения эффективности существующих методик ремонта с использованием полимерных композитных материалов. В данной работе проводится описание эксперимента по тензометрии стальной цилиндрической оболочки с поверхностным дефектом, и изложение полученных результатов. В качестве оболочки в эксперименте использовался баллон из углеродистой стали, который нагружался внутренним давлением. Цель эксперимента заключалась в изучении распределения деформаций в зоне дефекта.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, объемный поверхностный дефект, тензометрия.

Введение. На сегодняшний момент для многих стран, обладающих магистральными трубопроводами, остро стоит вопрос об обеспечении их надежности, так как некоторая часть труб в этих системах отработала свой ресурс. Интенсивные исследования [1] показывают, что основной причиной выхода из строя трубопровода являются объемные дефекты, образующиеся в результате коррозии или эрозии поверхности трубы. Одним из современных методов восстановления ресурса трубопроводов – это ремонт с использованием полимерных композитных материалов [2]. Однако, многочисленные стандарты (ISO 13623, EN 14161, ASME B31.4, и мн. др.), связанные с данной методикой ремонта, основаны на упрощенных подходах и не учитывают напряженно-деформированное состояние в области дефекта. Для решения данной проблемы проводится множество теоретических и экспериментальных исследований [3-5], при этом в последних не всегда уделяется достаточное внимание детальному изучению распределения деформаций в зоне дефекта.

Данная работа посвящена изложению результатов эксперимента по измерению деформаций в области поверхностного дефекта цилиндрической оболочки.

1 Постановка задачи и описание экспериментальной установки. Целью эксперимента является получение количественных и качественных данных о распределении деформаций в области объемного дефекта на поверхности стальной цилиндрической оболочки под давлением.

Собранная экспериментальная установка изображена на рис. 1. В качестве цилиндрической оболочки для исследований используется баллон из

углеродистой стали для хранения газов (ГОСТ 949-73). Основные характеристики баллона: диаметр $D_b = 140$ мм; толщина стенки $t_b = 5$ мм; рабочее давление $P = 10$ МПа. Представленный баллон удовлетворяет требованиям длинной оболочкой. Краевые эффекты, которые возникают в области перехода от сферических частей баллона к цилиндрической, быстро затухают, и не достигают центральной части баллона, где реализуется безмоментное напряженное состояние. Все технические работы по созданию дефекта и измерения проводятся именно в этой части баллона.

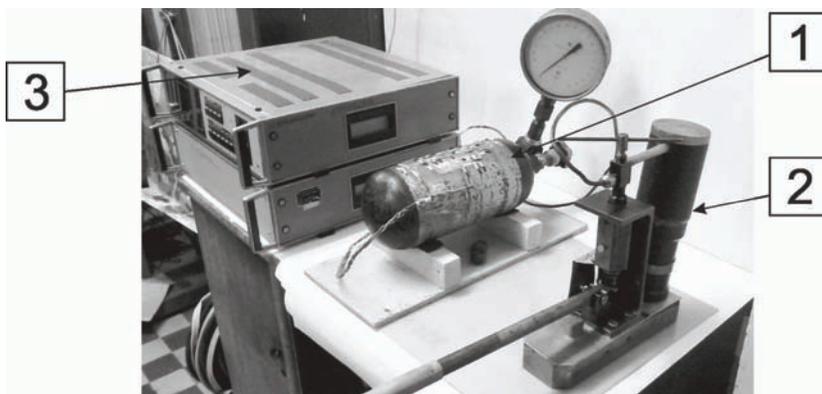


Рисунок 1 – Экспериментальная установка:

1 – баллон с дефектом; 2 – плунжерный насос; 3 – измерительный прибор СИИТ-3

Геометрия и размеры дефекта были выбраны исходя из перспективы последующего сравнения экспериментальных данных с результатами аналогичных исследований. В частности, с результатами экспериментальной программы Pipeline research Council International – PRCI [5], а так же результатами эксперимента проводимого в институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины в рамках европейского проекта «INNOPIPES» 7-й рамочной программы ЕС. Соответствие между размерами экспериментальных образцов и размерами дефектов устанавливается на основе безразмерных параметров подобия λ , λ_c (согласно API 579):

$$\lambda = \frac{1.285 \cdot S_p}{\sqrt{D_b \cdot t_b}}; \quad \lambda_c = \frac{1.285 \cdot C_p}{\sqrt{D_b \cdot t_b}}.$$

Результаты пересчета размеров дефекта для испытуемого в данной работе баллона, а так же его сравнение с образцами из других экспериментальных программ, представлено в табл. 1. Эскиз дефекта показан на рис. 2, а на рис. 3 – схема наклейки тензодатчиков.

Для создания в баллоне внутреннего давления в него закачивается масло при помощи плунжерного насоса (см. рис. 1 поз. 2).

Измерения деформаций в области дефекта осуществляется при помощи

метода тензометрии, который наиболее эффективен и экономически целесообразен для данной экспериментальной работы. В измерительной схеме используются проволочные тензорезисторы типа 2ПК-Б с базой 5 мм и коэффициентом преобразования $K = 2,1$.

Таблица 1 – Образцы для изучения поверхностных дефектов

Испытуемые образцы	Размеры образца		Размеры дефекта			λ	λ_c
	Диаметр D_b , мм	Толщина t_b , мм	Длина S_p , мм	Ширина C_p , мм	Глубина (40% коррозии)		
Образец в PRCI	323.9	9.5	203.2	152.4	3.8	4.7	3.53
Образец в ИЭС им. Патона	219	6	133	103	2.4	4.71	3.65
Образец в данной работе	140	5	100	80	2	4.8	3.8

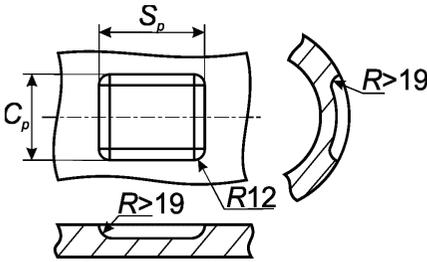


Рисунок 2 – Эскиз дефекта

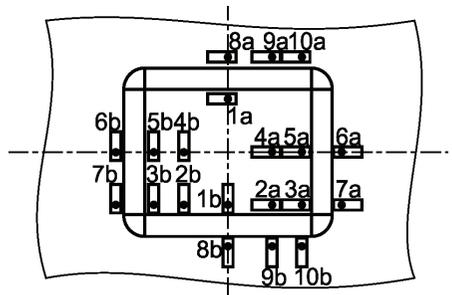


Рисунок 3 – Схема наклейки тензодатчиков

Коэффициент преобразования датчика K (или коэффициент тензочувствительности) – это отношение выходного сигнала с датчика в виде относительного изменения его сопротивления к входному в виде деформации: $K = (\Delta R/R)/\epsilon$. Зная коэффициент чувствительности и относительное изменение сопротивления датчика, можно вычислить его деформацию.

Измерительные датчики устанавливались согласно схеме на рис. 3. Поскольку представленный дефект симметричен, то и напряженно-деформированное состояние в его области так же симметрично. НДС пар точек 1a-1b, 2a-2b, 3a-3b, 4a-4b, ..., 10a-10b абсолютно идентично. В каждой паре точек есть два тензодатчика, один из которых установлен вдоль оси баллона, а другой по окружному направлению. Снимая показания с датчиков каждой пары можно определить осевую и окружную деформации для каждой пары точек. Все тензодатчики включены в электроизмерительную цепь согласно документации на прибор СИИТ-3, к которому они подключаются (см. рис.1 поз.3).

2 Проведение эксперимента и анализ результатов. После сборки экспериментальной установки была проведена серия экспериментов, состоящая из 7-ми измерений, в которых баллон подвергался давлению в 1.5 МПа. Ре-

зультаты измерений после соответствующей статистической обработки [6] представлены в табл. 2.

Для определения границ доверительного интервала измерений деформации использовался закон Стьюдента, который наиболее адекватно описывает распределение выборочных характеристик в случае небольшого числа замеров [6]. Заметим, что разброс измерений для точек 3а, 6а и 7а получился весьма большим, поэтому в дальнейшем анализе исключим их из рассмотрения. Из остальных результатов наблюдаем, что деформации внутри контура дефекта выше, чем деформации вне его контура.

Таблица 2 – Результаты измерений деформаций

Точка измерений	Направление деформации	Показания прибора $(\Delta R/R) \times 10^6$	K	Величина деформации $\varepsilon = (\Delta R/R)/K$	Доверительный интервал с вероятностью 95%
1а	осевое	74.85996	2.1	3.56E-05	$\pm 2.04E-06$
2а	осевое	89.71903	2.1	4.27E-05	$\pm 4.60E-06$
3а	осевое	80.57648	2.1	3.84E-05	$\pm 2.31E-05$
4а	осевое	93.14795	2.1	4.44E-05	$\pm 4.33E-06$
5а	осевое	112.5814	2.1	5.36E-05	$\pm 3.74E-06$
6а	осевое	6.857184	2.1	3.27E-06	$\pm 1.75E-06$
7а	осевое	18.85759	2.1	8.98E-06	$\pm 3.78E-06$
8а	осевое	56.00193	2.1	2.67E-05	$\pm 3.67E-06$
9а	осевое	49.71662	2.1	2.37E-05	$\pm 3.80E-06$
10а	осевое	50.85881	2.1	2.42E-05	$\pm 3.78E-06$
1b	окружное	372.6418	2.1	1.77E-04	$\pm 4.30E-06$
2b	окружное	332.6129	2.1	1.58E-04	$\pm 3.90E-06$
3b	окружное	322.3377	2.1	1.53E-04	$\pm 3.49E-06$
4b	окружное	345.7746	2.1	1.65E-04	$\pm 3.95E-06$
5b	окружное	338.9152	2.1	1.61E-04	$\pm 3.30E-06$
6b	окружное	212.0225	2.1	1.01E-04	$\pm 3.52E-06$
7b	окружное	240.6007	2.1	1.15E-04	$\pm 2.89E-06$
8b	окружное	*	2.1	*	*
9b	окружное	117.1504	2.1	5.58E-05	$\pm 2.94E-06$
10b	окружное	124.5794	2.1	5.93E-05	$\pm 3.58E-06$

* Датчик вышел из строя

Таблица 3 – Теоретические коэффициенты концентрации напряжений

Точка	Направление напряжения	Величина напряжения, МПа		Коэффициент концентрации
		номинальное	при наличии дефекта	
1а-1b	осевое	6.67	30	4.49
	окружное	22.2	51.7	2.32
5а-5b	осевое	6.67	33	4.94
	окружное	22.2	49.5	2.22
6а-6b	осевое	6.67	12.5	1.88
	окружное	22.2	27.6	1.24

Для точек, которые лежат на осях симметрии дефекта, главная система координат напряженно-деформированного состояния совпадает с цилиндрической системой координат баллона. Вычислив главные напряжения для этих точек, через осевую и окружную деформации, можно получить теоретические коэффициенты концентрации относительно номинальных напряжений для баллона без дефекта (вычисленные по безмоментной теории). Результаты расчетов для некоторых точек собраны в табл. 3.

Выводы. В статье выполнено описание эксперимента по изучению деформаций в области дефекта на поверхности стальной цилиндрической оболочки. Посчитаны коэффициенты концентрации напряжений в некоторых опасных точках зоны дефекта. Полученные результаты могут быть полезными при проектировании ремонтных систем для восстановления несущей способности трубопроводов, ослабленных внешними дефектами.

Список литературы: 1. Assessing the case for EU legislation on the safety of pipelines and the possible impacts of such initiative : final report [electronic resource] // European Commission : site of European Commission. – URL: http://ec.europa.eu/environment/seveso/pdf/study_report.pdf. 2. Md Shamsuddoha, Md Maiunul Islam, at al. Effectiveness of using fibre-reinforced polymer composites for underwater steel pipeline repairs // Comp. struc. : Elsevier, 2013. – Rel. 100. – P. 40-54. 3. János Lukács, Gyula Nagy at al. Experimental and numerical investigations of external reinforced damaged pipelines // Procedia engineering : Elsevier, 2010. – Rel. 2. – P. 1191-1200. 4. H.S. da Costa-Mattos, J.M.L. Reis, R.F. Sampaio, V.A. Perrut An alternative methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins // Mat. & Des. : Elsevier, 2009. – Rel. 30. – P. 3581-3591. 5. Composite repairs study : program overview [electronic resource] // site devoted to experimental program of PRCI Inc. – URL: <http://compositerepairstudy.com>. 6. М.Н. Степнов Статистические методы обработки результатов механических испытаний : Справочник. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.

Bibliography (transliterated): 1. Assessing the case for EU legislation on the safety of pipelines and the possible impacts of such initiative : final report. European Commission : site of European Commission. – URL: http://ec.europa.eu/environment/seveso/pdf/study_report.pdf. 2. Md Shamsuddoha, Md Maiunul Islam, at al. Effectiveness of using fibre-reinforced polymer composites for underwater steel pipeline repairs. Comp. struc. : Elsevier, 2013. Rel. 100. 40-54 Print. 3. János Lukács, Gyula Nagy at al. Experimental and numerical investigations of external reinforced damaged pipelines. Procedia engineering : Elsevier, 2010. Rel. 2. 1191-1200 Print. 4. H.S. da Costa-Mattos, J.M.L. Reis, R.F. Sampaio, V.A. Perrut An alternative methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins. Mat. & Des. : Elsevier, 2009. Rel. 30. 3581-3591 Print. 5. Composite repairs study : program overview [electronic resource] // site devoted to experimental program of PRCI Inc. – URL: <http://compositerepairstudy.com>. 6. M.N. Stepnov Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy : Spravochnik. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 232 Print.

Поступила (received) 03.10.2014