



ПРОДЛЕНИЕ РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДА С ДЕФЕКТАМИ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

П. С. ЮХИМЕЦ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
С. В. КОБЕЛЬСКИЙ, **В. И. КРАВЧЕНКО**, кандидаты техн. наук, **И. А. КЛИМЕНКО**, инж.
(Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины),
В. П. ЛЕСОВЕЦ, инж. (НАК «Нафтогаз Украины»)

Выполнен анализ напряженного состояния трубопровода с объемным дефектом на внутренней поверхности трубы для различных вариантов ремонтных работ, направленных на продление остаточного ресурса трубопровода. Показано, что установка двух бандажей, располагаемых симметрично относительно дефекта на расстоянии удвоенной длины дефекта, позволяет существенно снизить коэффициент концентрации напряжений и продлить остаточный ресурс трубопровода. При этом сохраняется возможность осуществления послеремонтного мониторинга дефектного участка.

Ключевые слова: трубопровод, коррозионные повреждения, ремонт, продление ресурса, бандаж

Распространенными повреждениями трубопроводов с большим сроком эксплуатации являются язвенные (объемные поверхностные) дефекты, являющиеся следствием коррозионных либо эрозионно-коррозионных процессов (рис. 1). На основании определения геометрических параметров дефекта непосредственным измерением (наружная) или средствами неразрушающего контроля (внутренняя поверхность) выполняется оценка его влияния на статическую и циклическую прочность [1, 2].

В результате проведенных расчетов может быть выявлено, что остаточный ресурс трубопровода является недостаточным. В такой ситуации принимается решение о проведении ремонта — сварке так называемой катушки — отрезка трубы взамен изымаемого дефектного, либо о снижении рабочего давления до соответствующего значения (по условиям обеспечения остаточного ресурса).

Указанные выше способы продления эксплуатации трубопровода могут оказаться неприемлемыми из-за требований непрерывности технологического цикла или стабильности режима перекачки продукта. В последнее время выполнен ряд

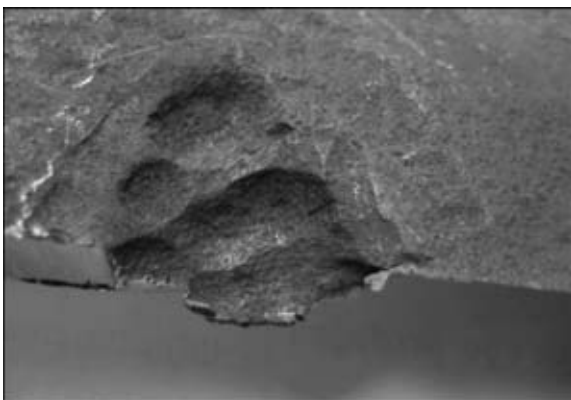


Рис. 1. Наружная поверхность трубы с язвенным повреждением (образец вырезан из трубы Ду 273Х8)

фундаментальных разработок относительно альтернативного способа ремонта — заварки отдельных коррозионных дефектов на наружной поверхности стенки трубы без остановки трубопровода [3, 4].

В настоящей статье выполнен анализ напряженного состояния трубопровода с объемным дефектом на внутренней поверхности с целью раз-

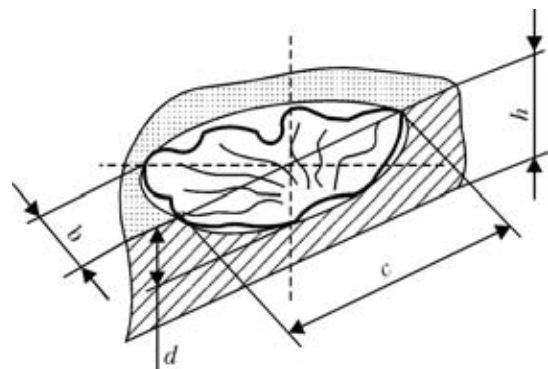


Рис. 2. Схема поверхностного дефекта, моделируемого половинной эллипсоидом (c — длина; b — ширина; d — глубина дефекта; h — толщина стенки трубы)

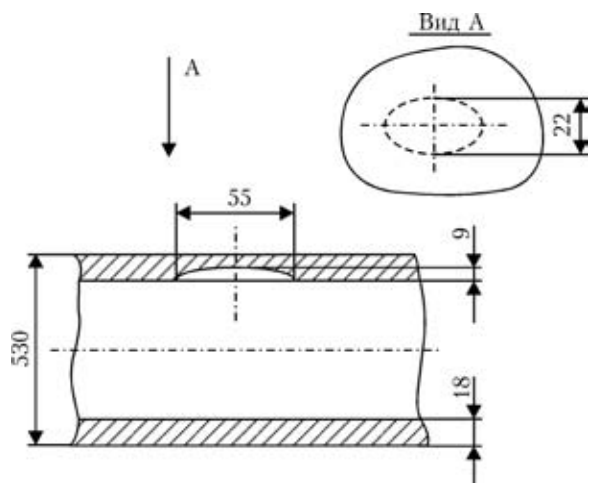


Рис. 3. Схема трубы с дефектом на внутренней поверхности

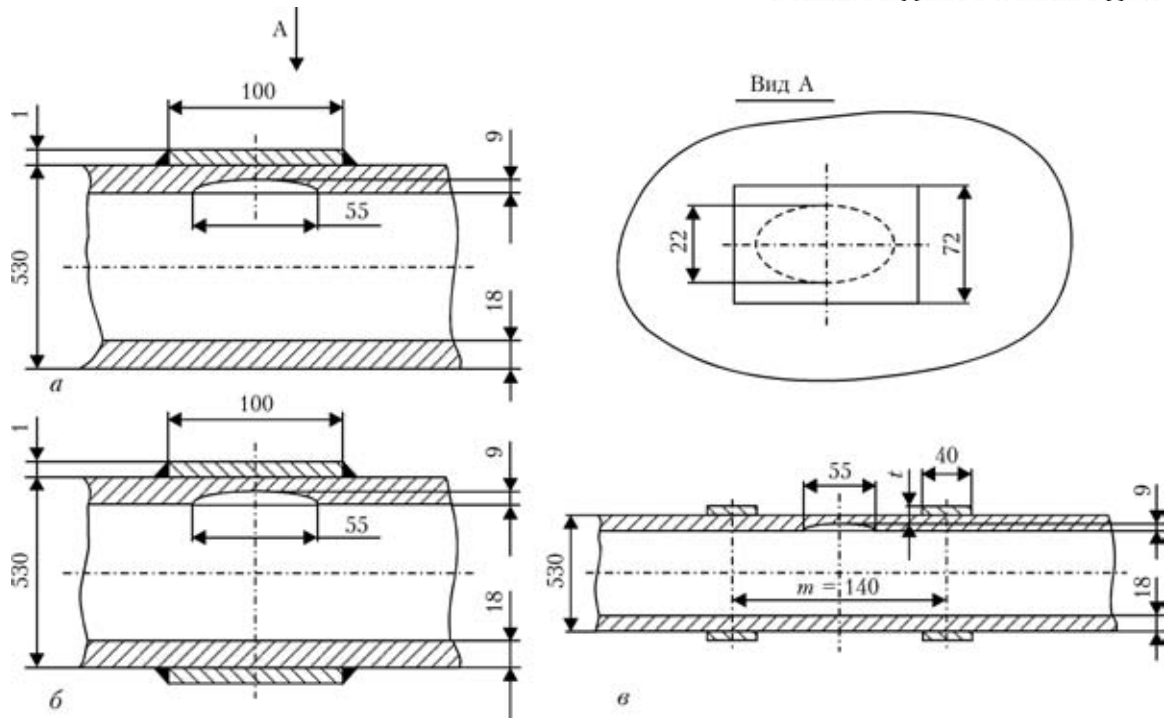


Рис. 4. Схемы вариантов трубопровода с язвенными дефектами: *a* – труба с приваренной накладкой; *б* – с бандажом; *в* – со сдвоенным бандажом

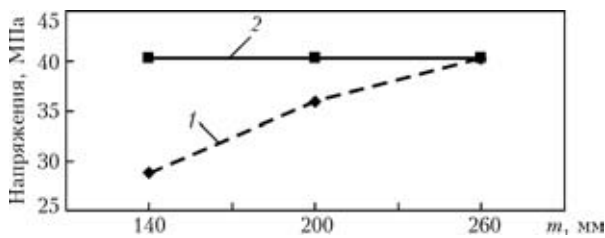


Рис. 5. Влияние расстояния между бандажами на максимальные напряжения в зоне дефекта ($t = 18$ мм, $\Delta P = 1$ МПа); 1, 2 – соответственно труба с бандажами и без

работки мероприятий для проведения ремонтных работ, направленных на продление остаточного ресурса трубопровода, без его остановки.

В качестве определяющего фактора, влияющего на циклическую прочность, выбран размах циклических деформаций (коэффициент концентрации напряжений (ККН)), рассчитываемый в зоне дефекта методом конечных элементов (МКЭ).

Расчеты проводили с помощью программного обеспечения SPACE, предназначенного для моделирования МКЭ трехмерного теплового и напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, разработанного и успешно эксплуатируемого в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. В основе программного обеспечения конечно-элементного анализа находится смешанная схема МКЭ, обеспечивающая устойчивость численного решения и высокую точность получения результатов как для перемещений, так и для напряжений и деформаций [5, 6]. Данное обстоятельство имеет большое значение при решении задач ресурсного проектирования, поскольку именно деформации и напряжения должны определяться с максимальной точностью.

В состав программного обеспечения входит открытая для дальнейшего пополнения библиотека параметризованных моделей типичных элементов трубопроводов, включающая различные типы тройниковых соединений (равно- и неравнопроходные, цилиндрические, конические), переходы, отводы, фланцевые соединения, фрагменты трубы с коррозионным дефектом на внутренней или внешней поверхности [7].

В качестве геометрической модели рассматриваемых поверхностных дефектов трубопроводов использовали половину эллипсоида, осями симметрии которой являются наибольшие размеры дефекта в осевом, окружном и радиальном направлениях (рис. 2). Тестирование эффективности различных вариантов ремонта трубопроводов проводили на основании расчетов напряженного состояния трубы Ду 530×18 с полуэллиптическим дефектом на внутренней поверхности (рис. 3). Рассмотрены следующие варианты ремонта (рис. 4):

- приварка к наружной поверхности трубы накладки, располагающейся над дефектом (рис. 4, *a*);
- установка/приварка металлического бандажа, перекрывающего дефект (рис. 4, *б*);
- установка/приварка двух бандажей, располагающихся симметрично относительно дефекта (рис. 4, *в*).

Как следует из приведенных данных (таблица), наиболее эффективным способом снижения концентрации напряжений (повышения остаточного ресурса) при одной и той же толщине укрепляющего элемента является перекрытие зоны дефекта с помощью кольцевого бандажа (вариант 2). При установке бандажа с толщиной, равной 1,5 толщины стенки трубы, уровень концентрации напряжений в зоне дефекта снижается в 2 раза. Наименее эффективным является укрепление дефекта



Способы повышения остаточного ресурса трубопровода

№ п/п	Вариант ремонта	Толщина укрепляющего элемента t , мм	Коэффициент концентрации напряжений в зоне дефекта α_a	Допускаемое количество циклов $[N]^*$ при $\Delta P = 20$ МПа
1	Накладка	9	3,11	14610
		18	2,90	20880
		27	2,65	34310
2	Бандаж	9	2,29	87210
		18	1,85	666000
		27	1,63	$> 1 \cdot 10^6$
3	Сдвоенный бандаж ($m = 140$ мм)	9	2,59	39230
		18	2,34	74940
		27	2,10	171900
4	Без укрепляющего элемента	—	3,26	11610

* Расчет выполнен для трубы из низкоуглеродистой стали.

с помощью приварки накладки. Установка двух бандажей, располагаемых симметрично относительно дефекта (вариант 3) на расстоянии между внутренними кромками примерно $2s$ (две длины дефекта) также позволяет достигнуть значительного снижения ККН. В этом случае его уменьшение до того же уровня, что и в случае одного бандажа (вариант 2) достигается при удвоенной толщине бандажей. При этом заметное влияние на концентрацию напряжений оказывает расстояние между бандажами m (рис. 5). Так, при $m = 300$ мм положительное влияние конструктивного решения полностью утрачивается.

Установка сдвоенных бандажей, имеющих толщину, равную толщине стенки труб, в условиях циклического воздействия пульсирующего внутреннего давления $\Delta P = 20$ МПа повышает допускаемое количество циклов примерно в 6 раз.

The stressed state of pipeline with a volume defect on the inner surface of a pipe was analysed in terms of different variants of repair operations aimed at extension of remaining life of the pipeline. It is shown that the use of two bands located symmetrically relative to a defect at a distance of the double defect length allows a substantial decrease in stress intensity factor and increase in the remaining life of the pipeline, the possibility of post-repair monitoring of the defective region being retained.

Таким образом, сопоставление рассмотренных вариантов ремонта свидетельствует о том, что одной из мер продления ресурса трубопровода с язвенными дефектами на внутренней поверхности может являться укрепление дефекта с помощью двух бандажей, располагаемых симметрично относительно дефекта на расстоянии удвоенной длины дефекта. Несмотря на то что данный метод несколько уступает в эффективности снижения ККН в зоне дефекта методу приварки бандажа, перекрывающего дефект, и является наиболее материалоёмким, он позволяет отслеживать динамику изменения геометрических параметров дефекта в послерементный период.

1. Прочность трубопроводов с эрозионно-коррозионными повреждениями // Э. Ф. Гарф, М. А. Нетребский и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 1. — С. 44–49.
2. Юхимец П. С., Гарф Э. Ф., Нехотящий В. А. Экспериментальное обоснование метода расчета остаточного ресурса трубопроводов с коррозионными повреждениями // Автомат. сварка. — 2005. — № 11. — С. 17–21.
3. API Standard 1104. Welding of pipelines and related facilities. Appendix 13. Service welding. — American Petroleum Institute, 1999, Sept.
4. Математическое моделирование язвенных дефектов в действующих нефте- и газопроводах и разработка численного метода оценки допустимых режимов дуговой заварки дефектов // В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 3–10.
5. Бойко В. Б., Ворошко П. П., Кобельский С. В. Моделирование трехмерного теплового и напряженно-деформированного состояния упругих тел с помощью смешанных вариационных формулировок МКЭ. Сообщение 1 // Пробл. прочности. — 1991. — № 2. — С. 72–77.
6. Чирков А. Ю. Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. — Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2003. — 250 с.
7. Кобельский С. В., Кравченко В. И., Лисовець В. П. Спеціалізоване програмне забезпечення для розрахунку міцності деталей трубопроводів у нафтогазовій промисловості // Нафт. і газова промисловість. — 2004. — № 1. — С. 52–54.

Поступила в редакцию 18.10.2005