

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗРУШАЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ ТРУБЫ С ВНУТРЕННИМ ПОВЕРХНОСТНЫМ ДЕФЕКТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. ПИВТОРАК, П. Д. КРОТЕНКО, В. А. НЕХОТЯЩИЙ, К. В. ШИЯН  
 ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Определены с помощью бесконтактных методов лазерной интерферометрии (электронной ширографии и спекл-интерферометрии) характерные параметры внутреннего коррозионного дефекта в трубе (протяженность в осевом направлении, толщина стенки), которые позволили получить величину прогнозируемого разрушающего давления. Погрешность прогнозирования разрушающего давления составила  $\delta = 7,6\%$ . Испытания на разрушение показали, что труба с внутренним поверхностным дефектом круговой формы ( $d \approx 27$  мм) выдерживает нагрузку, которая составила 89 % разрушающего давления для трубы без дефекта. Библиогр. 12, рис. 8.

*Ключевые слова:* электронная ширография, спекл-интерферометрия, коррозионный дефект трубы, разрушающее давление, характерные параметры коррозионного дефекта, деформированное состояние

При эксплуатации сосудов давления, а также трубопроводных систем тепловых и атомных электростанций, наиболее часто встречающимися повреждениями являются несквозные поверхностные дефекты, появление которых в большинстве случаев обусловлено коррозионными повреждениями. На участках контролируемой поверхности коррозионные дефекты имеют меньшую толщину металла по сравнению с бездефектным участком. Влияние утонений, образованных на поверхности цилиндрической оболочки, на ее прочность рассмотрено в работах [1, 2], в которых изучались условия зарождения разрушения, а также была получена эмпирическая формула для прогнозирования величины разрушающего давления цилиндрического сосуда при наличии поверхностного дефекта. Вопросам прочности и ресурса трубопроводов с эрозивно-коррозионным износом, трещиноподобными дефектами посвящены работы [3–6].

Выявление внутренних поверхностных дефектов в трубах, сосудах давления при их нагружении давлением является сложной и трудоемкой задачей. Перспективными методами диагностики таких конструкций являются бесконтактные методы лазерной интерферометрии [7, 8]. Наиболее интенсивное развитие для диагностики элементов тонкостенных конструкций, изготовленных из металлических и неметаллических материалов, получил метод электронной ширографии [9–11].

Целью приведенных в работе исследований является выявление коррозионного повреждения с последующим определением разрушающего давления для трубы с внутренним поверхностным дефектом с использованием

данных методов электронной ширографии и спекл-интерферометрии.

При неразрушающем контроле качества элементов конструкций используется компактная ширографическая установка, в комплект которой входит одномодовый лазер для освещения поверхности исследуемого объекта, ширографический интерферометр, формирующий два сдвинутых относительно друг друга изображения, CCD-камера для передачи и записи изображений в компьютер с целью дальнейшей обработки интерференционных полос.

При диагностике качества трубчатых элементов конструкций первоочередной задачей является выявление дефектов, в частности, внутренних поверхностных коррозионных повреждений. Для проведения экспериментальных исследований использовали стальную трубу с заложенным в центральном сечении внутренним поверхностным коррозионным повреждением, близким к круговой форме (рис. 1). Дефект был получен методом электрохимического травления металла. Наружный диаметр трубы 219 мм; длина 890 мм; толщина стенки 4,8 мм; материал сталь 2пс. Размер дефекта в осевом направлении составил 28,5 мм, а в кольцевом 26 мм. Толщина стенки на участке расположения дефекта составляла  $h_1 = 1,7$  мм. Отношение толщин равно  $k = 1,7/4,8 = 0,35$ . К торцам элемента стальной трубы с обеих сторон приваривались днища толщиной 25 мм, к которым подсоединялись шланги для подачи и сброса сжатого воздуха.

Контроль качества трубчатого элемента выполнялся путем освещения лазерным светом с наружной стороны исследуемого участка поверхности



Рис. 1. Внутритрубное коррозионное повреждение, полученное путем электрохимического травления металла

трубы длиной 200 мм, шириной 100 мм. Отраженная световая волна попадала на оптический элемент, который обеспечивал сдвиг изображений поверхности. С помощью CCD-камеры и аналогово-цифрового преобразователя спекл-картина записывалась в память компьютера. Затем трубу нагружали внутренним давлением на величину  $\Delta p = 0,39$  МПа. Спекл-картины для двух состояний объекта, до и после нагружения, обрабатывались с использованием метода фазовых шагов для получения информации о распределении производной  $\frac{\partial w}{\partial x}$  от нормальной составляющей  $w$  вектора перемещения.

Для определения продольного размера (вдоль оси  $OX$  (рис. 2)) внутритрубного коррозионно-

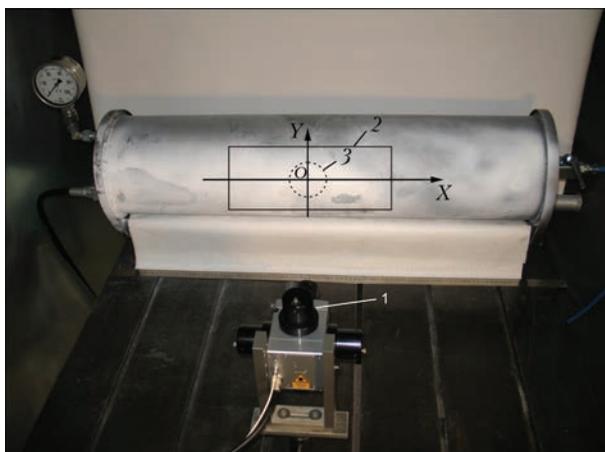


Рис. 2. Общий вид образца трубы с внутритрубным дефектом: 1 – спекл-интерферометрический прибор Q-300; 2 – прямоугольный участок измерения, который охватывает коррозионное повреждение; 3 – граница области внутритрубного коррозионного повреждения

го дефекта рассматривалось поведение производной  $\frac{\partial w}{\partial x}$  от прогиба поверхности трубы при ее упругом деформировании. Начало системы координат  $YOX$  находится на наружной поверхности трубы и совпадает с центром области коррозионного повреждения. Расстояние между экстремумами в точках  $A$  и  $B$  (рис. 3) дает величину  $d_1 = x_B - x_A = 26,6$  мм ( $x_B, x_A$  – координаты точек  $B$  и  $A$ ), что достаточно близко к фактическому осевому размеру дефекта  $d_{\text{факт.}} = 28,5$  мм.

Наряду с определением размера  $d_1$  поверхностного дефекта в осевом направлении важным параметром является толщина стенки трубы в месте его нахождения. При разработке методики определения толщины пораженного коррозией участка трубы использовался спекл-интерферометрический прибор Q-300, который позволяет измерять перемещения в плоскости контролируемого участка нагруженной поверхности трубы [7] (см. рис. 2). Область измерения перемещений ограничивалась прямоугольником 2. При отображении исследуемой поверхности на мониторе компьютера посредством CCD-камеры и аналогово-цифрового преобразователя начало декартовой системы координат  $XOY$  находилось в центре кадра. Прибор Q-300 (1) располагался таким образом, чтобы центр кадра совпадал с пересечением осей симметрии заложенного дефекта, который находился посередине образца на одинаковом расстоянии от его торцов. Труба с внутренним поверхностным дефектом крепилась на виброзащищенной металлической плите, что обеспечивало отсутствие ее перемещений как жесткого целого. Для улучшения диффузного отражения лазерного света от

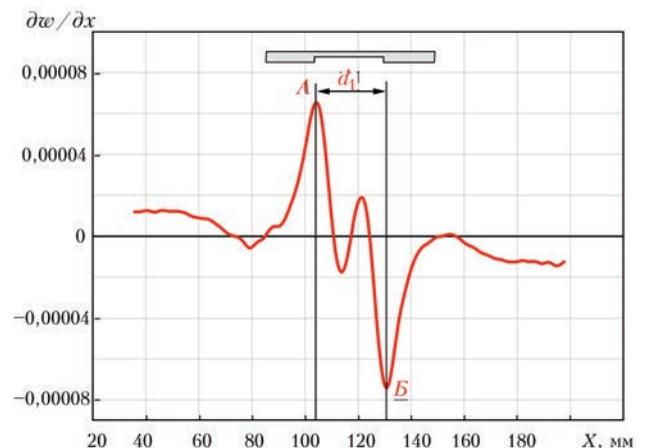


Рис. 3. Изменение производной  $\frac{\partial w}{\partial x}$  вдоль оси  $OX$  в области дефекта при приращении внутреннего давления на величину  $\Delta p = 0,39$  МПа ( $d_1$  – размер дефекта)

поверхности контролируемого участка трубы она окрашивалась в белый цвет средством для контроля трещин MR 70. Нагружение трубы внутренним давлением величиной  $\Delta p = 0,59$  МПа проводилось сжатым воздухом. Плоскостные перемещения  $v$  точек поверхности в направлении оси  $OY$  (см. рис. 2) измерялись на участке расположения коррозионного повреждения. Предварительно, до увеличения внутреннего давления, в память компьютера записывалась спекл-структура (образованная лазерным светом) начального состояния исследуемого участка поверхности трубы. После нагружения спекл-структура деформированного состояния контролируемого участка также записывалась в память компьютера. Компьютерная обработка двух спекл-структур (начального и деформированного состояний исследуемого участка поверхности) позволила получить картины интерференционных полос и определить плоскостные перемещения  $v$  в направлении оси  $OY$ .

Из представления поля окружных перемещений на наружной поверхности трубы на участке с внутренним поверхностным дефектом в виде изолиний следует, что в сечении вдоль оси  $OY$  с изменением координаты  $y$  и фиксированном значении  $x$  перемещения  $v$  увеличиваются в большей степени, по сравнению с сечениями, удаленными от границы области коррозионного повреждения (рис. 4). Такой характер деформирования объясняется уменьшением первоначальной толщины стенки трубы в результате локальной коррозии металла.

При разработке расчетно-экспериментальной модели деформирования участка трубы с заложением коррозионным повреждением исходили из следующих предположений. Заложенный дефект по своей форме близок к несквозному круговому отверстию, а утоненный участок в области дефекта рассматривается как круглая пластинка,

которая нагружена равномерно распределенным давлением. При задании граничных условий принимается допущение о свободном опирании пластинки по контуру.

Рассмотрим построение алгоритма определения толщины стенки  $h_1$  трубы в области коррозионного повреждения при ее упругом деформировании посредством приложенного внутреннего давления. Для моделирования деформационного процесса в рассматриваемой области использовалась теория изгиба пластин. При изгибе пластины (утоненного участка) перемещение  $v$  в плоскости вдоль оси  $OY$  в точках, которые находятся на расстоянии  $z$  от срединной плоскости, определяются соотношением [12]:

$$v = -z \frac{\partial w}{\partial y}, \quad -\frac{h_1}{2} \leq z \leq \frac{h_1}{2}. \quad (1)$$

Продифференцировав (1) по переменной  $y$  и используя соотношение  $\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$  при  $z = \frac{h_1}{2}$  получим:

$$h_1 = -\frac{2\varepsilon_y}{\partial^2 w / \partial y^2}. \quad (2)$$

Прогиб срединной поверхности свободно опертой круглой пластины определяется уравнением [12]:

$$w = -\frac{p}{64D} \left( \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 - r^2 \right) \left( \frac{5+v}{1+v} \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 - r^2 \right), \quad (3)$$

где  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  – расстояние от центра пластины до точки с координатой  $(x, y)$ ;  $d_1$  – диаметр пластины (соответствует диаметру поверхностного дефекта круговой формы);  $D = \frac{Eh_1^3}{12(1-\nu^2)}$  – жесткость пластины при изгибе;  $E$  – модуль упру-

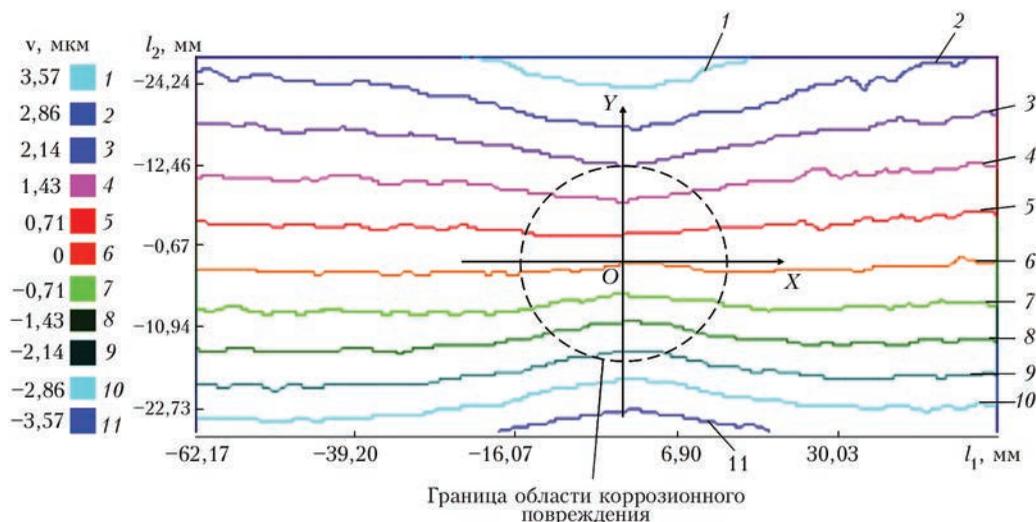


Рис. 4. Линии равных окружных перемещений  $v$  в области коррозионного повреждения трубы, мкм: 1 = 3,57; 2 = 2,86; 3 = 2,14; 4 = 1,43; 5 = 0,71; 6 = 0,00; 7 = -0,71; 8 = -1,43; 9 = -2,14; 10 = -2,86; 11 = -3,57 ( $l_1, l_2$  – размеры области измерения вдоль оси  $X$  и  $Y$  соответственно)

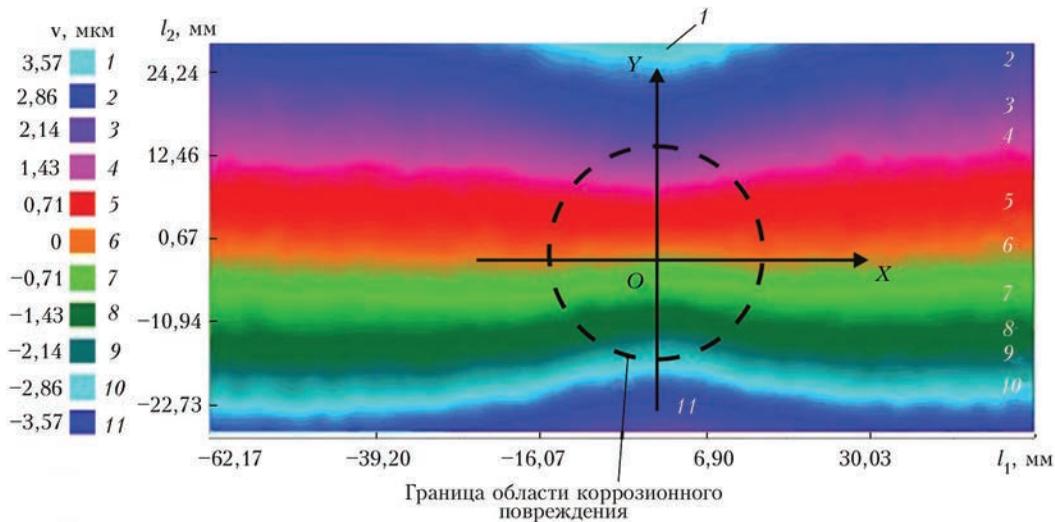


Рис. 5. Поле окружных перемещений  $v$  в направлении оси  $OY$  на внешней поверхности трубы, мкм: 1 = 3,57; 2 = 2,86; 3 = 2,14; 4 = 1,43; 5 = 0,71; 6 = 0,00; 7 = -0,71; 8 = -1,43; 9 = -2,14; 10 = -2,86; 11 = -3,57 ( $l_1, l_2$  – те же, что и на рис. 4)

гости материала;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $p$  – давление воздуха, равномерно распределенного по поверхности пластины.

Исходя из соотношений (2) и (3) для  $h_1$  и  $w$ , а также деформации  $\epsilon_y$ , которая получена на основании экспериментально измеренных перемещений  $v$  в окружном направлении методом электронной спекл-интерферометрии, разработана методика определения толщины стенки трубы в области коррозионного повреждения. Для получения в формуле (2) максимальных величин деформации  $\epsilon_y$  и второй производной  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  их значения определяются в точке  $x = y = 0$ , что позволяет избежать зависимости величины  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  от координат  $(x, y)$ .

При экспериментальном определении окружных перемещений на участке боковой поверхности оболочки их отсчет ведется от неподвижной горизонтальной линии симметрии области измерения 2 (см. рис. 2). Образец располагался таким образом, чтобы начало системы координат, а также место расположения нулевых точек при измерении перемещений  $v$  с помощью прибора Q-300 совпадало с центром  $O$  области коррозионного повреждения. При таком выборе указанных точек их расположение было максимально близко к линии симметрии области измерения. На основании экспериментальных значений перемещений  $v$  в зависимости от координаты  $y$  вдоль оси  $OY$  (рис. 5), получено их линейное приближение (рис. 6), которое описывается уравнением:

$$v = (0,148y + A) \cdot 10^{-3}, \text{ где } A = 0,118 \text{ мм.} \quad (4)$$

Продифференцировав выражение (4) по  $y$ , определим величину деформации  $\epsilon_y = 0,148 \cdot 10^{-3}$ .

При применении соотношения (2) для вычисления толщины пластинки  $h_1$  необходимо также

определить вторую производную от прогиба при  $x = y = 0$ . Исходя из выражения (3), находим:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \Big|_{x=y=0} = -\frac{p}{16D} \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 \left( \frac{3+\nu}{1+\nu} \right). \quad (5)$$

На основании анализа соотношений (2) и (5) получаем выражение для определения толщины  $h_1$ :

$$h_1 = \frac{2\epsilon_y}{\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \Big|_{x=y=0}} = \sqrt{\frac{3pd_1^2(3+\nu)(1-\nu)}{32E\epsilon_y}}. \quad (6)$$

С учетом рассматриваемой модели величина  $h_1$  соответствует толщине стенки в области заложеного коррозионного повреждения.

Для применения формулы (6) необходима информация о диаметре пластины (соответствует диаметру поверхностного дефекта круговой формы), который определялся на основании данных метода электронной широгографии и составил  $d_1 = 26,6$  мм. Подставив в выражение (6) диаметр дефекта  $d_1$ , а также величины:  $p = 0,59$  МПа;  $\nu = 0,3$ ;  $E = 200000$  МПа;  $\epsilon_y = 0,148 \cdot 10^{-3}$ , получим

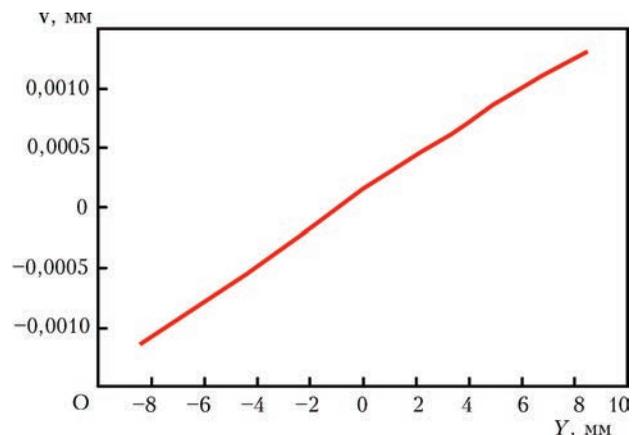


Рис. 6. Зависимость окружных перемещений  $v$  от координаты  $Y$  вдоль оси  $OY$

$h_1 = 1,762$  мм. Фактические параметры рассматриваемого дефекта: протяженность 28,5 мм, толщина стенки 1,7 мм.

Разработанная методика с использованием лазерной интерферометрии позволяет определять диаметр заложённого внутритрубного коррозионного дефекта, близкого к круговой форме, а также толщину стенки трубы в месте коррозионного повреждения (характерные размеры дефекта).

Применение созданной технологии определения характерных размеров внутренних поверхностных дефектов круговой формы ( $d_1$  – диаметра,  $h_1$  – толщины стенки) позволяет прогнозировать величину разрушающего давления в трубах. Для этого использовалась методика, в основе которой лежит гипотеза, что деформированное состояние трубы с внутренним поверхностным дефектом близко к влиянию одиночного сквозного кругового отверстия [1]. Приведение дефекта к сквозному отверстию осуществляется путем приравнивания вдоль оси трубы площади сечения отверстия и той, которая соответствует потерянной металлу в сечении на участке коррозионного повреждения. Расчетная величина разрушающего давления подсчитывается с использованием формулы [1]:

$$P_p^{(расч.)} = \varphi \frac{\sigma_B h}{R_m}, \quad (7)$$

где  $\varphi = \frac{2}{\left( \frac{d_y}{\sqrt{2R_m h}} + 1,75 \right)}$ ;  $\sigma_B$  – предел прочности

материала;  $h$  – толщина стенки трубы;  $R_m$  – радиус срединной поверхности цилиндрической оболочки;  $d_y$  – диаметр приведенного сквозного отверстия.

Параметры внутритрубного коррозионного дефекта ( $d_1$ ,  $h_1$ ) определяются по данным электронной ширографии и спекл-интерферометрии. Исходя из полученных результатов вычисляется диаметр приведенного отверстия  $d_y = 16,78$  мм. Для расчета по формуле (7) использовали сле-

дующие данные:  $R_m = 107,15$  мм;  $h = 4,8$  мм;  $\sigma_B = 410$  МПа. После вычислений получим:  $P_p^{(расч.)} = 15,85$  МПа.

Для оценки влияния коррозионного дефекта на прочность трубы экспериментальным путем было определено значение разрушающего давления. Первоначально испытывалась труба с заложённым внутритрубным коррозионным дефектом, а затем бездефектная. Для измерения внутреннего давления с дискретностью четыре измерения за секунду использовался цифровой датчик «Метран ДИ-100». На рис. 7 представлена кривая, которая показывает изменение давления в образце с коррозионным дефектом от момента его нагружения до разрушения. Анализ показывает, что на участке *АВ* труба деформируется упруго. Дальнейшее увеличение внутреннего давления ( $P > 14,12$  МПа) приводит к упрочнению материала. Металл в области дефекта постепенно теряет способность сопротивляться увеличивающейся величине внутреннего давления. На участке коррозионного повреждения в металле образуется и разрастается трещина, что приводит к разрушению образца (точка *С*, давление  $P_{p,1}^{(факт.)} = 17,16$  МПа). Образовавшаяся трещина в области коррозионного повреждения показана на рис. 8.

Разрушающее давление для стальной трубы с заложённым внутритрубным дефектом с использованием формулы (7) составило  $P_p^{(расч.)} = 15,85$  МПа. Фактическая прочность трубы определяется величиной  $P_{p,1}^{(факт.)} = 17,16$  МПа. Относительная погрешность прогнозирования величины разрушающего давления равна  $\delta = 7,6\%$ .

При испытании бездефектной трубы разрушающее давление составило  $P_{p,2}^{(факт.)} = 19,26$  МПа. Следовательно, труба с заложённым внутритрубным коррозионным повреждением выдерживает нагрузку, которая составляет 89 % разруша-

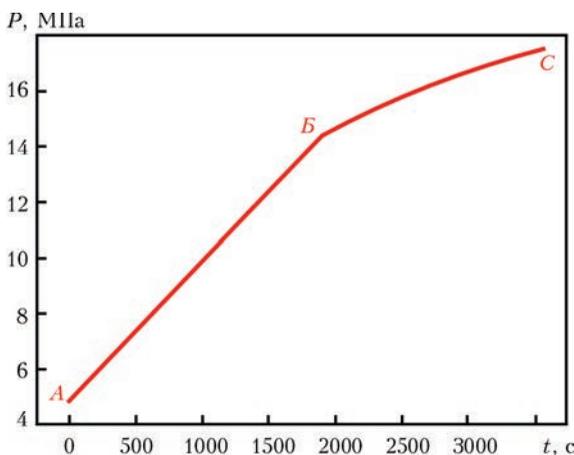


Рис. 7. Изменение во времени давления в трубе с коррозионным повреждением в процессе нагружения



Рис. 8. Разрушение трубы в месте коррозионного повреждения при ее нагружении внутренним давлением

ющего давления для трубы без коррозионного повреждения.

### Выводы

На основании данных метода электронной ширографии определена длина внутреннего поверхностного дефекта в трубе.

Разработана расчетно-экспериментальная методика определения толщины стенки внутреннего поверхностного дефекта в трубе с использованием измеренной методом электронной спекл-интерферометрии окружной величины перемещений.

В результате выполненных исследований установлено, что погрешность прогнозирования разрушающего давления составила  $\delta = 7,6\%$ .

Экспериментально обосновано, что труба с внутренним поверхностным дефектом выдерживает нагрузку, которая составляет 89 % разрушающего давления для трубы без дефекта.

1. Гарф Э. Ф. Оценка прочности и ресурса трубопроводов с эрозионно-коррозионными повреждениями / Э. Ф. Гарф, М. А. Нетребский // Автоматическая сварка. – 2000. – № 9–10. – С. 15–20.
2. Раймонд Э. Д. Экспериментальные исследования влияния местных утонений металлов на прочность цилиндрических оболочек / Э. Д. Раймонд, Н. В. Шигано // Проблемы прочности. – 1974. – № 4. – С. 117–120.
3. Великоиваненко Е. А. Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях / Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка,

Contactless methods of laser interferometry (electron shearography and speckle-interferometry) were used to determine the characteristic parameters of internal corrosion defect in the pipe (extent in the longitudinal direction, wall thickness), which allowed obtaining the magnitude of predicted breaking pressure. Error of breaking pressure prediction was equal to  $\sim 7.6\%$ . Break testing showed that a pipe with inner surface defect of a circular shape ( $d \sim 27$  mm) can stand a load that was equal to 89% of breaking pressure for a sound pipe. 12 References, 8 Figures.

*Keywords*: electron shearography, speckle-interferometry, corrosion defect, breaking pressure, characteristic parameters of corrosion defect, deformed state

А. С. Миленин // Автоматическая сварка. – 2013. – № 9. – С. 26–31.

4. Даффи А. О поведении дефектов в сосудах давления / А. Даффи, Р. Эйбер, У. Макси // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению: сб. статей под ред. акад. Ю. Н. Работнова. – М.: Мир, 1972. – С. 301–332.
5. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 2006. – 618 с.
6. Полянский Р. П. Трубы для нефтяной и газовой промышленности за рубежом / Р. П. Полянский, В. И. Пастернак. – М.: Недра, 1979. – 215 с.
7. Ettemeyer A. Combination of 3-D deformation and shape measurement by electronic speckle-pattern interferometry for quantitative strain-stress analysis / A. Ettemeyer // Optical Engineering. – 2000. – Vol. 39, № 1. – P. 212–215.
8. Rastogi P. K. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques / P. K. Rastogi. – New York, John Wiley & Sons, 2001. – 384 p.
9. Методика, технология и аппаратура ширографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 3. – С. 25–28.
10. Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной ширографии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. Н. Савицкая [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – С. 7–13.
11. Лобанов Л. М. Методика определения глубины залегания дефектов в плоских элементах конструкций на основе электронной ширографии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, П. Д. Кротенко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2009. – № 3. – С. 5–10.
12. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки: пер. с англ. / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1963. – 635 с.

Поступила в редакцию  
26.07.2016

**ООО «Фрониус Украина» – 25 лет !**  
см. статью в журнале «Автоматическая сварка», №9, 2016, стр. 67–68.

