



МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПЛОСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. ПИВТОРАК, П. Д. КРОТЕНКО

Разработана методика определения глубины залегания дефектов с использованием электронной ширографии, которая предоставляет новые возможности для выявления геометрических параметров зон коррозионных повреждений на внутренних поверхностях изделий и коррозионного подповерхностного расслоения.

A procedure was developed for determination of the depth of defect location using electron shearography, which opens up new possibilities for detection of geometrical parameters of corrosion damage zones on the product inner surfaces and subsurface corrosion delamination.

Развитие современных отраслей промышленности ставит все новые задачи, направленные на повышение работоспособности и надежности конструкций. Для их решения необходимы новые методы неразрушающего контроля (НК), позволяющие получать оперативную, более точную информацию об объекте контроля. К ним относятся методы лазерной интерферометрии — оптическая голография, электронная спекл-интерферометрия и ширография.

В последние годы электронная ширография является наиболее интенсивно развивающимся когерентным оптическим методом исследования конструкций, который осуществляется с помощью простых оптических устройств и позволяет бесконтактно исследовать поверхность объекта, не повреждая ее. Нечувствительность электронной ширографии к жестким смещениям объекта, которые вызваны влиянием внешних воздействий, определяет его универсальность и эффективность применения в производственных условиях.

Суть метода электронной ширографии состоит в следующем. Контролируемый объект частично или полностью освещается с помощью лазера когерентной световой волной, которая при отражении от его поверхности попадает на сдвиговый элемент, размещенный перед объективом CCD-камеры. В плоскости изображения CCD-камеры появляются два смещенных изображения контролируемого объекта. Интерференция световых волн образует хаотичную микроинтерференционную спекл-картину, которая с помощью CCD-камеры вводится в компьютер. Полученные микроинтерференционные спекл-картины, записанные для двух состояний объекта (до и после нагружения), сравниваются и обрабатываются с целью получения макроинтерференционных полос (широграммы), которые несут информацию о произ-

водной от нормальной компоненты вектора перемещения точек поверхности [4]. Концентрация деформаций в зоне дефектов под действием нагрузки проявляется в виде локальной особенности на картине интерференционных полос [1–3, 5].

При выполнении НК 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 [5].

Представленные ниже исследования посвящены разработке методики, которая позволит определять глубину залегания дефектов в виде утонений круговой и квадратной формы. Схема нагружения одного из таких дефектов представлена на рис. 1, а. Область утонения рассматривается как круглая или квадратная пластина, которая жестко закреплена по контуру и нагружена равномерно распределенным по поверхности давлением p (рис. 1, б).

Для исследования методом электронной ширографии деформированного состояния пластины, содержащей утонения, используется оптическая схема с близким к нормальному направлению освещения и наблюдения. Такая схема дает возможность в зависимости от направления широдвига получать частную производную $\frac{\partial w}{\partial x}$ от нормальных перемещений поверхности по переменной x , или же производную $\frac{\partial w}{\partial y}$ по переменной y . В случае широдвига δy вдоль оси OY , на основании измерения относительного изменения



фазы φ , определяется производная, умноженная на широдвиг

$$\frac{\partial w}{\partial y} \delta y = \frac{\lambda \varphi}{4\pi}, \quad (1)$$

где λ — длина волны света, которая генерируется лазером; δy — величина широдвига.

Рассмотрим утонение, имеющее круговую форму, для выявления которого использовали нагружение давлением с применением вакуумной камеры. Нормальные перемещения, возникающие при деформировании области утонения, вычисляли путем использования соотношений теории пластин. Выражение для перемещений имеет следующий вид [6]:

$$w = w_0 \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right)^2, \quad (2)$$

где $w_0 = \frac{pr_0^4}{64D}$ — максимальный прогиб пластины в центре; p — приложенное давление; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ — текущий радиус; r_0 — радиус области утонения; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$; E — модуль упругости; h — глубина залегания дефекта; ν — коэффициент Пуассона.

Чтобы получить соотношение для определения глубины залегания дефекта, найдем вторую производную $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$:

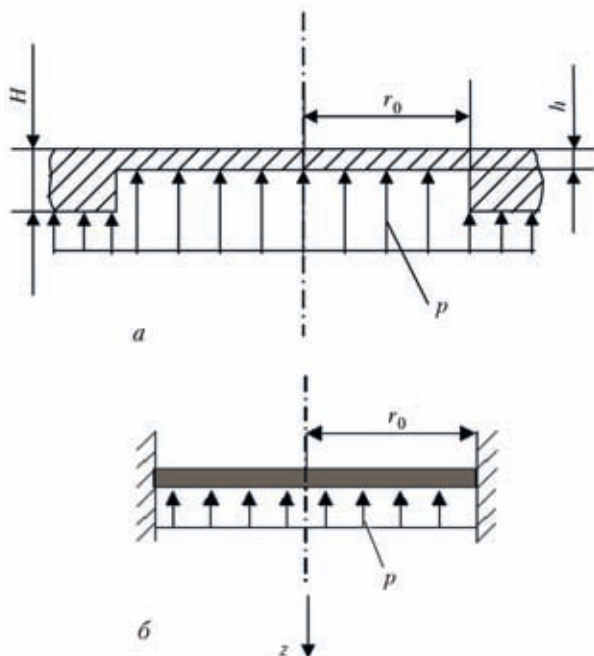


Рис. 1. Схема нагружения: а — области с заложенным дефектом; б — «эквивалентной» пластины, которая моделирует дефектную область

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{8w_0 y^2}{r_0^4} - \frac{4w_0 \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{r_0^2} \right)}{r_0^2}. \quad (3)$$

При $x = y = 0$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = -\frac{4w_0}{r_0^2} = -\frac{3(1-\nu^2)pr_0^2}{4Eh^3}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) можно определить глубину залегания дефекта h (рис. 1, а). Для этого достаточно знать величину второй производной $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ в точке $x = y = 0$, радиус утонения r_0 , величину приложенного давления p , механические характеристики материала.

Для разработки методики определения значения второй производной $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ в точке $x = y = 0$ на основе расчетных данных о распределении производной $\frac{\partial w}{\partial y}$ вдоль выбранного направления сканирования, рассмотрим выражение для производной $\frac{\partial w}{\partial y}$ при $x = 0$:

$$\frac{\partial w}{\partial y} = -\frac{4w_0 y}{r_0^2} + 4w_0 \frac{y^3}{r_0^4}. \quad (5)$$

В представлении (5) легко выделяется линейная часть $f(y)$. Тогда

$$f(y) = -\frac{4w_0}{r_0^2} y. \quad (6)$$

Графиком функции $f(y)$ есть прямая линия с угловым коэффициентом

$$K^{(p)} = -\frac{4w_0}{r_0^2}. \quad (7)$$

Из уравнений (4) и (7) следует, что угловым коэффициентом линейной части производной $\frac{\partial w}{\partial y}$

равняется значению второй производной $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ в

точке $x = y = 0$. Для наглядности полученных результатов, используя расчетные данные, представим уравнения (5) и (6) в графическом виде (рис. 2). Для расчета приняты следующие начальные данные: $r_0 = 23$ мм, $h = 1,1$ мм, модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно $E = 71000$ МПа и $\nu = 0,3$, величина приложенного давления $p = -10$ Мбар. Из приведенных графиков видно, что линейный участок изменения производной

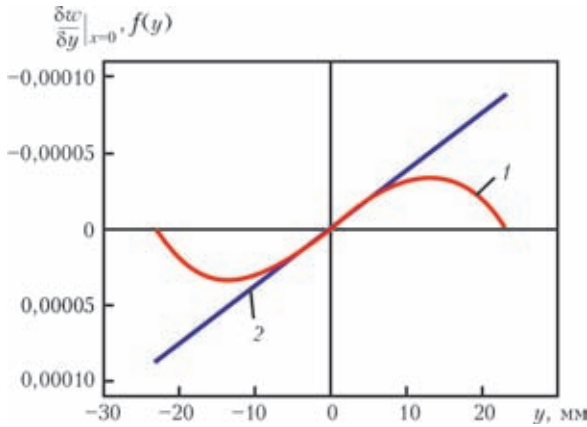


Рис. 2. Графическое представление изменения производной $\partial w / \partial y$ (1) при $x = 0$, $-23 \leq y \leq 23$, а также ее линейной части (2) для жестко защемленной круглой пластины радиусом $a = 23$ мм и толщиной $h = 1,1$ мм при нагружении давлением

водной $\frac{\partial w}{\partial y}$ (кривая 1), а также прямая 2, которая представляется уравнением (6), в окрестности начала координат совпадают. Полученные результаты позволяют сформулировать алгоритм определения второй производной от прогиба $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ в точке $x = y = 0$, основываясь на расчетном представлении распределения первой производной $\frac{\partial w}{\partial y}$ вдоль выбранного направления сканирования (кривая 1 на рис. 2). Приближим линейный участок кривой распределения производной $\frac{\partial w}{\partial y}$ (рис. 2) в окрестности начала координат прямой. Для этого на линейном участке выберем шесть реперных точек с шагом 2 мм. Используя их координаты, применяя стандартную процедуру метода наименьших квадратов, приблизим полиномом первого порядка участок, который рассматривается. Полученное уравнение прямой 2 (рис. 2) как функция координаты y запишется в виде

$$f_1(y) = -3,8 \cdot 10^{-6} y. \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет определить угловой коэффициент, т. е. получить приближенное значение второй производной $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ при $x = y = 0$. Вторая производная $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$, подсчитанная по формуле (4), имеет значение $-3,821 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^{-1}$. Погрешность определения второй производной из уравнения (8) по отношению к значению второй производной, рассчитанной по формуле (4), составляет 0,6 %. При использовании распределения производной $\partial w / \partial y$, полученного на основе экспериментальных данных, значение второй произ-

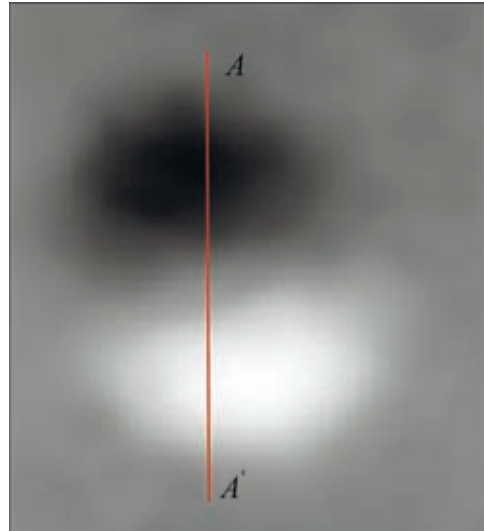


Рис. 3. Фазовая картина, характеризующая деформированное состояние утонения круговой формы диаметром 46 мм (AA — линия сканирования)

водной будет находиться с определенной погрешностью, которая превосходит приведенную выше. Представленная методика дает возможность, используя кривую распределения производной от прогиба в реперных точках на линейном участке, определять соответствующий угловой коэффициент. Радиус круговой области утонения, как будет показано ниже, определяется на основании экспериментальных данных.

Рассмотрим применение полученных результатов для экспериментального определения глубины залегания дефектов. С этой целью для проведения экспериментов был изготовлен тестовый образец из сплава АМг6 размерами $650 \times 500 \times 14$ мм с заложенными дефектами в виде утонений круговой и квадратной формы. Утонения имели равную толщину, которая составляла $h = 1,1$ мм (рис. 1, а). Для дефекта круговой формы диаметром 46 мм фазовая картина, полученная с применением метода электронной широкографии, в результате приложения давления $\Delta p = -10$ Мбар, имеет вид, приведенный на рис. 3. Экспериментальная кривая распределения производной, умноженной на широдвиг $\frac{\partial w}{\partial y} \delta y$, представлена на рис. 4, а, где BB_1 — часть кривой, которая используется при линейной аппроксимации.

Для определения $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} |_{x=y=0}$ на основании экспериментальных данных, получим соотношение

$$K^{(\text{экс})} = K^{(p)} \delta y = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} |_{x=y=0} \delta y, \quad (9)$$

тогда



$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \Big|_{x=y=0} = \frac{K^{(экс)}}{\delta y}, \quad (10)$$

где $K^{(экс)}$ — угловой коэффициент, который характеризует наклон линейного участка кривой распределения производной $\frac{\partial w}{\partial y} \delta y$ вдоль линии сканирования фазовой картины; δy — значение величины широдвига, который измеряется перед проведением эксперимента ($\delta y = 8$ мм). На основании соотношений (4) и (10) получим выражение для вычисления глубины залегания дефекта:

$$h = \frac{\sqrt[3]{-3(1 - \nu^2)\delta y p r_0^2}}{4E|K^{(экс)}|}. \quad (11)$$

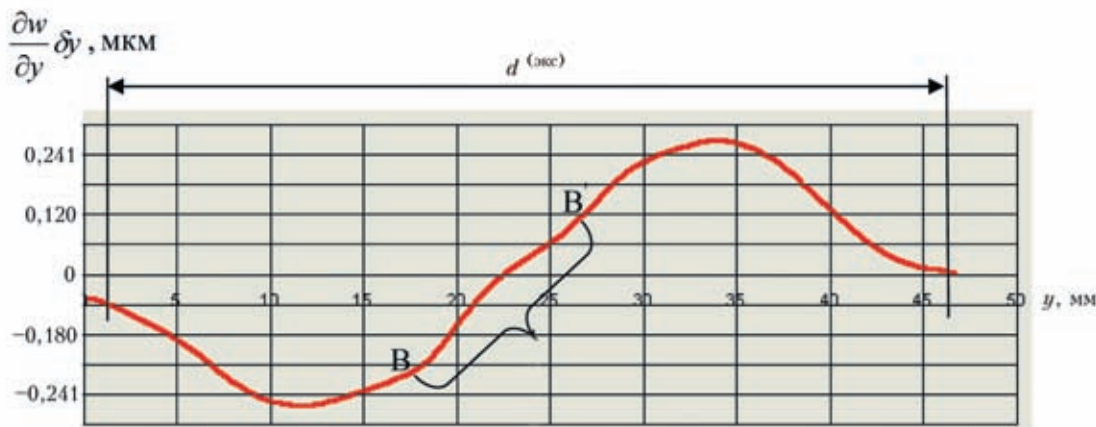
$K^{(экс)}$ — коэффициент, который определяется, исходя из приближения прямой линейного участка BB' графика распределения производной, умно-

женной на широдвиг $\frac{\partial w}{\partial y} \delta y$, вдоль линии сканирования фазовой картины (рис. 4, а). Начало координат выбирается в точке пересечения линейного участка с осью абсцисс. В качестве реперных рассматриваются точки, которые принадлежат экспериментально полученному линейному участку BB' кривой распределения производной $\frac{\partial w}{\partial y} \delta y$ (рис. 4, б). Приближая линейный участок полиномом первой степени, получаем

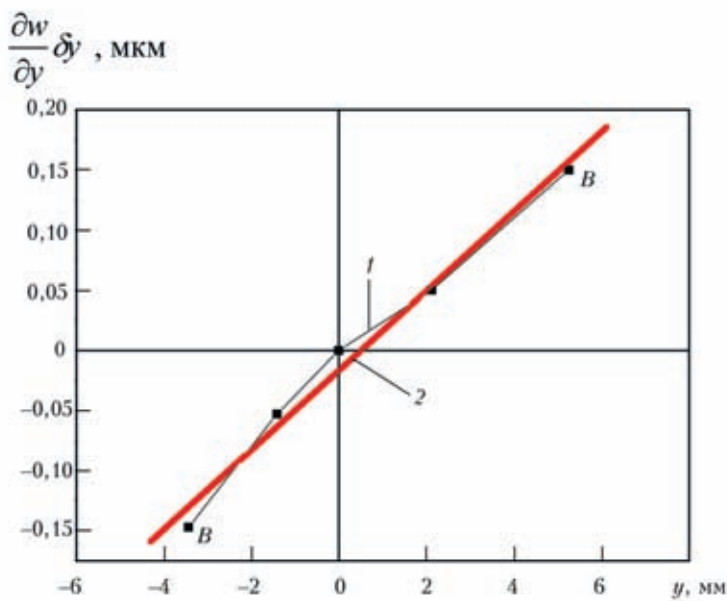
$$\frac{\partial w}{\partial y} \delta y = -0,03304y + A, \quad (12)$$

где $A = -0,01669$ мм.

Уравнение (12) представляет в функциональном виде линию с угловым коэффициентом $K^{(экс)} = -0,03304$. Наличие слагаемого, равного $-0,01669$ мм, свидетельствует о том, что линия, опи-



а



б

Рис. 4. Графическое представление изменения величины $(\partial w/\partial y)\delta y$: а — с выделенным линейным участком BB' , которое получено в результате сканирования фазовой картины вдоль линии AA' (рис. 3); б — 1 — первоначальное приближение ломаной участка BB' ; 2 — линейная аппроксимация выделенного участка графика BB'



сываемая уравнением (12), не проходит через начало координат. Функцией является производная $\frac{\partial w}{\partial y}$, которая умножена на величину широдвига. На основании графика, представленного на рис. 4, a , по длине характерного участка $d^{(экс)}$ можно определить диаметр области дефекта. Для радиуса области дефекта получаем величину $r_0^{(экс)} = d^{(экс)}/2 = 23,940$ мм. Используя определенные выше параметры, после их подстановки в выражение (11), получим глубину залегания дефекта $h^{(экс)} = 1,142$ мм. Относительная погрешность определения глубины залегания дефекта $\varepsilon = 3,9$ %.

При исследовании тестового образца, в котором заложены утонения, имеющие квадратную форму, участок утонения рассматривается как квадратная пластинка, жестко защемленная по контуру. Прогиб, который возникает в результате нагружения жестко защемленной квадратной пластины равномерно распределенным давлением при $x = 0$ и $-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}$ представляется выражением [6]:

$$w = \frac{pb^2}{32D} \left(\frac{b^2}{4} - y^2 \right) + w_1; \quad w_1 = -\frac{pb^3}{64D} \times \quad (13)$$

$$\times \left[\sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \left\{ A_n \frac{4}{n^2 \pi^2 ch^2 \frac{n\pi}{2}} (F_n(y) + bsh \frac{n\pi}{2} \cos \frac{n\pi y}{b}) \right\} \right],$$

где $F_n(y) = bsh \left(\frac{n\pi}{2} \right) ch \left(\frac{n\pi y}{b} \right) - 2ych \left(\frac{n\pi}{2} \right) sh \left(\frac{n\pi y}{b} \right)$, постоянные A_n определяются из системы линейных алгебраических уравнений. Данная система в свою очередь образуется в результате удовлетворения граничных условий.

Выполнив дифференцирование прогиба (13) по переменной y , получим

$$\frac{\partial w}{\partial y} = -\frac{pb^2}{16D} y + \frac{\partial w_1}{\partial y}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial w_1}{\partial y} = -\frac{pb^3}{64D} \left[\sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \left\{ A_n \frac{4}{n^2 \pi^2 ch^2 \frac{n\pi}{2}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(n\pi sh \frac{n\pi}{2} sh \frac{n\pi y}{b} - 2ch \frac{n\pi}{2} sh \frac{n\pi y}{b} - 2y \frac{n\pi}{b} \times ch \frac{n\pi}{2} ch \frac{n\pi y}{b} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - n\pi sh \frac{n\pi}{2} \sin \frac{n\pi y}{b} \right) \right\} \right]. \quad (15)$$

Для построения методики, которая позволит определять глубину залегания дефекта квадратной формы, получим аналитическое представле-

ние линейной части производной $\frac{\partial w}{\partial y}$. Для этого

в выражении (15) разложим функции $sh \frac{n\pi y}{b}$ и $\sin \frac{n\pi y}{b}$ в степенные ряды и при этом ограничимся лишь первыми членами. В результате получим следующее выражение для линейной части $L_1(y)$ производной $\frac{\partial w_1}{\partial y}$:

$$L_1(y) = \frac{pb^2 y}{4\pi D} \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} A_n \frac{1}{nch \frac{n\pi}{2}}. \quad (16)$$

На основании зависимостей (14) и (16) окончательное выражение для линейной части производной $\frac{\partial w}{\partial y}$ имеет вид:

$$L(y) = \frac{pb^2 y}{4D} \left(\frac{1}{\pi} \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} A_n \frac{1}{nch \frac{n\pi}{2}} - \frac{1}{4} \right). \quad (17)$$

Выражение для второй производной $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ при $x = y = 0$, получим после дифференцирования соотношений (14), (15):

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{pb^2}{4D} \left(\frac{1}{\pi} \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \frac{A_n}{nch \frac{n\pi}{2}} - \frac{1}{4} \right). \quad (18)$$

Анализ выражения (17) для линейной части производной $\frac{\partial w}{\partial y}$ и выражения (18) для второй производной $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ в точке $x = y = 0$ показал, что угловой коэффициент уравнения прямой, при помощи которого описывается линейная часть производной $\frac{\partial w}{\partial y}$, равняется значению второй производной $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ в точке $x = y = 0$. Таким образом, имея экспериментально полученную кривую распределения производной $\frac{\partial w}{\partial y}$ в зависимости от координаты y , можно определить значение второй производной $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ в точке $x = y = 0$. Для этого достаточно приблизить линейную часть кривой распределения производной $\frac{\partial w}{\partial y}$ вдоль координаты



уравнением y первой степени (прямой линией). Угловый коэффициент в полученном уравнении будет приближенно равен второй производной от прогиба поверхности дефекта в точке $x = y = 0$.

Аналогично, как и для дефектов круговой формы, в случае дефектов квадратной формы будем иметь соотношение (10). В рассматриваемом случае $\delta y = 8$ мм. Коэффициент $K^{(экс)}$ определяется путем аппроксимации полиномом первой степени линейного участка кривой распределения величины производной $\frac{\partial w}{\partial y}$, умноженной на широдвиг.

Из соотношений (10) и (18) получим выражение для определения глубины залегания дефекта h в виде:

$$h = \sqrt[3]{\frac{3(1 - \nu^2)\delta y p b^{(экс)2}}{E|K^{(экс)}|} \left\{ \frac{1}{\pi} \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \frac{A_n}{nch \frac{n\pi}{2}} - \frac{1}{4} \right\}}, \quad (19)$$

где $b^{(экс)}$ — экспериментально определяемая длина дефекта.

При этом учитывается выражение для $D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$.

Рассмотрим случай заложенного дефекта в виде утонения квадратной формы со стороной $b^{(экс)} = 43$ мм. Используя описанную выше процедуру определения экспериментального значения углового коэффициента $K^{(экс)}$, было получено $K^{(экс)} = -0,042$. Величина приложенного давления $p = -10$ Мбар.

Все параметры, которые входят в выражение (19), известны. После их подстановки получим: $h^{(экс)} = 1,076$ мм. Относительная погрешность определения глубины залегания дефекта составляет $\varepsilon = 2,2\%$.

Вывод

Разработанная методика определения глубины залегания дефектов с использованием электронной широгрaфии предоставляет новые возможности для выявления геометрических параметров зон коррозионных повреждений на внутренних поверхностях изделий и коррозионного подповерхностного расслоения.

1. *Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection* / Ed.: K. Promod. Rastogi and Daniele Inaudi, Elsevier, VK. — 2000. — 633 p.
2. *Состояние и перспективы применения метода электронной широгрaфии для диагностики элементов и узлов конструкций* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. Я. Киянец // *Автомат. сварка*. — 1998. — № 11. — С. 26–31.
3. *Методика, технология и аппаратура широгрaфического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. — 2004. — № 3. — С. 25–28.
4. *Wolfgang Steinchen, Lianxiang Yang. Digital shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry*. SPIE Press, 2003. — 330 p.
5. *Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной широгрaфии* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. Н. Савицкая, И. В. Киянец // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. — 2008. — № 4. — С. 7–13.
6. *Тимошенко С. П. Курс теории упругости*. — Киев: Наук. думка, 1972. — 497 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила в редакцию 30.06.2009

**СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА СТЫКОМ
ПРИ СВАРКЕ ПРОДОЛЬНЫХ СТЫКОВ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**



Система предназначена для автоматического наведения сварочного инструмента на стык с точностью ± 0.5 мм при скорости сварки до 150 м/ч. Разработка внедрена в производство на предприятии ОАО «Харьцызский трубный завод» (Украина, 2007 г.).
ИЭС им. Е.О.Патона, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, Тел./факс: (044) 287-67-11, 271-25-05, E-mail: eshapovalov@paton.kiev.ua