



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. ПИВТОРАК, В. В. САВИЦКИЙ, Г. И. ТКАЧУК

Развитие метода электронной спекл-интерферометрии позволило разработать методику определения остаточных напряжений, которая обладает более высокой точностью, достоверностью получаемых результатов и информативностью при определении остаточных напряжений в материалах и элементах конструкций. При разработке спекл-интерферометрического метода определения остаточных напряжений использована современная вычислительная техника, современные алгоритмы, основанные на методе конечных элементов, и разработанное авторами программное обеспечение.

Advance of electronic speckle interferometry method enables development of a residual stress determination technique that has higher accuracy, validity of the obtained results and self-descriptiveness at residual stress determination in materials and structural elements. The speckle interferometry residual stress determination method was developed using current computer systems, algorithms, which are based on finite-element method, and software designed by the authors.

Применение новых материалов, интенсификация производственных процессов и возрастание уровней эксплуатационных воздействий непрерывно повышают требования к конструкциям. Обеспечение прочности, повышение точности изготовления, качества, работоспособности элементов и узлов конструкций во многом определяется уровнем напряженного состояния, возникающего в процессе их изготовления и эксплуатации.

Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на работоспособность конструкций. Как величина, так и распределение напряжений могут быть критичными для рабочих характеристик и должны учитываться при разработке изделий и конструкций.

Эта проблема решается в нескольких направлениях. Среди них важная роль принадлежит разработке и широкому применению современных методов и средств определения остаточных напряжений, эффективность которых определяется, прежде всего, их достоверностью и производительностью.

При определении остаточных напряжений существующими методами принимают, что напряжения неизменны на базе их измерения. Однако зона сварного шва и околшовная зона практически всегда имеют неоднородное напряженное состояние (градиент) как по поверхности, так и по толщине сварного соединения. Поэтому важно разработать метод, который позволяет определять остаточные напряжения в условиях неравномерного напряженного состояния элементов конструкций в области измерения.

Для определения остаточных напряжений широкое применение получил метод электронной спекл-интерферометрии в сочетании с методом отверстий [1]. Этот метод заключается в регистрации методом электронной спекл-интерферометрии перемещений, возникающих в области упругой разгрузки напряжений с помощью отверстия, и последующему вычислению остаточных напряжений с использованием зависимостей, полученных в результате моделирования напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов.

Измерение остаточных напряжений методом спекл-интерферометрии выполняется в следующей последовательности [1]: спекл-интерферометрический прибор устанавливается на исследуемый сварной элемент — на участок, в котором необходимо определить остаточные напряжения. Контролируемая зона освещается лазерным светом и отраженная световая волна (спекл-картина), характеризующая исходное состояние контролируемого участка, с помощью ССD-камеры вводится в память компьютера. После упругой разгрузки напряжений, вызванной сверлением несковозного отверстия диаметром и глубиной 1...2 мм, отраженная световая волна аналогично исходной также вводится в память компьютера. Блок-схема измерительной системы показана на рис. 1. После компьютерной обработки двух спекл-картин, полученных до и после локальной упругой разгрузки остаточных напряжений с помощью сверления небольшого несковозного отверстия, на мониторе наблюдается интерференционная картина полос в

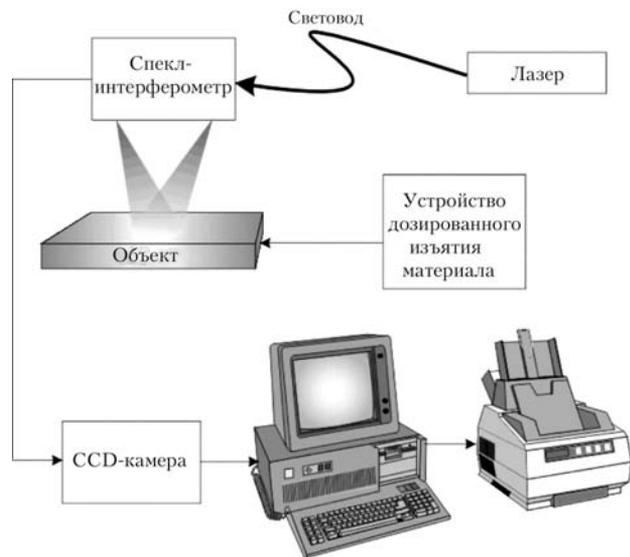


Рис. 1. Блок-схема измерительной системы для определения остаточных напряжений методом спекл-интерферометрии

области отверстия, которая содержит информацию о величине остаточных напряжений в контролируемой точке исследуемого участка объекта (рис. 2).

Сверление отверстия в напряженном материале вызывает перемещения точек поверхности. Зависимость перемещений u_r и u_θ , возникающих в результате упругой разгрузки напряжений σ_{xx} , σ_{yy} и τ_{xy} на некотором расстоянии r от центра отверстия, от угла θ имеет вид [1]:

$$u_r(r, \theta) = \bar{A} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + \bar{B} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cos 2\theta + 2\tau_{xy} \sin 2\theta], \quad (1)$$

$$u_\theta(r, \theta) = \bar{C} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \sin 2\theta - 2\tau_{xy} \cos 2\theta], \quad (2)$$

где \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} , — эмпирические коэффициенты, которые зависят от механических свойств мате-

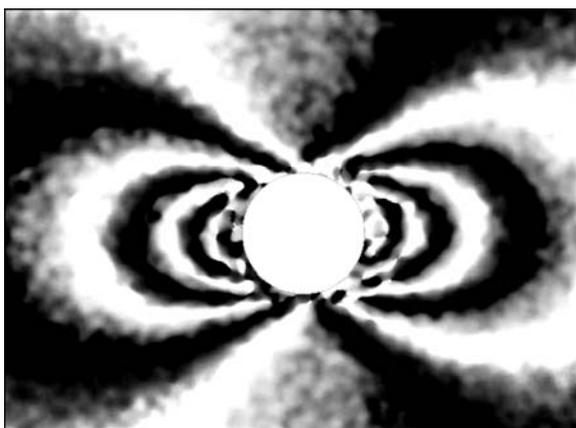


Рис. 2. Типичная интерференционная картина полос вокруг несквозного отверстия после упругой разгрузки остаточных напряжений

риала, размера отверстия, отношения глубины отверстия к его диаметру и соотношения $\rho = r_0/r$.

Методика определения остаточных напряжений методом электронной спекл-интерферометрии предполагает измерение компоненты перемещений u_x на определенном расстоянии от центра отверстия.

Из уравнений (1)–(2) получим следующую зависимость:

$$u_x(\theta) |_{r=2,5r_0} = F(\theta)\sigma_{xx} + G(\theta)\sigma_{yy} + H(\theta)\tau_{xy}, \quad (3)$$

где

$$F(\theta) = (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\theta)\cos \theta - \bar{C} \sin 2\theta \sin \theta, \quad (4)$$

$$G(\theta) = (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\theta)\sin \theta - \bar{C} \sin 2\theta \cos \theta, \quad (5)$$

$$H(\theta) = 2\bar{B} \sin 2\theta \cos \theta + 2\bar{C} \cos 2\theta \sin \theta, \quad (6)$$

— функции, зависящие от механических свойств материала и радиуса отверстия.

Поскольку в уравнении (3) три неизвестные σ_{xx} , σ_{yy} и τ_{xy} , то необходимо иметь данные о перемещениях в трех точках — $u_x(\theta_1)$, $u_x(\theta_2)$, $u_x(\theta_3)$, для того, чтобы из системы линейных уравнений

$$\begin{bmatrix} F(\theta_1) & G(\theta_1) & H(\theta_1) \\ F(\theta_2) & G(\theta_2) & H(\theta_2) \\ F(\theta_3) & G(\theta_3) & H(\theta_3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_x(\theta_1) \\ u_x(\theta_2) \\ u_x(\theta_3) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

найти неизвестные компоненты тензора напряжений.

Таким образом, для того чтобы определить остаточные напряжения в точке сверления по данным о перемещениях, полученных методом электронной спекл-интерферометрии, необходимо знать значения коэффициентов \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} .

Поскольку величины \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} не зависят от вида напряженного состояния, то коэффициенты, вычисленные для одноосного напряженного состояния, должны быть верны и для двухосного напряженного состояния исследуемого объекта. Это положено в основу разработанных экспериментального и численного методов определения эмпирических коэффициентов \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} .

Метод основывается на создании одноосного напряженного состояния в тестовом образце с известным уровнем напряжений. В нагруженном образце высверливали отверстие и с помощью спекл-интерферометра в окрестности отверстия измеряли компоненты вектора перемещений. По экспериментальным данным о перемещениях в исследуемых точках по установленным формулам вычисляли эмпирические коэффициенты \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} [2].

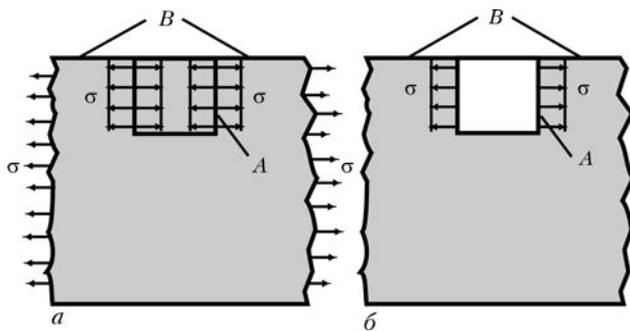


Рис. 3. Схема распределения напряжений при высверливании несквозного отверстия в материале, который находится под действием постоянной нагрузки σ

Экспериментальное определение эмпирических коэффициентов \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} для каждого типа материала, из которого изготовлено исследуемое изделие, требует значительных временных и материальных затрат. Поэтому важно иметь расчетную методику, позволяющую вычислить эмпирические коэффициенты. Для этого предложено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в окрестности отверстия, высверленного в напряженном материале, на основе применения метода конечных элементов (рис. 3).

Схематически начальное напряженное состояние растянутой пластины перед сверлением отверстия представлено на рис. 3, а. Моделирование упругой разгрузки напряжений с помощью отверстия можно свести к следующей задаче (рис. 3, б).

Перемещения точек поверхности B , измеряемые методом электронной спекл-интерферометрии, зависят от величины остаточных напряжений на поверхности A , существовавших до высверливания отверстия. Используя это, с помощью численного моделирования методом конечных элементов можно найти зависимость перемещений, возникающих в окрестности высверленного отверстия, от напряженного состояния исследуемого объекта.

Численное моделирование методом конечных элементов позволило определить значения эмпирических коэффициентов по разработанному алгоритму. Полученные результаты показали, что данные численного определения эмпирических коэффициентов \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} хорошо согласуются с экспериментальными. Это позволило дополнительно получить ряд зависимостей, повышающих точность определения остаточных напряжений для различных материалов без проведения трудоемких и дорогостоящих исследований.

Выполненные экспериментальные исследования показали, что на точность определения остаточных напряжений оказывает влияние толщина исследуемого объекта. Поэтому с помощью раз-

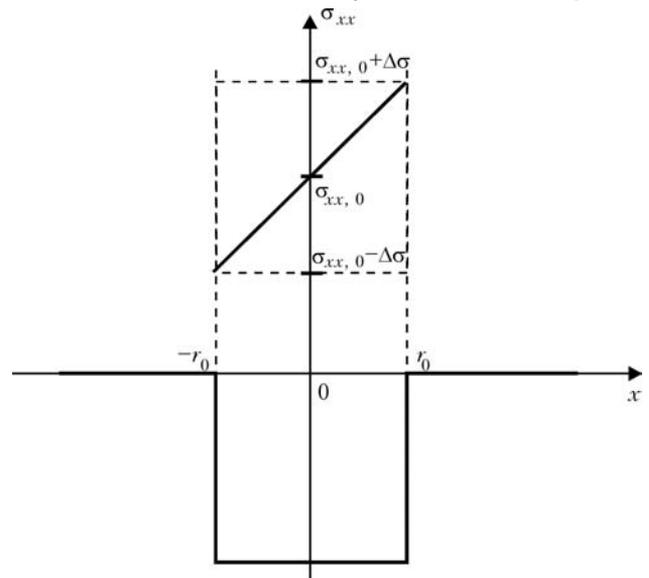


Рис. 4. Схема распределения напряжений в зоне отверстия при моделировании МКЭ

работанной математической модели и численных расчетов оценивалось влияние геометрических параметров исследуемого элемента на калибровочные коэффициенты \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} .

На основе применения метода конечных элементов изучали влияние отношения толщины исследуемого объекта к диаметру отверстия на точность измерений (параметр H/D). Исследования показали, что если при определении остаточных напряжений не учитывать параметр H/D , то возможно возникновение дополнительной ошибки вычисления порядка 10%. В связи с этим с помощью метода конечных элементов были рассчитаны коэффициенты \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} в зависимости от параметра H/D и по полученным значениям коэффициентов построена кривая для каждого калибровочного коэффициента.

Следует также отметить, что при определении остаточных напряжений в сварных соединениях допущения о постоянстве напряжений по поверхности на базе измерений часто не выполняется. В связи с этим необходимо учитывать градиент напряжений в исследуемом участке элемента.

Рассмотрим наиболее распространенный случай равномерно возрастающего (убывающего) распределения напряжений вдоль диаметра высверливаемого отверстия (рис. 4).

При таком градиенте напряжений методом конечных элементов вычисляли перемещения на заданном расстоянии от центра отверстия, которые использовали как исходные данные при определении остаточных напряжений с помощью алгоритма, описанного выше.

В отличие от известных методов обработки экспериментальных данных [3], в представленной работе область вокруг отверстия разбивали на че-



четыре сектора $C1-C4$, в которых измеряли перемещения и по которым рассчитывались напряжения. Для сектора $C1$ при определении остаточных напряжений используются данные о перемещениях в точках поверхности, расположенных в первой и четвертой четвертях, для сектора $C2$ — второй и третьей, $C3$ — первой и второй, $C4$ — третьей и четвертой, для сектора $C0$ используется алгоритм определения напряжений, описанный в статье [1] (рис. 5).

При моделировании задано следующее распределение напряжений:

$$\sigma_{xx} = \frac{\Delta\sigma}{r_0}x + \sigma_{xx,0}, \quad (8)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{yy,0}, \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = 0, \quad (10)$$

где $\sigma_{xx,0}$ и $\sigma_{yy,0}$ — напряжения в центре отверстия радиусом r_0 ; $\Delta\sigma$ — разность между максимальным напряжением в области отверстия и $\sigma_{xx,0}$ (см. рис. 4).

Согласно принципу суперпозиции напряжений, составляющая σ_{yy} не должна оказывать влияния на получаемые результаты, что и было подтверждено в результате выполненных численных экспериментов. Поэтому для упрощения в расчетах константу σ_{yy} в уравнении (8) принимали равной нулю.

В центре отверстия задавали напряжение $\sigma_{xx,0} = 10$ МПа, а изменение напряжений вдоль оси x выбирали таким образом, чтобы на одной кромке отверстия напряжения были равны нулю, а на другой — 20 МПа (т. е. $\sigma_{xx,0} = 10$ МПа, $\Delta\sigma =$

$= 10$ МПа). Также были рассмотрены варианты: $\sigma_{xx,0} = 20$ МПа, $\Delta\sigma = 10$ МПа и $\sigma_{xx,0} = 20$ МПа, $\Delta\sigma = 20$ МПа (результаты расчетов представлены в таблице). Анализ полученных данных показал, что для выбранного напряженного состояния определение остаточных напряжений с применением методики [1] (используются данные сектора $C0$) дает значение напряжений $\sigma_{xx,0}$, т. е. значение напряжений, существовавшее в центре отверстия.

Если существует градиент напряжений, то вычисленные остаточные напряжения по данным о перемещениях в секторах $C1$ и $C2$ будут отличаться. При этом напряжения, вычисленные в результате обработки данных о перемещениях во всех точках окружности, будут иметь усредненные значения по сравнению с вычисленными по данным измерений в секторах $C1$ и $C2$. Чем выше градиент напряжений в зоне отверстия, тем больше разница между результатами расчета напряжений по данным измерения перемещений в секторах $C1$ и $C2$. Следует отметить, что, используя результаты расчета напряжений в разных секторах, можно определить направление градиента напряжений в зоне отверстия, что позволяет с большей точностью находить значения макси-

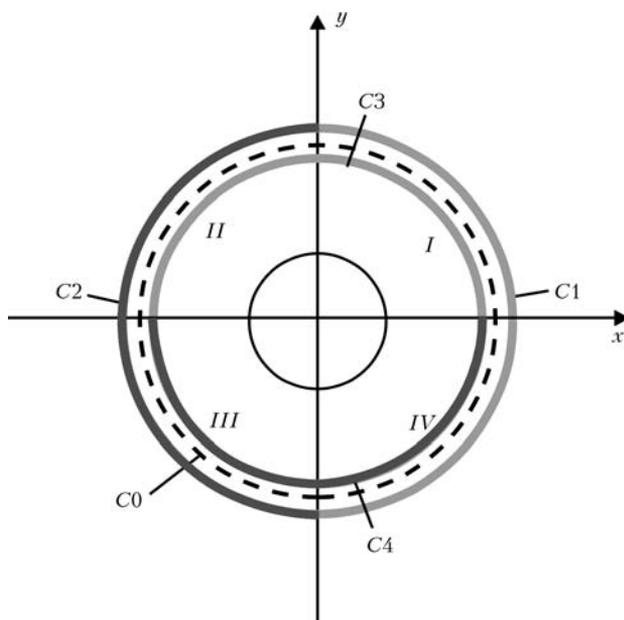
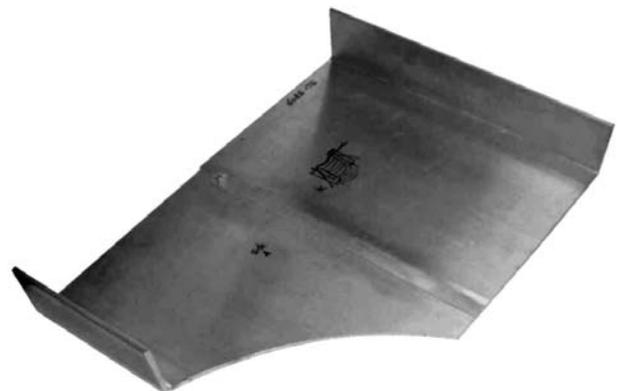
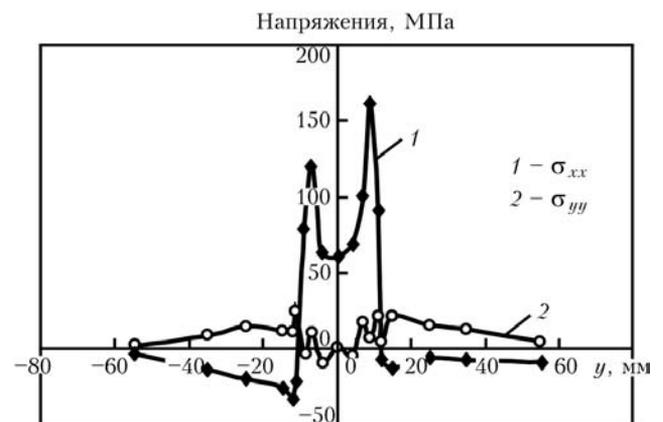


Рис. 5. Схема разбиения области на сектора для исследования градиента напряжений в зоне отверстия



а



б

Рис. 6. Распределение остаточных напряжений в элементе конструкции (а), образованных в результате сварки трением с перемешиванием вдоль центрального поперечного ко шву сечения (б)



Сектор	σ_{xx} , МПа	σ_{yy} , МПа	τ_{xy} , МПа
Вариант $\sigma_{xx,0} = 10$ МПа, $\Delta\sigma = 10$ МПа			
C0	10,00	0,00	0,00
C1	15,59	-1,11	0,00
C2	4,420	1,12	0,00
C3	10,00	0,00	-1,81
C4	10,00	0,00	1,81
Вариант $\sigma_{xx,0} = 20$ МПа, $\Delta\sigma = 10$ МПа			
C0	20,00	0,00	0,00
C1	25,59	-1,11	0,00
C2	14,42	1,12	0,00
C3	20,00	0,00	-1,81
C4	20,00	0,00	1,81
Вариант $\sigma_{xx,0} = 20$ МПа, $\Delta\sigma = 20$ МПа			
C0	20,00	0,00	0,00
C1	31,17	-2,33	0,00
C2	8,830	2,23	0,00
C3	20,00	0,00	-3,92
C4	20,00	0,00	3,92

мальных (минимальных) остаточных напряжений. Градиент напряжений в зоне отверстия можно оценить по эмпирической формуле (получена на основании анализа результатов таблицы):

$$\frac{\partial\sigma}{\partial x} = \frac{1,79(\sigma_{xx,2} - \sigma_{xx,1})}{r}, \quad (11)$$

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

Поступила в редакцию 29.09.2006

НОВАЯ КНИГА

Троицкий В. А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. — Киев: Феникс, 2006. — 320 с.

В пособии рассмотрены методы неразрушающего контроля (НК) и их классификация, изложены основные понятия и физические основы, приведены технические характеристики основных видов оборудования и вспомогательных средств для визуальной, ультразвуковой, радиационной, магнитной, капиллярной дефектоскопии и контроля герметичности. Классифицированы основные типы дефектов сварных соединений, выполненных дуговыми, контактными и другими видами сварки. Изложены вопросы статистической обработки результатов контроля, управления качеством сварки, примеры ведомственных норм на дефектность сварных соединений.

Приведены примеры использования средств НК в трубопроводном транспорте, в нефтегазовой и строительной промышленности, при производстве труб магистральных трубопроводов.

Методические рекомендации рассчитаны на инженерно-технических работников, дефектоскопистов и могут быть полезны студентам вузов. Издание третье, дополненное.

**По вопросам приобретения обращаться:
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 4
Тел.: 287-26-66; факс: 289-21-66; e-mail: usndt@ukr.net**