

## ДИАГНОСТИКА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **В. А. ПИВТОРАК**, канд. физ.-мат. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработаны методики неразрушающего контроля качества и определения напряженно-деформированного состояния и остаточных напряжений сварных соединений и конструкций на основе электронной ширографии и спекл-интерферометрии. Созданы компактные ширографические и спекл-интерферометрические измерительные системы, которые позволяют исследовать сварные конструкции в условиях их изготовления и эксплуатации. Представлены компьютерные системы для обработки интерферограмм и определения полей перемещений, деформаций и напряжений.

*Ключевые слова:* электронная спекл-интерферометрия, ширография, неразрушающий контроль, остаточные напряжения, компьютерная обработка

В современных отраслях промышленности (машино- и авиастроении, космической технике и др.) широкое применение находят высокопрочные металлы, сплавы и композиционные материалы. Повышение качества, надежности и работоспособности конструкций, изготовленных из таких материалов, неразрывно связано с созданием и развитием оперативных методов и средств неразрушающего контроля качества и определения напряженного состояния. Обычно эти конструкции работают в условиях сложного механического воздействия и температурных градиентов. Концентрация напряжений, возникающая в зоне дефектов сварных швов, понижает надежность и долговечность конструкций.

В настоящее время для выявления дефектов в материалах и конструкциях разработан ряд методов неразрушающего контроля таких, как рентгеновский, радиографический, ультразвуковой, магнитный и др. [1–3]. Следует отметить, что ни один из этих методов неразрушающего контроля не является универсальным. Каждый имеет преимущества и недостатки, свою область применения, которая определяется чувствительностью и точностью обнаружения дефектов.

Между тем, инженерная практика ставит все новые задачи, направленные на повышение работоспособности и надежности конструкций. Для их решения необходимы новые методы неразрушающего контроля, позволяющие получать оперативную и 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 дает возможность бесконтактно исследовать поверхность объекта, не повреждая ее. Этот метод используется при исследовании различных материалов, конструкций и позволяет измерить деформацию объекта в условиях нагружения. Этим обусловлена нечувствительность электронной ширографии к жестким смещениям объекта, вызванным влиянием окружающей среды, что и определяет ее универсальность и эффективность применения в производстве [4, 5].

Важным преимуществом электронной ширографии для неразрушающего контроля качества объектов является то, что в отличие от традиционных методов, которые только фиксируют наличие или отсутствие дефектов, она позволяет выявить концентрацию напряжений, вызванную присутствием дефекта и конструктивными особенностями объекта.

Суть метода электронной ширографии состоит в следующем. Контролируемый объект частично или полностью освещается с помощью лазера световой волной, которая при отражении от его поверхности попадает на подвижной элемент, размещенный перед объективом CCD-камеры, разделяя апертуру на две половины. При этом в плоскости изображения CCD-камеры появляются два смещенных изображения контролируемого объекта.

При интерференции световых волн образуется хаотическая микроинтерференционная спекл-картина, которая с помощью CCD-камеры вводится в компьютер. Полученные микроинтерференционные спекл-картины, записанные для двух состояний объекта (до и после нагружения), срав-

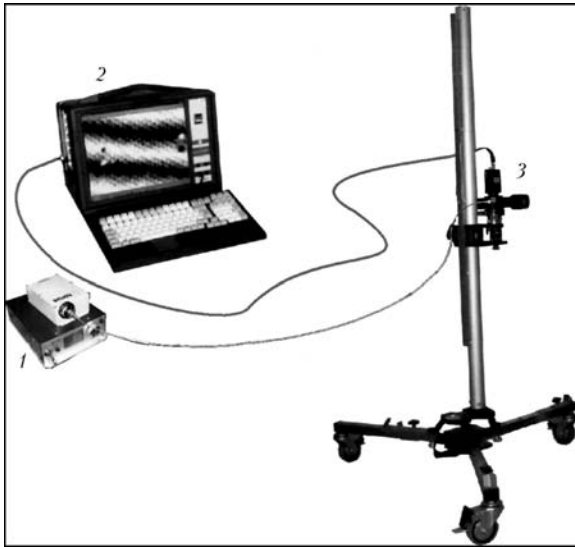


Рис. 1. Ширографическая установка для неразрушающего контроля: 1 — лазер со световодом; 2 — портативный компьютер; 3 — широкографический модуль

ниваются и обрабатываются с целью получения макроинтерференционных полос (широграмм).

При выполнении неразрушающего контроля качества элементов и узлов конструкций используется компактная широкографическая установка, в комплект которой входят одномодовый лазер для освещения поверхности исследуемого объекта, широкографический интерферометр, формирующий изображение объекта, CCD-камера для записи и

передачи изображения и компьютер для получения и обработки интерференционных картин полос (рис. 1).

При практическом применении широкографии для неразрушающего контроля качества необходимо учитывать следующие предположения, которые вытекают из оптической схемы широкографической установки:

размеры исследуемых объектов или участков объекта должны быть существенно меньше, чем расстояние от лазера до поверхности контролируемого объекта;

широэлемент располагается перпендикулярно к поверхности объекта, т. е. максимально приближен к оси измерений.

При проведении неразрушающего контроля качества направление освещения поверхности исследуемого объекта выбирают по возможности ближе к нормали его поверхности. В этом случае для темных и светлых интерференционных полос на широграмме используются следующие зависимости [5]:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{(2N + 1)\lambda}{4\delta x} \text{ (темные интерференционные полосы), (1)}$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{(2N + 1)\lambda}{4\delta y}, \text{ (2)}$$

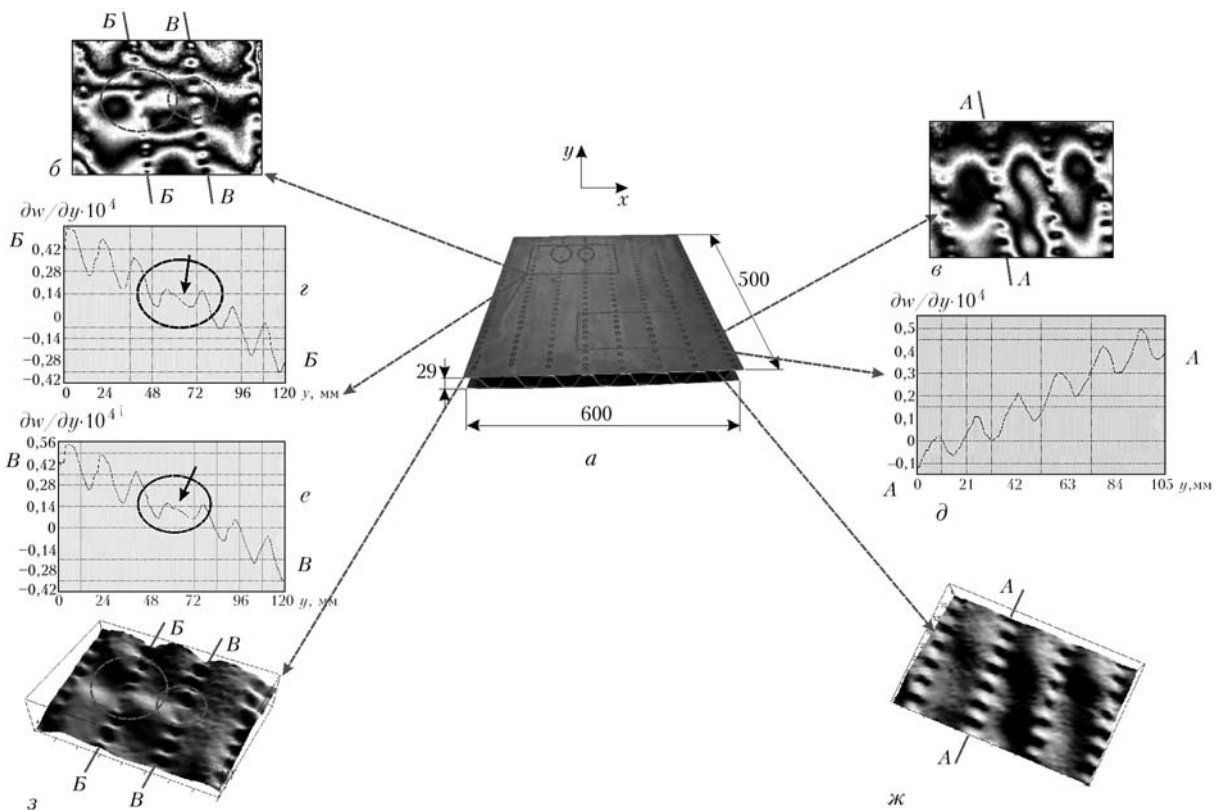


Рис. 2. Контроль качества панели, изготовленной дуговой точечной сваркой: а — общий вид панели; б, в — картины интерференционных полос на участке без дефекта и с дефектом (зона дефекта очерчена); з, е — распределение производной  $\partial w/\partial y$  вдоль выбранных сечений А-А, Б-Б, В-В; ж, з — трехмерные картины деформирования поверхности

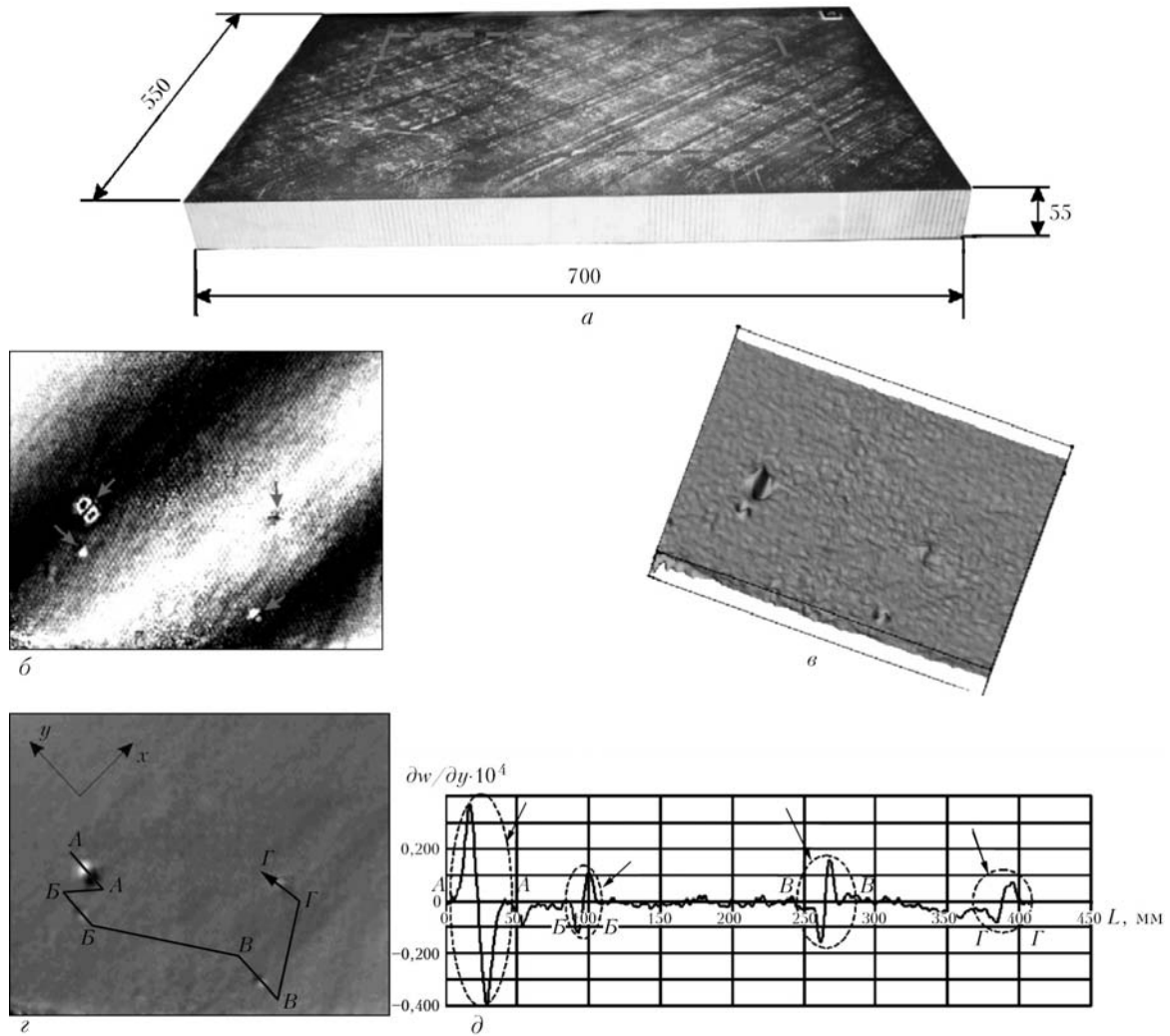


Рис. 3. Контроль качества элемента сотовой панели с использованием термического нагружения: *a* — общий вид панели; *б* — картина интерференционных полос, полученная в результате термического нагружения (зона дефекта показана стрелками); *в* — трехмерная картина деформирования поверхности контролируемого участка; *г* — схема исследуемых сечений; *д* — распределение производной  $\partial w/\partial y$  вдоль выбранных сечений А-А, Б-Б, В-В и Г-Г

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{N\lambda}{2\delta x} \quad (\text{светлые интерференционные полосы}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{N\lambda}{2\delta y}, \quad (4)$$

где  $N$  — порядок полос;  $\lambda$  — длина волны лазерного источника света;  $\delta x$ ,  $\delta y$  — широксмещение соответственно в направлениях  $Ox$ ,  $Oy$ ;  $\partial w/\partial x$ ,  $\partial w/\partial y$  — производные от перемещений по нормали к поверхности объекта.

Разработанную технологию широкографического неразрушающего контроля качества использовали для контроля элементов и узлов конструкций, изготовленных из различных конструкционных материалов. Применение этого метода перспективно также для контроля качества тонкостенных металлических панелей, полученных дуговой точечной сваркой.

Обычно при дуговой точечной сварке основным критерием качества является обеспечение не-

обходимого размера ядра сварной точки. При этом следует отметить, что отпечаток электрода на наружной поверхности свариваемого листа не всегда соответствует ядру сварной точки, и поэтому оценить качество сварной точки традиционными методами контроля достаточно сложно.

Созданная технология широкографического контроля качества позволяет оценить качество сварных точечных соединений. В ходе экспериментов исследовали качество точечных соединений трехслойной сотовой панельной конструкции размером  $600 \times 500 \times 29$  мм из стали СтЗсп. Толщина привариваемых дуговой точечной сваркой листов составляла 1,5 мм (рис. 2, *a*). Для нагружения панели использовали обдув исследуемой поверхности воздухом, нагретым до  $T = 100$  °С в течение 25 с с расстояния 80 мм от поверхности изделия.

Картины интерференционных полос, характеризующие участки соответственно без и с дефектами, показаны на рис. 2, *б*, *в*. Построенные трехмерные картины деформирования участка соот-

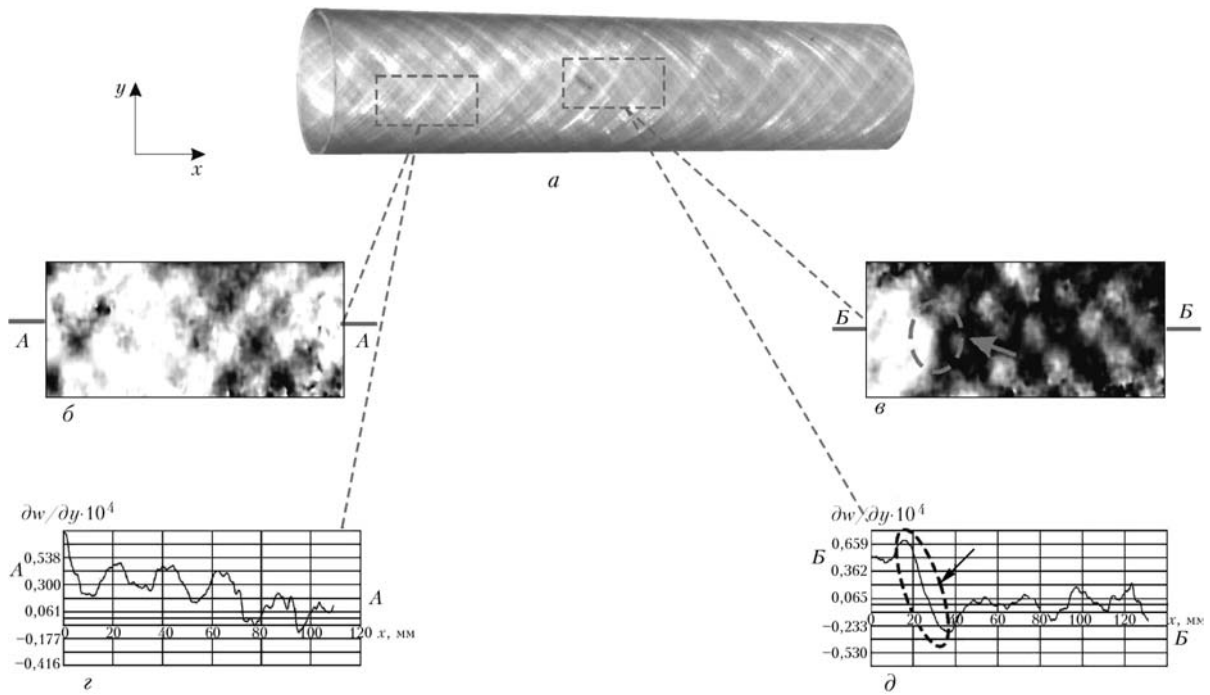


Рис. 4. Контроль качества стеклопластиковой трубы диаметром 68 мм с толщиной стенки 4 мм с нагружением внутренним давлением: *a* — общий вид панели; *б, в* — картины интерференционных полос на участке без дефектов и с дефектами (зона дефекта показана стрелкой); *з-д* — распределение производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  вдоль выбранных сечений *A-A, B-B*

ветственно без и с дефектами приведены на рис. 2, ж, з. Распределение производных  $\frac{\partial w}{\partial y}$  вдоль выбранного сечения *A-A* участка без и с дефектами в сечениях *B-B* и *B-B* показаны на рис. 2, з-е. Наиболее наглядным является изменение производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  на участке с дефектами (показано стрелками на рис. 2, з, е). Монотонность распределения производной в этих местах резко меняется, что свидетельствует об отсутствии качественного точечного соединения.

Созданная технология позволяет оперативно выполнять контроль качества композиционных сотовых панелей, используемых в авиационной промышленности. Общий вид контролируемой сотовой панели из стеклопластика представлен на рис. 3, а. При выполнении контроля качества сотовой панели производилась запись в память компьютера световой волны, отраженной от поверхности панели в ее исходном состоянии. Для нагружения поверхности сотовой панели использовали тепловой нагрев специальными инфракрасными лампами. С помощью компьютерной программы выполнялось автоматическое управление длительностью нагрева контролируемой поверхности панели в ее исходном состоянии. Затем отраженную от нагретой поверхности панели световую волну также вводили в память компьютера. После компьютерной обработки двух световых волн (до и после нагрева поверхности панели) получена картина полос (рис. 3, б) и трехмерная картина деформирования панели (рис. 3, в). На этих картинах видны локальные особенности деформирования контролируемой поверх-

ности панели на участках с дефектами. На рис. 3, д показано распределение производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  вдоль выбранных сечений *A-A, B-B, B-B, Г-Г*. На участках с дефектами распределение производной резко изменяется.

С применением электронной широкографии проводили исследования качества тонкостенных труб, изготовленных из композиционных материалов. Выполняли эксперименты по контролю качества стеклопластиковых труб диаметром 68 мм, с толщиной стенки 4 мм. Общий вид трубчатого элемента приведен на рис. 4, а. Широкодвиг осуществляли вдоль оси *x*, а для нагружения трубы с помощью воздуха создавали внутреннее давление. По ранее описанной методике отраженная световая волна, характеризующая состояние контролируемой поверхности трубы, которая нагружалась внутренним давлением 500 кПа, вводилась в память компьютера. Затем выполнялся сброс внутреннего давления до 400 кПа и при таком давлении световая волна, характеризующая состояние контролируемой поверхности, также вводилась в память компьютера.

Компьютерная обработка двух световых волн, отраженных от контролируемой поверхности, позволила получить картины интерференционных полос (рис. 4, б, в). Распределение производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  вдоль выбранных сечений *A-A* для участка без дефектов и с дефектами (сечение *B-B*) показаны соответственно на рис. 4, з, д. Установлено, что в трубе возник участок с дефектами площадью 200 мм<sup>2</sup> вследствие разрушения стекловолокна при его намотке внутри стенки трубы.

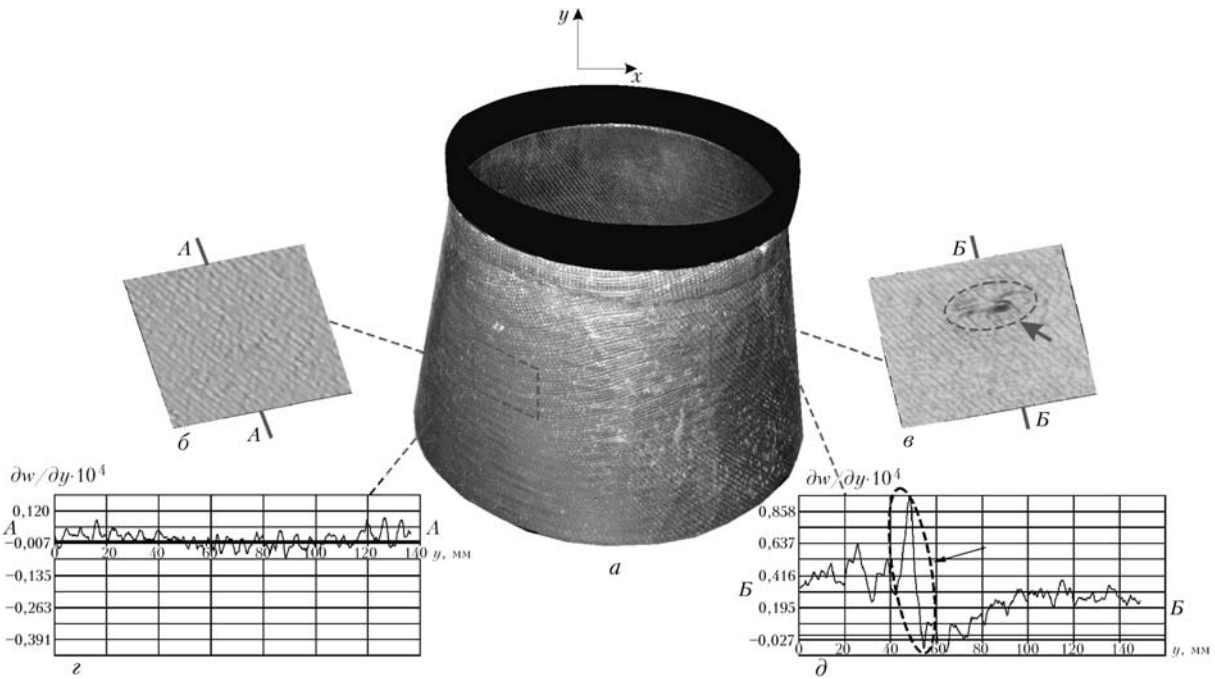


Рис. 5. Контроль качества усеченного конуса из углеродного композиционного материала: *a* — общий вид конуса; *б, в* — трехмерные картины деформирования поверхности участка без дефекта и с дефектом; *г, д* — распределение производной  $\partial w/\partial y$  вдоль выбранных сечений *A-A*, *B-B* (зона дефекта очерчена)

Эффективно использование созданной технологии неразрушающего контроля для исследования углеродных композиционных материалов, которые широко применяются в аэрокосмической технике. В экспериментах исследовали элемент конструкции в виде усеченного конуса размером  $300 \times 230 \times 200$  мм с толщиной стенки 2 мм, изготовленный из углеродного композиционного материала (рис. 5, *a*). Для нагружения элемента конструкции использовали обдув контролируемой поверхности теплым воздухом, нагретым до  $70^\circ\text{C}$ , в течение 30 с с расстояния около 50 мм.

Трехмерные картины деформирования контролируемых участков показаны соответственно на рис. 5, *б, в*. Здесь видно локальное деформирование исследуемой поверхности на участке с дефектом. Распределение производной  $\partial w/\partial y$  вдоль сечений *A-A* и *B-B* показано на рис. 5, *г, д*. В дефектном участке контролируемой поверхности наблюдается резкое изменение производной  $\partial w/\partial y$  (стрелкой показан участок с дефектом). Анализ полученных результатов показал, что в исследуемом элементе конструкции выявлено расслоение композиционного материала площадью  $400 \text{ мм}^2$ .

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что разработанная технология неразрушающего контроля качества элементов конструкций методом электронной широкографии предоставляет широкие возможности для выявления дефектов различных типов, которые при соответствующем нагружении создают локальную концентрацию напряжений. Применение такой технологии в ряде случаев является единственно возможным вари-

антом для получения достоверной информации о наличии дефектов в тонкостенных конструкциях из металлических и неметаллических материалов.

Существенное влияние на работоспособность сварных конструкций оказывают остаточные напряжения. Для их определения в элементах и узлах конструкций применяются методы тензометрии, рентгеновской и нейтронной дифракции, магнитные, ультразвуковые, лазерной интерферометрии и др. [6–12].

В ИЭС им. Е. О. Патона создана технология и разработана компактная аппаратура для оперативного определения остаточных напряжений с помощью метода электронной спекл-интерферометрии при сверлении несквозного отверстия [13]. Этот метод основывается на использовании оптической схемы интерферометра, приведенной на рис. 6, что позволяет измерить плоскостные перемещения. Луч лазера *1* с помощью делителя *2* разделяется на два луча (50/50), которые с помощью зеркал *3* и *4* попадают на линзы *5* и *6*, расширяются и освещают объект симметрично под углом  $\theta$  относительно нормали к поверхности контролируемого объекта *8*. В выполненных экспериментах  $\theta = 57^\circ$ . Отраженная от поверхности световая волна, несущая информацию о состоянии контролируемого участка, с помощью CCD-камеры *7* поступает в компьютер *9*, в котором расположена плата оцифровки. Изображение оцифровывается и обрабатывается до получения на мониторе вокруг высверленного отверстия картины интерференционных полос.

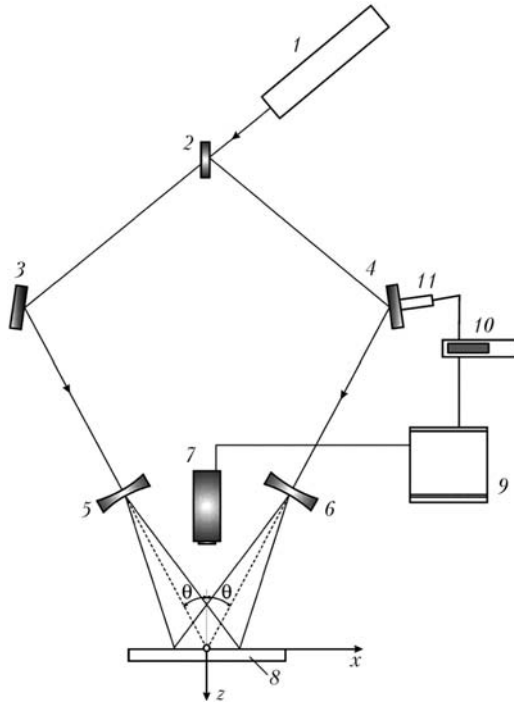


Рис. 6. Оптическая схема спекл-интерферометра для измерения плоскостных компонент  $u(x, y)$  вектора перемещений: 1 — гелиево-неоновый-лазер; 2 — оптический делитель 50/50; 3, 4 — плоские зеркала; 5, 6 — линзы; 7 — CCD-камера; 8 — контролируемый объект; 9 — компьютер; 10 — контроллер; 11 — пьезоэлектрический преобразователь

Использование приведенной симметричной оптической схемы спекл-интерферометра позволяет измерить плоскостную компоненту вектора перемещений  $u(x, y)$  по формуле из работы [14].

$$u(x, y) = \frac{\Phi(x, y)\lambda}{4\pi \sin \theta}, \quad (5)$$

где  $\Phi(x, y)$  — оптическая разность фаз, вызванная сверлением несквозного отверстия в исследуемом участке объекта.

Для определения оптической разности фаз  $\Phi(x, y)$  в точках поверхности исследуемого объекта используется метод фазовых шагов — запись нескольких интерферограмм с известным сдвигом фаз между ними [15]. Затем, согласно этому методу, составляется система нелинейных уравне-

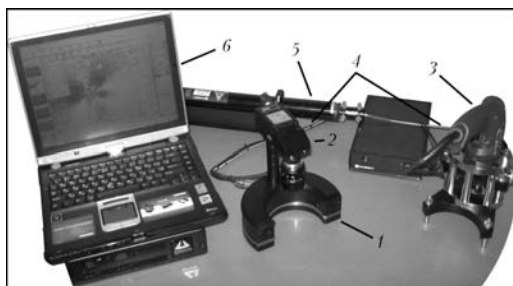


Рис. 7. Общий вид спекл-интерферометрической измерительной системы для определения остаточных напряжений: 1 — спекл-интерферометр; 2 — CCD-камера; 3 — устройство дозированного изъятия материала; 4 — световод; 5 — лазер; 6 — компьютер

ний, решением которой является распределение фазы в каждой точке поверхности.

Для практической реализации методики (рис. 6) используется пьезоуправляемое зеркало 4, установленное в одном из оптических плечей спекл-интерферометра. Управление пьезоэлементом 11 осуществляется путем подачи на него напряжения с выхода цифрового аналогового преобразователя 10. Изменение напряжения, подаваемого на пьезоэлемент, вызывает поступательное смещение зеркала, которое закрепляется на его поверхности, что приводит к изменению на определенное значение фазы в картине интерференционных полос по всему полю наблюдения, которое прямо пропорционально изменению подаваемого на пьезоэлемент напряжения.

Для определения остаточных напряжений в элементах и узлах конструкций на основе представленной оптической схемы разработан малогабаритный прибор, который устанавливается непосредственно на поверхность исследуемого объекта (рис. 7).

Измерения выполняются в следующей последовательности. Спекл-интерферометр устанавливается на поверхности объекта. Отраженная световая волна, характеризующая исходное состояние контролируемого участка, с помощью CCD-камеры преобразуется в аналоговый сигнал, который вводится в память компьютера. После упругой разгрузки напряжений путем сверления несквозного отверстия диаметром 1,0...1,5 мм и глубиной 0,4...1,5 мм отраженная световая волна аналогичным образом вводится в память компьютера. После компьютерной обработки данных об этих двух световых волнах на мониторе появляется картина интерференционных полос, расположенная вокруг отверстия. Она содержит информацию о значениях остаточных напряжений в контролируемой точке исследуемого объекта.

Для пластины со сквозным отверстием, которая находится в поле напряжений, значения перемещений точек на поверхности объекта вокруг отверстия могут быть вычислены с использованием зависимостей, полученных в работе [12]. Поскольку аналогичная задача для пластины с несквозным отверстием аналитического решения не имеет, то используются эмпирические формулы, приведенные в работе [16]. Зависимость перемещений  $u_r$  и  $u_\theta$ , возникающих в результате разгрузки напряжений  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  и  $\tau_{xy}$  на некотором расстоянии  $r$  от центра отверстия, от угла  $\theta$  имеет вид

$$u_r(r, \theta) = A(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + B[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cos 2\theta + 2\tau_{xy} \sin 2\theta]; \quad (6)$$

$$u_\theta(r, \theta) = C[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \sin 2\theta - 2\tau_{xy} \cos 2\theta], \quad (7)$$

Результаты определения остаточных напряжений вдоль сечений I-IV

| R, мм      | Радиальные $\sigma_{rr}$ , МПа | Окружные $\sigma_{\theta\theta}$ , МПа |
|------------|--------------------------------|--|
| <i>I</i>   |                                |  |
| 112        | 6                              | 218                                    |
| 122        | 29                             | 196                                    |
| 132        | 37                             | 165                                    |
| 195        | 55                             | 125                                    |
| 202        | 83                             | 128                                    |
| 282        | 28                             | -138                                   |
| 292        | 44                             | -128                                   |
| 302        | 43                             | -121                                   |
| <i>II</i>  |                                |  |
| 122        | 23                             | 195                                    |
| 132        | 43                             | 166                                    |
| 142        | 23                             | 154                                    |
| 195        | 56                             | 145                                    |
| 202        | 89                             | 141                                    |
| 282        | 38                             | -143                                   |
| 292        | 57                             | -126                                   |
| 302        | 38                             | -136                                   |
| <i>III</i> |                                |  |
| 112        | 2                              | 231                                    |
| 122        | 11                             | 209                                    |
| 132        | 32                             | 180                                    |
| 195        | 40                             | 155                                    |
| 202        | 89                             | 149                                    |
| 282        | 41                             | -159                                   |
| 292        | 34                             | -150                                   |
| 302        | 38                             | -116                                   |
| 302        | 38                             | -117                                   |
| <i>IV</i>  |                                |  |
| 122        | 29                             | 216                                    |
| 132        | 28                             | 178                                    |
| 142        | 40                             | 163                                    |
| 195        | 49                             | 145                                    |
| 202        | 75                             | 143                                    |
| 282        | 57                             | -136                                   |
| 292        | 32                             | -124                                   |
| 302        | 43                             | -104                                   |

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от механических свойств материала, расстояния от центра отверстия до точки измерения, его диаметра и не зависящие от вида напряженного состояния.

Для экспериментального определения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  разработаны методика и оборудование. Методика предполагает создание одноосного напряженного состояния в специальном тестовом образце с известным уровнем напряжений.

В нагруженном образце высверливалось отверстие и с помощью спекл-интерферометра в его зоне выполнялось измерение компонент вектора перемещений. В исследуемых точках по данным о перемещениях вычисляли значение эмпирических коэффициентов; с целью дополнительной проверки их определяли также методом конечных элементов по разработанному алгоритму. Полученные результаты показали, что результаты численного определения значений коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  хорошо согласуются с экспериментальными.

Разработанная методика предполагает измерение компоненты перемещений  $u_x(r, \theta)$  на постоянном расстоянии от центра отверстия. Используя уравнения (6) и (7),  $u_x$  можно представить в виде

$$u_x(\theta) |_{r=2,5r_0} = F(\theta)\sigma_{xx} + G(\theta)\sigma_{yy} + H(\theta)\tau_{xy}, \quad (8)$$

где

$$F(\theta) = (A + B \cos 2\theta) \cos \theta - C \sin 2\theta \sin \theta;$$

$$G(\theta) = (A - B \cos 2\theta) \cos \theta + C \sin 2\theta \sin \theta;$$

$$H(\theta) = 2B \sin 2\theta \cos \theta + 2C \cos 2\theta \sin \theta —$$

функции, зависящие от коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и угла  $\theta$ .

Определение остаточных напряжений предложенным методом выполняется в следующей последовательности:

на расстоянии  $2,5r_0$  от центра высверленного отверстия радиусом  $r_0$  выбираются точки под произвольным углом относительно оси освещения и с помощью спекл-интерферометра измеряются перемещения на поверхности исследуемого объекта; по данным о перемещениях с использованием (8) метода наименьших квадратов вычисляются компоненты  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  и  $\tau_{xy}$  тензора напряжений; определяются значения главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и угол  $\eta$  между осью освещения спекл-интерферометра и направлением  $\sigma_1$  по формулам

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2};$$

$$\eta = \begin{cases} \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} \right), & \text{если } \sigma_{xx} > \sigma_{yy}, \\ \frac{\pi}{4}, & \text{если } \sigma_{xx} = \sigma_{yy}, \\ \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} \right), & \text{если } \sigma_{xx} < \sigma_{yy}. \end{cases}$$

Для оценки точности измерения плоскостных перемещений с помощью малогабаритного спекл-интерферометра и автоматизированной компьютерной обработки интерферограмм использовали решение известной задачи об изгибе консоли

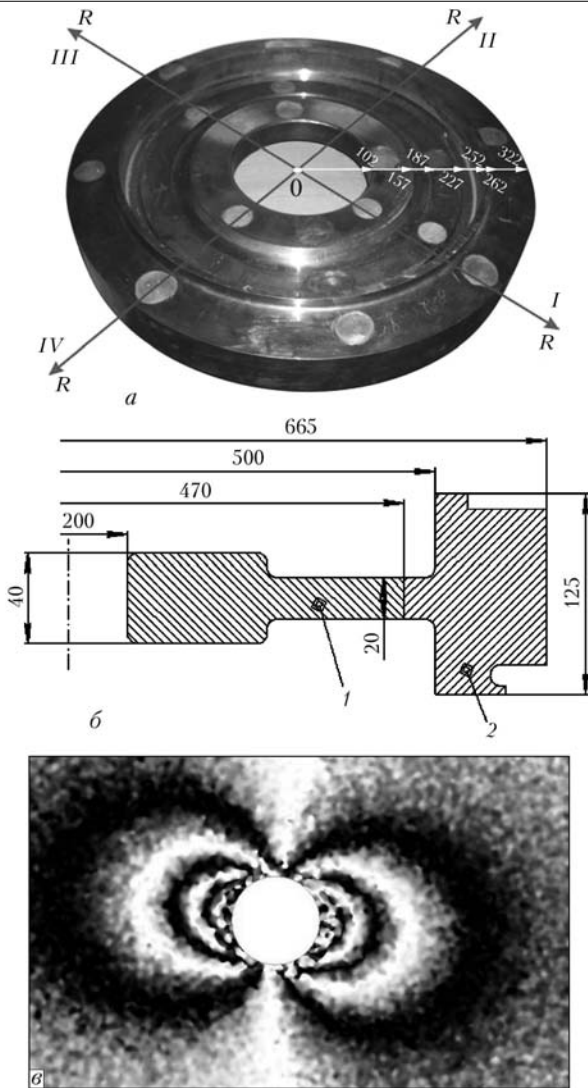


Рис. 8. Общий вид (а) и геометрические размеры (б) диска ротора газотурбинного двигателя и типичная картина интерференционных полос вокруг высверленного отверстия (в): 1 — ступица; 2 — обод

ной балки с заделанным концом силой, приложенной к свободному концу. Эксперименты показали, что отклонения значений напряжений, которые определяли спекл-интерферометрическим методом, от расчетных не превышали 5 % предела текучести исследуемого материала [17].

Методику определения остаточных напряжений и созданную аппаратуру применяли для исследования остаточного напряженного состояния сварного диска ротора газотурбинного двигателя. Диск изготавливался из хромоникелевой стали мартенситного типа 07X12НМБФ-Ш (ЭП-609Ш), применяемой в турбостроении и состоял из двух деталей — ступицы 1 и обода 2 (рис. 8, б), которые соединялись с помощью сварки. Диск работает при воздействии на него высоких нагрузок и температуры, вызывающих ползучесть материала диска, и неравномерном по радиусу и непостоянном во времени распределении температур, обуславливающих наложение часто периодически из-

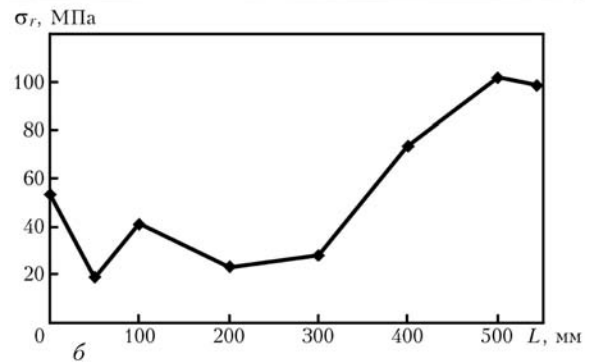
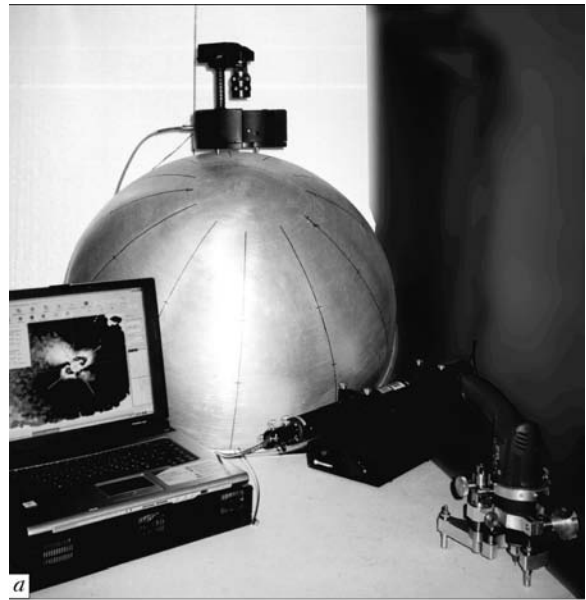


Рис. 9. Внешний вид полусферической оболочки переменной толщины (а) и распределение остаточных напряжений  $\sigma_r$  вдоль ее образующей  $L$  (б)

меняющихся во времени температурных напряжений. С целью повышения работоспособности диска ротора разработана новая технология его изготовления с применением электронно-лучевой сварки. Благодаря узкому и глубокому проплавлению, а также малой зоне термического влияния обеспечиваются требуемые прочностные характеристики диска.

Остаточные напряжения определялись в сечениях I–IV (рис. 8, а) в точках, расположенных на различных расстояниях  $R$  от центра диска. Значения вычисленных остаточных напряжений приведены в таблице; типичная картина интерференционных полос вокруг высверленного отверстия представлена на рис. 8, в.

Анализ полученных результатов показал, что остаточные напряжения на поверхности ступицы и обода распределяются неравномерно. В отличие от ступицы на поверхности обода действуют сжимающие напряжения, что благоприятно сказывается на работоспособности диска. Технология изготовления сварного диска ротора турбины с применением электронно-лучевой сварки обеспечивает выполнение требований нормативных доку-



ментов к прочности диска и не приводит к возникновению высоких остаточных напряжений.

Разработанная методика определения остаточных напряжений использовалась также для исследования технологических напряжений, которые возникали при изготовлении из алюминиевого сплава полусферических оболочек переменной толщины диаметром 760 мм, которые применяются в аэрокосмической промышленности (рис. 9, а). Кривая распределения остаточных напряжений  $\sigma_r$  вдоль образующей приведена на рис. 9, б. На основе анализа результатов исследования указанных напряжений усовершенствована технология изготовления оболочечных конструкций, при которой образуются минимальные остаточные напряжения.

Таким образом, разработанные методика и аппаратура для определения остаточных напряжений в элементах тонкостенных конструкций, основанные на методе электронной спекл-интерферометрии в сочетании с зондирующим отверстием, позволяют оперативно и с высокой точностью исследовать распределение напряжений по поверхности контролируемых объектов, что открывает новые возможности для диагностики напряженного состояния в лабораторных и производственных условиях.

1. *Неразрушающий контроль и техническая диагностика* / Под ред. З. Т. Назарчука. — Львов: Физико-механ. ин-т, 2001. — 1134 с.
2. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Книга, 2001. — 840 с.
3. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справ.* / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1995. — 488 с.
4. *Rastorgi P. K.* Trends in optical nondestructive testing and inspection. — Amsterdam-Lausanne: Elsevier, 2000. — 633 p.
5. *Методика, технология и аппаратура широгографического неразрушающего контроля материалов и элементов кон-*

- струкций / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. — 2004. — № 3. — С. 1–4.
6. *Ruud C. O.* A review of selected non-destructive methods for residual stress measurement // J. of Pressure Vessels and Piping. — 1985. — **15**. — P. 15–23.
7. *Prevey P. S.* Current application of X-ray diffraction for residual stress measurement // Development in materials characterization technologies. — N. Y.; London: ASME, 1995. — P. 103–110.
8. *Non-destructive determination of residual stresses in welded components using neutron diffraction* / C. Albertini, G. Bruno, P. Calbucci et al. // Welding Intern. — 1998. — **12(9)**. — P. 698–703.
9. *Jiles D. C.* Effects of stress on the magnetic properties of steels // Review of progress in quantitative nondestructive evaluation / Ed. D. Thompson, D. Chimenti. — N.Y.: Plenum Press, 1997. — **16**. — P. 1739–1746.
10. *Oda I., Iwasaki S., Gyotoku H.* Non-destructive evaluation of residual stress and mechanical stress relief by acoustoelasticity // Welding Intern. — 1992. — **6(3)**. — P. 188–193.
11. *E837–99.* ASRM-Standard: Standard test method for determining residual stresses by the hole drilling strain-gage method. — Publ. 03.01.2001.
12. *Лобанов Л. М., Пивторак В. А.* Развитие голографической интерферометрии для исследований напряженно-деформированных состояний и контроля качества сварных конструкций // Сучасне матеріалознавство: XXI сторіччя. — К.: Наук. думка, 1998. — С. 620–636.
13. *Оперативное определение остаточных напряжений с использованием электронной спекл-интерферометрии* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий, Г. И. Ткачук // В мире неразруш. контроля. — 2005. — № 1. — С. 10–13.
14. *Джоунс Р., Уайкс К.* Голографическая и спекл-интерферометрия. — М.: Мир, 1986. — 328 с.
15. *Pramod K.* Holographic interferometry. Principles and methods. — Berlin: Springer-Verlag, 1994. — 328 p.
16. *Makino A., Nelson D.* Residual stresses determination by single-axis holographic interferometry and hole-drilling. Pt.I: Theory // Exp. Mech. — 1994. — **34**. — P. 66–78.
17. *Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий, Г. И. Ткачук // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 25–30.

Methods of non-destructive quality control and determination of stress- strain state and residual stresses of welded joints and structures using electron shearography and speckle-interferometry were developed. The compact shearography and speckle-interferometry measuring systems have been created allowing examination of welded structures under the conditions of their manufacture and service. Computer systems for processing interferograms and determination of fields of displacements, deformations and stresses are presented.

Поступила в редакцию 01.03.2008