

# ДИАГНОСТИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ

Л. М. ЛОБАНОВ<sup>2</sup>, В. А. ЗНОВА<sup>1</sup>, В. А. ПИВТОРАК<sup>2</sup>, И. В. КИЯНЕЦ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГП «АНТОНОВ». 03062, г. Киев, ул. Академика Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

<sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Разработана технология неразрушающего контроля качества композиционных элементов авиационных конструкций, позволяющая эффективно выявлять внутренние дефекты (расслоения, утонения, разрушение волокон композита и др.), которые могут вызвать под действием внешней нагрузки концентрацию напряжений. Метод может использоваться как в процессе производства и эксплуатации конструкций, так и при техническом обслуживании и ремонте. Библиогр. 7, рис. 11.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль качества, диагностика авиационных конструкций, композиты, широгрaфия

Развитие ведущих отраслей авиационной промышленности, применение новых металлических и композиционных материалов тесно связаны с решением проблем повышения надежности и долговечности авиационных конструкций, которые работают в условиях сложного механического воздействия и температурных градиентов. Концентрация напряжений, возникающая в зоне дефектов, в ряде случаев вызывает разрушение таких конструкций. В настоящее время для выявления дефектов в материалах и конструкциях разработана группа таких неразрушающих методов, как рентгеновский, радиографический, ультразвуковой, люминесцентный, вихревых токов и др. [1–3]. Каждый из этих методов имеет свои недостатки и преимущества, однако ни один из них не является универсальным и не удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к средствам и методам неразрушающего контроля.

Между тем инженерная практика ставит все новые задачи перед неразрушающими методами, для решения которых необходимы новые методы испытаний, позволяющие получать более полную информацию об объекте контроля. К таким методам относится метод электронной широгрaфии, который не является альтернативой другим экспериментальным методам механики твердого деформируемого тела, а дополняет их [4–6].

Метод электронной широгрaфии позволяет получать по всей поверхности контролируемого участка объекта картину распределения деформаций, возникающих в результате приложения к объекту определенной нагрузки. Даже без дальнейшего углубленного анализа эта картина дает возможность получать полезную для задач кон-

троля информацию, позволяя обнаруживать различные дефекты.

Возможность использования электронной широгрaфии в области дефектоскопии объясняется следующим. Любые неоднородности структуры материала (трещины, отслоения и т.д.) можно рассматривать как включение элементов с разной степенью жесткости, приводящих к дискретности физико-механических характеристик материала. Это является причиной формирования локальных возмущений силового поля и концентрации напряжений и деформаций в околodefектной области объекта, подвергаемого внешним нагрузкам. Поэтому, если величина аномальной деформации поверхности объекта при его нагружении, обусловленная наличием дефекта, превышает нижний предел чувствительности используемого широгрaфического интерферометра, такой дефект проявляется локальным изменением интерференционной картины полос. Непосредственное влияние дефекта на вид интерференционной картины позволяет осуществлять контроль на основе анализа интерферограммы не прибегая в большинстве случаев к ее количественной обработке, что снижает время контроля и дает возможность использовать метод в условиях производства.

Надежность выявления дефектов на основе анализа интерферограмм определяется, в первую очередь, правильным учетом следующих двух факторов. Во-первых, выбором оптимального вида нагружения объекта, т. е. создание такого напряженного состояния, которое приводит к наибольшим различиям в распределении деформаций на поверхности объекта в дефектных и бездефектных участках. Во-вторых, использованием при

проведении исследований широкографического интерферометра, имеющего наибольшую чувствительность производной от одной из компонент вектора перемещений ( $u$ ,  $v$  и  $w$ ), на распределение которой при данном типе нагружения в наибольшей степени влияет наличие дефекта.

Чувствительность широкографического интерферометра на основе интерферометра Майкельсона к производной  $\partial w/\partial x$  или  $\partial w/\partial y$  (из плоскости объекта) значительно выше, чем к производным  $\partial u/\partial x$ ,  $\partial u/\partial y$ ,  $\partial v/\partial x$  или  $\partial v/\partial y$  (перемещения  $u$ ,  $v$  в плоскости объекта). Поэтому при проведении неразрушающего контроля качества различных объектов, направления освещения и наблюдения выбирают по возможности ближе к нормали к поверхности объекта. В этом случае для темных и светлых интерференционных полос на широкограмме получают следующие зависимости [5, 7]:

для темных интерференционных полос:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\delta x} = \frac{(2N+1)\lambda}{4\delta x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\delta y} = \frac{(2N+1)\lambda}{4\delta y}, \quad (2)$$

для светлых интерференционных полос:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\delta x} = \frac{N\lambda}{2\delta x}, \quad (3)$$

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

где  $\Delta\varphi$  – относительная разность фаз;  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения;  $\delta x$  и  $\delta y$  – величины широдвига в выбранных направлениях  $OX$  и  $OY$ ;  $N$  – порядок полосы.

Равенства (1)–(4) позволяют выполнять прямую оценку деформаций из плоскости объекта ( $\frac{\partial w}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial w}{\partial y}$ ) после определения порядка полосы.

Разработанную технологию широкографического НК качества использовали для диагностики тестовых образцов, изготовленных на ГП «АНТОНОВ» из композиционных углеродистых материалов трех типов: однонаправленный композит, мультинаправленный композит и композит, имеющий с двух сторон лакокрасочное покрытие (ЛКП). Тестовые образцы выполняли в виде пластинок размерами 150×100 мм и толщинами 2 и 3 мм (рис. 1) из углеродистых препрегов фирмы «Hexcel» – это материалы, аналогичные используемым для производства тонкостенных панелей оперения транспортного самолета, который изготавливается на предприятии.

После изготовления часть образцов подвергалась удару падающим грузом, который имитирует разрушение согласно регламенту ASTM D7136/D7136M-07. В дальнейшем тестовые образцы испытывались на сжатие (согласно ASTM D7137/

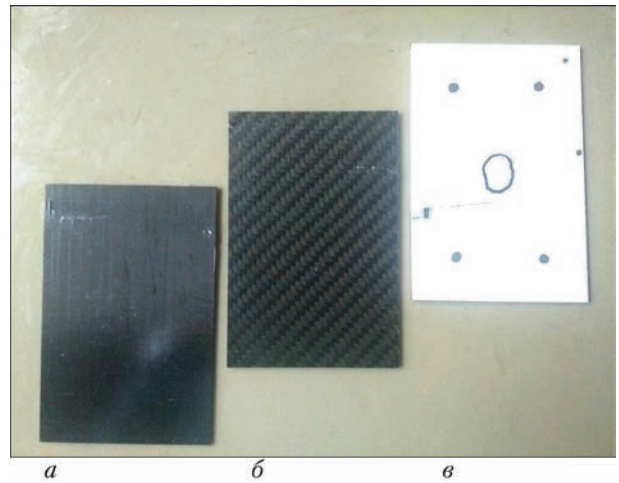


Рис. 1. Общий вид тестовых образцов, изготовленных из композиционных материалов трех типов: однонаправленный (а) и мультинаправленный (б) углеродистые композиты, а также углеродистый композит, покрытый с двух сторон краской (в)

D7137M-07) на базе ГП «АНТОНОВ» с использованием универсальной серво-гидравлической машины УИМ-25, цифрового контроллера MTS FlexGT и специального приспособления, которое обеспечивает условия опирания торцевых и боковых поверхностей образца во время его нагружения со скоростью 1,25 мм/с.

При проведении экспериментов исследуемые образцы размещались вертикально и фиксировались на монтажном столе с помощью механического приспособления. Ширографический интерферометр располагался на расстоянии около 400 мм напротив исследуемого образца, для нагружения которого использовали термический способ в виде обдува лицевой поверхности нагретым воздухом с расстояния около 150 мм.

Контроль тестового композиционного образца выполнялся в следующей последовательности: исследуемый образец освещался лазерным светом, с использованием оптического световода, затем отраженную от контролируемого участка поверхности световую волну, которая характеризует его начальное состояние, записывали с помощью CCD-камеры в память компьютера. После этого поверхность образца, с целью ее деформирования, обдували горячим воздухом (примерно 100 °С) в течение 3...5 с и записывали в память компьютера отраженную световую волну, которая характеризует нагруженное состояние исследуемого образца. С помощью компьютерной программы записанную оптическую информацию обрабатывали для получения широкограммы, картины деформирования контролируемой поверхности образца и кривой распределения производной  $\partial w/\partial x$  или  $\partial w/\partial y$  вдоль выбранного сечения (на представленных рисунках кривая А–А соответствует сечению в зоне с дефектом, а кривая Б–Б – сечению в бездефектной зоне). Резкое локаль-

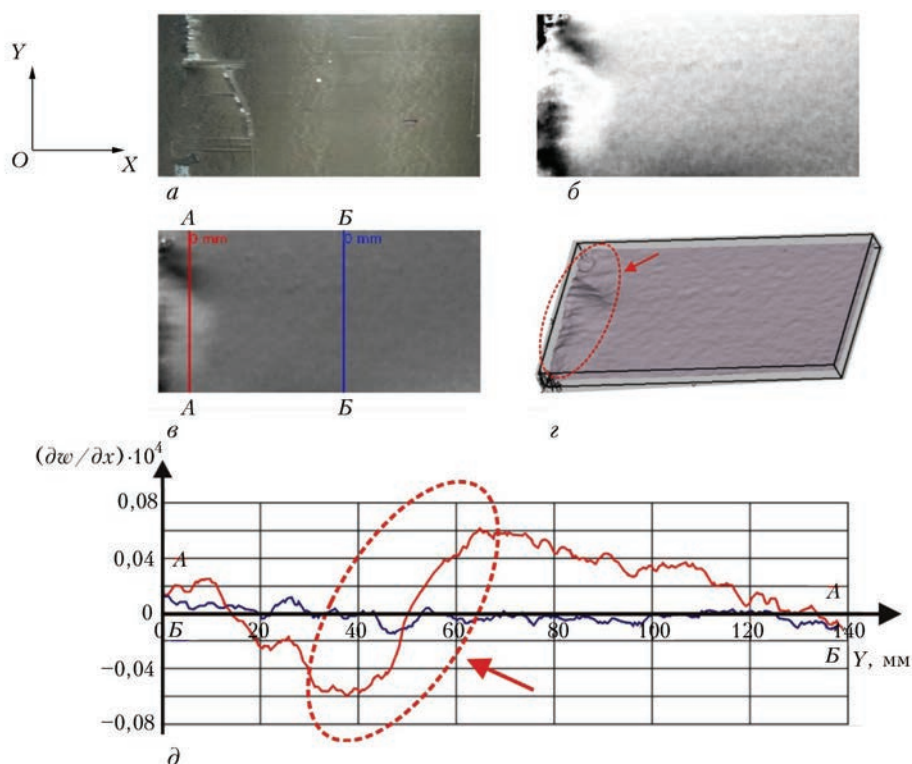


Рис. 2. Результаты широкографического контроля тестовой однонаправленной композитной пластинки толщиной 3 мм после испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом: а – общий вид исследуемой пластинки; б – интерференционная картина контролируемого участка; в – фазовая картина контролируемого участка с нанесенными сечениями; г – трехмерная картина поверхности деформирования контролируемого участка; д – кривая распределения производной  $\partial w / \partial x$  вдоль выбранных сечений (зона дефекта выделена и указана стрелками)

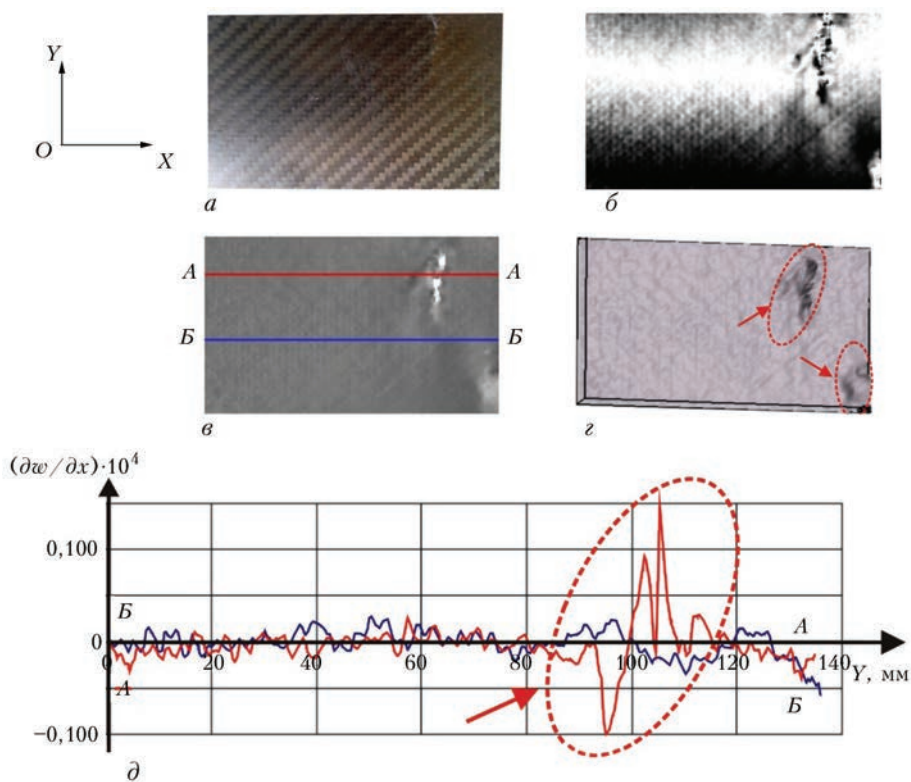


Рис. 3. Результаты широкографического контроля тестовой мультинаправленной композитной пластинки толщиной 2 мм после испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание а–д такие же, как на рис. 2)

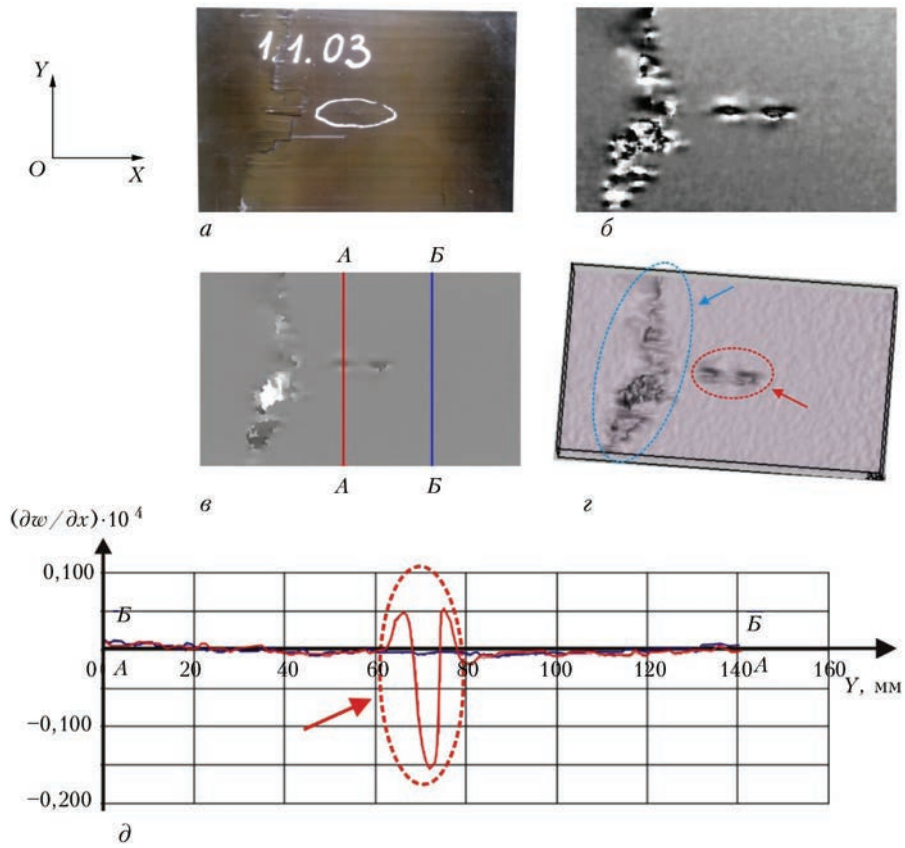


Рис. 4. Результаты широкографического контроля тестовой однонаправленной композитной пластинки толщиной 2 мм после удара и испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание а–д такие же, как на рис. 2)

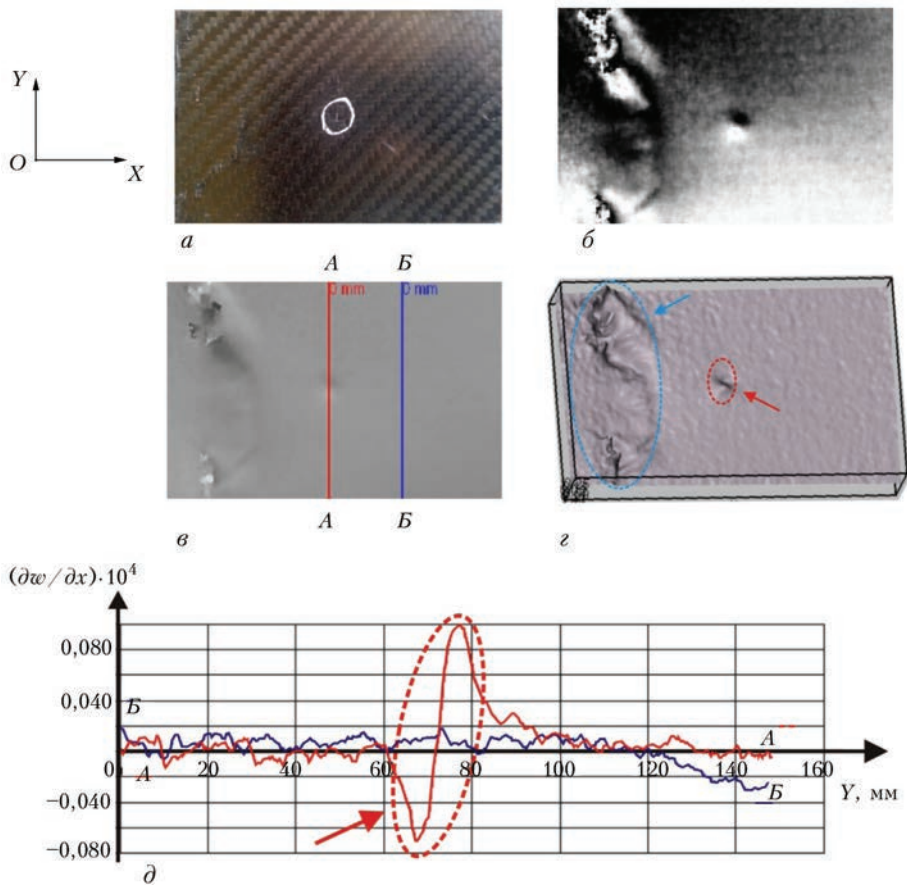


Рис. 5. Результаты широкографического контроля тестовой мультинаправленной композитной пластинки толщиной 3 мм после удара и испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание а–д такие же, как на рис. 2)

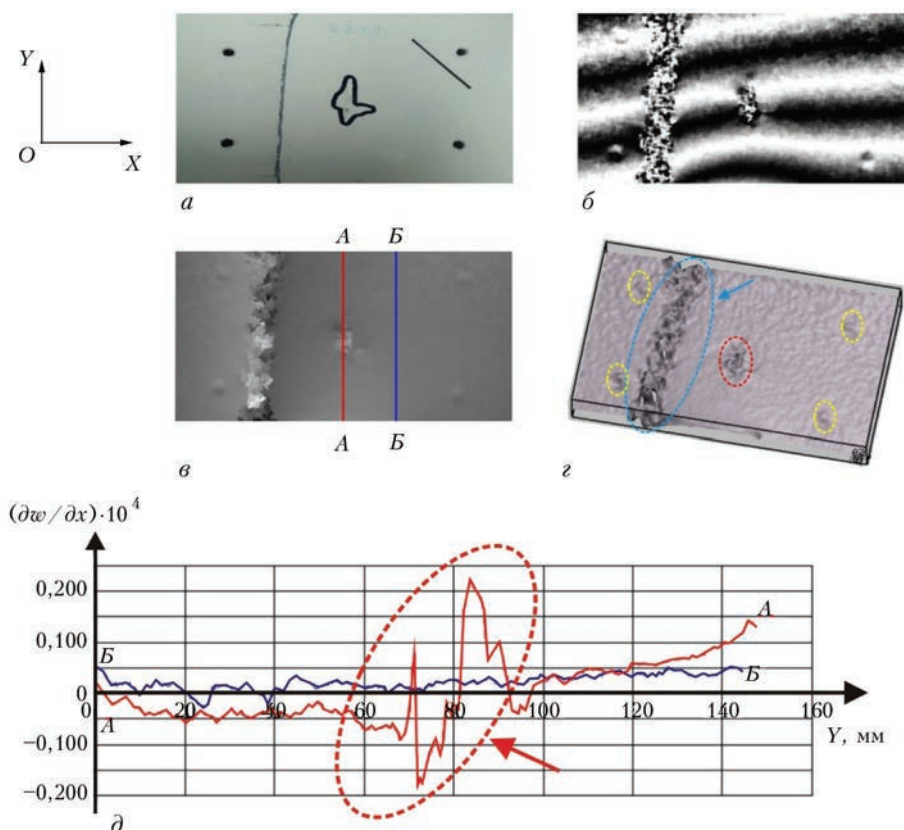


Рис. 6. Результаты широкографического контроля тестовой углеродистой покрытой краской с двух сторон композитной пластинки толщиной 3 мм после удара и испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание *a–d* такие же, как на рис. 2)

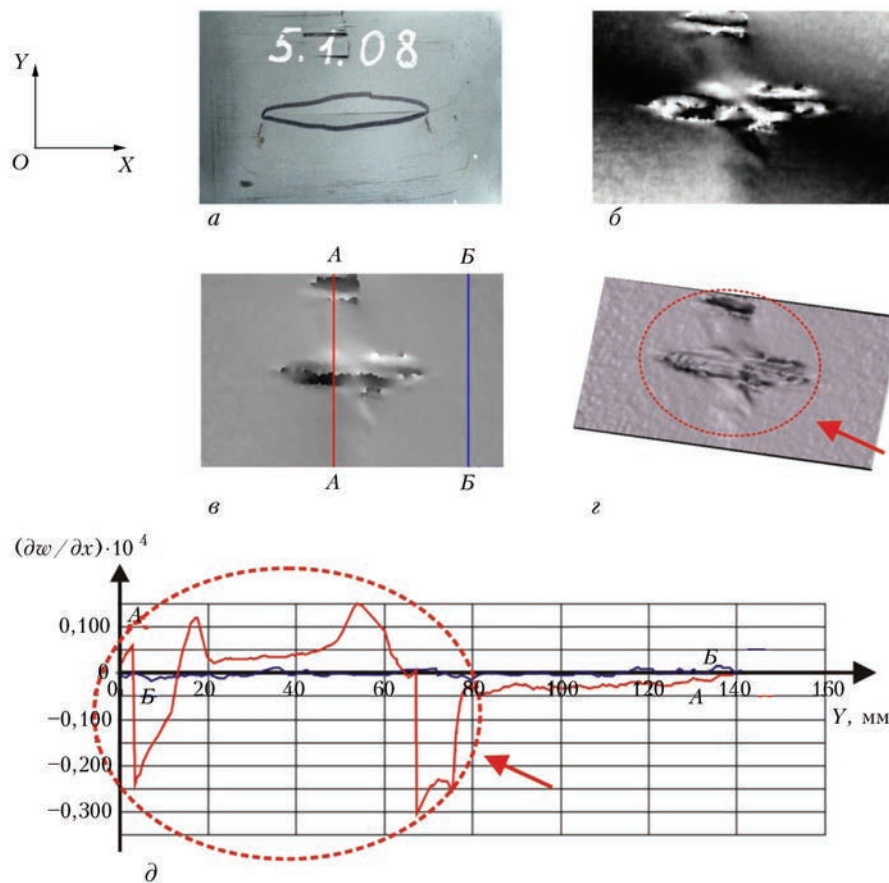


Рис. 7. Результаты широкографического контроля тестовой углеродистой покрытой краской с двух сторон композитной пластинки толщиной 2 мм после удара и испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание *a–d* такие же, как на рис. 2)

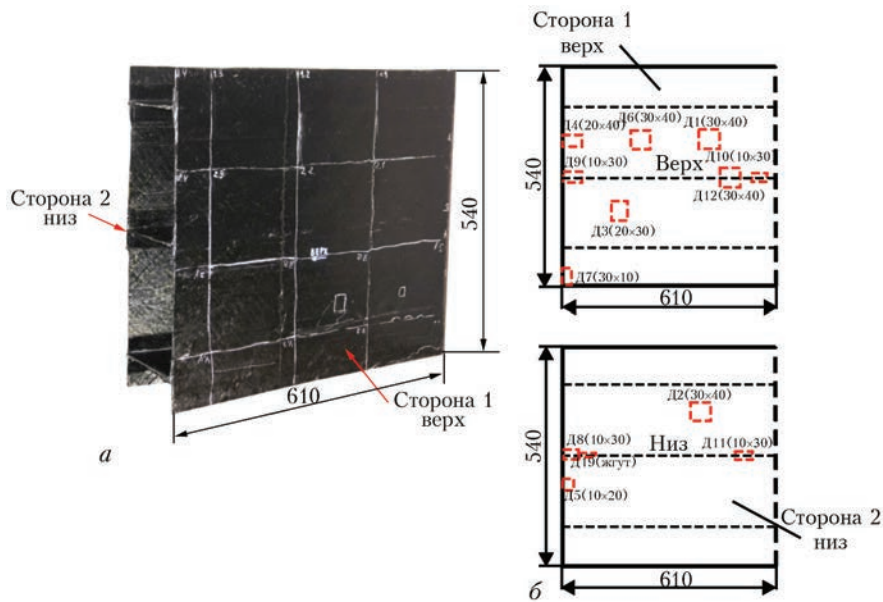


Рис. 8. Общий вид композиционного элемента рулевого отсека (а) и схема расположения внутренних дефектных зон (б)

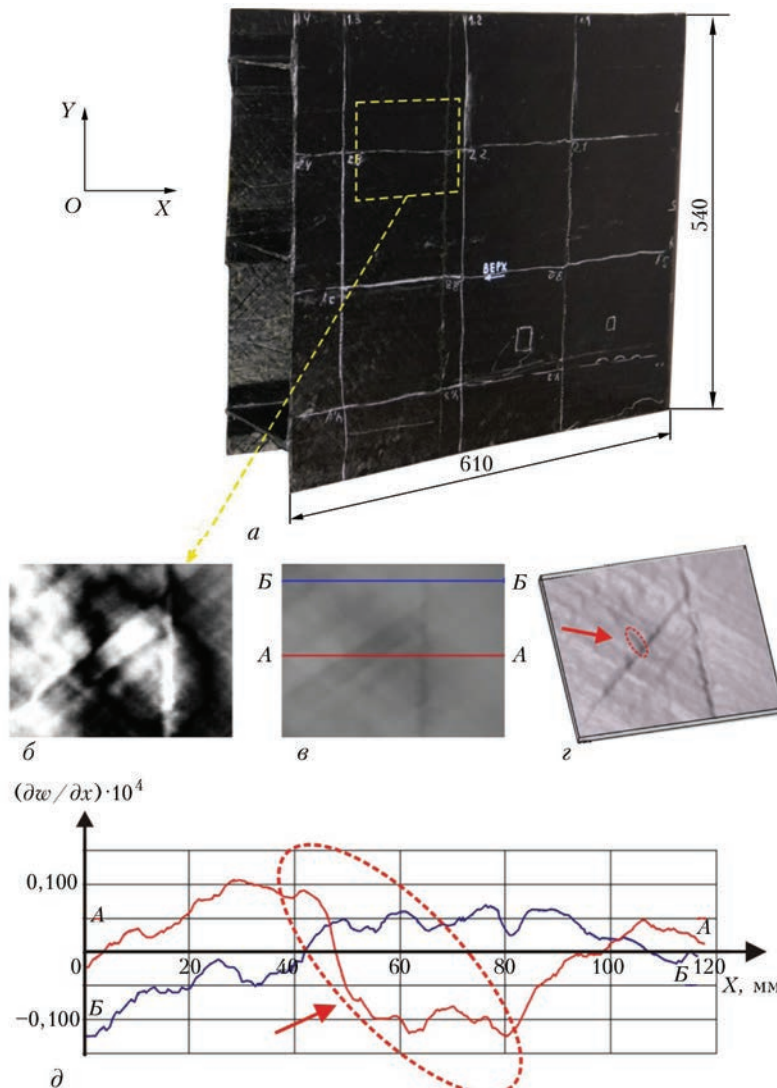


Рис. 9. Результаты широкографического контроля стороны 1 (основной лист) натурального композиционного элемента рулевого отсека при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом: а – общий вид исследуемого элемента с очерченным участком контроля; б – интерференционная картина контролируемого участка; в – фазовая картина контролируемого участка с нанесенными сечениями; г – трехмерная картина поверхности деформирования контролируемого участка; д – кривая распределения производной  $\partial w / \partial x$  вдоль выбранных сечений (дефектная зона выделена и указана стрелками)

ное изменение величины и знака производной на фоне общего незначительного деформирования исследуемой поверхности характеризует наличие дефектной зоны (на рисунках очерчена и отмечена стрелкой).

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что испытание сжатием приводит к появлению зоны расслоения материала (рис. 2, 3), а испытание ударом на участке его приложения, приводит к разрушению волокон (рис. 4–7). На рис. 6 показаны зоны повреждения лакокрасочного покрытия при опирании боковой поверхности образцов во время испытания сжатием.

С использованием созданной технологии выполнялись экспериментальные исследования по контролю качества натурального элемента рулевого отсека, изготовленного из композиционного материала, с известными дефектными зонами. Элемент представлял собой склеенный углепластиковый лист размерами 1220×540×1 мм, согнутый посередине как клин с углом при вершине 20°. В

промежутке между согнутым листом располагались три ребра жесткости в виде клина, которые приклеивались к верхнему и нижнему углепластиковому листу. На рис.8 показаны общий вид контролируемого элемента и схема расположения внутренних дефектных участков.

Учитывая сложность конструкции элемента рулевого отсека, а также то, что главными дефектами такой конструкции являются расслоения и отсутствие клееного соединения ребер жесткости и обшивки, при проведении ширографического неразрушающего контроля, оптимальным является применение теплового нагружения в виде обдува нагретым воздухом с помощью промышленного фена.

При проведении экспериментов исследуемый участок рулевого отсека подвергался обдуву в течение около 3 с теплым воздухом, нагретым до температуры примерно 120° с расстояния 100 мм от контролируемой поверхности. Затем в память компьютера записывалась световая волна, которая характеризует начальное состояние исследуемого участка.

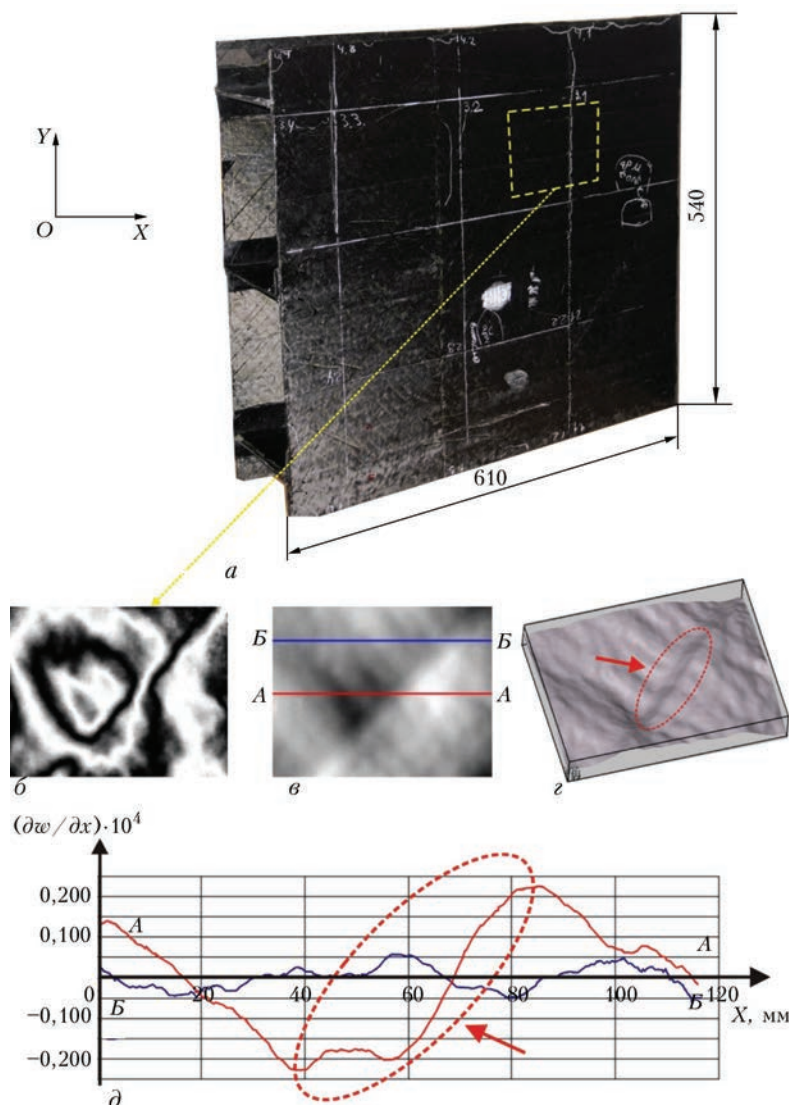


Рис. 10. Результаты ширографического контроля стороны 2 (основной лист) натурального композиционного элемента рулевого отсека при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание а–д такие же, как на рис. 9)

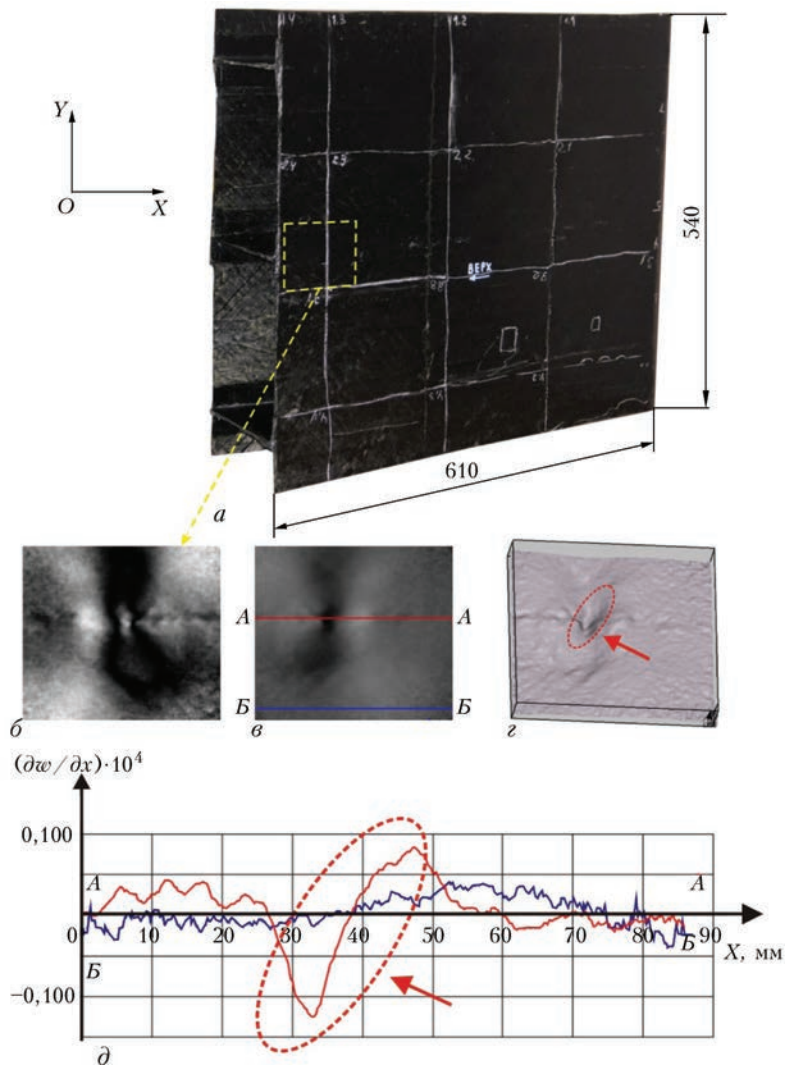


Рис. 11. Результаты широкографического контроля стороны 1 (место соединения ребра жесткости с обшивкой) натурального композиционного элемента рулевого отсека при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание а–д такие же, как на рис. 9)

дуемого участка. На стадии остывания в память компьютера записывалась вторая световая волна, которая характеризует деформированное, вследствие температурного нагружения, состояние исследуемого участка.

На рис. 9 и 10 приведены результаты широкографического контроля элемента рулевого отсека, которые свидетельствуют о наличии дефектов в основном листе. На рис. 11 показаны результаты выявления дефектных участков клееного соединения ребра жесткости с обшивкой.

Анализ приведенных результатов контроля качества показал, что метод электронной широкографии в сочетании с термическим нагружением является эффективным при выявлении внутренних дефектов как в основном листе контролируемого элемента, так и в участках соединения ребер жесткости с обшивкой.

### Выводы

Разработана технология диагностики элементов авиационных конструкций, изготовленных из

композиционных материалов с применением метода электронной широкографии.

Установлено, что для НК качества элементов авиационных конструкций целесообразно использовать оптическую схему для регистрации производных от перемещений  $w$  (внеплоскостные перемещения по нормали к контролируемой поверхности объекта). При этом величина широдвига выбирается в диапазоне от 1 до 10 мм.

Разработанная технология НК качества композиционных элементов авиационных конструкций позволяет эффективно выявлять внутренние дефекты (расслоения, утонения, разрушение волокон композита и др.), которые могут вызвать под действием внешней нагрузки концентрацию напряжений.

Эффективность применения созданной технологии для диагностики композиционных элементов авиационных конструкций подтверждена при проведении экспериментов на тестовых образцах и натурном элементе рулевого отсека самолета. При этом метод электронной широкографии может



использоваться на всех стадиях контроля: от процесса производства конструкций до их эксплуатации, как при техническом обслуживании, так и при их ремонте.

1. Механіка руйнування та міцність матеріалів ; в 8 т. – Т. 5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика. – Львів, Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.
2. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека; под ред. Б. Е. Патона. – К. : Индпром, 2001. – 840 с.
3. Rastorgy P. K. Trends in nondestructive and inspection / P. K. Rastorgy. – Amsterdam-Lausanne: Elsevier, 2000. – 633 p.
4. Діагностика елементів і вузлів конструкцій з використанням метода електронної широкорафії / Л. М. Лобанов,

The technology was developed for non-destructive testing of composite elements of aircraft structures allowing effective detection of internal defects (lamination, thinning, fracture of composite material fiber) which can promote stress concentration under external loading effect. The method can be used during production and structure operation as well as maintenance servicing and repair. Ref. 7, Figures 11.

*Key words* : non-destructive testing, diagnostic of aircraft structures, composite materials, shearography.

- В. А. Пивторак, Е. М. Савицкая [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – С. 7–13.
5. Hung Y. Y. Shearography: An optical measurement technique and applications / Y. Y. Hung, H. P. Ho // Materials Science and Engineering. – 2005. – R49. – P. 61–87.
6. Технология неразрушающего контроля качества элементов и узлов авиационных конструкций методом электронной широкорафии / Л. М. Лобанов, В. Я. Знова, В. А. Пивторак [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 3. – С. 15–18.
7. Технологія неруйнівного контролю матеріалів і елементів конструкцій з використанням електронної широкорафії / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, О. М. Олійник [та ін.] // Методи та прилади контролю якості. – 2003. – № 11. – С. 9–14.

Поступила в редакцию  
07.04.2016



## ВСЕУКРАЇНСЬКА КОНФЕРЕНЦІЯ «СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ. УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДГОТОВКИ КАДРІВ»

7–9 вересня 2016 р.  
м. Маріуполь

- Підвищення якості і ефективності процесів зварювання та інших споріднених технологій
- Проблеми проектування, виготовлення і експлуатації зварних конструкцій
- Система сертифікації продукції зварювального виробництва
- Фізико-хімічні процеси при зварюванні та споріднених процесах
- Контроль якості та надійність зварних конструкцій
- Енерго- та ресурсозбереження у зварюванні
- Удосконалення підготовки кадрів в умовах багаторівневої системи вищої освіти
- Математичне, фізичне, імітаційне моделювання, комп'ютерні та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах
- Механізація та автоматизація у зварюванні та споріднених процесах
- Матеріалознавство у зварюванні та споріднених процесах

РОБОЧІ МОВИ КОНФЕРЕНЦІЇ  
українська, російська, англійська.

До початку роботи конференції будуть видані тези доповідей. Найкращі доповіді будуть рекомендовані для видання в журналі «Вісник ДВНЗ «ПДТУ»».

АДРЕСА ОРГАНІЗАЦІЙНОГО КОМІТЕТУ

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет (ПДТУ), вул. Університетська 7,  
87500, м. Маріуполь, Донецька обл., Україна  
Тел. кафедри: (380) 629 44 65 91, (380) 629 44 62 16  
E-mail кафедри: pstu.edu.oitzv@gmail.com