



УДК 621.791:620.17

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ СПЛАВА ВТ20 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ

Академик НАН Украины Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. ПИВТОРАК, канд. физ.-мат. наук,
Е. М. САВИЦКАЯ, канд. техн. наук, И. В. КИЯНЕЦ, В. В. ЛЫСАК, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено применение современного метода неразрушающего контроля (НК) — электронной ширографии для НК сварных титановых панелей из сплава ВТ20, изготовленных с предварительным упругим растяжением. Показана эффективность использования метода НК титановой панели без демонтажа оснастки для растяжения, что позволяет при необходимости сразу приступить к устранению дефектов.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварные панели, титановый сплав, контроль качества, оперативный контроль, электронная ширография

Создание сварных металлических конструкций, отличающихся экономичностью, высокой надежностью и прочностью при различных условиях эксплуатации, тесно связано с развитием эффективных методов НК их качества. Одним из перспективных методов контроля качества является электронная ширография, которая характеризуется такими преимуществами, как наглядность, бесконтактность, высокая чувствительность, возможность проведения исследований в реальном масштабе времени объектов сложной геометрической формы и больших размеров. Относительная простота этого метода позволяет применять его при решении сложных задач, связанных с анализом деформаций, контролем качества и др. С помощью электронной ширографии можно определять деформации без численного дифференцирования данных. Кроме того, метод нечувствителен к вибрациям, т. е. его можно применять в различных отраслях промышленности при оперативном контроле качества конструкций, изготовленных из металлических и композиционных материалов [1–5].

При практическом применении электронной ширографии для НК качества необходимо учитывать следующие допущения, которые вытекают из оптической схемы ширографического интерферометра:

— размеры исследуемых объектов или их участков должны быть существенно меньше, чем расстояние от источника лазерного света до поверхности контролируемого объекта;

— широмодуль располагается перпендикулярно к контролируемому участку поверхности объекта;

— направление освещения поверхности исследуемого объекта лазерным светом выбирается по возможности ближе к нормали исследуемого участка поверхности объекта.

В этом случае на широграмме для темных и светлых интерференционных полос используются следующие зависимости [6]:

для темных интерференционных полос

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

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

для светлых интерференционных полос

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{N\lambda}{2\delta x},$$

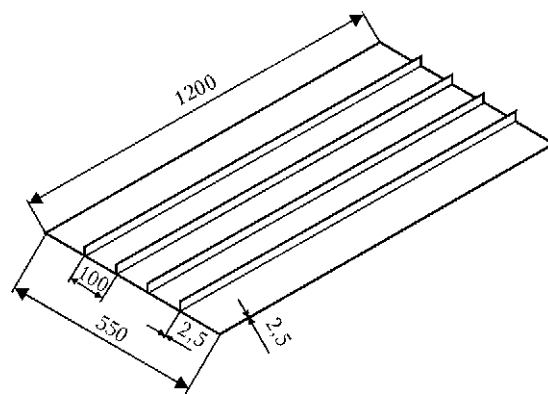


Рис. 1. Схема сварной панели, выполненной из титанового сплава ВТ20

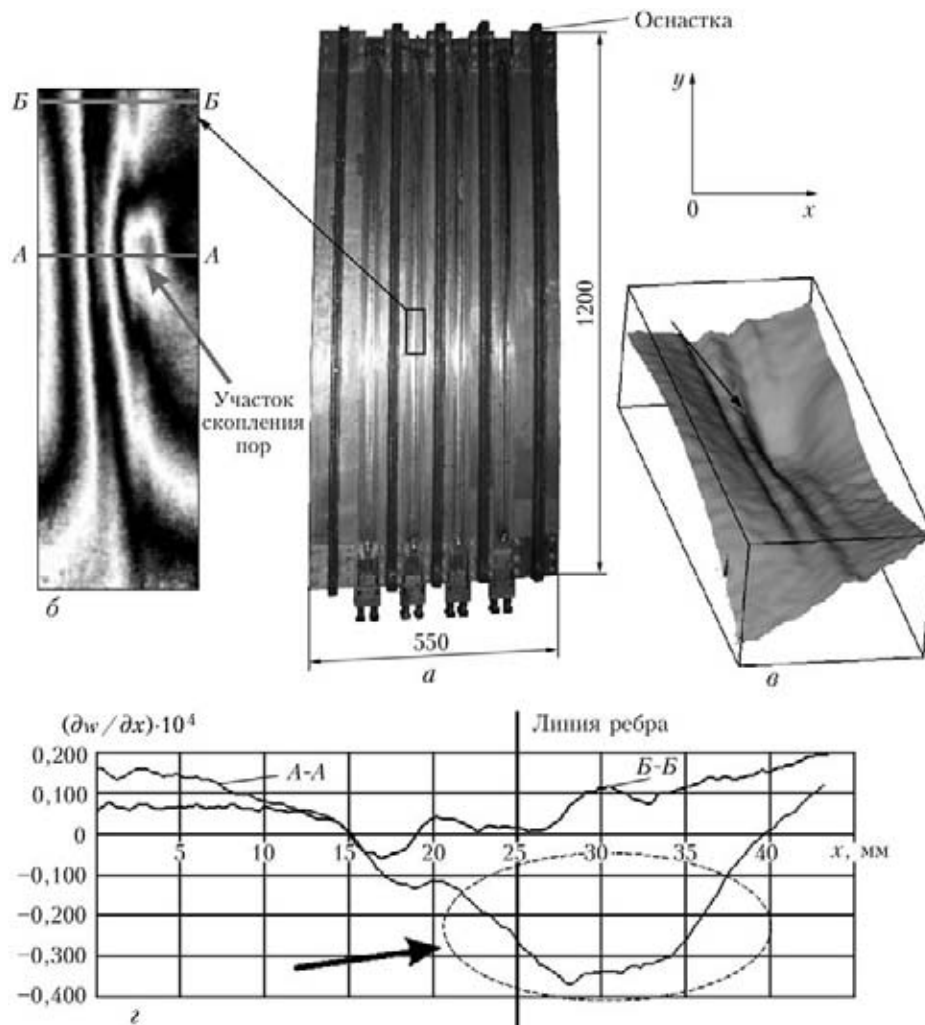


Рис. 2. НК качества титановой панели № 1 с ребрами жесткости, изготовленной в условиях ее предварительного упругого растяжения: *a* — титановая панель в силовой механической оснастке после сварки; *б* — картина интерференционных полос исследуемого участка; *в* — трехмерная картина деформирования контролируемого участка панели; *г* — распределение производных $\partial w/\partial x$ вдоль исследуемых сечений: *A-A* — сечение с дефектом; *B-B* — бездефектное сечение

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{N\lambda}{2\delta y}, \tag{4}$$

где N — порядок полосы; λ — длина волны лазерного источника света; ∂x , ∂y — широмещения соответственно в направлениях осей ox , oy ; $\partial w/\partial x$, $\partial w/\partial y$ — производные от перемещений по нормали к поверхности контролируемого объекта.

С помощью уравнений (1)–(4) можно выполнить прямую оценку деформаций из плоскости объекта после определения порядка полосы.

Технологию НК качества с применением метода электронной широгрaфии использовали для диагностики элементов и узлов конструкций, изготовленных из различных конструкционных материалов [3].

В настоящее время в авиационной и аэрокосмической промышленности все более широкое

применение находят сварные тонкостенные панели с продольными ребрами жесткости, изготовленные из титановых сплавов. Контроль качества таких панелей достаточно трудоемкий и вызывает ряд трудностей. В связи с этим актуальным остается разработка новых методов исследования их качества.

Метод электронной широгрaфии применяли для НК качества стрингерных панелей, выполненных из высокопрочного титанового сплава BT-20 размерами 1200×550×2,5 мм (рис. 1). Четыре продольных ребра жесткости высотой 25 мм и толщиной 2,5 мм приваривали прорезными швами к титановому листу. Расстояние между ребрами составляло 100 мм. Сварку титановых панелей выполняли в условиях их предварительного упругого растяжения. При этом использовали автоматическую аргонодуговую сварку погруженной дугой и автоматическую аргонодуговую сварку неплавящимся электродом по слою активирующего флюса. После сварки титановая панель оставалась в оснастке в растянутом состоянии.

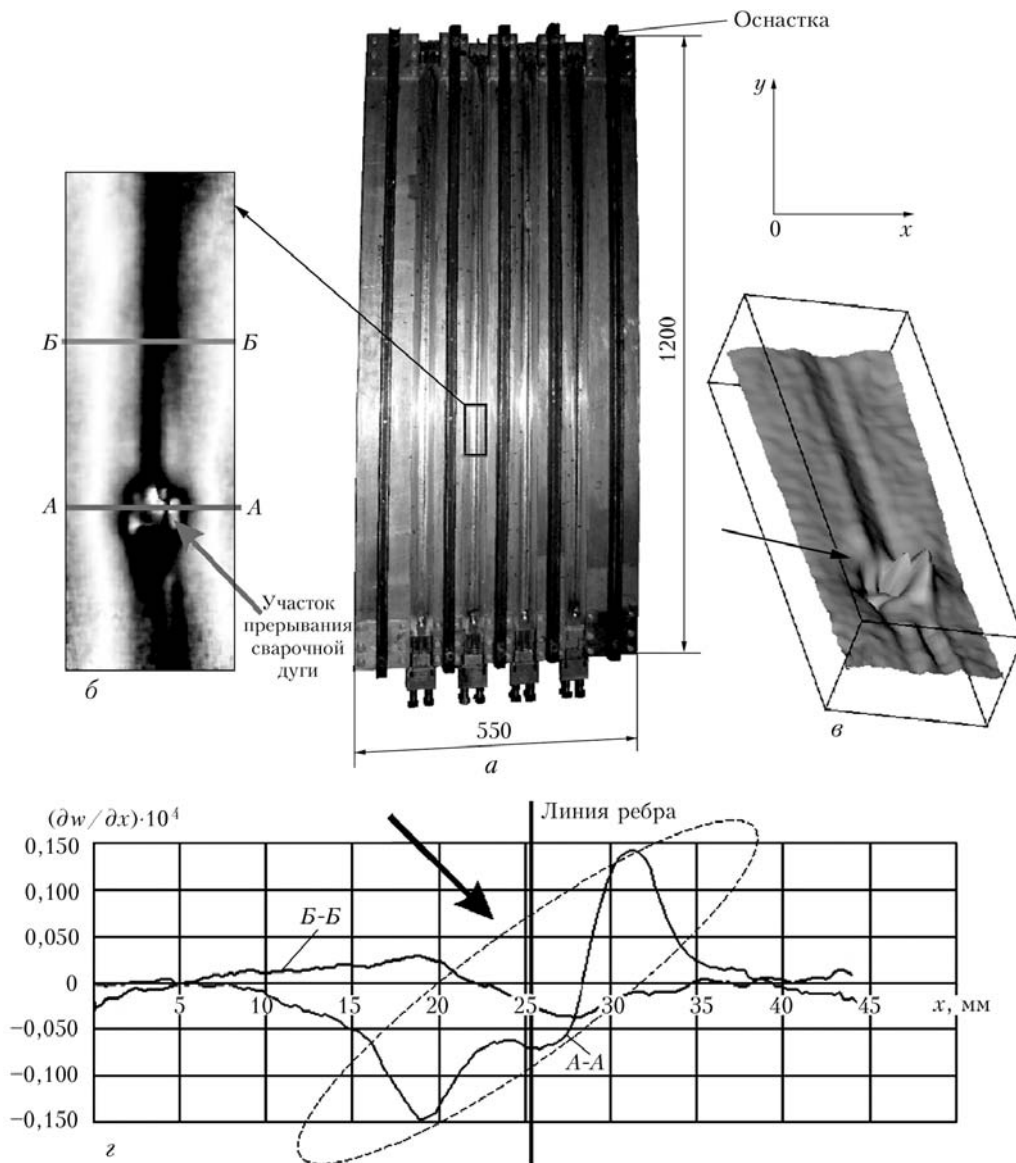


Рис. 3. НК качества титановой панели № 2 с ребрами жесткости, изготовленной в условиях ее предварительного упругого растяжения: а-г — то же, что и на рис. 2

НК качества панелей выполняли в следующей последовательности. Контролируемый участок сварного шва растянутой панели освещали лазерным светом и отраженная световая волна, характеризующая исходное состояние контролируемой поверхности, записывалась в память компьютера. После этого контролируемый участок обдували теплым воздухом с температурой около 50...70 °С в течение 25...40 с, что приводило к его деформации. Затем световую волну, отраженную от деформированного участка исследуемой поверхности, также записывали в память компьютера. С помощью специальной компьютерной программы записанную оптическую информацию обрабатывали до получения широграммы и трехмерной картины деформирования исследуемой поверхности.

Результат контроля сварной панели № 1 из сплава ВТ-20, выполненной автоматической ар-

гонодуговой сваркой погруженной дугой, представлен на рис. 2. На широграмме исследуемого участка сварного шва (рис. 2, б) на общем фоне деформирования видно локальное изменение картины интерференционных полос, что свидетельствует о наличии внутренних дефектов. Построенная трехмерная картина деформирования (рис. 2, в) и кривые распределения производных $\partial w / \partial x$ вдоль выбранных сечений А-А и Б-Б соответственно дефектного и бездефектного (рис. 2, г) подтверждают наличие дефектов на исследуемом участке (показаны стрелкой).

Следует отметить, что в контролируемом участке панели на рис. 2, б приведено сечение А-А, в котором локальное изменение производной имеет наибольшее значение (выполняли анализ нескольких сечений и выбирали сечение с наибольшим локальным значением производной $\partial w / \partial x$).

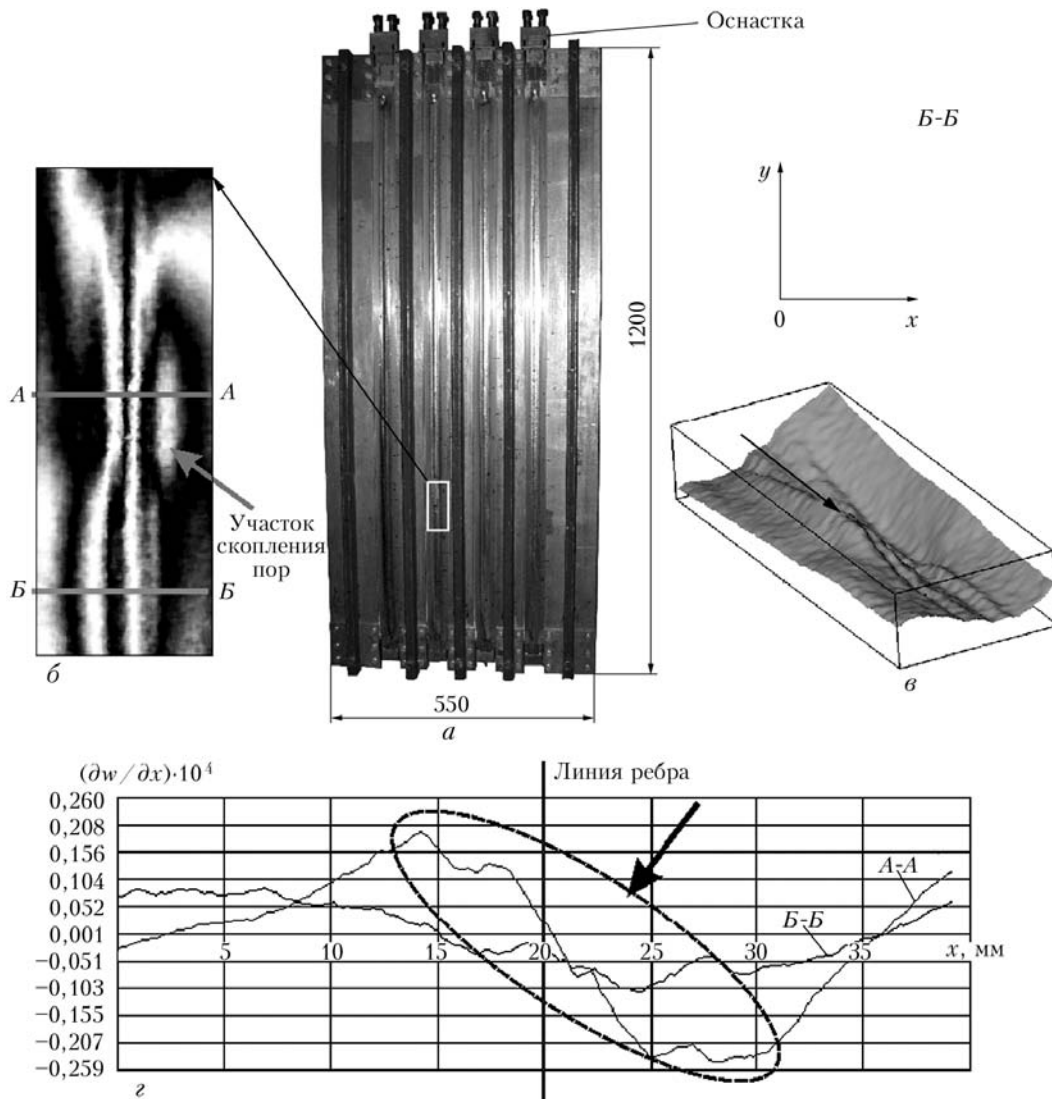


Рис. 4. НК качества титановой панели № 3 с ребрами жесткости, изготовленной в условиях ее предварительного упругого растяжения: а-г — то же, что и на рис. 2

Проведенный рентгеновский контроль качества рассматриваемого участка сварного шва титановой панели из сплава ВТ20 показал наличие в нем скопления пор размером 0,2...0,4 мм.

При исследовании сварной титановой панели № 2 обнаружен участок прерывания дуги, на котором возникает концентрация деформаций в месте остановки сварки (рис. 3, б). Широкографический контроль качества выполняли с использованием аналогичных параметров нагрева, как и в предыдущем случае.

Результаты дальнейшей обработки интерференционных полос до получения трехмерной картины деформирования (рис. 3, в) и построения кривых распределения производных $\partial w / \partial x$ вдоль исследуемых сечений А-А и Б-Б (соответственно, дефектный и бездефектный участки шва) (рис. 3, г) подтвердили наличие локального скачка производной $\partial w / \partial x$ на участке прерывания дуги при сварке панели.

При НК качества сварной панели № 3, выполненной автоматической аргодуговой сваркой погруженной дугой, также выявлены участки с резким изменением производных $\partial w / \partial x$. Результаты контроля качества, полученные на одном из них, представлены на рис. 4.

На трехмерной картине деформирования исследуемого участка шва и кривых распределения производной $\partial w / \partial y$ вдоль сечения А-А виден локальный участок резкого ее изменения (указаны стрелками), что свидетельствует о наличии дефектов в шве (рис. 4, в, г).

Выполненный рентгеновский контроль исследуемого участка шва показал в нем скопление пор размерами 0,2...1,0 мм и включений размерами 0,3 и 0,8 мм.

На рис. 5, б-г показаны соответственно картина интерференционных полос, трехмерная картина деформирования контролируемого участка шва сварной титановой панели № 4, выполненной автоматической аргодуговой сваркой погру-

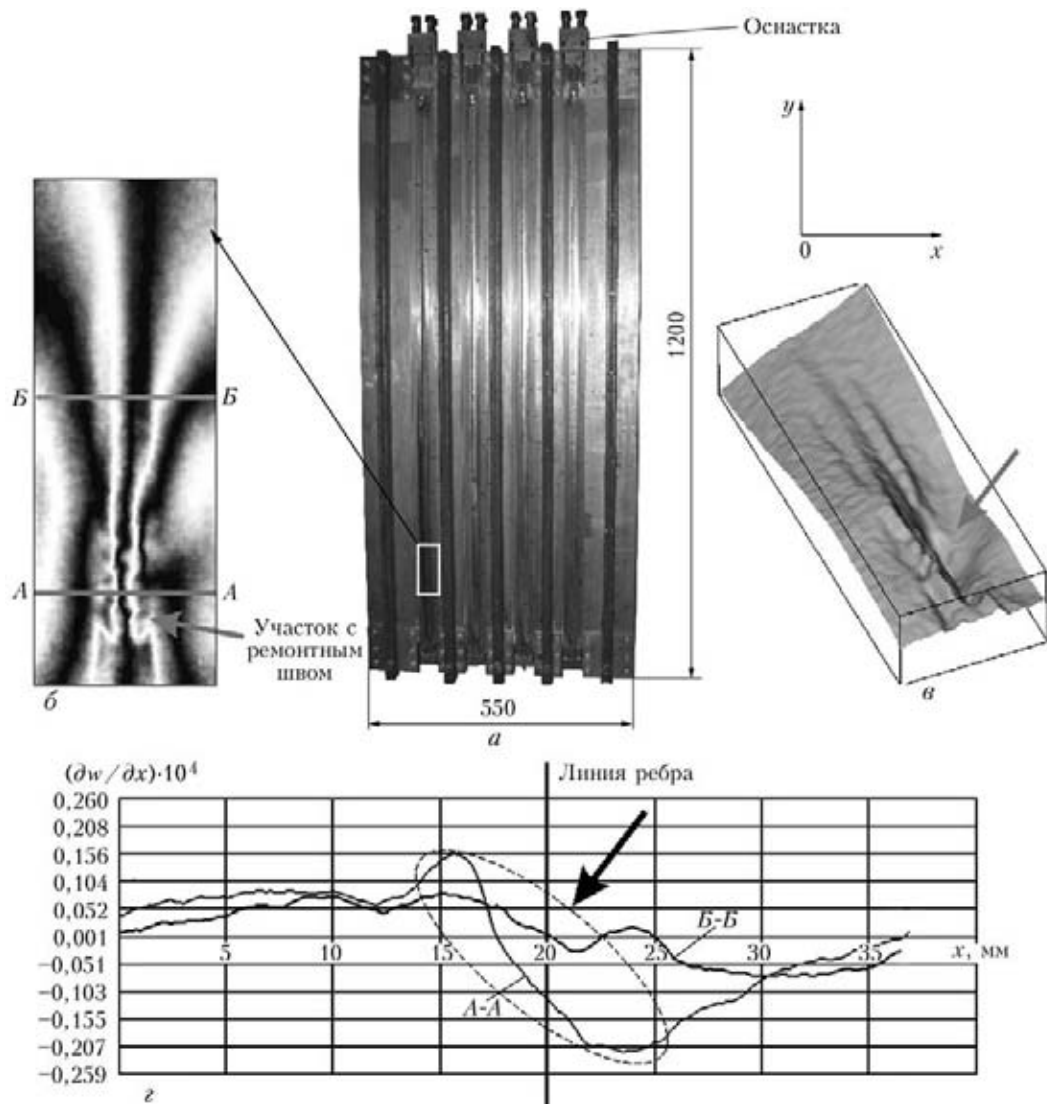


Рис. 5. НК качества титановой панели № 4 с ребрами жесткости, изготовленной в условиях ее предварительного упругого растяжения: а-г — то же, что и на рис. 2

женной дугой, и распределение производных $\frac{dw}{dx}$ вдоль исследуемых сечений А-А и Б-Б на участке сварного шва после его ремонта с применением ручной дуговой сварки.

Наглядно видно, что после ремонта дефектного участка шва наблюдается резкое локальное изменение производной $\frac{dw}{dx}$, что характеризует концентрацию деформаций в восстановленном с помощью ремонта участке шва.

При сварке титановой панели № 5 с применением автоматической аргодуговой сварки неплавящимся электродом по слою активирующего флюса также обнаружен участок шва с локальной концентрацией деформаций, обусловленных скоплением пор (рис. 6, б, в).

Распределение производных $\frac{dw}{dx}$ вдоль исследуемых сечений А-А и Б-Б показано на рис. 6, г. Резкое изменение производной $\frac{dw}{dx}$ в сечении А-А на исследуемом участке сварного шва характеризует его дефектность.

Таким образом, проведенная серия экспериментов по бесконтактному НК качества сварных титановых панелей с ребрами жесткости, изготовленных из сплава ВТ20 и выполненных в условиях их предварительного упругого растяжения, показала, что метод электронной ширографии позволяет оперативно исследовать качество сварных панелей и определять дефектные участки сварных швов. Особенно важным является то, что метод позволяет без демонтажа оснастки для растяжения титановой панели выявлять дефекты и в случае необходимости сразу приступать к их устранению.

При сварке титановых панелей следует также учитывать, что прерывание сварочной дуги при выполнении шва и ручная ремонтная сварка участков шва вызывают локальную концентрацию деформаций, что может привести к снижению ресурса их работы при воздействии эксплуатационных нагрузений.

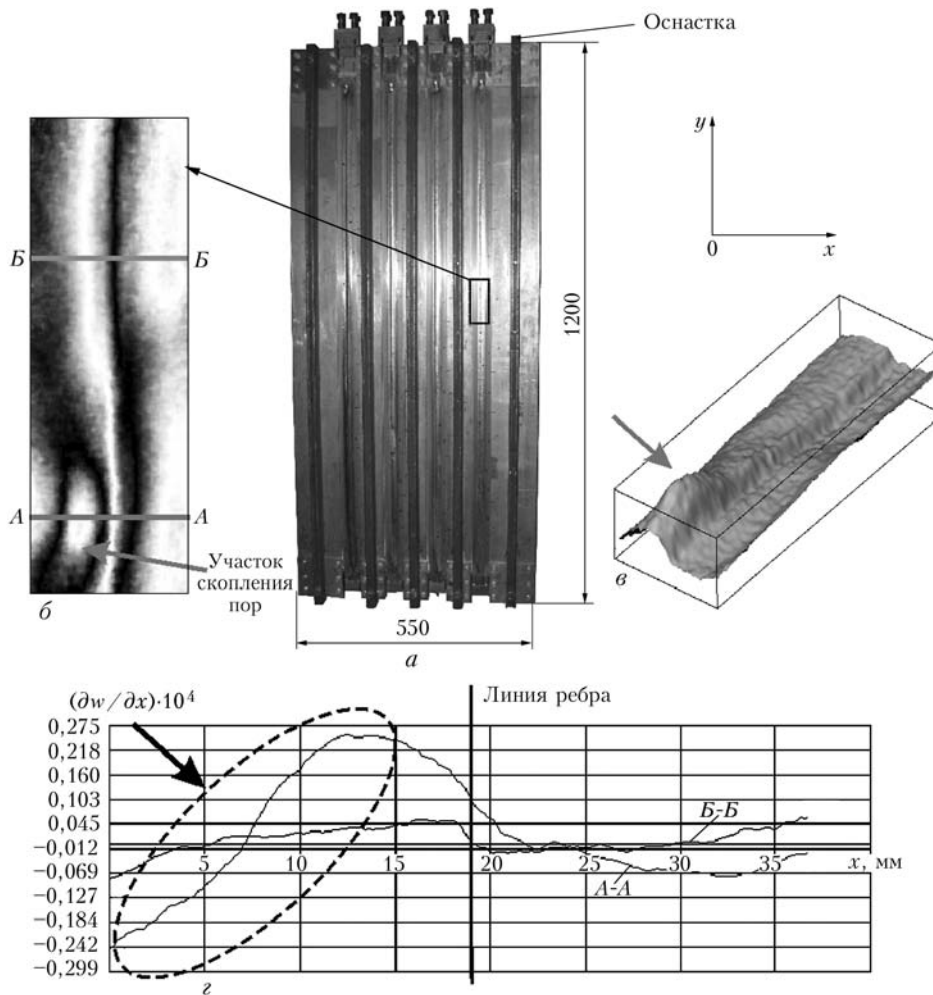


Рис. 6. НК качества титановой панели № 5 с ребрами жесткости, изготовленной в условиях ее предварительного упругого растяжения: а-в — то же, что и на рис. 2; б — картина интерференционных полос на участке скопления пор

1. *Rastogi P. K.* Trends in optical nondestructive testing and inspection. — Amsterdam–Lausanne: Elsevier, 2000. — 633 p.
2. *Методика, технология и аппаратура широкографического 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. 1–4.
3. *Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной широкографии* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Савицкая, И. В. Киянец // Там же. — 2008. — № 4. — С. 7–13.
4. *Newman J. W.* Holographic and Shearographic NDT. Application in Aerospace Manufacturing // *Materials Evaluation*. — 2005. — № 7. — P. 746–750.
5. *Collrep J., Krupka R., Siebert T.* Industrial applications of shearography for inspection of aircraft components // *NDT World Review*. — 2007. — **36**, № 6. — P. 28–31.
6. *Hung Y. Y., Ho H. P.* Shearography: An optical measurement technique and applications // *Materials Sci. and Eng.* — 2005. — № 49. — P. 61–87.

Application of modern NDT technique of electron shearography for NDT of welded titanium panels of VT20 alloy made with elastic prestressing, is considered. The effectiveness of application of the technique of titanium panel NDT without dismantling the stretching fixture is shown, which allows immediately starting defect repair, if required.

Поступила в редакцию 20.07.2011