

## Голографический интерференционный метод исследования остаточных напряжений

А.А.Апальков, А.И.Ларкин, А.В.Осинцев, И.Н.Одинцев,  
В.П.Щепинов, А.Ю.Щиканов, Дж.Фонтен

*Рассмотрена оригинальная методика определения остаточных напряжений, основанная на совместном применении методов голографической интерферометрии и зондирующего отверстия. В качестве первичной информации используется разность порядков интерференционных полос для пар точек поверхности тела, расположенных на направлениях главных напряжений. Представлены результаты тестового эксперимента по измерению напряжений в пластине, деформируемой в условиях чистого сдвига, и результаты измерения остаточных сварочных напряжений в двух образцах, сваренных с помощью лазера.*

**Ключевые слова:** голографическая интерферометрия, интерферограмма, остаточные напряжения, лазерная сварка.

Возникающие в процессе сварки остаточные напряжения, суммируясь с напряжениями, вызванными эксплуатационными нагрузками, могут приводить к образованию дефектов типа трещин и преждевременному разрушению конструкции. В связи с этим информация об остаточных напряжениях имеет большое значение для обеспечения прочности и ресурса работы конструкций. Расчет остаточных напряжений в зоне сварных швов, особенно многопроходных, представляет собой сложную задачу, связанную не только с созданием адекватной математической модели, но и с необходимостью использования большого объема экспериментальных данных (например, о механических свойствах материала при температурах, близких к температуре плавления), получить которые достаточно сложно. Таким образом, значительную роль при решении таких задач играют экспериментальные методы [1].

Для измерения остаточных напряжений в элементах конструкций наибольшее применение в настоящее время находит метод зондирующих отверстий [1–3]. Его суть заключается в изготовлении отверстия малого диаметра и в регистрации соответствующего деформационного отклика материала. Последующий анализ состоит в решении обратной задачи механики твердого тела, а именно, в восстановлении по измеренным деформациям (перемещениям) исходных значений остаточных напряжений.

Для регистрации параметров локальной деформации в окрестности зондирующего отверстия широко используются розетки малобазных тензорезисторов. Однако получаемая таким образом первичная информация име-

ет весьма ограниченный объем, а чаще всего свидетельствует лишь о наличии остаточных напряжений. С одной стороны, это обстоятельство исключает возможность статистических подходов, а с другой – не позволяет оценить, насколько реальная картина деформации адекватна выбранной модели нахождения остаточных напряжений. В этой связи деформации в окрестности зондирующего отверстия необходимо измерять так называемыми полевыми методами, среди которых следует выделить голографическую интерферометрию – бесконтактный высокочувствительный метод измерения перемещений точек поверхности тела, диффузно отражающей излучение.

В ранних работах применение голографической интерферометрии в основном ограничивалось измерением полей перемещений, нормальных к поверхности тела [4, 5]. При этом терялась информация о шаровом тензоре напряжений, что в большинстве случаев нежелательно. Позднее была предложена методика определения остаточных напряжений на базе тангенциальных компонент перемещений точек тела, лежащих непосредственно на контуре отверстия [6]. В случае идеально изготовленного зондирующего отверстия абсолютные значения перемещений здесь максимальны и, следовательно, чувствительность метода будет наивысшей. Однако в реальности именно контур отверстия подвержен наибольшему деструктивному воздействию в процессе сверления, что на практике может приводить к локальному искажению картины интерференционных полос вплоть до ее исчезновения.

В настоящей работе рассмотрена методика измерения остаточных напряжений в листовых материалах, основанная на использовании первичной информации в виде разности порядков голографических интерференционных полос для двух множеств пар точек, выбираемых на главных осях деформации на некотором удалении от контура зондирующего отверстия. Приведены результаты экспериментов по измерению заранее известных упругих напряжений в пластине.

Регистрация двухэкспозиционных отражательных голограмм осуществляется с помощью оптической схемы

А.А.Апальков, А.И.Ларкин, А.В.Осинцев, И.Н.Одинцев, В.П.Щепинов, А.Ю.Щиканов. Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: Osintsev\_andr@yandex.ru  
J.Fontaine. Institute National de Sciences Appliquees de Strasbourg 24, Boulevard de la Victoire 67000 Strasbourg, e-mail: joel.fontaine@insa-strasbourg.fr

Поступила в редакцию 27 сентября 2005 г., после доработки – 5 февраля 2007 г.

во встречных пучках с нормальным к исследуемой поверхности тела коллимированным освещением. Фотопластинка в этом случае устанавливается в специальном кинематическом устройстве, обеспечивающем ее удаление из схемы интерферометра после первого экспонирования и последующий прецизионный возврат после изготовления зондирующего отверстия [7].

На первом этапе восстановления двухэкспозиционных интерферограмм вектор наблюдения ориентируется вдоль нормали к поверхности объекта, принимаемой за ось  $x_3$  лабораторной декартовой системы координат. В этом случае интерференционные полосы представляют собой геометрические места точек равных перемещений  $W$  из плоскости. Так как при малых диаметрах отверстий (1–2 мм) локальное напряженное состояние с достаточной степенью приближения является однородным, то поле нормальных релаксационных перемещений  $W$  имеет две оси симметрии, совпадающие с осями главных остаточных напряжений и принимаемые за оси координат  $x_1$  и  $x_2$ . После визуального установления главных осей производится регистрация двух пар интерферограмм при независимой ориентировке векторов наблюдения в плоскостях  $x_1x_3$  и  $x_2x_3$ . Точки полупространства, из которых ведется наблюдение, обычно задаются в сферической системе координат полярным радиусом  $r$ , широтой  $\psi$  и долготой  $\varphi$ . При  $r \rightarrow \infty$  точки наблюдения находятся на бесконечности, т.е. осуществляется коллимированное наблюдение области зондирующего отверстия. Центр этой системы совпадает с центром отверстия на поверхности тела, восстановленного отражательной голограммой. Указанным парам интерферограмм отвечают сле-

дующие значения направляющих углов вектора наблюдения:  $0, \psi_1$  и  $180^\circ, \psi_3$  и, соответственно,  $90^\circ, \psi_2$  и  $270^\circ, \psi_4$ . Оптическая схема голографического интерферометра приведена на рис.1. Поверхность тела в зоне зондирующего отверстия освещается плоской волной в направлении единичного вектора  $e_s$ .

Каждая точка поверхности исследуемого объекта, расположенная на осях  $x_1$  и  $x_2$ , после изготовления зондирующего отверстия смещается на величину  $D(x_1) = [U(x_1), 0, W(x_1)]$  и  $D(x_2) = [0, V(x_2), W(x_2)]$ . Пусть произвольная пара точек, лежащих на главной оси  $x_1$  и имеющих координаты  $(x_{1i}, 0, 0)$  и  $(x_{1j}, 0, 0)$ , наблюдается под углом  $\psi_k$  ( $i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, k = 1, \dots, K$ ). Используя основное соотношение голографической интерферометрии [8], для каждой из рассматриваемых точек (см. рис.1) получим два уравнения:

$$U(x_{1i}) \sin \psi_k + W(x_{1i})(1 + \cos \psi_k) = \lambda N(x_{1i}), \quad (1)$$

$$U(x_{1j}) \sin \psi_k + W(x_{1j})(1 + \cos \psi_k) = \lambda N(x_{1j}), \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны света;  $N(x_{1i})$  и  $N(x_{1j})$  – абсолютные порядки полос в точках с координатами  $(x_{1i}, 0, 0)$  и  $(x_{1j}, 0, 0)$ . (Направления перемещений определяются на основе анализа формы интерференционных полосы вблизи контура зондирующего отверстия [9].) Вычтя из уравнения (1) уравнение (2), получим

$$[U(x_{1i}) - U(x_{1j})] \sin \psi_k + [W(x_{1i}) - W(x_{1j})](1 + \cos \psi_k) = \lambda [N(x_{1i}) - N(x_{1j})]. \quad (3)$$

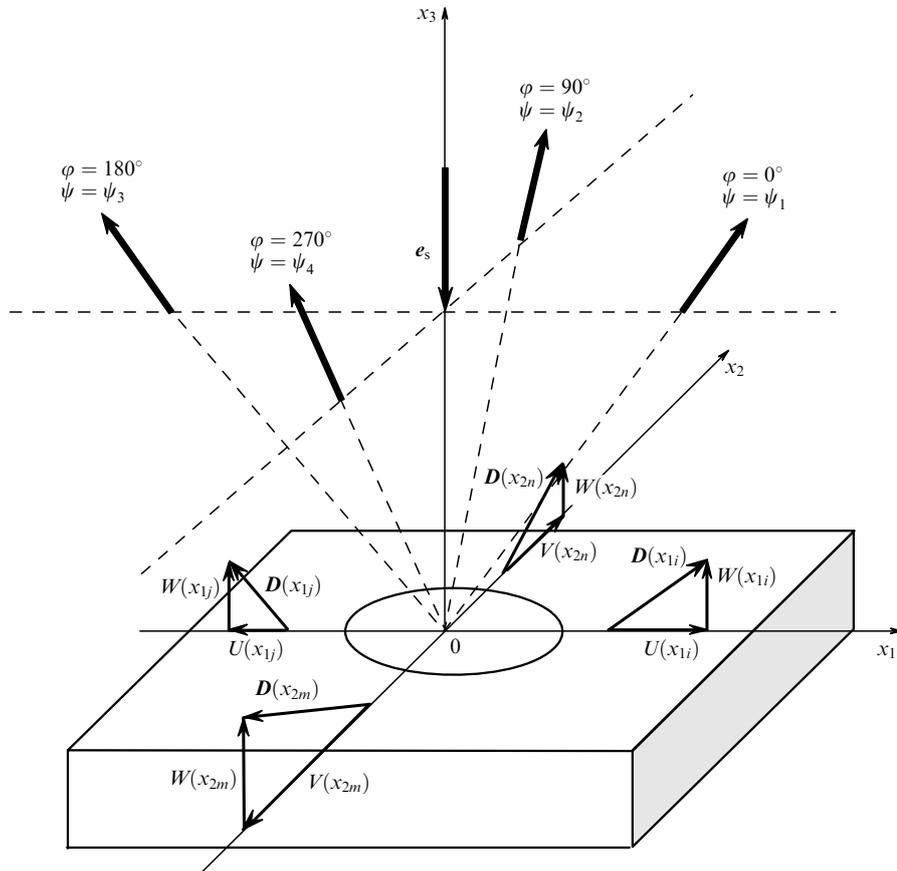


Рис.1. Оптическая схема голографического интерферометра.

Уравнение (3) можно переписать следующим образом:

$$(\Delta U_{1ij}) \sin \psi_k + (\Delta W_{1ij})(1 + \cos \psi_k) = \lambda \Delta N(x_{1ij}), \quad (4)$$

где  $(\Delta U_{1ij})$  и  $(\Delta W_{1ij})$  – разности компонент перемещений  $U(x_1)$  и  $W(x_1)$ ;  $\Delta N(x_{1ij})$  – разность абсолютных порядков полос в точках с координатами  $(x_{1i}, 0, 0)$  и  $(x_{1j}, 0, 0)$ , равная числу интерференционных полос между ними.

Аналогичным образом может быть получено уравнение для точек с координатами  $(0, x_{2m}, 0)$  и  $(0, x_{2n}, 0)$  на главной оси  $x_2$ :

$$(\Delta V_{2mn}) \sin \psi_l + (\Delta W_{2mn})(1 + \cos \psi_l) = \lambda \Delta N(x_{2mn}), \quad (5)$$

где  $m = 1, 2, \dots, M$ ;  $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $l = 1, 2, \dots, L$ .

Функции  $U(x_1)$ ,  $W(x_1)$  и  $V(x_2)$ ,  $W(x_2)$  в общем случае представляют собой сумму локальных перемещений  $u(x_1)$ ,  $w(x_1)$  и  $v(x_2)$ ,  $w(x_2)$ , определяемых деформацией в окрестности отверстия вследствие удаления материала, и обобщенных жестких смещений  $U^0$ ,  $V^0$ ,  $W^0$  всего объекта как целого относительно регистрирующей среды (фотопластинка):

$$U(x_1) = u(x_1) + U^0, \quad W(x_1) = w(x_1) + W^0, \quad (6)$$

$$V(x_2) = v(x_2) + V^0, \quad W(x_2) = w(x_2) + W^0.$$

Жесткие смещения можно разложить на сумму трансляционных и поворотных составляющих. Очевидно, что трансляции в плоскости поверхности тела взаимно уничтожаются в соответствии с уравнениями (4) и (5). Трансляция, нормальная к поверхности тела, оказывает влияние только на локализацию голографических интерференционных полос. Отсутствуют также вклады от поворотов тела относительно оси, нормальной к его поверхности, поскольку их проекции на координатные оси при малом угле поворота не зависят от координат  $x_1$  и  $x_2$ .

Оставшиеся малые повороты относительно оси, лежащей в плоскости поверхности тела, можно записать следующим образом:

$$W^0 = Ax_1 + Bx_2, \quad (7)$$

где  $A$  и  $B$  – неизвестные константы.

Выражения для разностей нормальных к поверхности тела компонент перемещений с учетом (7) принимают вид

$$\Delta W_{1ij} = \Delta w_{1ij} + A(x_{1i} - x_{1j}), \quad (8)$$

$$\Delta W_{2mn} = \Delta w_{2mn} + B(x_{2m} - x_{2n}).$$

В этой связи необходимо отметить следующий существенный момент. Повороты тела относительно оси, лежащей в плоскости его поверхности, вообще говоря, нарушают центральную симметрию картины интерференционных полос, обусловленных нормальными перемещениями. Это создает некоторые трудности при определении направлений главных остаточных напряжений. Однако в непосредственной близости от контура отверстия относительная значимость указанных поворотных составляющих поля перемещений, как правило, невелика и, следовательно, сохраняется симметрия нормальной компоненты.

В рамках упругой модели среды распределения деформационных составляющих разностных величин перемещений для пар точек вдоль направлений главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta u_{ij} &= \sigma_1 \Delta F_{ij} + \sigma_2 \Delta G_{ij}, \\ \Delta w_{ij} &= \sigma_1 \Delta H_{ij} + \sigma_2 \Delta Q_{ij} - A \Delta x_{ij}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta v_{mn} = \sigma_1 \Delta G_{mn} + \sigma_2 \Delta F_{mn},$$

$$\Delta w_{mn} = \sigma_1 \Delta Q_{mn} + \sigma_2 \Delta H_{mn} - B \Delta x_{mn},$$

где  $\Delta F$ ,  $\Delta G$  и  $\Delta H$ ,  $\Delta Q$  – базисные функции разности перемещений от единичных напряжений, действующих последовательно вдоль направлений  $x_1$  и  $x_2$ .

Для сквозного отверстия в пластине эти функции выражаются аналитически и имеют следующий вид [10, 11]:

$$\begin{aligned} \Delta F_{ij} &= \frac{(5+v)R^2}{2E} \left( \frac{1}{x_{1i}} - \frac{1}{x_{1j}} \right) - \frac{(1+v)R^4}{2E} \left( \frac{1}{x_{1i}^3} - \frac{1}{x_{1j}^3} \right), \\ \Delta G_{ij} &= \frac{(v-3)R^2}{2E} \left( \frac{1}{x_{1i}} - \frac{1}{x_{1j}} \right) + \frac{(1+v)R^4}{2E} \left( \frac{1}{x_{1i}^3} - \frac{1}{x_{1j}^3} \right), \\ \Delta F_{mn} &= \frac{(5+v)R^2}{2E} \left( \frac{1}{x_{2m}} - \frac{1}{x_{2n}} \right) - \frac{(1+v)R^4}{2E} \left( \frac{1}{x_{2m}^3} - \frac{1}{x_{2n}^3} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta G_{mn} &= \frac{(v-3)R^2}{2E} \left( \frac{1}{x_{2m}} - \frac{1}{x_{2n}} \right) + \frac{(1+v)R^4}{2E} \left( \frac{1}{x_{2m}^3} - \frac{1}{x_{2n}^3} \right), \\ \Delta H_{ij} &= \frac{vtR^2}{E} \left( \frac{1}{x_{1i}^2} - \frac{1}{x_{1j}^2} \right), \quad \Delta Q_{ij} = -\frac{vtR^2}{E} \left( \frac{1}{x_{1i}^2} - \frac{1}{x_{1j}^2} \right), \end{aligned}$$

$$\Delta H_{mn} = \frac{vtR^2}{E} \left( \frac{1}{x_{2m}^2} - \frac{1}{x_{2n}^2} \right), \quad \Delta Q_{mn} = -\frac{vtR^2}{E} \left( \frac{1}{x_{2m}^2} - \frac{1}{x_{2n}^2} \right),$$

где  $E$  – модуль упругости материала пластины;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $R$  – радиус отверстия;  $t$  – толщина пластины.

Используя выражения (4), (5), (8)–(10), систему уравнений для определения главных остаточных напряжений можно записать в матричном виде:

$$\mathbf{ZS} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \Delta x_1(1 + \cos \psi_k) & 0 \\ Z_{21} & Z_{22} & 0 & \Delta x_2(1 + \cos \psi_l) \end{pmatrix} \mathbf{S} = \lambda \mathbf{N}, \quad (11)$$

где

$$Z_{11} = \Delta F_{ij} \sin \psi_k + \Delta H_{ij}(1 + \cos \psi_k);$$

$$Z_{12} = \Delta G_{ij} \sin \psi_k + \Delta Q_{ij}(1 + \cos \psi_k);$$

$$Z_{21} = \Delta H_{mn} \sin \psi_l + \Delta F_{mn}(1 + \cos \psi_l);$$

$$Z_{22} = \Delta G_{mn} \sin \psi_l + \Delta Q_{mn}(1 + \cos \psi_l);$$

$\mathbf{S} = (\sigma_1 \sigma_2 \mathbf{AB})^T$  – вектор искомых величин (индекс  $T$  означает операцию транспонирования);  $\mathbf{N} = (\Delta N_{ij} \Delta N_{mn})^T$  – вектор относительных порядков полос. В общем случае переопределенная система уравнений (11) решается методом наименьших квадратов.

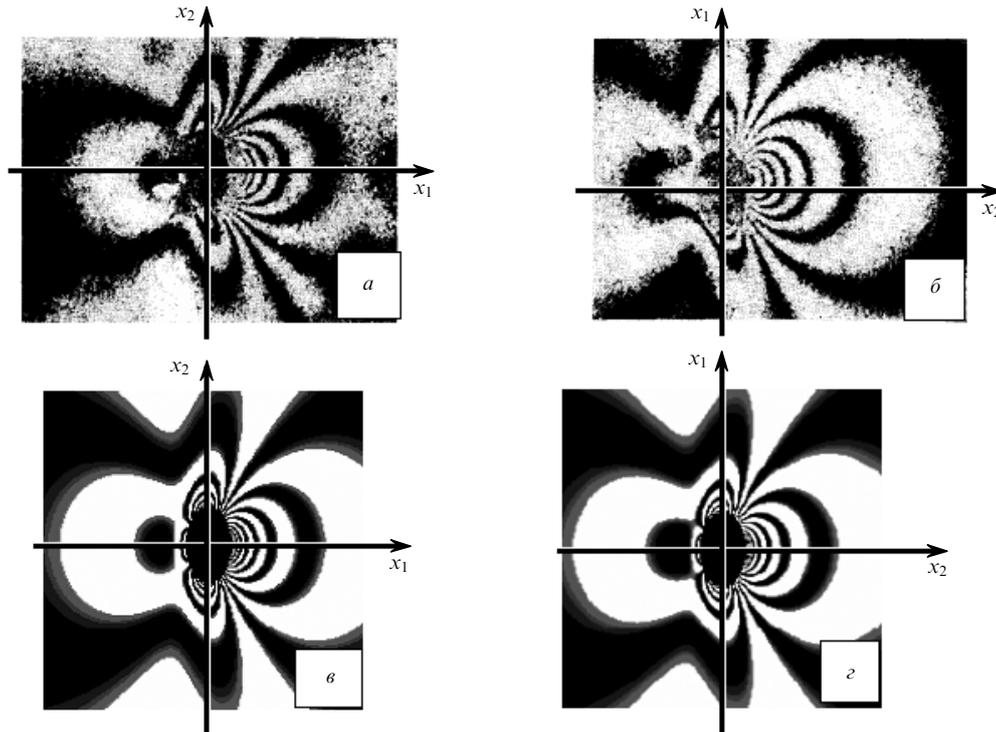


Рис.2. Голографические интерферограммы пластины, деформируемой в условиях чистого сдвига, полученные при  $\varphi = 0$  (а) и  $\varphi = 90^\circ$  (б), и картины полос, полученные с помощью математического моделирования при  $\varphi = 0$  (в) и  $\varphi = 90^\circ$  (г).

Тестирование разработанной методики определения главных остаточных напряжений производилось на пластине с размерами  $70 \times 32 \times 3$  мм, изготовленной из алюминиевого сплава и нагруженной в условиях плоского напряженного состояния чистого сдвига:  $\sigma_{x_1} = -\sigma_{x_2} = 70$  МПа [6]. При визуализации интерферограмм использовались следующие параметры:  $\psi = 50^\circ$ ,  $\varphi = 0, 90^\circ, 180^\circ$  и  $270^\circ$ . На рис.2,а, б приведены интерферограммы, полученные, в частности, для  $\varphi = 0$  и  $90^\circ$ . Расшифровка интерферограмм и решение полученной системы уравнений дают  $\sigma_{x_1} = 72$  МПа,  $\sigma_{x_2} = -78$  МПа, что в пределах погрешностей  $\pm 15$  МПа, характерных для данного способа измерений, хорошо согласуется с величинами заданных номинальных напряжений. Для сравнения на рис.2,в, г представлены картины полос, полученные путем математического моделирования на основе приведенных выше формул для напряжений, полученных в данном эксперименте. Подобие соответствующих фактических и расчетных интерферограмм свидетельствует об адекватности принятой физической модели интерпретации данных эксперимента.

Известно, что неравномерность температурного поля и структурные превращения при сварке приводят к появлению остаточных напряжений в материале шва и околошовной зоне. Исследование полей остаточных напряжений в околошовной зоне лазерной сварки алюминиевых листов проводилось путем испытания двух образцов прямоугольной формы. Образец 1 был получен в результате лазерной сварки встык двух пластин одинаковой толщины (2 мм); ширина шва составляла 3 мм, толщина – 2.7 мм. Образец 2 был получен в результате лазерной сварки двух пластин разной толщины – 1.2 и 2.0 мм; ширина шва была равна 1.5 мм, толщина – 2.25 мм.

Остаточные напряжения в каждой из точек получались усреднением данных по двум диаметрам отверстий

– 2 и 2.9 мм. Различие в определяемых значениях напряжений не выходило за пределы допустимых погрешностей ( $\pm 15$  МПа). Это говорит о том, что в рамках рассматриваемой модели напряжения можно считать однородными на базе выбранных диаметров отверстий. По результатам вычислений построены графические зависимости остаточных напряжений от расстояния до середины сварного шва. На рис.3,а кривая 1 соответствует остаточным напряжениям  $\sigma_1$  в образце 1, направленным параллельно шву, кривая 2 – напряжениям  $\sigma_2$  в перпенди-

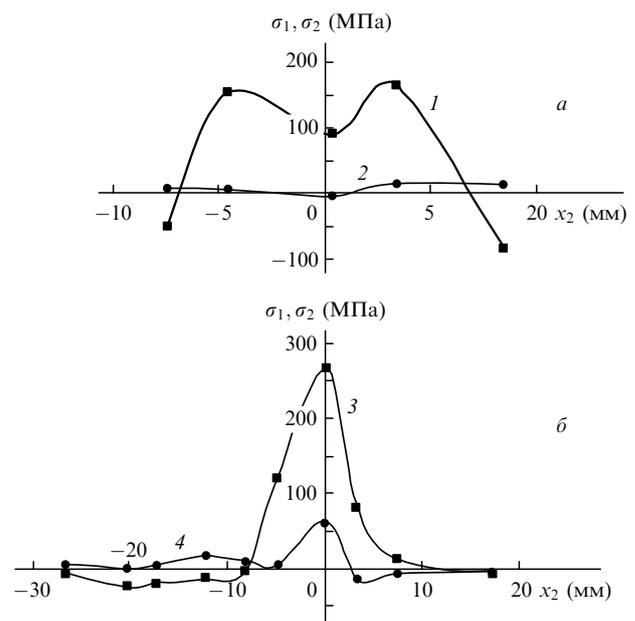


Рис.3. Распределение остаточных напряжений в зависимости от расстояния до сварного шва для двух образцов.

кулярном направлении. Видно, что напряженное состояние близко к одноосному. Максимальные растягивающие напряжения действуют вдоль оси  $x_1$  на расстоянии 3 мм от шва и равны 164 МПа. Характер изменения остаточных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  для образца 2 вдоль главных осей  $x_1$  и  $x_2$  показан на рис. 3, б кривыми 3 и 4 соответственно. Наиболее опасной областью с точки зрения прочности является середина шва, где напряженное состояние является двухосным, с растягивающими напряжениями  $\sigma_1 = 270$  МПа,  $\sigma_2 = 62$  МПа.

Таким образом, методика, основанная на совместном применении методов голографической интерферометрии и зондирующего отверстия, дает возможность определить остаточные напряжения в материале шва и околошовной зоне алюминиевых образцов, соединенных лазерной сваркой, с погрешностью не более  $\pm 15$  МПа. Наиболее опасной зоной является середина шва, в которой характерные растягивающие напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  составляют 270 и 62 МПа. Подобие фактических и расчетных интерферограмм свидетельствует об адекватности принятой физической модели данным эксперимента.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ № 2894.

1. Кобояси А. *Экспериментальная механика* (М.: Мир, 1990).
2. Антонов А.А., Чернышев Г.Н., Каменская Н.Н., Вертелов В.М. В сб. *Сварочные работы в энергостроительстве* (М.: ИПМ РАН, 1988 с. 82).
3. Nelson D.V., McCricked J.T. *Experimental Mechanics*, **23**, 371(1986).
4. Бакулин В.Н., Рассоха А.А. *Метод конечных элементов и голографическая интерферометрия в механике композитов* (М.: Машиностроение, 1987).
5. Антонов А.А., Бобрик А.И., Морозов В.К., Чернышев Г.Н. *Механика твердого тела*, **5**, 182 (1980).
6. Писарев В.С., Щепинов В.П., Щиканов А.Ю. *ЖТФ*, **66**, 99 (1996).
7. Furse I.R. *J. Phys. E*, **14**, 164 (1981).
8. Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. *Голографические интерференционные методы измерения деформаций* (М.: Наука, 1988).
9. Shchepinov V.P., Schikanov A.Yu. *Proc. Int. Conf. 'Simulation and Experiment in Laser Metrology'* (Berlin: Akad. Verlag, 1996).
10. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. *Теория упругости* (М.: Наука, 1979).
11. Курносов Д.Г., Якутович М.В. *Заводская лаборатория*, **12**, 960 (1946).