

05:07;12

## Применение голографической интерферометрии для измерения остаточных напряжений методом зондирующего отверстия

© И.Н. Одинцев, В.П. Щепинов, А.Ю. Щиканов

Московский государственный инженерно-физический институт,  
115409 Москва, Россия  
e-mail: postgrad@postgrad.mephi.ru

(Поступило в Редакцию 25 марта 2003 г.)

Рассматривается оригинальная методика определения остаточных напряжений с помощью зондирующих отверстий и измерений разности порядков голографических интерференционных полос для двух множеств пар точек, выбираемых на главных осях деформаций. Оптическая схема интерферометра, основана на использовании отражательных голограмм. Величины главных остаточных напряжений определяются при решении переопределенной системы линейных уравнений. При этом учитывается влияние на картину полос жестких смещений тела как целого. Приводятся результаты экспериментальной проверки методики при регистрации упругих напряжений на образцах в условиях одноосного и двухосного напряженных состояний.

Для измерения остаточных напряжений в элементах конструкций наибольшее применение в настоящее время находит метод зондирующих отверстий [1]. Его суть заключается в изготовлении отверстия малого диаметра в интересующей области на поверхности тела и в регистрации соответствующего деформационного отклика материала. Последующий анализ состоит в решении обратной задачи механики твердого тела, а именно в восстановлении по измеренным деформациям исходных значений остаточных напряжений, которые равны нулю на свободной поверхности отверстия.

Для регистрации параметров локального деформирования в окрестности зондирующего отверстия широко используются розетки малобазных тензорезисторов. Однако получаемая таким образом первичная информация имеет весьма ограниченный, а чаще всего лишь необходимый объем с точки зрения последующей интерпретации в терминах остаточных напряжений. Данное обстоятельство исключает как возможность привлечения статистических подходов для такой интерпретации, так и оценку адекватности реальной картины деформирования к выбранной механической модели.

В связи с этим представляется обоснованным при определении остаточных напряжений применение полевых методов измерения деформаций или перемещений, дающих исходную информацию практически в неограниченном объеме. В ряде работ такой подход осуществлялся, например, на базе метода оптически чувствительных покрытий [2]. Однако в этом случае, как и в методе тензометрии, в качестве необходимого этапа сохраняется процедура предварительной подготовки поверхности образца — приклейки покрытия. Перспективной альтернативой в данном отношении можно считать бесконтактный, высокочувствительный метод голографической интерферометрии, который не требует специальной обработки поверхности тела.

В ранних работах применение голографической интерферометрии в основном ограничивалось измерением полей перемещений, нормальных к поверхности тела [3–5].

При такой постановке теряется информация о шаровом тензоре напряжений, что в большинстве случаев оказывается нежелательным. Позднее была предложена методика определения остаточных напряжений на базе тангенциальных компонент перемещений точек тела, лежащих непосредственно на контуре отверстия [6]. В идеальном случае изготовления зондирующего отверстия абсолютные значения перемещений здесь максимальны и, следовательно, чувствительность метода также максимальна. 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 необратимого уничтожения.

В настоящей работе рассматривается методика, 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. Величины остаточных напряжений в этом случае вычисляются при решении переопределенной системы линейных уравнений. Приведенные результаты экспериментов по определению известных заранее упругих напряжений в образцах в виде балки и толстостенной трубы подтверждают эффективность предложенной методики.

Техника регистрации голографических интерферограмм для визуализации трехмерного формоизменения поверхности тела в зоне зондирующего отверстия совпадает с описанной в работе [6]. Напомним, что для записи двухэкспозиционных голограмм используется оптическая схема во встречных пучках с нормальным к исследуемой поверхности тела коллимированным освещением. Фотопластинка устанавливается в специальном кинематическом устройстве, обеспечивающим ее удаление из схемы интерферометра после первого экспонирования и последующий (после изготовления зондирующего отверстия) возврат с прецизионной точностью.

На первом этапе восстановления двухэкспозиционных интерферограмм вектор наблюдения ориентируется

вдоль нормали к поверхности объекта, принимаемой за ось  $x_3$  лабораторной декартовой системы координат  $Ox_1x_2x_3$ . В этом случае интерференционные полосы представляют собой геометрические места точек равных перемещений из плоскости ( $W$ ). Так как при малых диаметрах высверливаемых отверстий локальное напряженное состояние является с достаточной степенью приближения однородным, то поле  $w$  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  $Ox_1x_3$  и  $Ox_2x_3$ . Точки полупространства, из которых ведется наблюдение, обычно задаются в сферической системе координат полярным радиусом  $r$ , широтой  $\psi$  и долготой  $\varphi$ . При  $r \rightarrow \infty$  осуществляется коллимированное наблюдение области зондирующего отверстия. Центр этой системы совпадает с центром отверстия на поверхности тела на восстановленном голографическом изображении. Указанным парам интерферограмм отвечают следующие значения направляющих углов вектора наблюдения:  $(0, \psi_1)$ ,  $(\pi, \psi_2)$  и соответственно  $(\pi/2, \psi_3)$ ,  $(3\pi/2, \psi_4)$ . Оптическая схема освещения и наблюдения двух точек (1, 2) поверхности тела в плоскости  $Ox_1x_3$  приведена на рис. 1.

Каждая точка поверхности исследуемого объекта после изготовления зондирующего отверстия смещается вдоль главных осей  $x_1$  и  $x_2$  на величину  $D(x_1) = [U(x_1), 0, W(x_1)]$  и  $D(x_2) = [0, V(x_2), W(x_2)]$  соответственно. Пусть произвольная пара точек, лежащая на главной оси  $x_1$  и имеющая координаты  $(x_{1i}, 0, 0)$  и  $(x_{1j}, 0, 0)$ , наблюдается под углом  $\psi_k$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ;  $j = 1, 2, \dots, J$ ;  $k = 1, 2, \dots, K$ ). Используя основное соотношение голографической интерферометрии [7] для каждой из рассматриваемых точек (рис. 1), получим два

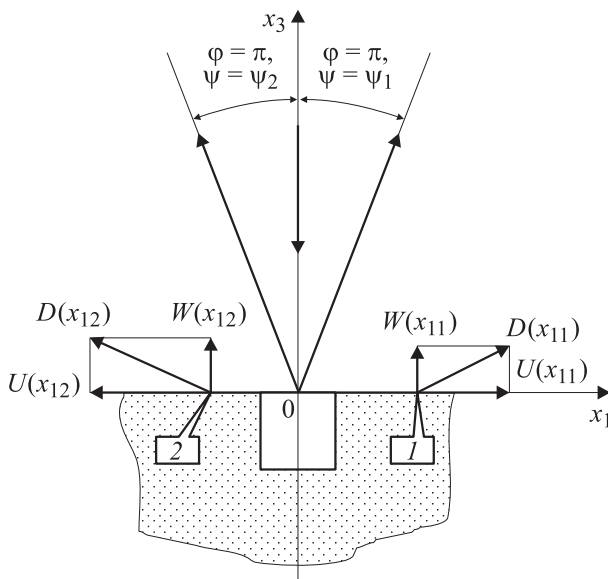


Рис. 1. Оптическая схема голографического интерферометра.

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 лазерного излучения;  $N(x_{1i})$  и  $N(x_{1j})$  — абсолютные порядки полос в точках с координатами  $(x_{1i}, 0, 0)$  и  $(x_{1j}, 0, 0)$  соответственно.

Вычитая из уравнения (1) уравнение (2), получим

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

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  $(\Delta W_{1ij})$  — разность компонент перемещений  $U$  и  $W$ ;  $\Delta N(x_{1ij})$  — разность абсолютных порядков полос в точках с координатами  $(x_{1i}, 0, 0)$  и  $(x_{1j}, 0, 0)$ .

Аналогичным образом может быть получено уравнение для точек с координатами  $(0, x_{2m}, 0)$  и  $(0, x_{2n}, 0)$  главного направления  $x_2$

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

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 окрестности отверстия вследствие высвобождения элемента объема, и обобщенных жестких перемещений  $U^0$ ,  $V^0$ ,  $W^0$  всего объекта как целого относительно регистрирующей среды

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

$$V(x_2) = v(x_2) + V^0; \quad W(x_2) = w(x_2) + W^0. \quad (6)$$

В свою очередь последние можно разложить на сумму трансляционных и поворотных составляющих. Очевидно, что трансляции в плоскости поверхности тела, исходя из структуры уравнений (4) и (5), взаимно уничтожаются. Отсутствуют также вклады и от поворотов тела относительно оси, нормальной к его поверхности, так как их проекции на координатные оси при малом угле поворота не зависят от координат  $x_2$  ( $x_2$ ). Трансляция, нормальная к поверхности тела, оказывает влияние только на локализацию голографических интерференционных полос.

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 разности нормальных поверхности тела компонент перемещений, с учетом (7) принимают вид

$$\begin{aligned}\Delta W_{1ij} &= \Delta w_{1ij} + A(x_{1i} - x_{1j}), \\ \Delta W_{2mn} &= \Delta w_{2mn} + B(x_{2m} - x_{2n}).\end{aligned}\quad (8)$$

Для произвольной точки поверхности тела с координатами  $(x_1, x_2)$  величина перемещения  $W(x_1, x_2)$  определяется по голографической интерферограмме, полученной при  $\psi \approx 0^\circ$  с помощью соотношения

$$W(x_1, x_2) = \frac{\lambda N(x_1, x_2)}{1 + \cos \psi}.\quad (9)$$

С учетом формул (6), (8) и (9) получим следующее выражение:

$$\frac{\lambda N(x_1, x_2)}{1 + \cos \psi} - w(x_1, x_2) = Ax_1 + Bx_2.\quad (10)$$

В случае сквозного отверстия радиусом  $R$  в пластине толщиной  $t$ , величина  $w(x_1, x_2)$  зависит от разности главных напряжений  $\sigma_1 - \sigma_2$  и определяется в каждой точке отверстия по формуле [5]

$$w(x_1, x_2) = \frac{\nu t R^2 (x_1^2 - x_2^2) (\sigma_1 - \sigma_2)}{E (x_1^2 + x_2^2)^2},\quad (11)$$

где  $\nu$  и  $E$  — коэффициент Пуассона и модуль упругости материала пластины.

Для несквозного отверстия величины  $w(x_1, x_2)$  определяются из численного решения соответствующей задачи теории упругости. Составленная на основе уравнений (10), (11) (расчетных данных), система позволяет найти поле поворотов и выделить оси главных остаточных напряжений.

Для увеличения достоверности результатов рекомендуется применение нескольких голограмм в сочетании с последовательной рассверловкой отверстия. В этом случае каждая голограмма является одинаковым носителем информации для релаксационных перемещений и имеет свое поле жестких смещений, что при малых поворотах позволяет определить направление главных осей.

Распределение деформационных составляющих перемещений  $u(x_1)$ ,  $u(x_2)$ ,  $v(x_1)$ ,  $v(x_2)$ ,  $w(x_1)$  и  $w(x_2)$  и их разности величин для пар точек вдоль направлений главных напряжений в рамках общепринятой в подобных задачах линейно-упругой модели записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta u_{ij} &= \sigma_1 \Delta F_{ij} + \sigma_2 \Delta G_{ij}, \\ \Delta w_{ij} &= \sigma_1 \Delta H_{ij} + \sigma_2 \Delta Q_{ij}, \\ \Delta v_{mn} &= \sigma_1 \Delta G_{mn} + \sigma_2 \Delta F_{mn}, \\ \Delta w_{mn} &= \sigma_1 \Delta Q_{mn} + \sigma_2 \Delta H_{mn},\end{aligned}\quad (12)$$

где  $\Delta F$ ,  $\Delta G$  и  $\Delta H$ ,  $\Delta Q$  — разность расчетных функций перемещений  $F$ ,  $G$  и  $H$ ,  $Q$  от единичного напряжения, действующего последовательно вдоль направления  $x_1$  и  $x_2$ .

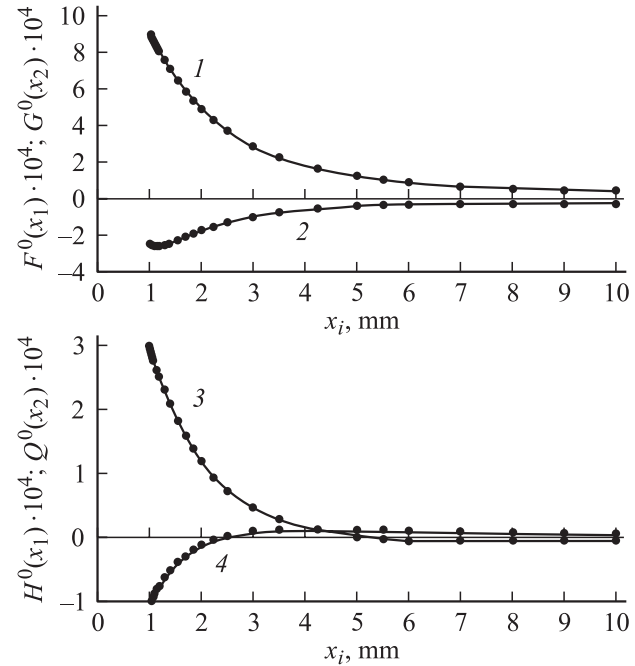


Рис. 2. Базовые функции полей единичных перемещений: 1 —  $F$ , 2 —  $G$ , 3 —  $H$ , 4 —  $Q$ .

Для сквозных отверстий эти функции выражаются аналитически из соответствующих решений задачи теории упругости [5,8].

Функции перемещений для несквозного отверстия получены методом конечных элементов на тест-объекте, представляющем собой куб с ребром  $a$ , находящегося в однородном поле напряжений  $\sigma(x_1) = 1$ . Процедура изготовления отверстия диаметром  $2R = a/10$  и глубиной  $h_0 = 3R$  моделировалась так же, как и в работе [9]. Полученные базисные распределения тангенциальных продольных  $F^0(x_1)$  и поперечных  $G^0(x_2)$ , а также нормальных  $H^0(x_1)$  и  $Q^0(x_2)$  перемещений приводятся на рис. 2. Функции  $F$ ,  $G$  и  $H$ ,  $Q$  в уравнении (12) определяются простым домножением базисных на фактическую величину диаметра зондирующего отверстия  $2R$ , а также очевидными свойствами нечетности  $F$ ,  $G$  и четности  $H$ ,  $Q$ .

Используя выражения (4), (5), (8) и (12) систему уравнений для определения главных остаточных напряжений, можно записать в матричном виде

$$\begin{aligned}\mathbf{Z} \cdot \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \Delta x_1(1 + \cos \psi_k) & 0 \\ Z_{21} & Z_{22} & 0 & \Delta x_2(1 + \cos \psi_1) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{S} \\ &= \lambda \mathbf{N},\end{aligned}\quad (13)$$

где

$$\begin{aligned}Z_{11} &= \Delta F_{ij} \cdot \sin \psi_k + \Delta H_{ij} \cdot (1 + \cos \psi_k), \\ Z_{12} &= \Delta G_{ij} \cdot \sin \psi_k + \Delta Q_{ij} \cdot (1 + \cos \psi_k), \\ Z_{21} &= \Delta G_{mn} \cdot \sin \psi_1 + \Delta Q_{mn} \cdot (1 + \cos \psi_1), \\ Z_{22} &= \Delta F_{mn} \cdot \sin \psi_1 + \Delta H_{mn} \cdot (1 + \cos \psi_1),\end{aligned}$$

$\mathbf{S} = \{\sigma_1 \sigma_2 AB\}^T$  — вектор искомых величин (индекс  $T$  означает операцию транспонирования);  $\mathbf{N} = \{\Delta N_{1ij} \Delta N_{2mn}\}^T$  — вектор относительных порядков полос.

Решение системы уравнений (13) методом наименьших квадратов в матричном виде будет записываться

$$\mathbf{S} = (\mathbf{Z}^T \cdot \mathbf{Z})^{-1} \cdot \mathbf{Z}^T \cdot \mathbf{N}. \quad (14)$$

Для определения знака перемещений, а следовательно, и остаточных напряжений на полученных интерферограммах производится анализ траекторий выхода интерференционной полосы на контур зондирующего отверстия [6].

Оценка погрешности определения остаточных напряжений производится с привлечением компьютерного моделирования результатов экспериментальных исследований. Для этой цели при заданных погрешностях измерений компонент векторов перемещений осуществляется статистическая обработка экспериментальных данных по методу Монте-Карло. Практика свидетельствует, что надежные и устойчивые измерения тангенциальных компонент перемещений в окрестности зондирующего отверстия возможны для угла наблюдения  $40\text{--}60^\circ$  [6].

Тестирование предложенной методики осуществлялось на упругодеформированном образце в виде консольной балки, нагруженной на свободном конце изгибающим моментом. В этом случае на рабочей поверхности образца создавалось упругое одноосное сжатие. Образец размером  $18 \times 36 \times 160$  мм был изготовлен из стали Ст. 40.

Сначала регистрировались две голограммы исходного состояния поверхности тела. Для этого каждая из двух фотопластинок устанавливалась на специальном устройстве, позволяющем удалять их схемы интерферометра и точно возвращать обратно. Затем производилась засверловка диаметром 2 мм на глубину 2 мм и на одной из фотопластинок осуществлялась вторая экспозиция. После этого отверстие рассверливалось сверлом диаметром 2.9 мм на глубину 2.9 мм и производилась вторая экспозиция на оставшейся фотопластинке.

Таким образом, в исследуемой точке поверхности балки регистрировались две дважды экспонированные голограммы для двух зондирующих отверстий разного диаметра. На рис. 3 приведены картины полос, соответствующие заданным напряжениям  $\sigma_{x1} = -100$  МПа и  $\sigma_{x2} = 0$ . Угол наблюдения во всех случаях равнялся  $\psi = 50^\circ$ . Предварительный анализ интерферограмм позволяет однозначно выделить главные оси. Интерференционные полосы от относительного поворота фотопластинки и объекта отсутствуют. Величины напряжений, найденных из решения переопределенной системы (14), составили  $\sigma_{x1} = (-97 \pm 20)$  МПа,  $\sigma_{x2} = (0.17 \pm 20)$  МПа, а неизвестные коэффициенты —  $A = 3 \cdot 10^{-2}$   $\mu\text{m}/\text{mm}$ ,  $B = -2.5 \cdot 10^{-3}$   $\mu\text{m}/\text{mm}$ . В пределах погрешности измеренные упругие напряжения совпадают с заданными.

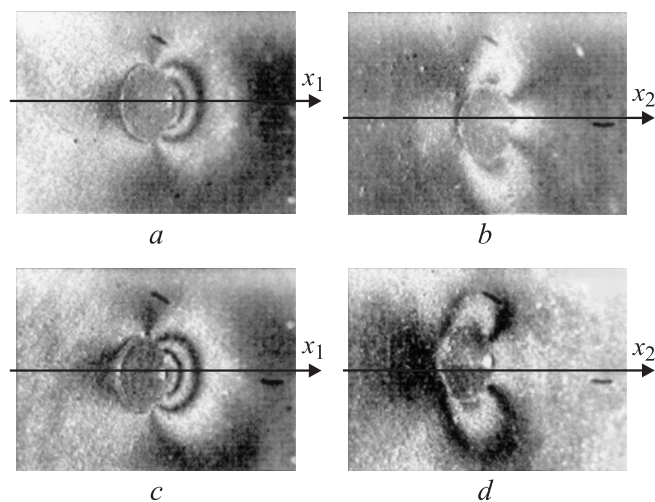


Рис. 3. Голографические интерферограммы окрестности зондирующего отверстия в стальной балке, деформированной в условиях чистого изгиба.  $\varphi = 0$  (a),  $90$  (b),  $180$  (c),  $270^\circ$  (d).

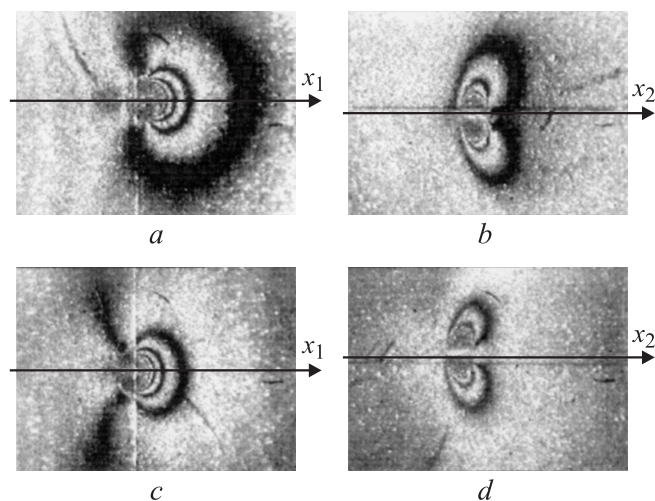


Рис. 4. Голографические интерферограммы окрестности зондирующего отверстия в толстостенном цилиндре. a-d — те же, что и на рис. 1.

Экспериментальная проверка методики в условиях двухосного напряженного состояния проводилась на образце в виде толстостенной трубы с плоским днищем, нагруженной внутренним давлением. В этом случае на поверхности трубы реализуется двухосное напряженное состояние при соотношении окружных  $\sigma_{x1}$  и осевых  $\sigma_{x2}$  напряжений, равном 2:1. Типичные голографические интерферограммы поверхности образца в зоне зондирующего отверстия для заданных упругих напряжений  $\sigma_{x1} = 61$  и  $\sigma_{x2} = 30.5$  МПа приведены на рис. 4. Полосы, характеризующие смещение, и поворот фотопластинки относительно объекта исследования отсутствуют. Оси симметрии на картинах полос совпадают с главными осями напряжений, а характер выхода полос на контур отверстия соответствует двухосному растяжению. Изме-

ренные величины напряжений в этом случае получились равными  $\sigma_{x1} = (60 \pm 12)$  и  $\sigma_{x2} = (31 \pm 12)$  МПа, что хорошо согласуется не только с заданными величинами напряжений, но и их соотношением.

Предложенная методика может использоваться для определения остаточных технологических напряжений, например сварочных. Высокая информативность голографических интерферограмм дает возможность определять направления главных напряжений, их знак и величины.

Настоящая работа выполнена по программе МНТЦ (проект № 774).

## Список литературы

- [1] *Кобояси А.* Экспериментальная механика. Кн. 2. М.: Мир, 1990. 552 с.
- [2] *Flatau M.T.* // J.A. Exp. Mech. 1990. Vol. 30. N 4. P. 352–355.
- [3] *Антонов А.А., Бобрик А.И., Морозов В.К.* и др. // МТТ. 1980. № 2. С. 41–43.
- [4] *Veaney E.M.* // Strain. 1976. Vol. 12. N 3. P. 99–105.
- [5] *Бакулин В.Н., Рассоха А.А.* Метод конечных элементов и голографическая интерферометрия в механике композитов. М.: Машиностроение, 1987. 312 с.
- [6] *Писарев В.С., Щепинов В.П., Щиканов А.Ю.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 1. С. 99–113.
- [7] *Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В.* Голографические интерференционные методы измерения деформаций. М.: Наука, 1988. 248 с.
- [8] *Курносоев Д.Г., Якутович М.В.* // Заводская лаборатория. 1946. Т. 12, № 126. С. 960–967.
- [9] *Антонов Л.А., Бобрик А.И., Морозов В.К.* и др. // МТТ. 1980. № 2. С. 182–189.