

Рис. 3.

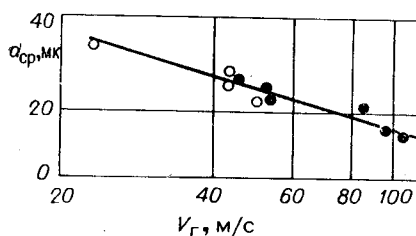


Рис. 4.

В заключение отметим, что полученные результаты в целом свидетельствуют о применимости методов рассеяния для автоматизации обработки голограмм двухфазного потока, а при больших концентрациях — о целесообразности использования этих методов. Вместе с тем необходима дальнейшая работа по уточнению погрешности метода, особенно в области малых значений размеров частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аладьев И. Т. и др. Исследование возможности применения голографии к изучению двухфазных течений.— Теплоэнергетика, 1973, № 8.
2. Палеев И. И., Агафонова Ф. А., Быков В. Н., Лаврентьев М. Е. Некоторые результаты исследования двухфазного потока методом однолучевой голографии Фраунгофера.— Энергомашиностроение, 1972, № 6.
3. Стаселько Д. И., Косниковский В. А. Голографическая регистрация пространственных ансамблей быстро движущихся частиц.— Опт. и спектр., 1973, т. 34, вып. 2.
4. Shofner F. M. et al. Fundamentals of Holographic Velocimetry.— In: Proc. 1969, Intern. Congr. on Instrum. in Aerospace Simulation Facilities. N. Y., May 1969.
5. Thompson B. J., Ward J. H., Zinky W. Application of Hologram Techniques for Particle Size Analysis.— Appl. Opt., 1967, vol. 6, p. 519.
6. Голография. Методы и аппаратура.— М.: Сов. радио, 1974.
7. Беккер А. М. и др. Автоматический корреляционный анализатор размеров бактериальных колоний.— В кн.: Материалы II Всесоюз. конф. по голографии, 1975, ч. 1.
8. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде.— М.: Гостехиздат, 1951.
9. Быков В. Н. Исследование образования и деформации спектра капель в двухфазных потоках методом голографии: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. мат. наук.— Л.: изд. ЛПИ, 1975.

Поступила в редакцию 25 марта 1977 г.;
окончательный вариант — 30 января 1978 г.

УДК 620.17 : 535.512

Л. А. БОРЫНЯК, С. И. ГЕРАСИМОВ, В. А. ЖИЛКИН

(Новосибирск)

ПРАКТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ЗАПИСИ И РАСШИФРОВКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ НЕОБХОДИМУЮ ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА ДЕФОРМАЦИЙ

В конце 60-х — начале 70-х годов голографическая интерферометрия завоевала широкую популярность, так как в это время казалось, что с ее помощью удастся с достаточно высокой точностью и довольно легко по сравнению с известными экспериментальными методами определять перемещения произвольных точек поверхности трехмерных объектов. Од-

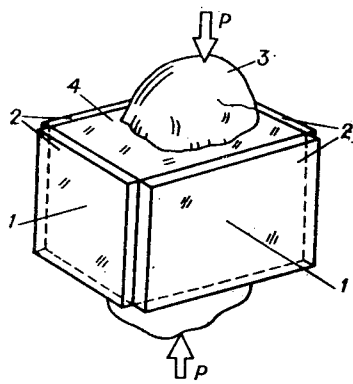


Рис. 1. Схема крепления регистрирующей среды на деформируемом объекте:
 1 — направления освещения объекта, 2 — регистрирующая среда, 3 — деформируемый объект, 4 — промежуточная оптически прозрачная среда.

нако, как показали дальнейшие исследования, традиционными методами голографической интерферометрии надежные количественные результаты можно получить только для ограниченного класса задач, описываемых с помощью одной компоненты вектора перемещения, нормальной к поверхности конструкции [1—4]. К таким задачам относятся исследования изгиба оболочек, различных элементов конструкций как при статическом, так и при динамическом их нагружении. Работы, посвященные исследованию методом голографической интерферометрии плоских задач механики деформируемой среды, в настоящее время практически отсутствуют. Кроме того, применяемые схемы записи голографических интерферограмм требуют строгой виброизоляции элементов экспериментальных схем, специальных нагрузочных устройств и не позволяют проводить испытания на натуральных изделиях в условиях обычной заводской лаборатории.

Данная статья посвящена частичному решению этих проблем.

Для устранения значительного влияния на интерференционную картину перемещений исследуемого участка поверхности как жесткого целого регистрирующую среду каким-либо способом закрепляют на этой поверхности [5]. Нами было предложено между регистрирующей средой и исследуемым объектом помещать оптически прозрачную среду, которая прикрепляется одной поверхностью к объекту, а другой — к регистрирующей среде (рис. 1). Этот прием позволяет снять ограничения, обычно присущие голографическим способам записи оптической информации, связанные с вибрацией типовых испытательных машин, и проводить исследования полей деформаций реальных конструкций на стандартном оборудовании как при статическом, так и при циклическом нагружении изделия. Варьируя сдвиговой жесткостью прозрачной среды и жесткостью подложки регистрирующей среды, записывают интерферограммы, несущие информацию либо о компонентах U , V , W вектора перемещения Δr , либо только об изменении толщины прозрачной среды. Компоненты U и V ориентированы вдоль осей x и y , которые лежат в касательной плоскости, проведенной через исследуемую точку объекта, а компонента W ориентирована вдоль оси z , совпадающей с внешней нормалью к поверхности. Если жесткость подложки регистрирующей среды и жесткость объекта немного больше сдвиговой жесткости прозрачной среды, то она практически не влияет на измеряемое поле перемещений. Картины интерференционных полос, восстановленные с интерферограммы, записанной в этом случае, позволяют определять компоненты U , V , W . Если же жесткость подложки намного меньше жесткости прозрачной среды, жесткость которой, в свою очередь, намного меньше жесткости исследуемого изделия, и толщина этой среды t постоянна в пределах исследуемого участка поверхности, то картина интерференционных полос, восстановленная интерферограммой, будет нести информацию о сумме продольных деформаций. Действительно, при достаточно малой толщине прозрачной среды можно считать, что продольные деформации ϵ_x и ϵ_y остаются постоянными по ее толщине; тогда средняя поперечная деформация среды ϵ_z определяется равенством [6]

$$\epsilon_z = -(\mu/(1 - \mu))(\epsilon_x + \epsilon_y), \quad (1)$$

где μ — коэффициент Пуассона материала среды.

Так как жесткость подложки регистрирующей среды низка, то тождественные точки эмульсии и образца в процессе его деформирования в направлении осей x и y имеют одинаковые перемещения. Поэтому картина полос, наблюдаемая при восстановлении голографической интерферограммы, будет содержать информацию только о компоненте W , равной абсолютной поперечной деформации среды толщиной t . Относительная поперечная деформация найдется по формуле

$$\varepsilon_z = W/t. \quad (2)$$

Следовательно, в соответствии с зависимостями (1) и (2) можно записать:

$$(\varepsilon_x + \varepsilon_y) = -((1 - \mu)/\mu)(W/t) = (1 - \mu)L\lambda/2\mu tn, \quad (3)$$

где L — порядок интерференционных полос, λ — длина волны света, n — показатель преломления прозрачной среды.

Итак, предложенный способ крепления регистрирующей среды на исследуемом объекте позволил значительно снизить требования к виброизоляции элементов экспериментальных схем, а также получить информацию о сумме продольных деформаций. Применение этого способа не требует использования интерферометрических столов, а техника проведения эксперимента по своей сложности и трудоемкости приближается к фотографической. При проявлении регистрирующей среды на месте появляется возможность исследовать нестационарные процессы в «реальном» времени. В качестве регистрирующей среды использовались фотопластинки ЛОИ-2, проявляемые в проявителе Петрова [7].

Расшифровка голографических интерферограмм в случаях, когда знак интерференционных полос известен, сводится к совместному решению трех уравнений типа [8]

$$\Delta_{so} = \overline{\Delta r} \rho_{so} = L_{so}\lambda (s, o = 1, 2, 3), \quad (4)$$

где $\overline{\Delta r} = \overline{U}_i + \overline{V}_j + \overline{W}_k$, $\overline{\rho}_{so} = \overline{\rho}_s - \overline{\rho}_o = (l_s - l_o)\overline{i} + (m_s - m_o)\overline{j} + (n_s - m_o)\overline{k}$, $l_i = \cos \alpha_i$, $m_i = \cos \beta_i$, $n_i = \cos \gamma_i$ ($t = o, s$). Здесь Δ_{so} — разность хода световых лучей, обусловленная условиями освещения (o) и наблюдения (s) в случае, если расшифровка интерферограмм выполняется по схеме Эпсона, либо Δ_{so} — разность хода, вызванная сменой направления наблюдения за точкой объекта с s на o , если расшифровка выполняется по схеме Александра — Бонч-Бруевича; \overline{i} , \overline{j} , \overline{k} — орты координатных осей x , y , z соответственно; L_{so} — порядок интерференционных полос; $\overline{\rho}_s$, $\overline{\rho}_o$ — орты направлений s и o , определяемые направляющими косинусами (l_s, m_s, n_s) и (l_o, m_o, n_o) соответственно.

Решая систему трех уравнений (4) с тремя неизвестными, определяют искомые компоненты U , V , W вектора перемещения $\overline{\Delta r}$. Если же знак порядка L_{so} не определен, то для однозначного определения модуля вектора перемещения $\overline{\Delta r}$ необходимо использовать четыре уравнения типа (4) [12].

Компоненты тензора деформаций в соответствии с соотношениями Коши [6]

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x}, & \gamma_{xy} &= \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial V}{\partial y}, & \gamma_{yz} &= \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}, \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial W}{\partial z}, & \gamma_{zx} &= \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} \end{aligned}$$

находят численным или графическим дифференцированием экспериментально найденных функций U , V , W .

Проведенные исследования показали, что в случае применения традиционных способов записи и расшифровки голографических интерферограмм компоненты U и V вектора перемещения $\overline{\Delta r}$ определяются со

значительными погрешностями, вызванными решением плохо обусловленных систем алгебраических уравнений [3—4, 12]. Точность определения этих компонент можно повысить, если избавиться от необходимости совместного решения системы трех уравнений (4). Такая возможность появляется при записи голографических интерферограмм на встречных пучках. В этом случае уравнение (4) упрощается:

$$Ul_s + Vm_s + W(n_s + 1) = L_s\lambda \quad (s = 1, 2, 3) \quad (5)$$

— и появляется возможность регистрации картин интерференционных полос, несущих информацию преимущественно об одной компоненте вектора перемещения Δr . Здесь и везде в дальнейшем индекс o у порядка полос L опускается. В рассматриваемом случае при расшифровке голографических интерферограмм можно воспользоваться одним из следующих методов.

Первый метод. Вначале регистрируют только компоненту W . Для этого съемку картины полос проводят при углах $\alpha_1 = \beta_1 = \pi/2$ и $\gamma_1 = 0$. Используя первое уравнение системы (5), находят

$$W = L_1\lambda/2. \quad (6)$$

С помощью фотографий интерференционных картин, соответствующих направлениям наблюдения

$$\alpha_2 \neq \pi/2, \quad \beta_2 = \pi/2, \quad \gamma_2 = \pi/2 - \alpha_2$$

и

$$\alpha_3 = \pi/2, \quad \beta_3 \neq \pi/2, \quad \gamma_3 = \pi/2 - \beta_3,$$

определяет две другие компоненты вектора перемещения $\overline{\Delta r}$:

$$U = [L_2\lambda - W(1 + n_2)]/l_2, \quad V = [L_3\lambda - W(1 + n_3)]/m_3. \quad (7)$$

Если вторым слагаемым в числителе выражений (7) пренебречь, то формулы (7) еще более упростятся, приняв вид

$$U = L_2\lambda/m_2, \quad V = L_3\lambda/m_3. \quad (8)$$

По внешнему виду формулы (8) напоминают разрешающие уравнения метода муаровых полос.

Второй метод. С целью независимого определения компонент U , V , W вектора перемещения $\overline{\Delta r}$ съемку картин интерференционных полос проводят с четырех попарно симметричных относительно оси z направлений, определяемых направляющими косинусами:

$$\left. \begin{array}{l} l_1 \neq 0, m_1 = 0, n_1 = \sqrt{1 - l_1^2}, \\ l_2 = -l_1, m_2 = 0, n_2 = n_1 \end{array} \right\} \text{— первые два направления;} \\ \left. \begin{array}{l} l_3 = 0, m_3 \neq 0, n_3 = \sqrt{1 - m_3^2}, \\ l_4 = 0, m_4 = -m_3, n_4 = n_3 \end{array} \right\} \text{— вторые два направления.}$$

По картинам интерференционных полос, снятым по первым двум направлениям, в соответствии с уравнениями (5) $Ul_1 + W(1 + n_1) = L_1\lambda$, $-Ul_1 + W(1 + n_1) = L_2\lambda$ определяются компоненты U и W :

$$U = (L_1 - L_2)\lambda/2l_1, \quad (9)$$

$$W = (L_1 + L_2)\lambda/2(1 + n_1). \quad (10)$$

Аналогично две другие картины полос позволяют найти

$$V = (L_3 - L_4)\lambda/2m_3, \quad (11)$$

$$W = (L_3 + L_4)\lambda/2(1 + n_3). \quad (12)$$

Совпадение величин W , вычисляемых по формулам (10) и (12), служит критерием точности получаемого результата.

При расшифровке интерферограмм по формулам (6)—(12) необходимо знать порядок полосы, который можно определить по спекл-интерферограмме методом поточечного сканирования [9]. При записи голографических интерферограмм на встречных пучках на одной и той же фотопластинке записываются одновременно и спекл-интерферограмма, и голографическая интерферограмма. С целью повышения достоверности экспериментально получаемой информации целесообразно параллельно с расшифровкой голографических интерферограмм проводить расшифровку и спекл-интерферограмм.

Если конечной целью эксперимента является определение компонент тензора деформаций, то отсчет порядка полосы можно проводить от любой наперед заданной полосы. Закон изменения порядков полос вдоль рассматриваемого сечения образца устанавливается по скорости и направлению перемещения полос в процессе изменения направления наблюдения.

Используя зависимости (7)—(12), компоненты тензора деформаций в точках, лежащих на поверхности исследуемой конструкции, находят по формулам

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\lambda}{l_2} \left(\frac{\partial L_2}{\partial x} - \frac{\partial L_1}{\partial x} (1 + n_2) \right), \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\lambda}{m_3} \left(\frac{\partial L_3}{\partial y} - \frac{\partial L_1}{\partial y} (1 + n_3) \right)\end{aligned}\quad (7')$$

или

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\lambda}{2l_1} \left(\frac{\partial L_1}{\partial x} - \frac{\partial L_2}{\partial x} \right), \quad (9')$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\lambda}{2m_3} \left(\frac{\partial L_3}{\partial y} - \frac{\partial L_4}{\partial y} \right). \quad (11')$$

Итак, при соответствующей организации схемы эксперимента расшифровку голографических интерферограмм можно существенно упростить, одновременно повысив точность определения компонент вектора перемещения Δr . Техника проведения эксперимента приближается при этом к муаровой, а чувствительность и точность метода соответствуют варианту «простого» муара [10]. Однако в отличие от последнего чувствительность метода зависит от угла наблюдения, что позволяет с равной точностью исследовать как малые упругие, так и малые пластические деформации.

В качестве иллюстрации описанной методики приведем примеры исследования деформированного состояния плоских образцов. Фотопластинки ЛОИ-2 или эмульсия, снятая с этих пластинок, крепились непосредственно на исследуемом участке образца и экспонировались во встречных пучках света, генерируемого He-Ne-лазером. Фотопластинки проявлялись в проявителе Петрова. Картины интерференционных полос регистрировались с помощью фотоаппарата «Зенит-Е», объектива «Телемар» и приставки для макросъемки.

С целью иллюстрации общей методики определения деформаций ε_x и ε_y по формулам (9') и (11') нами исследовано деформированное состояние центрально растянутой пластинки с симметрично расположенным круговым отверстием. Геометрические размеры пластинки, характеристики материала образца и нагрузка приведены на рис. 2.

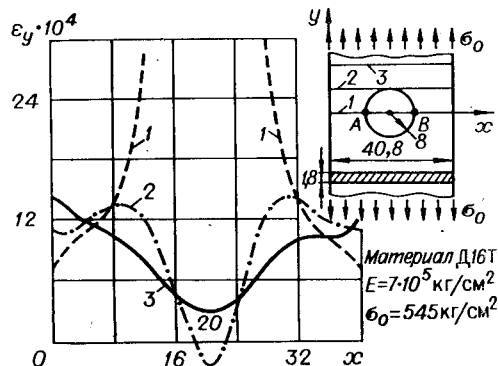


Рис. 2. Эпюры деформаций ε_y в трех сечениях образца (1, 2 и 3).

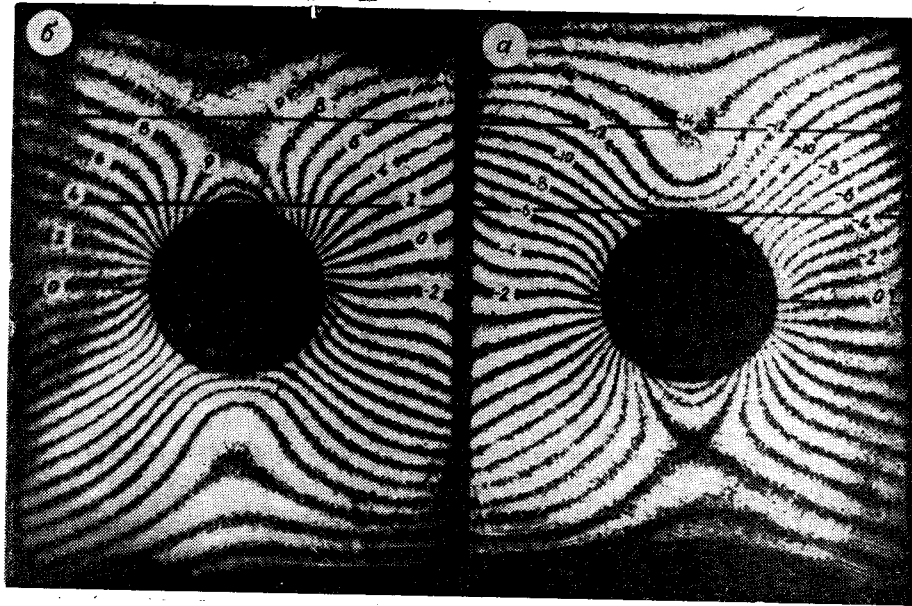


Рис. 3. Картины интерференционных полос, наблюдаемые в плоскости xoy с двух симметричных относительно оси z направлений.

Картины интерференционных полос, наблюдаемые по направлениям ($\alpha_3 = 90^\circ$, $\beta_3 = 74^\circ$, $\gamma_3 = 16^\circ$) и ($\alpha_4 = 90^\circ$, $\beta_4 = 106^\circ$, $\gamma_4 = 16^\circ$), приведены на рис. 3. Припаятые порядки полос указаны на этом же рисунке. Знак порядков полос назначался из условия согласованности знаков в правой

№	f_2	f_3	ξ	n	h	r	$h-r$	$n-h$	$\frac{\partial L_-}{\partial y} \times 10^{-2}$	$\varepsilon_y \cdot 10^{-4}$
0	13,0	11,0	2,2	-2	-1	0	-1	-1	-8,2	7,46
1	10,0	10,0	-0,5	-2	-1	0	-1	-1	-10,0	9,18
2	9,0	8,5	-0,5	-2	-1	0	-1	-1	-11,5	10,56
3	7,5	8,0	0	-2	-1	0	-1	-1	-12,9	11,84
4	7,0	6,5	1,0	-2	-1	0	-1	-1	-14,7	13,49
5	5,0	5,0	-1,2	-2	-1	0	-1	-1	-20,0	18,37
6	3,5	3,0	0	-3	-2	-1	-1	-1	-31,1	28,55
14	3,0	3,5	1,0	-2	-1	0	-1	-1	-32,6	29,93
15	5,0	4,6	1,2	-1	0	1	-1	-1	-20,5	18,82
16	5,5	7,5	5,0	-1	0	1	-1	-1	-19,9	
17	7,6	6,5	6,5	-1	0	1	-1	-1	-12,3	11,26
18	9,0	8,0	0	0	1	2	-1	-1	-11,8	10,84
19	11,0	9,0	2,0	0	1	2	-1	-1	-9,8	8,99
20	13,0	10,0	7,0	0	1	2	-1	-1	-7,6	6,96

№	f_2	f_3	ξ	n	h	r	$h-r$	$n-h$	$\frac{\partial L_+}{\partial y} \times 10^{-2}$
0	11,0	13,0	-2,2	0	-1	-2	+1	1	8,2
1	10,0	10,0	0,5	0	-1	-2	1	1	10,0
2	8,5	9,0	0,5	0	-1	-2	1	1	11,5
3	8,0	7,5	0,0	0	-1	-2	1	1	12,9
4	6,5	7,0	-1,0	0	-1	-2	1	1	14,7
5	5,0	5,0	1,2	0	-1	-2	1	1	20,0
6	3,0	3,5	0,0	-1	-2	-3	1	1	31,1
14	3,5	3,0	-1,0	0	-1	-2	1	1	32,6
15	4,6	5,0	-1,2	1	0	-1	1	1	20,5
16	7,5	5,5	-5,0	1	0	-1	1	1	19,9
17	6,5	7,6	-6,5	1	0	-1	1	1	12,3
18	8,0	9,0	0	2	1	0	1	1	11,8
19	9,0	11,0	-2,0	2	1	0	1	1	9,8
20	10,0	13,0	-7,0	2	1	0	1	1	7,6

и левой частях уравнения (5). При вычислении производных $\partial L/\partial y$ в уравнении (11') использовалась локальная параболическая аппроксимация

$$\frac{\partial L}{\partial y} = \frac{M \sin \beta_3 (k-r) (f_3 + 2\xi) f_3 - (n-k)(2\xi - f_2) f_2}{f_2 f_3 (f_2 + f_3)},$$

где M — масштаб снимка; f_2, f_3 — шаги между тремя рядом расположенными интерференционными полосами с порядками k, n, r соответственно, между которыми лежит точка, в которой вычисляется производная $\partial L/\partial y$; ξ — расстояние от этой точки до средней полосы.

В таблице приведены результаты измерения параметров f_2, f_3, ξ, n, k, r по фотографиям (см. рис. 5), а также результаты вычисления деформаций ε_y по формуле (11') для сечения 1.

Эпюры деформаций ε_y в трех сечениях образца 1, 2 и 3 приведены на рис. 2. Величины и характер изменения деформаций в этих сечениях согласуются с результатами других экспериментальных и теоретических исследований. Теоретическое значение коэффициента концентрации деформаций в рассматриваемом случае равно 3,74 [11]; нами получены следующие величины: в точке A — 3,66, в точке B — 3,85. Несовпадение значений коэффициентов концентраций в точках A и B объясняется нецентральностью приложения нагрузки.

Предложенный метод определения компонент тензора деформаций и компонент вектора перемещения позволил существенно повысить точность их определения по сравнению с традиционными методами расшивки интерференционных картин.

Этот же образец был использован и при получении картины интерференционных полос, являющихся линиями уровня функции $(\varepsilon_x + \varepsilon_y)$. Для получения этой картины на поверхность образца наклеивалось листовое оргстекло толщиной 1,24 мм, на которое наносилась высококачественная эмульсия с фотопластинок ЛОИ-2. Перенос эмульсии осуществлялся в два этапа: вначале она отделялась от стеклянной подложки, а затем в воде переносилась на образец. Для отделения эмульсии применяли следующие растворы: раствор 1 — соляная кислота (5%-ный раствор);



Рис. 4. Картина изопахтик — линий уровня функции $(\varepsilon_x + \varepsilon_y)$.

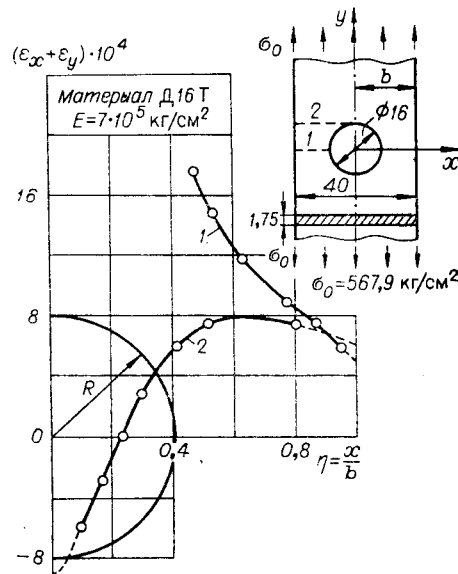


Рис. 5. Эпюры сумм деформаций $(\varepsilon_x + \varepsilon_y)$ в двух сечениях образца (1, 2).

раствор 2 — формалин (40%-ный) — 20 мл, фтористый натрий — 5 г, вода — 100 мл.

Время выдержки в каждом растворе определялось экспериментально и обычно не превышало 1 мин. Эмульсия сушилась в темноте при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Чувствительность и разрешение эмульсии не ухудшались.

Интерферограммы записывались методом двух экспозиций, затем следовала фотографическая обработка эмульсии, и она снова переносилась на стеклянную подложку (последний этап не обязателен!). Полученная таким образом интерференционная картина приведена на рис. 4. Порядок полос, достаточно удаленных от концентратора, определялся по величине средних деформаций в сечениях образца, удаленных от отверстия. В соответствии с формулой (3) вычислялась сумма продольных деформаций $(\epsilon_x + \epsilon_y)$ в двух сечениях образца 1, 2 (рис. 5). В сечении 1 функция $(\epsilon_x + \epsilon_y)$ определялась на основе численного счета по аналитическим зависимостям, приведенным в [11]. Совпадение результатов удовлетворительное.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жилкин В. А., Борняк Л. А. Определение перемещений элементов конструкций с помощью голографической интерферометрии.— Изв. высш. учебн. заведений. Строительство и архитектура, 1974, т. 10, с. 150—155.
2. Charnet J. C. Analyse des Etats Plans de Contrainte par Interferométrie Holographique, sur Pièces Diffusantes.— Rev. Franç. Mec., 1976, p. 84—85.
3. Жилкин В. А. Чувствительность и точность оптических методов при определении полей перемещений или деформаций.— В кн.: Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений: [Межвуз. сб. науч. трудов]. Новосибирск: изд. НИИЖТ, 1978, вып. 190/3, с. 101—109.
4. Писарев В. С., Яковлев В. В., Щепинов В. П. Определение радиальных и осевых деформаций цилиндрических оболочек методом голографической интерферометрии.— В кн.: Тез. докл. 3-го Всесоюз. семинара «Оптико-голографические методы исследования деформаций и напряжений». Днепропетровск: изд. ДГУ, 1978, с. 76—78.
5. Boone P. Use of Reflection Holograms in Holographic Interferometry and Speckle Correlation for Measurement of Surface — Displacement.— Opt. Acta, 1975, vol. 22, p. 579—589.
6. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости.— М.: Наука, 1975, с. 576.
7. Петров В. А. Скоростная обработка фотографических слоев при получении отражательных голограмм.— Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр., 1976, т. 21, № 3.
8. Александров Е. Б., Бонч-Бруевич А. М. Исследование поверхностных деформаций тел с помощью голографической техники.— ЖТФ, 1967, т. 37, № 2.
9. Жилкин В. А., Бондаренко А. Н. Определение перемещений и деформаций деформируемых тел методом спекл-интерферометрии.— Изв. высш. учебн. заведений. Строительство и архитектура, 1977, т. 9, с. 157—162.
10. Жилкин В. А., Попов А. М. Чувствительность и точность муаровых методов при измерении полей деформаций.— Проблемы прочности, 1976, № 1, с. 84—88.
11. Howland R. C. T. On the Stresses in the Neighbourhood of a Circular Hole in a Strip Under Tension.— Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A, 1930, vol. 229, p. 49.
12. Де С. Т. и др. Голографический интерферометр с минимальной погрешностью измерения смещений и деформаций.— В кн.: Голографические измерительные системы. Новосибирск: изд. НЭТИ, 1978, вып. 2, с. 30—50.

Поступила в редакцию 3 мая 1979 г