

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 539.373 : 620.178

А. Н. ГРИШАНОВ, С. Т. ДЕ, Е. Н. ДЕНЕЖКИН, В. А. ХАНДОГИН
 (Новосибирск)

ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ И РЕГИСТРАЦИИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Эффективная обработка голографической информации возможна лишь при условии применения автоматизированных голографических измерительных систем (ГИС), в состав которых входят голографический интерферометр, устройство ввода оптической информации в ЭВМ, вычислительный комплекс со средствами визуализации и документирования.

Многие задачи механики, в которых используются методы голографической интерферометрии, обладают специфическими особенностями. Для учета этих задач и получения достоверных результатов требуется тщательный подбор параметров ГИС. К подобному классу относится задача об исследовании остаточных напряжений в плоских образцах (рис. 1, а), на примере которой показан вариант поиска оптимальных параметров ГИС.

Оптимизация геометрической схемы интерферометра. При исследовании деформаций твердых тел главный критерий оптимальности интерферометра — минимизация погрешностей измерений. Как известно [2—5], основными факторами, влияющими на величину методической погрешности, являются ошибки определения порядка интерференционных полос и направления векторов чувствительности интерферометра. Анализ влияния указанных факторов обычно выполняется на основе известных количественных оценок, полученных для систем линейных алгебраических уравнений. Однако введение чисел обусловленности позволяет охарактеризовать интерферометр лишь в некотором среднем смысле и не дает возможности дифференцированно учесть специфику конкретной измерительной задачи. Более адекватное описание получается с помощью статистических методов, один из которых изложен в работе [6]. Однако использованная в указанной статье методика в результативной части ничем не отличается от известных, поскольку корреляционные эффекты не были учтены. Но именно эти эффекты, как правило, и имеют решающее значение при анализе геометрической схемы интерферометра.

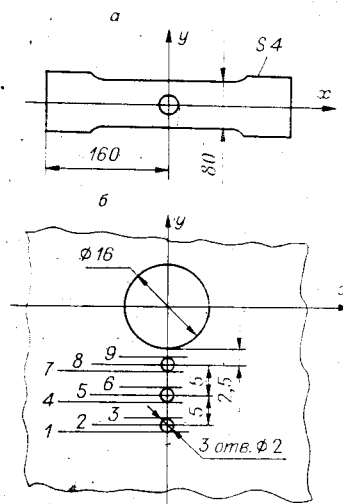


Рис. 1. Форма образцов (а) и схема сверления отверстий (б)

Предельно точные измерения обеспечивает схема со взаимно перпендикулярными векторами чувствительности интерферометра [2—4]. Применение таких схем на практике приводит к двум отрицательным следствиям: необходимости использования ретрорефлексных покрытий (тогда измерения становятся контактными) и разделенному во времени экспонированию голограмм (что снижает достоверность данных измерений в условиях релаксации напряжений). Большее распространение получили схемы с одним направлением освещения, которые свободны от указанных недостатков, хотя и отличаются пониженной точностью измерений. При этом оптимальная конфигурация интерферометра определяется выбором целевой функции в критерии оптимальности. Последний, по мнению авторов, должен удовлетворять двум условиям, которые отражают особенности голографической интерферометрии.

Во-первых, абсолютные порядки интерференционных полос определяются, как правило, неоднозначно. Физически это означает, что по голографическим интерферограммам поле перемещений можно восстановить лишь с точностью до поступательных движений, поэтому и критерий должен быть инвариантным относительно жестких сдвигов исследуемого объекта. Легко проверить, что относительная погрешность не инвариантна относительно указанного преобразования и поэтому не может быть использована при формулировке критерия оптимальности интерферометра в общем случае.

Во-вторых, напряженное состояние деформируемого тела не зависит от его жестких вращений, а значит, и оптимальная схема также должна быть инвариантной относительно поворотов исследуемого образца.

При естественном предположении о независимости погрешности порядков полос от уровня перемещений условия инвариантности выделяют критерии, использующие минимизацию абсолютных погрешностей вектора перемещений или его отдельных компонент. Можно показать, что одновременно при этом минимизируются и относительные погрешности деформаций.

Рассмотрим более подробно двухголограммный интерферометр, используемый в ГИС при исследовании остаточных напряжений.

Плоский голографический интерферометр позволяет регистрировать проекцию полного трехмерного поля перемещений $u(x)$ на плоскость, в которой лежат его направления чувствительности. Систему координат удобно выбрать так, чтобы ось $Ox_3 \equiv Oy$ была перпендикулярна указанной плоскости, образованной, следовательно, векторами типа $(x_1, x_2, 0) \equiv (x, 0, z)$ (рис. 2, а). При этом уравнения полос имеют вид

$$R_{ij}u_j = N_i; \quad R_{ij} = (R_{0j} + R_{ij})/\lambda; \quad i, j = 1, 2, \quad (1)$$

где u_i — компоненты вектора перемещений; $R_0 = (R_{01}, R_{02}, 0)$; $R_i = (R_{i1}, R_{i2}, 0)$ — орты направлений освещения и наблюдения для i -й интерферограммы; λ — длина волны лазера.

Естественно предположить, что случайные ошибки порядковых номеров полос δN_i ($i = 1, 2$) являются некоррелированными нормальными случайными процессами с нулевым средним:

$$\langle \delta N_i \rangle = 0; \quad \langle \delta N_i \delta N_j \rangle = \sigma^2 \delta_{ij}; \quad i, j = 1, 2,$$

где σ^2 — дисперсия номеров полос; δ_{ij} — символы Кронекера. При этом оценка вектора перемещений по результатам расшифровки голографической интерферограммы оказывается несмещенной и состоятельной:

$$\langle \delta u_i \rangle = 0; \quad \langle \delta u_i \delta u_j \rangle = \sigma^2 R_{ik}^{-1} R_{jk}^{-1} \equiv \sigma^2 K_{ij}. \quad (2)$$

Здесь K_{ij} — корреляционная матрица, которая в общем случае не диагональна. Поэтому случайные погрешности $\delta u_i(x)$ имеют двумерное гауссовское распределение общего типа с эллипсом рассеяния вида [7]

$$\frac{K_{22} \delta u_1^2 - 2K_{12} \delta u_1 \delta u_2 + K_{11} \delta u_2^2}{4(K_{11} K_{22} - K_{12}^2)} = 1. \quad (3)$$

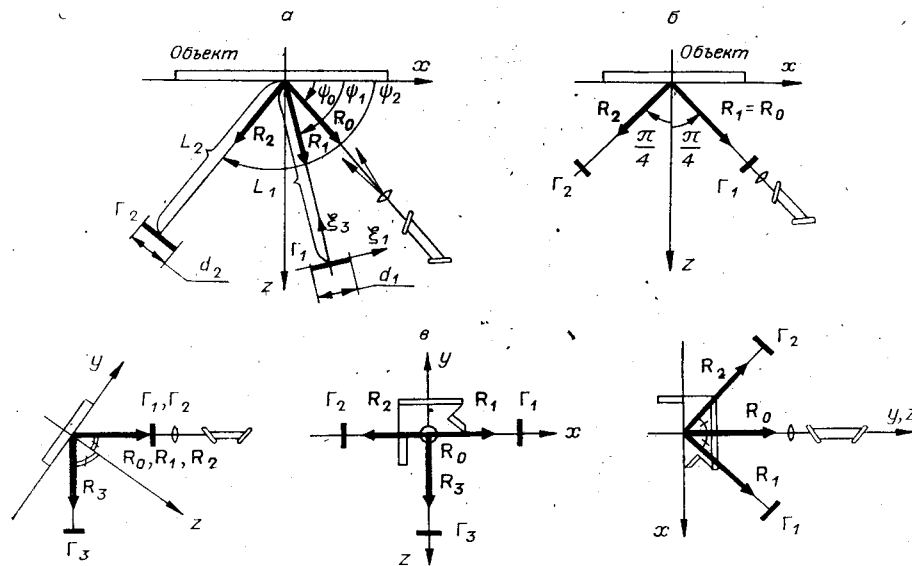


Рис. 2. Общая (а) и оптимальная (б) схемы двухголограммного интерферометра, а также три проекции оптимального трехголограммного интерферометра (в)

Соотношения (2), (3) позволяют сформулировать два разных критерия оптимальности плоского интерферометра. Если задача измерений состоит в определении обеих компонент плоского поля перемещений $u_i(x)$, $i = 1, 2$, то естественно потребовать минимизации максимально возможного выброса $|\delta u|$, что эквивалентно минимизации наибольшей полуоси эллипса рассеяния

$$\max(a_1, a_2) \rightarrow \inf, \quad (4)$$

где a_1, a_2 — полуоси эллипса (3).

Если по условию экспериментов необходима только одна из двух компонент поля перемещений, то целесообразно минимизировать ее дисперсию

$$\langle \delta u_i^2 \rangle = \sigma^2 K_{ii} \rightarrow \inf, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

где по i суммирование не выполняется. В выражениях (4) и (5) точные нижние грани определяются в области изменения углов ψ_n , $n = 0, 1, 2$ (см. рис. 2, а), которая обуславливается спецификой экспериментальной установки и решаемой задачи (габариты интерферометра, допустимая длительность экспозиции, уровень шероховатости поверхности исследуемого объекта и т. д.) и обычно значительно меньше, чем максимально возможная. При этом критерии (4) и (5) из абсолютных превращаются в условные. Опуская громоздкие выкладки, приведем окончательные результаты для трех наиболее интересных случаев.

Критерий (4) выделяет симметричные схемы интерферометров со следующими параметрами:

$$\psi_0 = \pi/2; \quad \psi_2 - \psi_0 = \psi_0 - \psi_1, \quad (6)$$

которые совпадают с известными схемами, полученными из анализа обусловленности алгебраической системы (1) [3, 5].

Для задач об измерении z -компоненты поля перемещений критерий (5) приводит к очевидному результату:

$$\psi_0 = \psi_1 = \psi_2 = \pi/2. \quad (7)$$

При исследовании остаточных напряжений основной интерес представляет x -компонента поля смещений $u_1(x) = u(x, y)$. Дополнительные условия, главное из которых состоит в предельном сокращении дли-

тельности экспозиций, ограничивают минимальную интенсивность объектной волны и в рассматриваемом случае могут быть формализованы в виде соотношений

$$\psi_2 - \psi_1 \leq \pi/2; \psi_1 < \psi_0 < \psi_2. \quad (8)$$

Тогда критерий (5) выделяет несимметричную схему интерферометра со следующими характеристиками (рис. 2, б):

$$\psi_0 = \psi_1 = \pi/4; \psi_2 = 3\pi/4; \langle \delta u^2 \rangle = \sigma^2/2. \quad (9)$$

Для сравнения укажем, что симметричный интерферометр (6) при условии (8) приводит к большей погрешности измерений продольных смещений $\langle \delta u^2 \rangle = \sigma^2$; теоретический предел точности для него, достигаемый при $\psi_2 - \psi_1 = \pi$, равен точности несимметричного интерферометра (9). В то же время интерферометр (9) обладает большей погрешностью при измерении двух компонент, которая для него равна $\langle \delta u^2 + \delta w^2 \rangle = 3\sigma^2/2$. Для симметричного интерферометра (6) при условии (8) эта погрешность меньше: $\langle \delta u^2 + \delta w^2 \rangle = 4\sigma^2/(2 + \sqrt{2})$.

Для окончательного определения оптимальной схемы голографического интерферометра (см. рис. 2, а) необходимо зафиксировать расстояния L_i от объекта до голограмм Γ_i и их апертуры $d_i \equiv \text{diam } \Gamma_i$. С этой целью рассмотрим интенсивность $I(x, y)$ голографической интерферограммы, полученной путем восстановления действительного изображения, например, с голограммы Γ_1 , которая имеет вид

$$I(x, y) = 2I_0(x, y) \{1 + V_1 V_2 \cos 2\pi R_{1j} u_j\}. \quad (10)$$

Здесь $I_0(x, y)$ аппроксимирует изображение образца быстро осциллирующими функциями, воспринимаемыми как спекл-шумы изображения. Ясно, что минимальный шаг полос на интерферограмме должен быть значительно больше (примерно в 10 раз), чем средний размер спеклов. Учитывая оценку для характерного размера спеклов (см. [4]) и оценку минимального шага полос ($\min h$), вытекающую из уравнений (1), получаем следующую цепочку неравенств:

$$10 \frac{\lambda L_1}{d_1} \leq \min h \leq (\max |R_{1j} u_{j,h}|)^{-1}, \quad (11)$$

где $u_{j,h}$ — производная j -й компоненты поля перемещений по направлению h . Из (11) видно, что для устранения вредного влияния шумов целесообразно снижать отношение L_1/d_1 . Однако предельное уменьшение отношения L_1/d_1 на практике неосуществимо из-за снижения контраста полос по причинам, рассмотренным ниже.

Контраст интерференционных полос (10) определяется в основном двумя факторами: во-первых, делокализацией полос [4] из-за конечного разрешения голографического изображения

$$V_1 = \frac{1}{\Delta} \iint_{\Delta} \cos 2\pi R_{1j} (u_{j,x}(x - x_*) + u_{j,y}(y - y_*)) dx dy, \quad (12)$$

где Δ — область вклада с центром в точке (x_*, y_*) ; во-вторых, вариацией орта наблюдения \mathbf{R}_1 в пределах апертуры голограммы

$$V_2 = \frac{1}{\Gamma_1} \iint_{\Gamma_1} \cos \frac{2\pi}{\lambda} u \frac{\partial R_1}{\partial \xi_\alpha} (\xi_\alpha - \xi_\alpha^*) d\xi_1 d\xi_2. \quad (13)$$

Здесь ξ_α, ξ_α^* , $\alpha = 1, 2, 3$, — координаты текущей точки и центра тяжести апертуры голограммы (см. рис. 2, а). Контраст полос исчезнет, если хотя бы один из множителей (12), (13) обратится в нуль. Учитывая это, получаем из выражений (12) и (13) еще два ограничительных условия, которым удобно придать следующую форму:

$$t \max |R_{1j} u_{j,t}| \ll 1/2; d_1 \max |\mathbf{u} \times \mathbf{R}_1| \ll (\lambda L_1)/2, \quad (14)$$

где l — характерный линейный размер области вклада Δ ; $u_{j,t}$ — производная j -й компоненты перемещений по направлению t .

Таким образом, три соотношения ((11), (14)) определяют область допустимой вариации параметров интерферометра L_1, d_1 , выражая их через разрешение, перемещения и деформации. В частности, для асимметричного интерферометра (9) указанная область определяется по правилу ($u \equiv u_1, w \equiv u_2$)

$$\frac{\sqrt{2}}{\lambda} \max |u + w| \ll \frac{L_1}{d_1} \ll \left(10 \sqrt{2} \max \left| \frac{\partial}{\partial h} (u + w) \right| \right)^{-1}. \quad (15)$$

Например, распределения остаточных напряжений характеризуются относительно высокими деформациями ($u_{1,t} \sim 10^{-3}$), но малыми перемещениями, вызывающими ~ 10 интерференционных полос. Подставляя эти значения в неравенство (15), получаем $10 \ll L_1/d_1 \leq 70$, что практически исключает возможность выбора, так как левое неравенство должно быть выполнено с достаточным запасом. Поэтому в экспериментах было принято $L_1 = 5 \cdot 10^2$ мм, $d_1 = 8 \div 10$ мм.

Отметим, что рассмотренный алгоритм выбора оптимальной геометрической схемы плоского интерферометра с очевидными изменениями переносится и на трехголограммные интерферометры. Эллипс рассеяния (3) заменяется эллипсоидом рассеяния [7], с помощью которого формулируются различные виды критериев оптимальности. При исследовании трехмерных задач минимизируется большая полуось эллипсоида, что приводит к симметричной схеме интерферометра [3—5]. Однако при анализе плоских задач целесообразно минимизировать большую полуось эллипса, полученного при проекции эллипсоида рассеяния на плоскость, образованную парой измеряемых компонент поля перемещений. При этом выделяются асимметричные схемы (рис. 2, в), которые обеспечивают значительный выигрыш в точности измерения плоскостных компонент поля перемещений, но уступают симметричным схемам при измерении полного трехмерного поля. Указанные отличия двух видов схем, очевидно, определяют и области их рационального использования.

Преобразования оптической информации. Конечная цель этих преобразований состоит в определении полей перемещений $u(x, y)$, $w(x, y)$ и деформации $\epsilon_{11}(x, y)$. Основные этапы обработки и применяемые алгоритмы (рис. 3) ориентированы на использование в измерительной системе стандартных аппаратных средств [2]. Отметим отличительные особенности используемых преобразований интерферограмм в ГИС.

При вводе оптической информации в ЭВМ необходимо учитывать не только известные рекомендации, вытекающие из теоремы Котельникова, но и фильтрующие свойства считывающей диафрагмы. В результате шаг дискретизации l и диаметр считывающей диафрагмы d оказываются взаимосвязанными [8]. При вводе с большой диафрагмой ($d > 2l$) происходит искажение спектра дискретизированного сигнала. При малой диафрагме ($d < l$) усиливается вредное влияние спекл-структур голографического изображения и снижается отношение сигнал — шум. В данной работе ввод информации осуществляется при $d = 2l$, поскольку в этом случае частота среза примерно

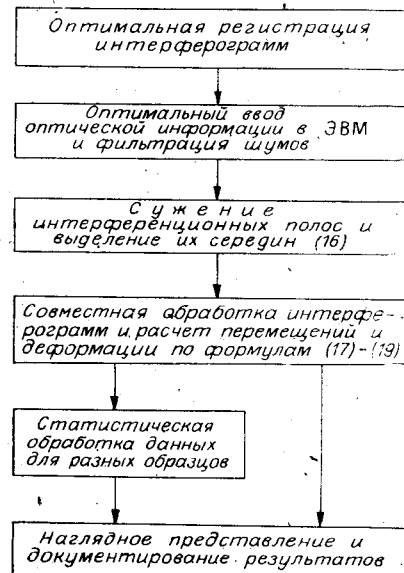


Рис. 3. Последовательность преобразования голографической информации

равна частоте дискретизации. Последняя выбиралась из следующих соображений.

Цифровой образ оптической информации должен достаточно точно воспроизводить положение интерференционных полос. Погрешность такого воспроизведения зависит от шага дискретизации и для одной из координат равна $|\delta x_N| \leq l$, где $x_N - x$ — координата центра интерференционной полосы. Тогда расстояния между двумя соседними полосами h определяются с погрешностью вида

$$|\delta h| = |\delta(x_N - x_{N-1})| \leq \sqrt{2}l,$$

а количество отсчетов между точками x_{N-1} и $x_N - M \approx |x_N - x_{N-1}|/l$. Пусть, например, необходимо воспроизвести шаг полос с погрешностью не более 10%. Тогда минимальное количество отсчетов между двумя полосами определяется по правилу

$$\min M \geq \frac{\sqrt{2} \min h}{|\delta h|} = 10 \sqrt{2}.$$

С учетом этого ограничения выбирался шаг дискретизации при вводе интерферограмм в ЭВМ (рис. 4, а, з).

Выделение середин интерференционных полос производится в две стадии. Сначала выполняется сужение интерференционных полос с использованием одного из муаровых алгоритмов, основанного на полиномиальном преобразовании вида

$$I(x, y) \rightarrow M_p^4 \sim 8I^4 - 24I_0^2 I^3 + 22I_0^2 I^2 - 6I_0^3 I + I_0^4/2 \quad (16)$$

при соответствующей нормировке значений распределения $M_p^4(x, y)$. Это преобразование дает возможность примерно в 2 раза уменьшить ширину светлых интерференционных полос. Аналогичное преобразование негатива изображения позволяет сузить и темные интерференционные полосы.

Затем производится выделение середин полос (рис. 4, б) с использованием одного из простейших алгоритмов определения положения локальных экстремумов поля $M_p^4(x, y)$. Практический опыт показывает, что относительно быстродействующие «автоматические» алгоритмы недостаточно надежны, а повышение их надежности приводит к недопустимо резкому увеличению времени обработки. Поэтому выделение середин полос выполнялось в полуавтоматическом режиме, который предусматривает возможность вмешательства оператора для исправления ошибок на любом этапе автоматического отслеживания середин полос.

Далее выполняется совместная расшифровка соответствующих пар интерферограмм в следующей последовательности. Определяются относительные порядки интерференционных полос и точки их пересечения с девятью наиболее интересными трассами сканирования (рис. 1, б). Продольная u и нормальная w компоненты перемещений находятся по уравнениям (1), из которых с учетом (9) следует

$$u = \lambda(N_1 - N_2)/\sqrt{2}; \quad w = \lambda N_2/\sqrt{2}. \quad (17)$$

В промежутках между полосами значения перемещений аппроксимируются линейными функциями. Деформация $\varepsilon_{11} = u_{1,1}$ подсчитывается с помощью двухточечной разности

$$\varepsilon_{11}(\tilde{x}_N, y_k) \approx \lambda(1 - \Delta N_2)/[\sqrt{2}(x_N - x_{N-1})]; \quad \tilde{x}_N = (1/2)(x_N + x_{N-1}), \quad (18)$$

где y_k , $k = 1, 2, \dots, 9$, — ординаты трасс сканирования (см. рис. 1, б); x_N — абсцисса центра интерференционной полосы с номером N на первой интерферограмме (см. рис. 2, б); ΔN_2 — изменение порядка полос N_2 на второй интерферограмме между точками (x_{N-1}, y_k) и (x_N, y_k) .

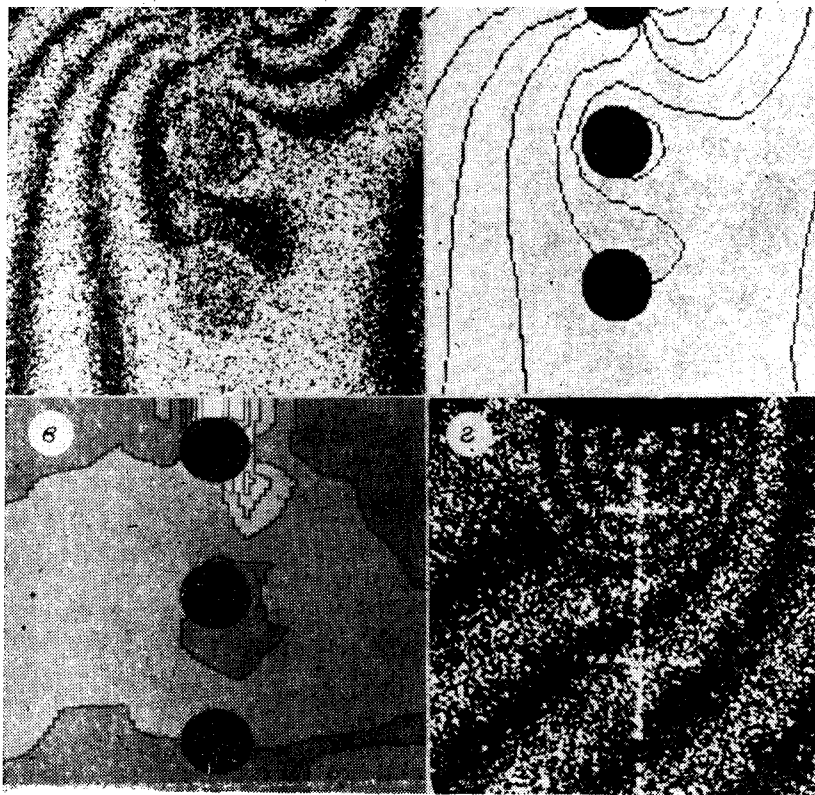


Рис. 4. Основные этапы преобразования типичной интерферограммы:
 а — вид интерферограммы после ввода в ЭВМ; б — выделение середин интерференционных полос; е — полутоновая картина и изолинии распределения деформации после фильтрации по трем полосам; з — интерферограмма сужения, выделяющая пластическую зону

В промежутках между точками \tilde{x}_N и трассами сканирования также использовалась линейная аппроксимация деформации.

Основным источником погрешностей при вычислении ϵ_{11} по формуле (18) являются ошибки определения координат полос. Для уменьшения влияния этих ошибок использовалось осреднение деформации (18) по трем смежным полосам:

$$\tilde{\epsilon}_{11}(\tilde{x}_N, y_k) = (1/3) (\epsilon_{11}(\tilde{x}_{N-1}, y_k) + \epsilon_{11}(\tilde{x}_N, y_k) + \epsilon_{11}(\tilde{x}_{N+1}, y_k)). \quad (19)$$

Наконец, на заключительном этапе предусмотрена возможность статистической обработки данных для нескольких однотипных образцов с вычислением математического ожидания и дисперсии полей $u(x, y)$, $w(x, y)$, $\epsilon_{11}(x, y)$ по стандартным правилам.

По окончании обработки информация о механических характеристиках отображается в удобном виде карт изолиний соответствующего поля (рис. 4, в, 5, а, в) либо в виде графиков (рис. 5, б, з) или таблиц значений.

Алгоритмические погрешности определялись следующим образом. С помощью ЭВМ были синтезированы две интерферограммы, полосы на которых подчиняются уравнениям (17), а уровни перемещений и шумов подобраны близкими к реально наблюдаемым в экспериментах. Затем эти интерферограммы обрабатывались по описанным правилам с определением полей деформации ϵ_{11} и $\tilde{\epsilon}_{11}$ по формулам (18) и (19). Статистическая обработка результатов для 10 различных реализаций

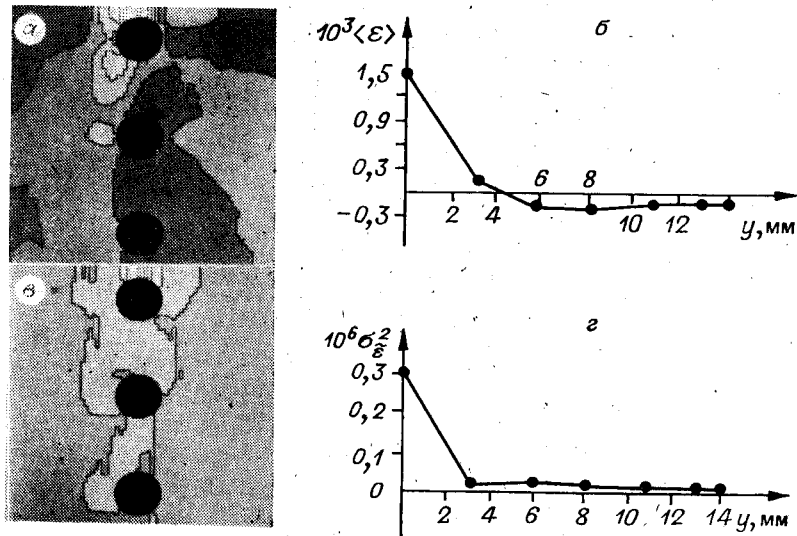


Рис. 5. Результаты статистической обработки для 12 образцов: а — полутоновая картина; б — график в сечении $x = 0$ среднего значения деформаций, рассчитанных по формуле (18); г — полутоновая картина; г — график в сечении $x = 0$ дисперсии деформаций, определенных по правилу (19)

случайных шумов интерферограмм показала, что приведенные относительные погрешности определения деформаций по формулам (18) и (19) составляют 23 и 12% соответственно. Оценка (18) оказывается несмещенной, а вычисления по формуле (19) уменьшают максимальные значения деформации на 10%.

Таким образом, разработанные алгоритмы преобразования оптической информации являются достаточно эффективным средством для восстановления механических характеристик. Средние значения измеряемых величин целесообразно определять до фильтрации погрешностей с помощью осреднения по трем полосам, т. е. по формулам типа (18); для выделения естественного статистического разброса, обусловленного индивидуальными особенностями объекта измерений, а не алгоритмическими погрешностями, целесообразно использовать фильтрацию погрешностей по трем полосам, т. е. формул типа (19).

Методика и результаты измерений. Метод измерений основан на регистрации поля малых перемещений, которое возникает на поверхности образца при его освобождении путем удаления некоторой части материала. При этом суммарное поле напряжений $\sigma_{ij}(x)$ после удаления материала является суперпозицией двух полей: остаточных напряжений $\sigma_{ij}^0(x)$ и возмущения, вызванного удалением части материала, $-\sigma_{ij}^*(x)$:

$$\sigma_{ij}(x) = \sigma_{ij}^0(x) + \sigma_{ij}^*(x).$$

Поле $\sigma_{ij}^*(x)$ может быть восстановлено, если достаточно подробно определить перемещения $u_i^*(x)$, возникающие при освобождении.

Новые поверхности образца свободны от внешних сил, поэтому на них вектор напряжения исчезает:

$$\sigma_{ij} n_j \equiv (\sigma_{ij}^0 + \sigma_{ij}^*) n_j = 0.$$

Здесь n_j — компоненты внешней нормали. Например, для точек, в которых нормаль параллельна оси Ox , получаем равенства

$$\sigma_{11}^0 + \sigma_{11}^* = 0; \quad \sigma_{12}^0 + \sigma_{12}^* = 0, \quad (20)$$

которые позволяют оценить остаточные напряжения σ_{ij}^0 по данным измерения поля $u_i^*(x)$.

Достоинством описанного принципа восстановления остаточных напряжений по сравнению с традиционными [9, 10] является меньшая ба-

за измерений, ограниченная здесь шагом интерференционных полос, а не характерным размером области удаленного материала.

В экспериментах остаточные напряжения инициировались пластической обтяжкой плоских дюралевых образцов с центральным круглым отверстием (см. рис. 1, а) аналогично тому, как это сделано в работе [1] для нагрузки, равной 0,6 от разрушающей. Удаление части материала осуществлялось путем высверливания трех сквозных отверстий диаметром 2 мм. Основным интерес представляют продольные напряжения σ_{11} , которые определяются по соотношениям (20) в точках, расположенных на пересечении контуров отверстий с трассами сканирования 2, 5, 8 (см. рис. 1, б). Для оценки значений в других точках используется тензор коэффициентов концентрации, так как

$$\sigma_{11} = K_{11ij}\sigma_{ij}^0; \quad \sigma_{11}^* = (K_{11ij} - \delta_{ij})\sigma_{ij}^0,$$

где K — тензор коэффициентов концентрации. Точное определение тензора K представляет собой очень сложную задачу, поскольку в данном случае, кроме эффектов взаимодействия отверстий, расстояния между которыми относительно невелики, а также объемности напряженного состояния, необходимо учитывать еще и существенно неоднородный характер распределения остаточных напряжений на масштабах порядка диаметра отверстия 2 мм. По этим причинам при определении коэффициентов концентрации распределение остаточных напряжений уже должно быть известно.

Приближенно коэффициенты концентрации оцениваются по решениям двух плоских задач теории упругости: о распределении напряжений в полуплоскости с одним отверстием и в плоскости с тремя отверстиями [10]. Тогда для точки (0, 9), лежащей на границе большого отверстия, следует принять

$$K_{1111} \cong 0,7; \quad \sigma_{11}^* = -0,3\sigma_{11}^0,$$

а для точек касания трасс 1, 3, 4, 6, 7 с контурами малых отверстий

$$K_{1111} \cong 3; \quad \sigma_{11}^* = 2\sigma_{11}^0.$$

Исследовались 12 однотипных образцов при одинаковых условиях нагружения и сверления отверстий. Основные этапы обработки для типичного образца показаны на рис. 4. Статистический анализ данных для 12 образцов (см. рис. 5) позволил сделать следующие заключения:

а) наибольшие по модулю остаточные напряжения возникают на границе исходного концентратора: $\max |\sigma_{11}| = (30 \pm 10) 10 \text{ Н/мм}^2$, что согласуется с известными данными работы [1];

б) зона сжимающих остаточных напряжений совпадает с пластической зоной (см. рис. 4, з) с длиной ~ 5 мм при нагрузке 0,6 от разрушающей (см. рис. 5, а, б) (это также согласуется с данными работы [1]);

в) остаточные напряжения имеют значительный статистический разброс, обусловленный не только погрешностями измерений, но и индивидуальными особенностями образцов (см. рис. 5, в, з); дисперсия напряжений значительно превышает погрешности, возникающие при обработке оптической информации.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена задача оптимизации параметров голографической измерительной системы и ее отдельных элементов на примере исследования распределения остаточных напряжений.

Разработаны алгоритмы для совместной обработки двух интерферограмм, получаемых при исследовании плоских образцов с помощью голографического интерферометра.

Приведены оценки погрешностей ввода и обработки интерферограмм при использовании разработанных алгоритмов. Предложены способы снижения указанных погрешностей.

Эффективность оптимизированного варианта ГИС иллюстрируется на примере исследования остаточных напряжений в плоском образце. Показано, что случайный разброс остаточных напряжений обусловлен не только случайными погрешностями измерений, но и индивидуальными особенностями образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вишняков Н. А., Грингауз Г. Д., Рудзей Г. Ф. Остаточные напряжения в образцах с отверстием при действии статических и циклических нагрузок.— Проблемы прочности, 1978, № 12.
2. Козачок А. Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике.— М.: Машиностроение, 1984.
3. Количественная расшифровка голографических интерферограмм: Методика.— Горький: Горьковский филиал ВНИИМаша Госстандарта СССР, 1982.
4. Вест Ч. Голографическая интерферометрия.— М.: Мир, 1982.
5. Писарев В. С., Яковлев В. В., Щепинов В. Ю. Оценка точности определения компонентов вектора перемещений в методе голографической интерферометрии.— В кн.: Физика и механика деформации и разрушения. М.: Энергоиздат, 1981, вып. 9.
6. Nobis D., Vest C. M. Statistical analysis of errors in holographic interferometry.— Appl. Opt., 1978, v. 17, p. 2198.
7. Крамер Г. Математические методы статистики.— М.: Мир, 1975.
8. Гинзбург Э. С., Гришанов А. Н., Де С. Т., Козачок А. Г., Кухаренко А. В. Экспериментальное исследование характеристик спекл-структуры голографических изображений.— В кн.: Системы автоматизации обработки оптической информации. Новосибирск, 1984.
9. Антонов А. А., Бобрик А. И., Морозов В. К., Чернышев Г. Н. Определение остаточных напряжений при помощи создания отверстий и голографической интерферометрии.— Изв. АН СССР. Сер. Механика твердого тела, 1980, № 2.
10. Чернышов Г. Н., Антонов А. А. Методика определения остаточных напряжений при помощи создания отверстий и голографической интерферометрии.— В кн.: Труды II Всесоюз. симп. «Остаточные технологические напряжения». М., 1985.
11. Савин Г. Н. Распределение напряжений около отверстий.— Киев: Наукова думка, 1968.

Поступила в редакцию 13 февраля 1986 г.

УДК 621.378.9 : 778.4

В. Н. САРНАДСКИЙ

(Новосибирск)

СИСТЕМА ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА ПОЛЕЙ НЕОДНОРОДНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ НАКЛАДНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

Введение. Решение ряда актуальных задач экспериментальной механики связано с переходом от анализа напряженно-деформированного состояния объектов по конечному набору точек к исследованию пространственного распределения механических параметров с высоким разрешением. Это стало возможным благодаря появлению интерференционно-оптических методов, позволяющих преобразовывать поля механических величин в оптические поля в виде интерферограмм [1]. В настоящее время оптические методы широко используются для решения разнообразных задач исследования формы, перемещений и деформаций объектов.

Ручные способы расшифровки интерферограмм не в состоянии обеспечить обработку всей доступной для измерения информации. Поэтому реализация полных возможностей оптических методов связана с соз-