

05;07;12

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЗОНДИРУЮЩЕГО ОТВЕРСТИЯ

© В.С.Писарев, В.П.Шепинов, А.Ю.Щиканов

Московский инженерно-физический институт (Технический университет),
Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 9 ноября 1994 г.

В окончательной редакции 30 августа 1995 г.)

Рассматривается методика определения остаточных напряжений, базирующаяся на измерении тангенциальных компонент перемещений точек контура зондирующего отверстия с помощью интерферометров на основе отражательных голограмм. Представлен анализ погрешностей измерения компонент перемещений и связанных с ними деформаций на контуре зондирующего отверстия. Описаны способы определения направления и знака главных деформаций по картинам интерференционных полос в исследуемой точке поверхности. Приводится модель, используемая для интерпретации экспериментальных данных, и вытекающие из нее формулы для расчета остаточных напряжений. Эффективность разработанного подхода иллюстрируется с помощью специальных тестовых экспериментов по определению действующих напряжений в тонкостенных элементах конструкций. Точность определения напряжений оценивается путем сравнения полученных результатов с известными решениями классических задач теории упругости.

Остаточные напряжения, возникающие на различных стадиях технологического процесса изготовления деталей и элементов конструкций, часто оказывают существенное негативное влияние на их статическую прочность и долговечность [1]. Поэтому проблема определения величины и знака остаточных напряжений представляет значительный научный и практический интерес.

Одним из наиболее распространенных подходов к исследованию остаточных напряжений является метод зондирующего отверстия [2]. Согласно этому подходу, в интересующей точке на поверхности тела выполняют сквозное или несквозное отверстие и измеряют в нескольких направлениях деформации в его окрестности, вызванные разгрузкой объема материала при освобождении остаточных напряжений. По величинам этих деформаций с помощью различных расчетных или аналитических моделей могут быть определены главные направления и соответствующие величины остаточных деформаций и напряжений.

Применение метода голографической интерферометрии позволяет реализовать на практике максимальную чувствительность метода зондирующих отверстий к остаточным напряжениям. Это объясняется тем, что голографические измерения компонент перемещений, необходимых для вычисления деформаций, могут быть проведены непосредственно на контуре отверстия. Кроме того, высокая чувствительность метода голографической интерферометрии дает возможность проводить надежные количественные измерения при сверлении отверстий весьма малого диаметра (1–3 мм). Указанное обстоятельство дает основание считать, что комбинация методов зондирующего отверстия и голографической интерферометрии обеспечивает минимальную деформацию поверхности объекта, необходимую для выявления остаточных напряжений. Более того, для крупногабаритных конструкций подобный подход может рассматриваться как неразрушающий метод испытаний, если геометрические параметры зондирующего отверстия не превосходят размеры, допустимые при эксплуатации дефектов.

Другой важной особенностью рассматриваемого подхода является тот факт, что по голографической интерферограмме окрестности отверстия однозначно определяются направления главных деформаций [3]. Это обстоятельство существенно упрощает процедуру вычисления остаточных напряжений и повышает точность конечного результата.

Любая методика определения напряжений с помощью сверления отверстия требует измерения компонент перемещений только в локальной области поверхности объекта. Для исследования локальных деформаций более всего подходят интерферометры на основе отражательных голограмм. Анализ различных подходов к интерпретации голографических интерферограмм свидетельствует, что комбинация метода абсолютных порядков полос и оптимальных схем интерферометров является наиболее эффективным и универсальным подходом к определяющим дву- и трехмерных полей перемещений [4,5].

В настоящее время определение величины и знака остаточных напряжений в окрестности отверстия проводится в основном с помощью голографических измерений нормальной к поверхности объекта компоненты вектора перемещения. При этом используются как голографические интерферограммы, зарегистрированные по схеме Лейта и Упатниекса [3,6], так и по схеме Левисюка [7–9].

Однако такой подход не во всех случаях является оптимальным. Дело в том, что во многих практических случаях измерение тангенциальных компонент перемещений может обеспечить более надежное определение остаточных напряжений [10,11]. Возможность определения остаточных напряжений по данным голографических интерференционных измерений тангенциальных к поверхности компонент перемещений отмечается, в частности, в работе [9]. Однако детальный метрологический анализ подобного подхода и описание его практического применения в настоящее время в литературе отсутствует.

В данной работе рассматривается методика определения остаточных напряжений, основанная на измерении тангенциальных компонент перемещений точек контура зондирующего отверстия с помощью отражательных голограмм. Представлен анализ погрешностей измерения компонент перемещений и связанных с ними деформаций на контуре зондирующего отверстия. Описаны способы определения величины и знака главных деформаций по картинам интерференционных полос

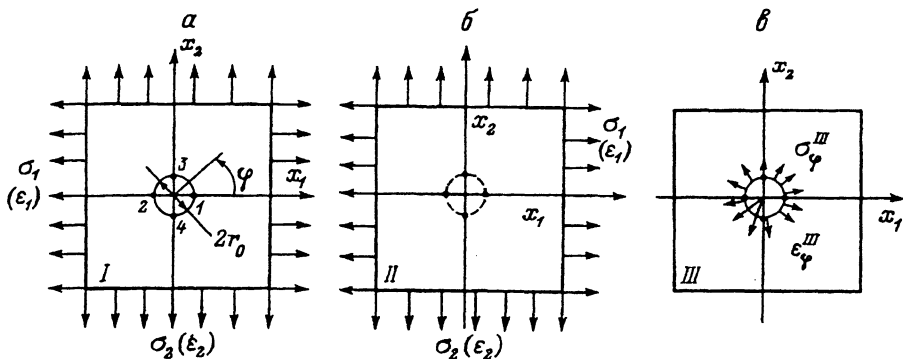


Рис. 1. Модель релаксации остаточных напряжений при сверлении зондирующего отверстия в равномерном поле напряжений.

a — растяжение пластины с отверстием, b — без отверстия, $в$ — релаксация остаточных напряжений.

в исследуемой точке поверхности. Приводятся модель, используемая для интерпретации экспериментальных данных, и вытекающие из нее формулы для расчета остаточных напряжений. Эффективность разработанного подхода иллюстрируется с помощью специальных тестовых экспериментов по определению действующих напряжений в тонкостенных элементах конструкций.

Исходным пунктом рассматриваемого подхода к определению остаточных напряжений является то, что с помощью регистрации отражательных голограмм могут быть получены интерференционные картины, несущие количественную информацию о перемещениях контура зондирующего отверстия в направлении осей главных деформаций.

Согласно классическому подходу, основное допущение, необходимое для количественной интерпретации полей перемещений в терминах остаточных напряжений, состоит в том, что малое зондирующее отверстие создается в равномерном поле напряжений. Это означает, что влияние возможных градиентов напряжений на базе малого отверстия, а также возможное влияние реальных граничных условий не учитываются.

Рассмотрим малый участок поверхности исследуемого объекта, который в общем случае находится в условиях плоского напряженного состояния с компонентами τ_1 и τ_2 , удовлетворяющего в некоторой окрестности отверстия диаметром $2r_0$ указанной выше гипотезе (рис. 1). Центр отверстия и есть условная точка, где определяются остаточные или действующие напряжения. На рис. 1 показана также прямоугольная система координат (x_1, x_2) , оси которой совпадают с направлениями главных деформаций ϵ_1 и ϵ_2 (напряжений τ_1, τ_2) соответственно. Эти оси определяются как оси симметрии интерференционных картин, характеризующих перемещения контура отверстия, созданного в двусосном поле напряжений.

После разгрузки и вызванного этой операцией перераспределения напряжений на контуре свободного от нагрузки отверстия реализуется одноосное напряженное состояние, которое в точке с полярными координатами (r_0, φ) (рис. 1, a) описывается следующим образом:

$$\epsilon_\varphi = \frac{1}{r_0} \left[\frac{\partial v}{\partial \varphi} \cos \varphi - \frac{\partial u}{\partial \varphi} \sin \varphi \right], \quad \tau_\varphi = E \epsilon_\varphi, \quad (1)$$

где r_0 — радиус отверстия; φ — полярный угол, который отсчитывается от оси x_1 (рис. 1,а); u, v — перемещения точек контура отверстия в декартовой системе координат (x_1, x_2) ; E — модуль упругости: $\varepsilon_\varphi, \tau_\varphi$ — окружные деформации и напряжения соответственно.

Римскими цифрами на рис. 1 условно показаны различные состояния исследуемого объекта, которые должны быть количественно описаны, чтобы определить искомые напряжения τ_1 и τ_2 . Состояние III (рис. 1,в) соответствует релаксации напряжений после выполнения отверстия и может быть описано как разность между состояниями I (рис. 1,а) и II (рис. 1,б). Параметры напряженно-деформированного состояния III регистрируются на интерферограмме. Напряженно-деформированные состояния I и II должны быть описаны аналитически, исходя из соотношений теории упругости.

Состояние I соответствует двусосному нагружению элемента объема материала с несквозным (для трехмерных тел) либо со сквозным (для тонкостенных конструкций) отверстием искомыми напряжениями τ_i ($i = 1, 2$) и представляет собой решение соответствующей задачи теории упругости о концентрации напряжений, решение которой можно также представить в форме (1).

Состояние II есть исходное состояние поверхности объекта под действием двусосного поля напряжений до сверления отверстия.

Основное соотношение для определения напряжений методом зондирующего отверстия, согласно классическим представлениям, выглядит следующим образом [1]:

$$I - II = III. \quad (2)$$

Количественная формулировка выражения (2) может быть записана через любые параметры, которыми оперирует теория упругости: напряжения, деформации или перемещения.

В рамках рассматриваемого подхода удобнее всего использовать имеющие наиболее ясный физический смысл величины окружных деформаций ε_φ в двух точках контура отверстия: $\varphi = 0$ (точка 1 на рис. 1,а) и $\varphi = 90^\circ$ (точка 3). При этом вводятся следующие обозначения для точек 1 и 3:

$$\varepsilon_{\varphi=0} \equiv \varepsilon_2^m,$$

$$\varepsilon_{\varphi=90^\circ} \equiv \varepsilon_1^m, \quad m = I, II, III.$$

Теперь, чтобы решить задачу об определении главных напряжений, величины деформаций $\varepsilon_1^I, \varepsilon_2^I, \varepsilon_1^{II}, \varepsilon_2^{II}$ должны быть выражены через искомые величины τ_1 и τ_2 , а деформации ε_1^{III} и ε_2^{III} — через экспериментально определяемые с помощью голографической интерферометрии компоненты перемещений в соответствующих направлениях u и v . Затем все эти деформации необходимо свести в разрешающее уравнение (2).

Для наглядности изложения далее предполагается, что окрестность исследуемой точки поверхности квазиплоская, т.е. направления x_1 и x_2 равноправны с точки зрения решения задачи о концентрации напряжений. В этом случае соотношения для деформаций ε_1^I и ε_2^I имеет вид

$$\varepsilon_1^I = \alpha_1 \frac{\tau_1}{E} - \alpha_2 \frac{\tau_2}{E},$$

$$\varepsilon_2^I = \alpha_1 \frac{\tau_2}{E} - \alpha_2 \frac{\tau_1}{E}, \quad (3)$$

где $\alpha_1 = \varepsilon_{\varphi=0}/\varepsilon_1$, $\alpha_2 = -\varepsilon_{\varphi=g_0}/\varepsilon_1$ — коэффициенты концентрации упругих деформаций (напряжений), определяемые из аналитического или численного решения соответствующей одноосной задачи теории упругости; E — модуль упругости материала.

Соотношения для исходных деформаций ε_1^{II} , ε_2^{II} в точках 1 и 2 участка поверхности до выполнения отверстия имеют следующую очевидную форму:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^{II} &= \frac{\tau_1}{E} - \frac{\nu\tau_2}{E}, \\ \varepsilon_2^{II} &= \frac{\tau_2}{E} - \frac{\nu\tau_1}{E}, \end{aligned} \quad (4)$$

где ν — коэффициент Пуассона материала.

Анализ различных аналитических решений [12,13], данные расчетов методом конечных элементов [14], а также результаты экспериментальных исследований концентрации напряжений методом голографической интерферометрии [14,15] позволяют установить следующую связь между деформациями ε_1^{II} , ε_2^{II} и измеряемыми в направлениях x_1 , x_2 компонентами перемещений u и v :

$$\varepsilon_1^{III} = \frac{\Delta u}{2r_0}, \quad \varepsilon_2^{III} = \frac{\Delta v}{2r_0}, \quad (5)$$

где Δu , Δv — абсолютные изменения диаметров отверстия, проходящих через точки 1, 2 и 3, 4 соответственно (рис. 1,а).

Формулы (5) свидетельствуют, что деформации контура малого сквозного или несквозного отверстия в плоском равномерном поле напряжений могут быть выражены как относительные изменения диаметра отверстия в соответствующих направлениях.

Запишем систему уравнений, сформированную из двух уравнений вида (2) для точек 1 и 2 на контуре отверстия, необходимую для вычисления напряжений τ_1 и τ_2

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^I - \varepsilon_1^{II} &= \varepsilon_1^{III}, \\ \varepsilon_2^I - \varepsilon_2^{II} &= \varepsilon_2^{III}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подстановка зависимостей (3)–(5) в систему уравнений (6) и ее решение относительно главных напряжений τ_1 и τ_2 приводит к следующему результату:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{E}{2r_0} \left[\frac{(\alpha_1 - 1)\Delta u + (\alpha_2 - \nu)\Delta v}{(\alpha_1 - 1)^2 - (\alpha_2 - \nu)^2} \right], \\ \tau_2 &= \frac{E}{2r_0} \left[\frac{(\alpha_1 - 1)\Delta v + (\alpha_2 - \nu)\Delta u}{(\alpha_1 - 1)^2 - (\alpha_2 - \nu)^2} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

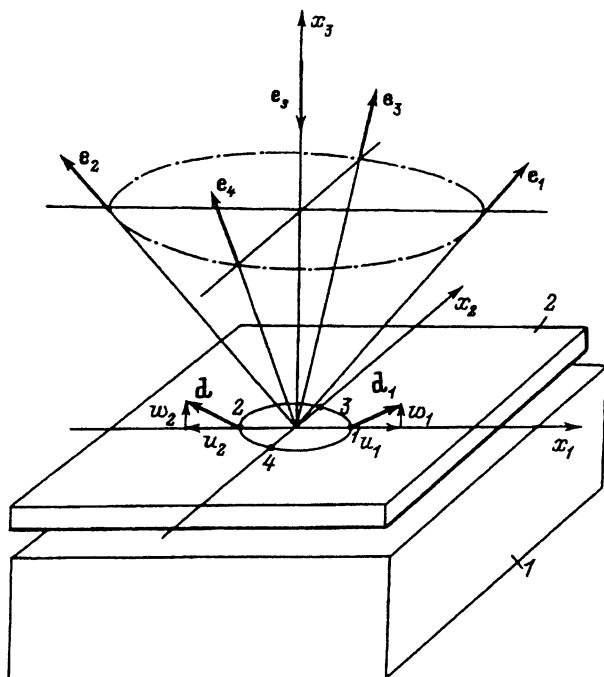


Рис. 2. Схемы регистрации отражательных голограмм в окрестности зондирующего отверстия и наблюдения картин интерференционных полос.

e_s — единичный вектор освещения; e_j ($j = 1, 2, 3, 4$) — единичные векторы наблюдения; 1 — исследуемый участок поверхности, 2 — фотопластинка.

Необходимо сразу же отметить, что использование соотношений (7) для расчета напряжений τ_1 и τ_2 требует определения абсолютных знаков величин Δu и Δv . Как известно, метод голографической интерферометрии позволяет определять компоненты перемещений только с точностью до знака.

Далее в работе при описании тестовых экспериментов будет изложен подход, позволяющий определять знак компонент перемещений по той же самой картине полос, по которой определяются и величины компонент перемещений u и v .

Схема регистрации отражательных голограмм в окрестности зондирующего отверстия приведена на рис. 2. Голограмма, расположенная непосредственно у исследуемого участка поверхности, освещается плоской волной лазерного излучения в направлении e_s , как показано на рис. 2. Направление освещения совпадает с нормалью к поверхности объекта (осью x_3) в исследуемой точке (центр отверстия), чтобы обеспечить возможность выбора параметров оптимальной схемы интерферометра на стадии восстановления голограммы [5]. Картины интерференционных полос наблюдаются с помощью телецентрической оптической системы.

Главной особенностью регистрации голограмм при выполнении зондирующего отверстия является необходимость удаления фотопластинки после первой экспозиции для сверления и возвращения ее на первоначальное место с интерференционной точностью. Подобная опе-

рация с большой степенью надежности выполняется путем крепления фотопластинки на специальном прецизионном кинематическом устройстве [16].

Вопрос выбора количества направлений наблюдения и их пространственной конфигурации с целью оптимизации схемы интерферометра зависит от количества компонент вектора перемещения, подлежащих определению по результатам измерений.

Как было показано выше, для определения напряжений с помощью высверливания отверстия необходимо измерять две компоненты вектора перемещения в плоскости исследуемого объекта, которые лежат в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Эти направления совпадают с осями симметрии картины интерференционных полос и легко определяются при восстановлении голографической интерферограммы.

Показанные обстоятельства дают возможность для измерения каждой из двух тангенциальных компонент перемещений построить оптимальную матрицу чувствительности интерферометра K размерности 2×2 путем регистрации картин полос в двух симметричных относительно оси x_3 (нормали к поверхности объекта) направлениях наблюдения [17]. Симметричные пары направлений наблюдения (e_1, e_2) и (e_3, e_4) лежат в двух ортогональных плоскостях, а проекции единичных векторов наблюдения на плоскость фотопластинки (объекта) совпадают с координатными осями x_1 или x_2 , вдоль которых должны быть определены компоненты перемещений u и v (рис. 2).

Система линейных алгебраических уравнений для определения неизвестного вектора перемещения $\mathbf{d} = \{u, w\}$ в каждой точке поверхности исследуемого объекта, соответствующая одной паре векторов наблюдения, например (e_1, e_2) , имеет вид

$$Kd = \lambda N, \quad (8)$$

где элементы матрицы чувствительности K размерности 2×2 равны проекциям разности единичных векторов наблюдения и освещения $(e_j - e_s)$ на координатные оси x_1 и x_3 ; λ — длина волны лазерного излучения; $N = \{N_1, N_2\}$ — вектор абсолютных порядков полос.

Таким образом, с помощью одного интерферометра вида (8) можно определить нормальную к поверхности компоненту вектора перемещения w и одну из компоненты в плоскости, например u . Другая пара симметричных направлений наблюдения дает компоненты w и v .

Для определения абсолютных и относительных изменений диаметров зондирующего отверстия в направлениях главных деформаций (напряжений), которые необходимы для вычисления главных напряжений согласно формулам (7), вновь обратимся к схеме элемента исследуемой поверхности с зондирующим отверстием, показанной на рис. 2. В качестве примера рассмотрим изменение диаметра в направлении оси x_1 , который обозначен цифрами на окружности отверстия 1 и 2 (рис. 1, 2).

Введем двойную систему индексации абсолютных порядков полос: N_j^m , $m = 1, 2, 3, 4$ — номер точки на диаметре; $j = 1, 2$ — номер направления наблюдения.

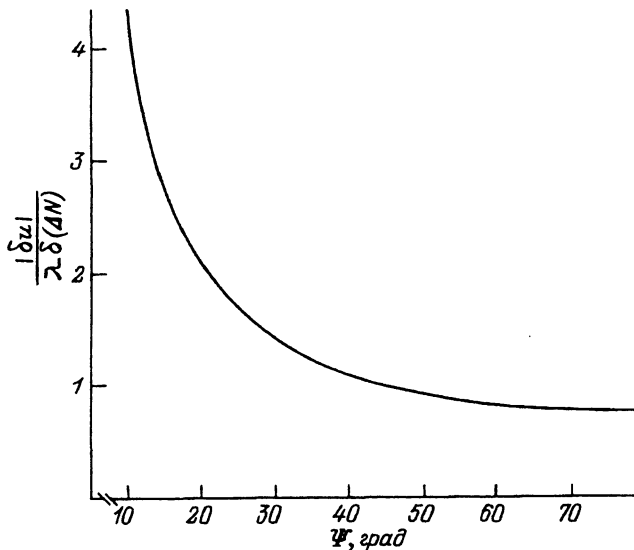


Рис. 3. Нормированная погрешность определения тангенциальных компонент перемещений в зависимости от угла наблюдения Ψ .

Нужно отметить, что для отверстия, находящегося в равномерном поле напряжений, компоненты перемещения, нормальные к контуру отверстия в точках 1 и 2 — u_1 и u_2 , всегда равны и противоположны по направлению. На рис. 2 для иллюстрации показан случай увеличения диаметра отверстия направлению x_1 .

Для точки 1 системы уравнений (8) с оптимальной матрицей K принимает следующий вид

$$\begin{bmatrix} \sin \Psi & 1 + \cos \Psi \\ -\sin \Psi & 1 + \cos \Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} N_1^1 \\ N_2^1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

и для точки 2

$$\begin{bmatrix} -\sin \Psi & 1 + \cos \Psi \\ \sin \Psi & 1 + \cos \Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -u_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} N_1^2 \\ N_2^2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Решения систем уравнений (9) и (10) соответственно дают

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{\lambda}{2 \sin \Psi} [N_1^1 - N_2^1], \\ u_2 &= \frac{\lambda}{2 \sin \Psi} [N_2^2 - N_1^2]. \end{aligned} \quad (11)$$

Соответствующая решению (11) погрешность определения тангенциальных компонент перемещений u и v выражается следующим образом:

$$|\delta u| = |\delta v| \leq \frac{\lambda \delta n}{\sqrt{2} \sin \Psi}, \quad (12)$$

где $\delta n = \delta N_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$) — погрешность определения абсолютных порядков полос.

Зависимость (12) в нормированном виде представлены на рис. 3. Следует отметить, что при фиксированной чувствительности интерферометра (т.е. фиксированной величине угла Ψ) погрешность (12) является минимальной и может быть уменьшена только путем увеличения угла наблюдения Ψ [4,5].

Практика свидетельствует, что надежные и устойчивые измерения тангенциальных компонент перемещений в окрестности отверстия, высверленного в поле напряжений, возможны для угла наблюдения Ψ не менее 50° .

Вернемся теперь к определению искомого абсолютного изменения диаметра отверстия в направлении $x_1 - \Delta u$, которое выражается как сумма первого и второго уравнений (11),

$$\Delta u = u_1 + u_2 = \frac{\lambda}{2 \sin \Psi} [(N_1^1 - N_1^2) + (N_2^2 - N_2^1)]. \quad (13)$$

Отметим, что величины, выделенные круглыми скобками в уравнении (13), представляют разности порядков полос на одной интерференционной картине между точками 1 и 2. Этот факт отражает важнейшее достоинство рассматриваемой методики, которое заключается в возможности интерпретации интерферограмм с помощью абсолютных порядков полос без определения полосы нулевого порядка. Решение последней задачи, когда фактором, вызывающим появление интерференционных полос, является перераспределение напряжений в окрестности зондирующего отверстия, вызывает значительные трудности.

Естественно, что уравнение (13) может быть записано и для определения изменения диаметра Δv в направлении оси x_2 .

Тестирование представленной методики определения изменения диаметров зондирующего отверстия в направлении главных деформаций (напряжений) и вычисления с помощью этих данных напряжений τ_1, τ_2 проводилось при нагружении тонкостенных объектов — пластины в условиях двусосного напряженного состояния и одноосном растяжении круговой цилиндрической оболочки. Нагружение образцов осуществлялось так, чтобы в некоторой зоне на исследуемой поверхности создавалось равномерное поле действующих напряжений с известными параметрами:

Интерферограммы, полученные при сверлении сквозного отверстия радиусом $r_0 = 1.1$ мм в прямоугольной пластине с размерами 70×32 мм и толщиной $h = 3$ мм, находящейся в условиях плоского напряженного состояния, известного как "чистый сдвиг" [12,13], приведены на рис. 4. Следует отметить симметрию интерференционных картин, соответствующих компонентам перемещений точек, лежащих на одном диаметре (рис. 4,а-г), что свидетельствует о корректности процессов получения и восстановления голограмм.

Количественная обработка приведенных картин полос приводит к следующим исходным результатам, необходимым для определения компоненты u :

$$N_1^1 - N_2^1 = \Delta N_{12}^1 = 7.5 \quad (\text{рис. 4, а}),$$

$$N_1^2 - N_2^2 = \Delta N_{12}^2 = -8.2 \quad (\text{рис. 4, б}).$$

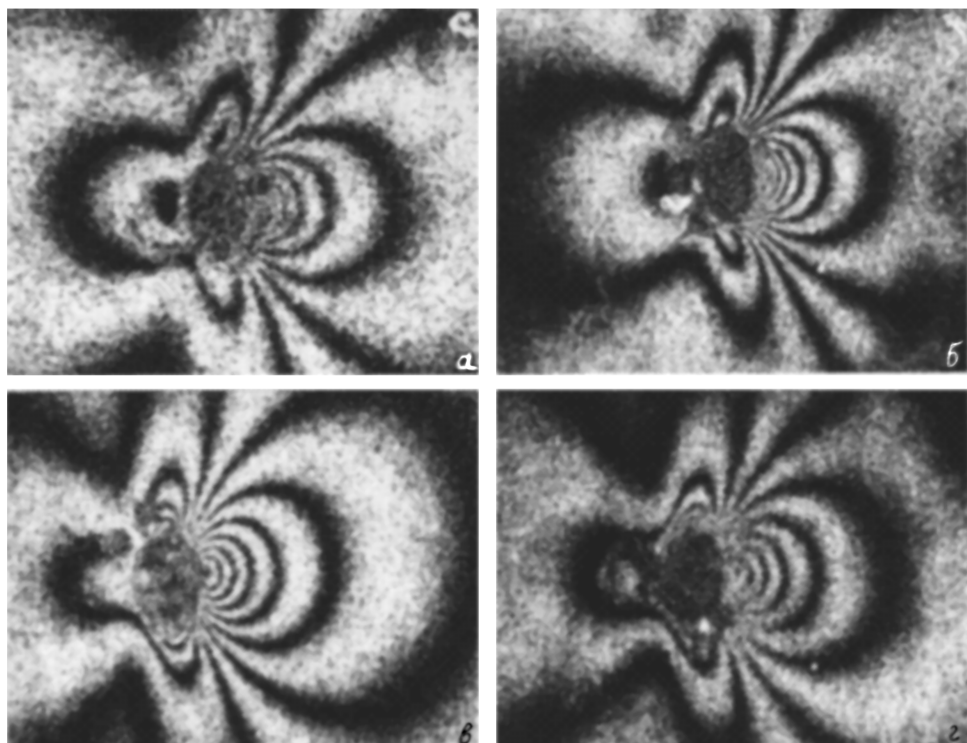


Рис. 4. Интерферограммы тангенциальных компонент перемещений, полученные в окрестности сквозного отверстия в тонкой пластине при чистом сдвиге. Угол наблюдения $\Psi = 54^\circ$, задаваемые значения напряжений $\tau_1 = -\tau_2 = 70$ МПа; а, б — компонента u ; в, г — компонента v .

Аналогичные данные для компоненты v имеют вид $\Delta N_{34}^1 = 8.5$ (рис. 4, в), $\Delta N_{34}^2 = -8.5$ (рис. 4, г). Подстановка указанных значений в соотношения (11) ($\sin \Psi = 0.81$) приводит к следующим результатам для абсолютных величин компонент перемещений:

$$|\Delta u| = 6.1 \text{ мкм}, \quad |\Delta v| = 6.6 \text{ мкм}. \quad (14)$$

Интерферограммы, иллюстрирующие релаксацию деформаций в напряжений при сверлении сквозного отверстия радиусом $r_0 = 1.6$ мм в тонкостенной цилиндрической оболочке (внешний диаметр 60 мм, толщина стенки $h = 1.5$ мм) при ее одноосном растяжении, представлены на рис. 5. Вновь обращает на себя внимание практически идеальная симметрия соответствующих пар интерференционных картин.

Соответствующие количественные результаты обработки этих интерферограмм имеют следующий вид (ось x_1 направлена вдоль оси оболочки) для компоненты u : $\Delta N_{12}^1 = 9.3$ (рис. 5, а), $\Delta N_{12}^2 = -8.1$ (рис. 5, б). Соответственно, для компоненты v $\Delta N_{34}^1 = 4.3$ (рис. 5, в), $\Delta N_{34}^2 = -4.3$ (рис. 5, г). Вычисления, согласно соотношениям (11) ($\sin \Psi = 0.87$), в этом случае дают

$$|\Delta u| = 7.3 \text{ мкм}, \quad |\Delta v| = 2.6 \text{ мкм}. \quad (15)$$

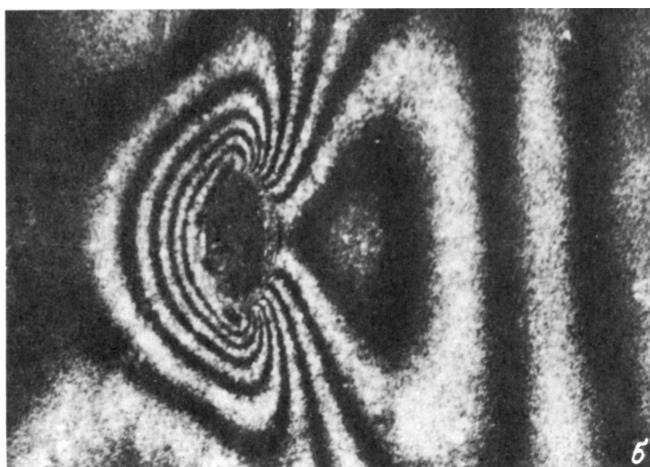
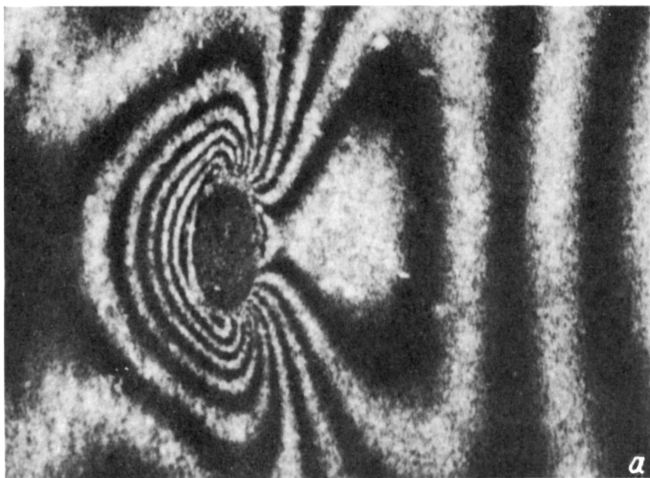


Рис. 5. Интерферограммы тангенциальных компонент перемещений, полученные в окрестности сквозного отверстия в тонкостенной цилиндрической оболочке при одноосном растяжении.

Угол наблюдения $\Psi = 60.5^\circ$, задаваемые значения напряжений $\tau_1 = 70$ МПа, $\tau_2 = 0$; *a, б* — компонента *а*; *в, г* — компонента *у*.

Приведенные картины полос позволяют оценить погрешность вычисления напряжений по формулам (7).

Анализ практически идеальных картин полос на рис. 4 и 5 свидетельствует, что реальная величина погрешности определения абсолютных порядков полос при одном отсчете δn может достигать 0.5 полосы. Эта величина определяет реальную погрешность определения напряжений, которую можно оценить с помощью выражений (7), (12) и (13).

Из неравенства (12) и формулы (13), если пренебречь погрешностью определения угла наблюдения Ψ , которая на практике очень мала, следует

$$|\delta(\Delta u)| = 2|\delta u| \leq \frac{\sqrt{2}\lambda}{\sin \Psi}. \quad (16)$$

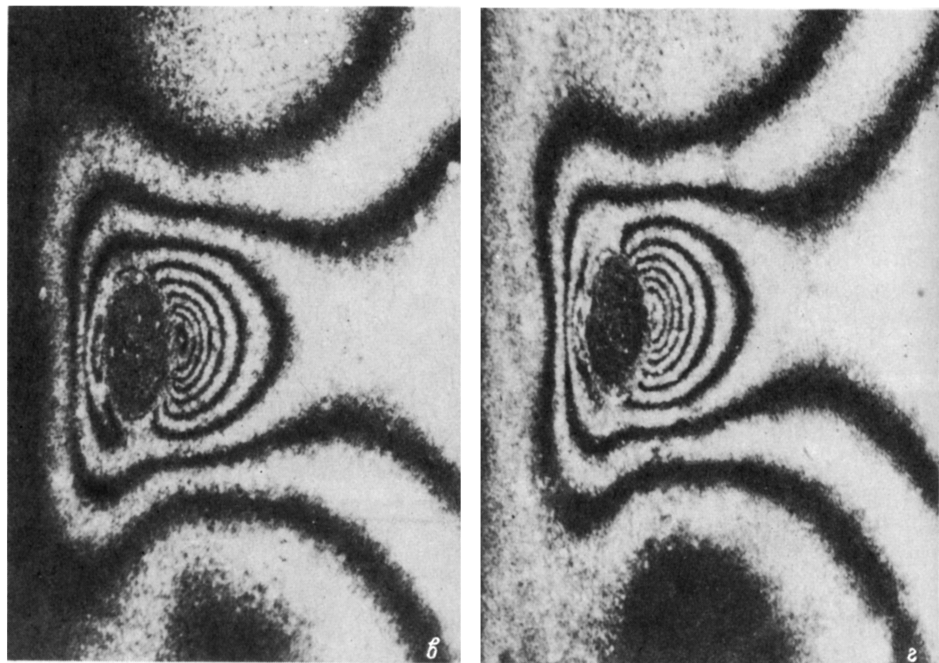


Рис. 5 (продолжение).

Принимая $\delta(\Delta u) = \delta(\Delta v)$ и подставляя их значения из неравенства (16) в соотношения (7), получим

$$|\delta\tau_1| \leq \frac{E\sqrt{2}\lambda}{2r_0 \sin \Psi} \left[\frac{1}{(\alpha_1 - 1) - (\alpha_2 - \nu)} \right]. \quad (17)$$

Оценим величину погрешности (17) для сквозного отверстия в тонкой пластине, находящейся в условиях плоского напряженного состояния ($\alpha_1 = 3, \alpha_2 = 1$),

$$|\delta\tau_1| \leq \frac{\lambda E}{\sqrt{2}r_0 \sin \Psi(1 + \nu)}. \quad (18)$$

Для алюминиевых сплавов, используемых в данной работе ($\nu = 0.32, E = 72\,000$ МПа), и реальных условий эксперимента ($2r_0 = 3$ мм, $\Psi = 54^\circ, \sin \Psi = 0.81, \lambda = 0.633$ мкм) неравенство (18) дает $|\delta\tau_1| \lesssim 20$ МПа. Представленная оценка отражает практически минимальную возможную величину погрешности определения напряжений и алюминиевых сплавов методом зондирующего отверстия.

Вычисление напряжений, согласно формулам (7), как уже отмечалось, требует идентификации абсолютных знаков изменения диаметра отверстия (уменьшение или увеличение в соответствующих направлениях). Традиционная количественная интерпретация картин полос, восстановленных с двухэкспозиционных голографических интерферограмм, которые приведены, в частности, на рис. 4 и 5, дает величины

компонент перемещений с точностью до знака. Поэтому для определения направлений компонент перемещений необходимо привлекать дополнительную информацию.

Анализ картин полос в окрестности зондирующего отверстия, полученных в тестовых экспериментах, где направления компонент перемещений известны а priori, свидетельствует о том, что эти картины содержат информацию о направлениях компонент перемещений в направлениях главных деформаций (напряжений).

Обратимся к рис. 4, на котором представлены четыре практически идентичные картины полос. Из теории упругости известно, что пары интерферограмм на рис. 4, а-г соответствуют одинаковым напряжениям, действующим в противоположных направлениях $\tau_1 = -\tau_2$. В рассматриваемом случае, исходя из условий проведения эксперимента, известно также, что картины полос на рис. 4, а, б соответствуют растяжению, а на рис. 4, в, г — сжатию.

На парах этих картин видны ясные различия в траекториях выхода интерференционных полос на контур отверстия, которые наиболее выражены со стороны отверстия, содержащей максимальное количество полос. Эти различия проявляются в величине угла между касательными к контуру и выходящей на этот контур полосой. В случае сжатия (рис. 4, в, г) упомянутый угол значительно меньше 90° , а в случае растяжения (рис. 4, а, б) угол выхода полос на контур отверстия больше 90° — полосы как бы охватывают контур отверстия.

Аналогичная ситуация наблюдается и при одноосном растяжении цилиндрической оболочки. Увеличение диаметра в направлении растяжения (см. рис. 5, а, б) и его пуассоновское сжатие в перпендикулярном направлении (рис. 5, в, г) подчиняются указанным закономерностям. Физической причиной указанного явления, позволяющего определить растяжение или сжатие соответствующих диаметров в направлении главных деформаций, является, по-видимому, различный характер взаимодействия сверла с кромками отверстия в точках растяжения и сжатия.

Перейдем теперь к анализу представленных тестовых примеров с точки зрения точности определения напряжений τ_1 и τ_2 . Для этого необходимо в первую очередь для каждого рассматриваемого случая выбрать соответствующую модель и на ее основе получить коэффициенты концентрации деформаций α_1, α_2 , которые требуются для составления уравнения (3).

Тонкая пластина со сквозным отверстием в условиях плоского напряженного состояния

В качестве модели используется классическое решение Кирша [12] для одноосного растяжения широкой пластины с круговым отверстием напряжениями τ_1 . В этом случае распределение окружных деформаций ε_φ по контуру отверстия имеет вид

$$\frac{\varepsilon_\varphi}{\varepsilon_1} = 1 - \cos 2\varphi. \quad (19)$$

Из формулы (18) и соотношений (3) можно получить требуемые величины коэффициентов α_1 и α_2

$$\alpha_1 = 3, \quad \alpha_2 = 1. \quad (20)$$

Абсолютные величины изменений диаметров отверстия, полученные при двусосном нагружении пластины в условиях чистого сдвига, заданы значениями (14). Рис. 4 и известные условия проведения эксперимента свидетельствуют, что $\Delta u > 0$, $\Delta v < 0$. Другие параметры, входящие в выражение (7), были указаны выше. Подстановка значений (14) с учетом знака в соотношение (7) дает следующие результаты: $\tau_1 = 75$ МПа, $\tau_2 = -87$ МПа, что хорошо согласуется с величинами напряжений, заданными по условиям тестового эксперимента, $\tau_1 = -\tau_2 = 70$ МПа.

Одноосное растяжение тонкостенной цилиндрической оболочки

В качестве модели для описания состояния I (оболочка с малым отверстием при одноосном растяжении) используется классическое решение Лурье [13]

$$\varepsilon_\varphi/\varepsilon_1 = 1 - \cos 2\Phi \left[2 + \sqrt{\frac{3(m^2 - 1)}{m^2}} \frac{\pi r_0^2}{4Rh} \right], \quad (21)$$

где $m = 1/\nu$, ν — коэффициент Пуассона материала оболочки, $R = 60$ мм — внешний диаметр оболочки, $h = 1.5$ мм — толщина стенки, $r_0 = 1.6$ мм — радиус зондирующего отверстия.

Для указанных геометрических размеров оболочки параметры α_1 и α_2 практически не отличаются от значений (20).

Анализ рис. 5 и известные условия проведения эксперимента свидетельствуют, что $\Delta u > 0$, $\Delta v < 0$. Подстановка значений (15) с учетом знаков, а также других указанных выше параметров в формулу (7) дает следующие результаты: $\tau_1 = 89$ МПа, $\tau_2 = -16$ МПа, что практически совпадает с задаваемыми напряжениями $\tau_1 = 70$ МПа, $\tau_2 = 0$.

Представленные в данной работе результаты свидетельствуют, что разработанная методика обеспечивает надежное определение напряжений с помощью сверления малого зондирующего отверстия. Главной особенностью рассмотренного подхода является вычисление деформаций в точках на контуре отверстия по данным голографических интерференционных измерений тангенциальных компонент перемещений с одновременным определением их знака по той же самой картине интерференционных полос.

Настоящая работа поддержана Российским центром лазерной физики.

Список литературы

- [1] Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 209 с.
- [2] Экспериментальная механика / Под ред. А.Кобаяси. М.: Мир, 1990. Кн. 2. 552 с.
- [3] Антонов А.А., Бобрик А.И., Морозов В.К., Чернышев Г.Н. // Механика твердого тела. 1980. № 2. С. 182–189.
- [4] Индисов В.О., Писарев В.С., Щепинов В.П., Яковлев В.В. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 4. С. 701–707.
- [5] Балалов В.В., Писарев В.С., Щепинов В.П., Яковлев В.В. // Опт. и спектр. 1990. Т. 68. Вып. 1. С. 134–139.
- [6] Лобанов Л.М., Касаткин Б.С., Пиеторак В.А., Андрущенко С.Г. // ДАН СССР. 1983. № 3. С. 557–561.

- [7] *Рассола А.А.* // Проблемы прочности. 1983. № 1. С. 111-115.
- [8] *Антонов А.А., Козинцев В.М.* // Заводская лаб. 1989. Т. 55. № 5. С. 84-87.
- [9] *Антонов А.А., Морозов В.К., Чернышев Г.Н.* // Изв. АН СССР. МТТ. 1988. № 3. С. 185-189.
- [10] *Курносое Д.Г., Якутович М.В.* // Заводская лаб. 1946. Т. 12. № 12. С. 960-967.
- [11] *Штанько А.Е., Гузиков М.Н.* Остаточные технологические напряжения. Тр. II Всесоюз. симп. М., 1985. С. 366-370.
- [12] *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
- [13] *Савин Г.Н.* Концентрация напряжений около отверстий. М.; Л.: Гостехиздат, 1951. 496 с.
- [14] *Городниченко В.И., Гришин В.И., Писарев В.С.* // Ученые записки ЦАГИ. 1989. Т. 20 № 5. С. 67-75.
- [15] *Городниченко В.И., Писарев В.С., Щепинов В.П.* // Заводская лаб. 1990. Т. 56. № 5. С. 59-64.
- [16] *Furse I.R.* // J. Phys. Ser. E. 1981. Vol. 14. P. 164-217.
- [17] *Индицов В.О., Писарев В.С., Щепинов В.П., Яковлев В.В.* Деформация и разрушение материалов и конструкций атомной техники. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 45-54.
-