

05.1;09.6

Исследование главных напряжений методом голографической интерферометрии

© Ю.П. Бородин^{1,2}, В.В. Кесаев¹, А.Н. Лобанов¹, С.А. Амброзевич^{1,3}¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия² МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия³ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: lobanovan@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 7 июля 2023 г.

В окончательной редакции 7 августа 2023 г.

Принято к публикации 29 августа 2023 г.

Предложена феноменологическая модель экспериментального определения значений главных напряжений и их направлений методом голографической интерферометрии и зондирующего отверстия. Метод позволяет неинвазивно *in situ* анализировать напряженно-деформированное состояние для широкого класса объектов. С помощью модели однозначно связываются порядок интерференции и действующая величина плоского напряжения. Представленные результаты имеют практическое значение для оценки работоспособности и безопасности вводимых или эксплуатируемых технических объектов, их элементов и деталей.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, метод зондирующего отверстия, плоское напряженное состояние, неразрушающий контроль, измерение главных напряжений.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.20.56340.19678

Одной из важнейших задач в области механики и конструкционного проектирования является определение механических напряжений в элементах конструкций и механизмов. Особо важны экспериментальные методы определения напряжений на натуральных объектах, поскольку они позволяют оценивать напряженное состояние непосредственно. Такие методы, не разрушающие объект исследования и не выводящие его из эксплуатации, относятся к области неразрушающего контроля, целью которого является надежное выявление опасных дефектов или состояний. Зачастую на практике контроль напряженного состояния является ключевой операцией с затратами, соизмеримыми или даже превышающими затраты на изготовление самого объекта исследования. Действительно, разрушение ответственных элементов (котлов, механизмов, сварных швов, фланцевых соединений и т.п.) приводит к катастрофическим последствиям. Таким образом, существует постоянная необходимость в совершенствовании методов анализа напряженного состояния и, в особенности, в совершенствовании методов его экспериментального определения.

В настоящей работе рассматривается метод экспериментального определения напряжений с помощью сверления зондирующих отверстий и голографической интерферометрии, предложенный в начале 1980-х годов отечественными учеными [1,2]. Сверление отверстия вносит локальное осесимметричное нарушение сплошности материала, что приводит к перераспределению напряжений около отверстия и, как следствие, к деформациям. Для интерферометрического метода достаточны относительно небольшие диаметр и глубина зондирующего отверстия (1–3 мм). Такое отверстие, как

правило, не сказывается на дальнейшей эксплуатации тестируемого объекта и может быть легко устранено по окончании измерения, поэтому данный метод можно считать неинвазивным. Более подробно с методом, включая экспериментальную технику, область применимости и ограничения, можно ознакомиться в монографии [3]. Отметим, что связь между перемещениями поверхности и вызвавшими их напряжениями до сих пор является предметом научных исследований [4,5]. В рассматриваемом методе для определения значений напряжений обычно используется пересчет результатов, полученных для эталонных материалов [3]. Целью настоящей работы является непосредственное установление численной связи между нормальной компонентой деформации u_z и абсолютными значениями напряжений $\sigma_{1,2}$, а также установление направлений α главных площадок в лабораторной системе координат.

Процедура экспериментального измерения напряжений состоит из трех последовательных этапов. На первом этапе производится голографическая запись волнового фронта, рассеянного поверхностью без отверстия. В наших исследованиях для этого использовался многоцветный фототермопластический материал на основе поли-N-винилкарбазола, позволяющий наблюдать восстановленное изображение в проходящих лучах с помощью цифровой камеры. Условия регистрации голограммы показаны на рис. 1, а. Они обеспечивают чувствительность эксперимента только к нормальным перемещениям. Так, если принять лабораторную декартову систему координат, в которой оси X и Y произвольно направлены в касательной плоскости, ось Z будет направлена вдоль нормали \hat{n} . Тогда освещать

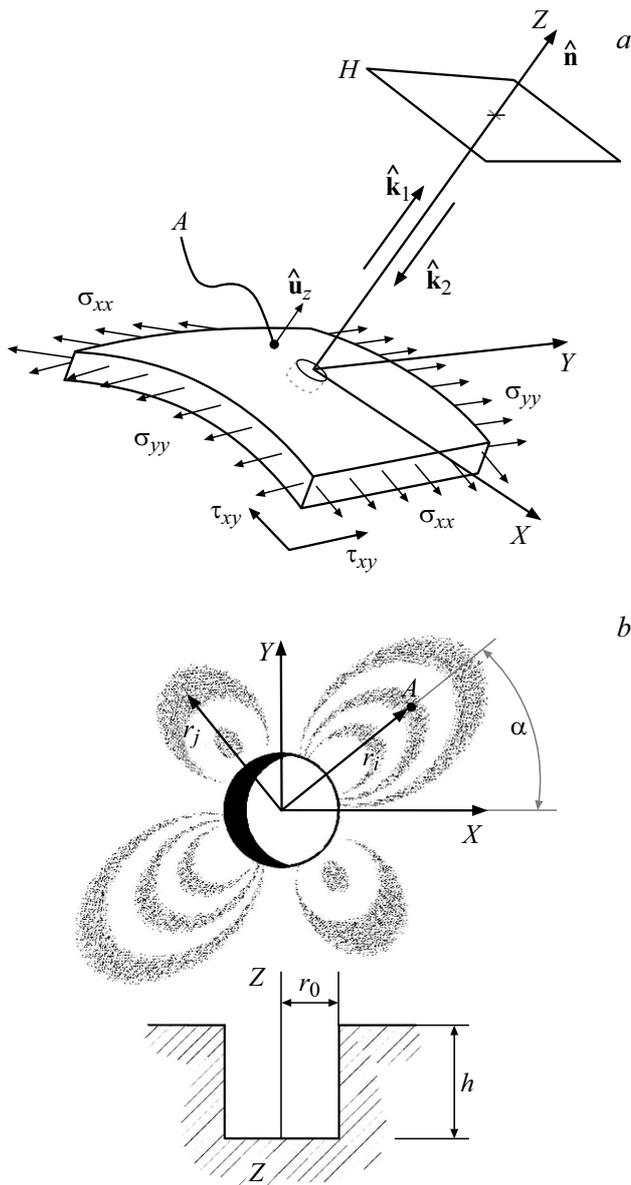


Рис. 1. *a* — условия для регистрации нормальных перемещений u_z в окрестности зондирующего отверстия методом голографической интерферометрии; *b* — геометрия зондирующего отверстия (в нижней части показан профиль). *A* — точка на поверхности в окрестности отверстия; u_z — компонента перемещения вдоль оси Z ; $\mathbf{k}_{1,2}$ — волновые векторы для света, освещающего точку *A*, и света, рассеянного в направлении голограммы *H* и наблюдения, соответственно; r_0 и h — радиус и глубина отверстия, r — радиус-вектор до центра i, j -й полосы. Угол α указан при условии, что вдоль r_i действуют σ_1 .

объект необходимо коллимированным световым пучком с плоским волновым фронтом и волновым вектором $\hat{\mathbf{k}}_1$, направленным вдоль нормали ($\hat{\mathbf{k}}_1 \parallel \hat{\mathbf{n}}$). Далее апертура регистрируемой голограммы также должна позволять наблюдать восстановленный волновой фронт по нормали. Диффузно отражающая поверхность объекта рассеивает свет по всем направлениям, поэто-

му нужно выделить часть восстановленного волнового фронта с вектором $\hat{\mathbf{k}}_2$, также параллельным $\hat{\mathbf{n}}$. На практике это можно сделать, наблюдая восстановленное изображение поверхности через объектив с малым относительным отверстием (на рисунке он не показан).

На втором этапе с помощью концевой микрофрезы с прямоугольным профилем изготавливается зондирующее отверстие с плоским дном, ось которого направлена вдоль оси Z (рис. 2, *b*). После этого имеющиеся в материале напряжения σ_{ii}, τ_{ij} ($i, j \in x, y, z$) будут перераспределены для того, чтобы компенсировать отсутствующие связи. Следующие за этим перемещения u_i поверхности будут содержать компоненту u_z вдоль оси Z . Поскольку искомая связь ищется именно с нор-

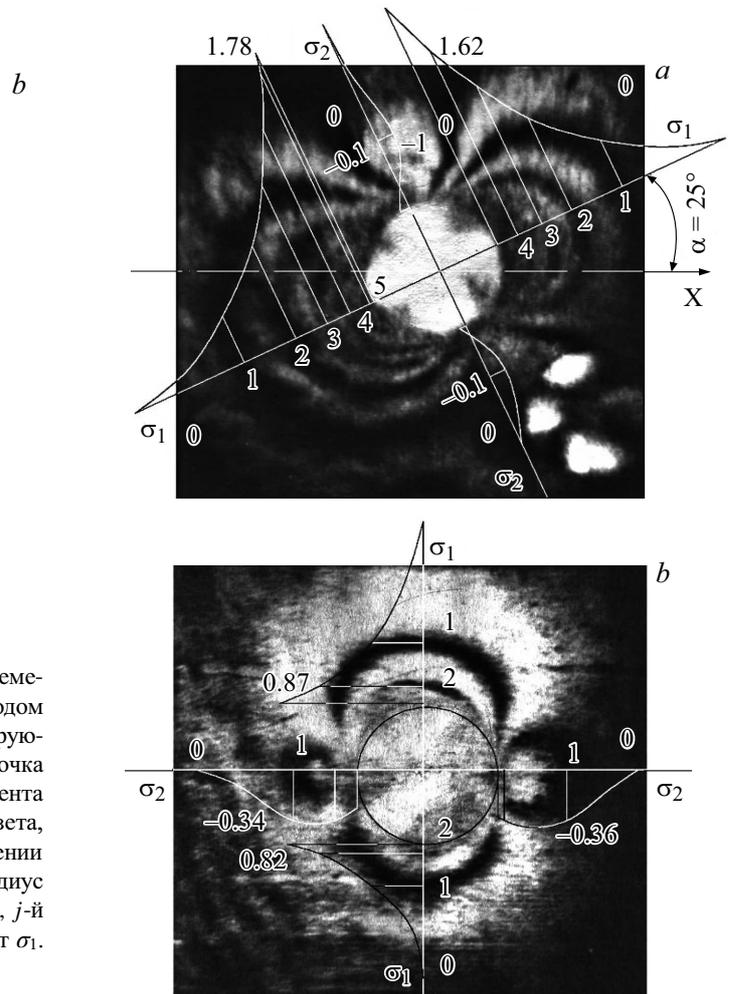


Рис. 2. Примеры интерферограмм для дюралюминиевого листа Д16 толщиной 40 mm, в котором присутствуют остаточные напряжения. *a* — зондирующее отверстие с $r_0 = 1$ mm, $h = 2$ mm находится на торцевом сечении вблизи края, $\sigma_1 \approx 49$ МПа, $\sigma_2 \approx -11$ МПа; *b* — такое же отверстие в центре сечения с $\sigma_1 \approx -9$ МПа, $\sigma_2 \approx -17$ МПа. Показаны собственные оси, угол α в лабораторной системе координат, эпюры перемещений, аппроксимированные с помощью формулы (2). Цифры соответствуют порядкам N и значениям перемещений (в μm).

мальными компонентами вектора перемещения, измерения будут тем точнее, чем меньше локальная кривизна поверхности.

На третьем этапе одновременно наблюдаются восстановленный голограммой волновой фронт и фронт, рассеянный деформированной поверхностью. При этом оба фронта, будучи когерентными, интерферируют в реальном масштабе времени. Вектор чувствительности $\vec{K} \equiv \hat{\mathbf{k}}_2 - \hat{\mathbf{k}}_1$ будет параллельным оси Z , и, таким образом, вклад в интерферограмму будет вносить исключительно компонента перемещений u_z . Так как оба вектора $\hat{\mathbf{k}}_{1,2}$ коллинеарны и равны по модулю ($K = 4\pi/\lambda$), цена одной интерферометрической полосы оказывается равной половине длины волны λ используемого света. Действительно, интерференционным максимумам или минимумам соответствует волновая разность фаз $\delta = 2\pi N$, где $N = 0, 1, 2, \dots$ — порядковый номер полосы (или просто порядок). С другой стороны, разность фаз равна $\delta = Ku_z$; тогда, принимая $N = 1$ и уравнивая эти выражения, получим указанную цену $\Delta w_{N=1} = \lambda/2$. Отметим, что оси симметрии картины полос ортогональны друг другу и совпадают с главными осями напряжений σ_1 и σ_2 . Это обстоятельство позволяет визуализировать ориентацию главных площадок (рис. 2).

Полученная интерферограмма содержит информацию только о величине перемещений по модулю и не содержит никакой информации о направлении или, что то же самое, о знаке перемещения. Примем его положительным для случая увеличения разности хода, т.е. для перемещений поверхности в направлении вдоль $\hat{\mathbf{n}}$ внутрь тела. Знак можно определить, смещая голограмму вдоль оси Z . Если при этом порядок полосы N для точки A уменьшается, то это означает, что направление смещения голограммы и поверхности совпадают, и наоборот. На практике достаточно незначительного тестового смещения (около десятых долей длины волны).

По серии экспериментов, выполненных на тестовых образцах с зондирующими отверстиями диаметром от 0.5 до 3.0 mm и глубиной от 0.2 до 5.0 mm, получено эмпирическое выражение, связывающее нормальные перемещения $u_z \equiv w$ и деформации:

$$\varepsilon_3 = w \frac{2r_0}{r} h \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{2r_0}\right) \right], \quad (1)$$

где ε_3 — деформации в направлении оси Z ; r_0 и h — радиус и глубина отверстия; r — расстояние от точки поверхности образца до центра сверления, измеряемое вдоль оси симметрии интерферограммы (собственной оси). При постоянных напряжениях увеличение радиуса r_0 приводит к росту перемещений поверхности (рис. 3, *a*), что, с одной стороны, позволяет выполнить измерение с меньшей относительной погрешностью, но, с другой стороны, может приводить к возникновению пластических деформаций и искажению результатов. Экспоненциальный член был выявлен при анализе интерферограмм, полученных для отверстий одинаковых

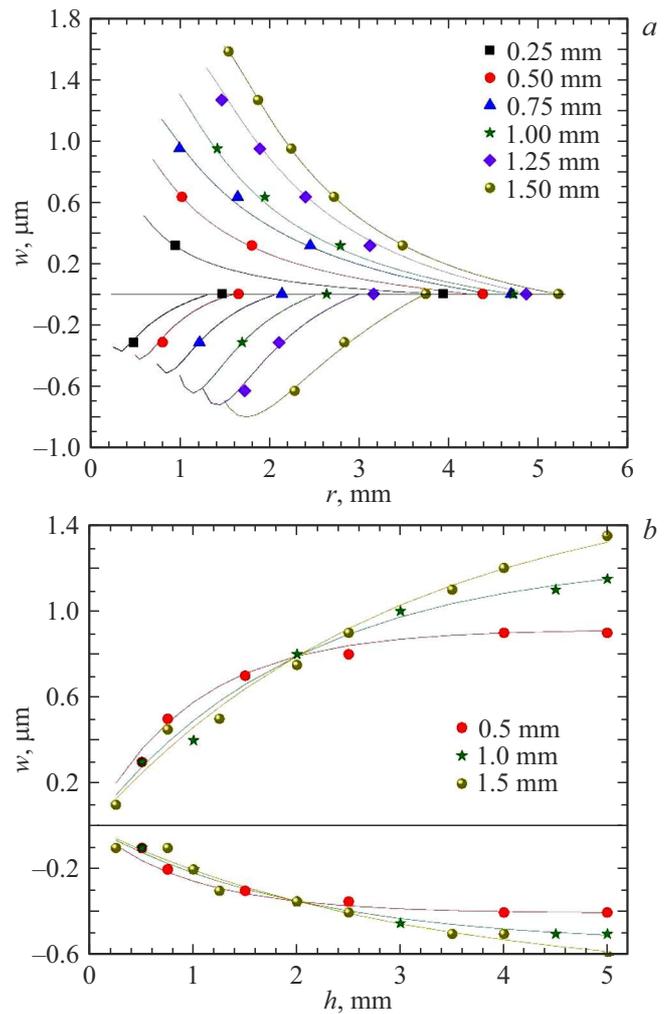


Рис. 3. *a* — зависимости нормальных перемещений поверхности w от расстояния r для различных радиусов зондирующего отверстия r_0 при фиксированной глубине $h = 2r_0$, полученные на тестовом образце с $\sigma_1 = 240$ МПа, $\sigma_2 = -80$ МПа; *b* — зависимости перемещений w на кромке отверстия ($r = r_0$) от глубины h для различных r_0 , полученные на том же образце.

диаметров и различной глубины (рис. 3, *b*). В ходе эксперимента для каждого тестового образца выполнялись серии интерферометрических измерений перемещений w , между которыми последовательно увеличивалась глубина отверстия h . Количество полос N существенно изменялось в диапазоне глубин $h = (0.5-5)r_0$, после значения $h = 5r_0$ изменения порядка оказывались меньше ошибки сверления (здесь $\Delta N = \pm 1/2$). Зависимость w от r была принята в виде

$$w = \frac{A}{r^n} + \frac{B}{r^{n+2}} + C, \quad (2)$$

где A , B и C — постоянные, полученные в результате аппроксимации. Тогда напряжения в зоне высверленного отверстия можно найти по аналогии с уравнениями

Кирша [6]. Так, в соответствии с законом Гука имеем

$$-\frac{E\varepsilon_3^{(1)}}{\nu} = \sigma_1 \left(1 - \frac{2r_0^2}{r^2}\right) - \sigma_2 \left(1 + \frac{2r_0^2}{r^2}\right), \quad (3)$$

где ν — коэффициент Пуассона, $\varepsilon_3^{(1)}$ — относительная деформация по направлению σ_1 . Составляющая деформации $\varepsilon_3^{(2)}$ вдоль ортогонального направления может быть выражена аналогично:

$$-\frac{E\varepsilon_3^{(2)}}{\nu} = \sigma_2 \left(1 - \frac{2r_0^2}{r^2}\right) - \sigma_1 \left(1 + \frac{2r_0^2}{r^2}\right). \quad (4)$$

Окончательное выражение для главных напряжений, полученное в результате совместного решения уравнений (3) и (4), имеет вид

$$\sigma_{1,2} = -E \frac{\pm \varepsilon_i r_i^2 (r_j^2 \pm 2r_0^2) \mp \varepsilon_j r_j^2 (r_i^2 \pm 2r_0^2)}{4\nu r_0^2 (r_i^2 - r_j^2)}, \quad (5)$$

где $r_{i,j}$ — координата центра i, j -й полосы, отмеряемая вдоль собственных осей (рис. 1, *b*), а $\varepsilon_{i,j}$ — соответствующая ей относительная деформация. Использование уравнения (5) позволяет снизить влияние пластических деформаций, возникающих на кромке отверстия в процессе его изготовления, на определяемые значения напряжений. При расшифровке интерферограмм, полученных на тестовых образцах, значения напряжений отличались от теоретических на величину, не превышающую $(2-3) \cdot 10^{-4}E$, где E — модуль Юнга материала.

В заключение кратко упомянем ограничения, которые накладывает предложенный метод на исследуемый объект. Во-первых, предполагается, что отсутствует компонента напряжения σ_3 , направление которой совпадает с осью отверстия. Во-вторых, в соответствии с принципом Сен-Венана расстояние от центра полученного отверстия до края или любого другого нарушения сплошности объекта исследования должно составлять не менее $5r_0$. В-третьих, кривизна поверхности не должна быть значительной, а ось зондирующего отверстия должна быть направлена по нормали к поверхности. Направления освещения и наблюдения должны быть параллельны оси отверстия, чтобы вклад тангенциальных перемещений был минимальным.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Антонов, А.И. Бобрик, В.К. Морозов, Г.Н. Чернышев, Изв. АН СССР. Механика твердого тела, № 2, 182 (1980).
- [2] Л.М. Лобанов, Б.С. Касаткин, В.В. Пивторак, С.Г. Андрущенко, ДАН СССР, **271** (3), 557 (1983).
- [3] Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев, *Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах* (Физматлит, М., 1996).
- [4] K. Duan, C.Y. Kwok, J. Geophys. Res. Solid Earth, **121**, 2361 (2016). DOI: 10.1002/2015JB012676
- [5] Y. Wang, X. Zhong, S. Nie, Y. Zhu, C. Chen, Processes, **11**, 1150 (2023). DOI: 10.3390/pr11041150
- [6] G. Kirsch, Zentralblatt Verlin Deutscher Ingenieure, **42**, 797 (1898).