Исследование локализации пластической деформации вблизи трещины в плоском образце при реверсивном нагружении методом накладной голографической интерферометрии

С.И. Герасимов, В.А. Жилкин[1]

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, 630049, Россия
[1] Челябинский государственный агроинженерный университет, Челябинск, 454080, Россия

Рассматривается оригинальная методика определения перемещений и деформаций на поверхности объекта с помощью контактного голографического интерферометра. Оптическая схема интерферометра основана на использовании голограмм Денисюка и малочувствительна к жестким перемещениям образца как целого. Приводятся результаты экспериментального исследования перемещений краев трещины в образце в условиях одноосного знакопеременного нагружения.

Holographic interferometry study of plastic deformation localization near a crack in a flat specimen under alternating loading

S.I. Gerasimov and V.A. Zhilkin

Consideration is given to an original method for displacement and strain measurements on the specimen surface using a contact holographic interferometer. The optical scheme of the interferometer is based on application of the Denisyuk holograms and it is low sensitive to firm displacements of the specimen as a whole. Crack edge displacements in the specimen under uniaxial alternating loading are experimentally studied.

1. Введение

Экспериментальные оптические методы неоднократно применялись при анализе упругопластических деформаций конструкционных материалов. Однако в классических вариантах им свойственны либо низкая чувствительность (метод муаровых полос) [1], либо влияние механических и упругих характеристик преобразователя на изучаемое деформированное состояние изделия (метод фотоупругих покрытий) [2]. В методе голографической интерферометрии диапазон деформаций $6\cdot10^{-5}$–$2\cdot10^{-3}$, измеряемых посредством одной двухэкспозиционной голографической интерферограммы, не выходит за область упругих деформаций, поэтому изучение процесса пластической деформации материала возможно либо в сочетании с другими методами, либо с использованием поэтапных методов нагружения образца и записи интерференционных картин [3]. В данной работе представлен последних из них.

В традиционных схемах записи голографических интерферограмм регистрирующая среда и объект исследования разнесены в пространстве, что вызывает необходимость применения специализированных виброизолированных стендов и предъявляет высокие требования к уровню перемещений изделия как абсолютно твердого тела, которые в данном случае являются «шумовыми». При этом обеспечивается бесконтактность регистрации перемещений точек поверхности.

От большинства перечисленных недостатков свободен накладной голографический интерферометр, в котором регистрирующая среда на исследуемой поверхности закрепляется с помощью прозрачной, непьезочувствительной и обладающей малой сдвиговой жесткостью резиноподобной среды (ПОС). При этом, однако, возникает эффект подкрепления объекта самим интерферометром.

© Герасимов С.И., Жилкин В.А., 2004

Оценим жесткостные характеристики такого интерферометра и приведем разрешающие уравнения, используемые при расшифровке интерференционных картин.

2. Методика эксперимента

2.1. Расшифровка голографической интерферограммы

На рис. 1 представлена схема записи информации в накладном интерферометре [4]. При освещении объекта плоской когерентной волной, падающей нормально на фотопластинку, основное уравнение метода голографической интерферометрии имеет вид

$$U\cos\alpha_k + V\cos\beta_k + W(n+\sqrt{n^2-\sin^2\gamma_k}) = N\lambda,$$

где U, V, W — компоненты вектора перемещения $\Delta\mathbf{r}$; α, β, γ — углы, характеризующие направление наблюдения; n — показатель преломления промежуточной среды 2; N — номер интерференционной полосы; λ — длина волны лазера.

Если регистрация интерференционных картин производится с четырех попарно симметричных относительно оси z направлений (k = 1, 2, 3, 4), лежащих в двух взаимно перпендикулярных плоскостях $x0z$ и $y0z$, то проекции U, V и W могут быть найдены по формулам:

– направления наблюдения 1 и 2 лежат в плоскости $x0z$

$$U(x,y) = \frac{(N_1 - N_2)\lambda}{2\cos\alpha_{1,2}},$$

$$W(x,y) = \frac{(N_1 + N_2)\lambda}{(n+\sqrt{n^2-\sin^2\gamma_{1,2}})},$$

– направления наблюдения 3 и 4 лежат в плоскости $y0z$

$$V(x,y) = \frac{(N_3 - N_4)\lambda}{2\cos\beta_{3,4}},$$

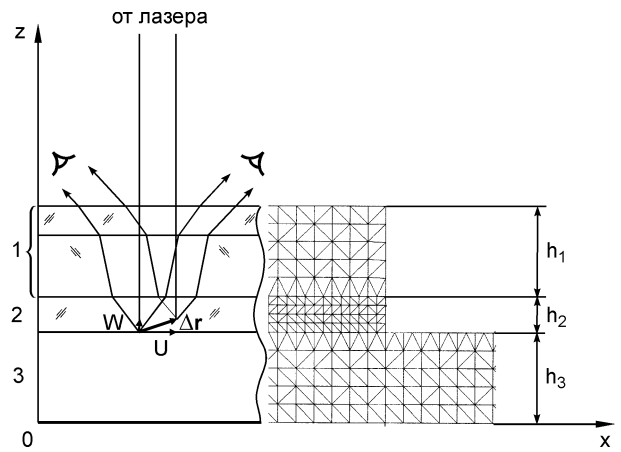


Рис. 1. Схема накладного голографического интерферометра: *1* — фотоэмульсия со стеклянной подложкой, *2* — прозрачная промежуточная среда, *3* — исследуемый образец

$$W(x,y) = \frac{(N_3 + N_4)\lambda}{(n+\sqrt{n^2-\sin^2\gamma_{3,4}})}.$$

Переход к деформациям ε_x, ε_y, $\gamma_{x,y}$, ω_z осуществляли по соотношениям Коши

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x},\ \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y},$$

$$\gamma_{x,y} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x},\ \omega_z = \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x}.$$

2.2. Оценка эффекта подкрепления исследуемого изделия

Задачу об учете влияния жесткости фоторегистрирующей среды в накладном голографическом интерферометре сведем к рассмотрению различия деформированных состояний двух одинаковых элементов конструкций, на один из которых прикреплена регистрирующая среда.

Предположим, что регистрирующая среда со стеклянной подложкой *1* закреплена с помощью ПОС *2* на поверхности плоского образца *3*, испытуемого на центральное растяжение (см. рис. 1). Оценку эффекта подкрепления произведем с помощью вычислительной системы COSMOS/M, реализующей метод конечных элементов. Геометрические размеры и упругие характеристики слоев интерферометра даны в таблице 1, где h — толщина; E_x — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; G_{xz} — модуль сдвига; ρ — плотность.

Исходные опции элементов TRIANG были выбраны таким образом, что обеспечивались плоское напряженное состояние, вычисление напряжений в глобальной декартовой системе координат, линейная упругость материала, малые перемещения, отсутствие внутреннего трения.

При статическом расчете для узлов, расположенных на левом краю образца (x = 0), задавались нулевые перемещения вдоль координатных осей x, z. Для узлов на правой границе образца (x = 40 мм) были заданы перемещения U = 25 мкм, W = 0. Во всех остальных узлах перемещения и напряжения определялись численно. Специальным образом было обеспечено совместное перемещение узлов на границах между образцом и ПОС, между ПОС и стеклом. Выбранные толщины ПОС, стек-

Таблица 1

Характеристики слоев интерферометра

	1 — стекло	2 — резина	3 — сталь
h, мм	2	0.8	2
E_x, Па	$6.3\cdot10^{10}$	$6.1\cdot10^{6}$	$2.1\cdot10^{11}$
ν	0.22	0.49	0.28
G_{xz}, Па	$2.6\cdot10^{10}$	$2.9\cdot10^{6}$	$7.9\cdot10^{10}$
ρ, кг/м^3	$3.0\cdot10^{3}$	$1.0\cdot10^{3}$	$7.7\cdot10^{3}$

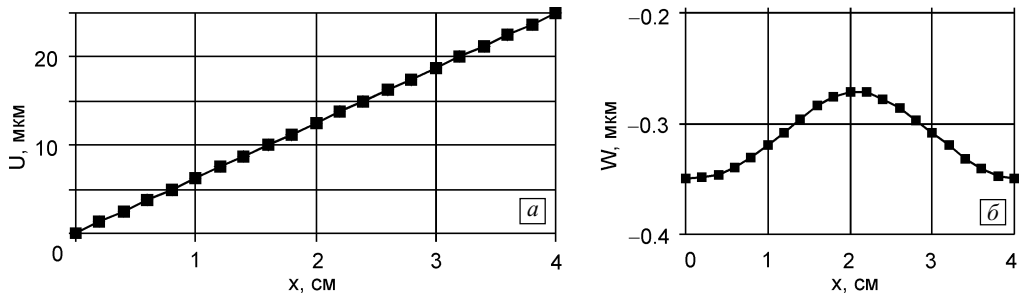


Рис. 2. Оценка подкрепления в накладном интерферометре по перемещениям U (*а*) и W (*б*)

ла и элемента конструкции соответствуют наихудшему соотношению, встретившемуся в конкретных экспериментах.

Эффект подкрепления оценивали по дополнительным перемещениям (особенно на поверхности контакта ПОС и образца). Уровень перемещений $U = 25$ мкм близок к предельно допустимому, при котором на такой базе из-за декорреляции не произойдет размытие интерференционной картины.

На рис. 2, *а* даны распределения компоненты U на двух поверхностях элемента — верхней (z = 2 мм) и нижней ($z = 0$ мм). На линейном графике, хорошо соответствующем одноосному растяжению, расчетные точки практически совпадают. На рис. 2, *б* приведены прогибы W образца в сечении $z = 2$ мм. Величина этих прогибов лежит вне переделов чувствительности интерферометра. В сечении $z = 0$ мм перемещения еще на порядок меньше.

Итак, если соотношение жесткостей в накладном интерферометре подобрано правильно, то в пределах чувствительности метода (~0.3 мкм) фотопластинка не искажает деформированного состояния образца.

2.3. Определение вибрационных характеристик интерферометра

Для определения частот собственных колебаний накладного интерферометра использовали модуль DSTAR вычислительного комплекса COSMOS/M. Геометрия, граничные условия и конечно-элементная сетка модели аналогичны рассмотренным выше. На рис. 3 показаны результаты расчета первых четырех мод собственных колебаний интерферометра.

Явно прослеживается эффект зависимости частот собственных колебаний от степени напряженного состояния. Проведенный анализ полезен при оценке возможности применения накладных интерферометров для проведения экспериментальных исследований в промышленных условиях. Целесообразно предварительно оценить спектр частот колебаний нагрузочных устройств и самих элементов конструкций, чтобы, по возможности, избежать резонанса. Как показывает наш практический опыт, нагрузочные машины типа Instron, MTS, Schenck, ГРМ, УМЭ вполне удовлетворяют этим требованиям.

Следовательно, только при изучении процессов, близких к статическим, характеризуемых частотами <0.1 Гц, можно считать, что фотопластинка по отношению к образцу остается неподвижной, в результате чего голограмма регистрирует лишь истинное поле перемещений. При изучении статических и квазистатических задач с использованием лазеров непрерывного действия экспозиции составляют десятки секунд, в течение которых взаимное смещение фотопластинки и образца произойдет многократно. Это приведет к усреднению паразитной интерференционной картины и, следовательно, не вызовет ошибок при определении полей перемещений, обусловленных статическим деформированием изделия.

3. Результаты эксперимента

Образцы изготавливали из листового материала Д16Т. Геометрические размеры образца и вид нанесенной на его поверхность координатной сетки представлены на рис. 4, *а*. Для исключения потери устойчивости образца при сжатии его рабочий участок был сокращен до минимума и составил 70–80 мм (расстояние между захватами нагрузочного устройства). Нагружение образца проводили в машине УМЭ-10ТМ. Максимальная нагрузка на образец не превышала ±80 кН. При первом цикле нагружения поэтапно зарегистрированы 23 голографические интерферограммы. По вычисленным значениям ε_y в точке A с координатами $x = R$, $y = 0$ была построена зависимость амплитуды деформации от амп-

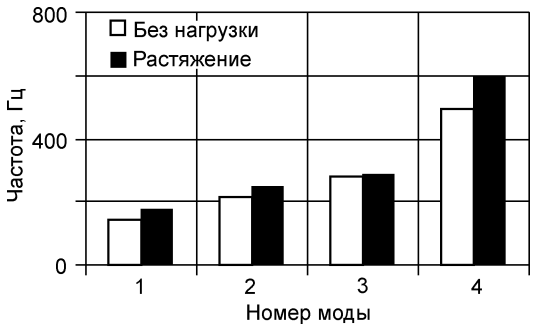
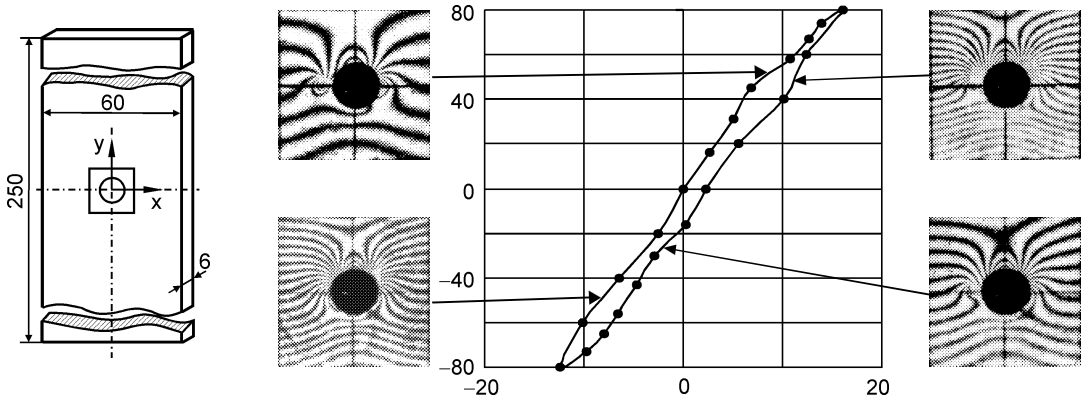


Рис. 3. Влияние напряженного состояния на собственные частоты колебаний интерферометра



а *б*

Рис. 4. Плоский образец с центральным отверстием и картины интерференционных полос для различных этапов нагружения

литуды прикладываемой к образцу знакопеременной нагрузки P.

Аналогично получены 22 голограммы через 350 циклов мягкого симметричного нагружения образца с той же амплитудой. Диаграмма деформирования материала образца в точке A на 351-м цикле нагружения приведена на рис. 4, *б*. Сопоставление диаграмм показало, что сплав Д16Т — упрочняющийся.

При поэтапном исследовании 351-го цикла нагружения на интерферограммах стала отчетливо прослеживаться возникшая за предыдущий промежуток времени трещина. На стадии растяжения края трещины расходятся, при разгрузке они сближаются. При этом на интерферограммах вблизи трещины концентрируются полосы (рис. 4, *б*). Аналогичную ситуацию мы видим при реверсивном нагружении. Очевидно, при этом один край трещины оказывает давление на другой и происходит выпучивание материала. Такое явление всегда наблюдается при исследовании зоны контакта двух тел, когда одно из них действует на другое. На последнем же участке — разгрузке — трещина никак себя не проявляет. Можно предположить, что в области трещины, как и в других точках зоны концентрации, происходит упругая разгрузка материала образца.

4. Заключение

Процессы пластического деформирования в экспериментах по растяжению дюралюминиевых образцов были визуализированы при помощи накладной голографической интерферометрии в условиях обычной промышленной лаборатории. В эксперименте с выращенной трещиной на стадии разгрузки из состояния сжатия оказалось невозможно обнаружить имеющуюся несплошность материала образца. Это может определить и сформулировать ограничения для других неразрушающих методов обнаружения трещин в конструкционных материалах.

Литература

1. *Дюрелли А., Паркс В.* Анализ деформаций с использованием муара. – М.: Мир, 1974. – 359 с.
2. *Александров А.Я., Ахметзянов М.Х.* Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. – М.: Наука, 1973. – 576 с.
3. *Герасимов С.И., Жилкин В.А.* Исследование деформаций поликристаллических образцов методом накладной голографической интерферометрии // ПМТФ. – 2000. – Т. 41. – № 1. – С. 218–222.
4. *Жилкин В.А., Герасимов С.И.* О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного интерферометра // ЖТФ. – 1982. – Т. 52. – № 10. – С. 2079–2085.