

9. Нигматулин Р. И. К вопросу о волнах уплотнения в двухфазных средах // Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика, механика.— 1969.— № 4.
10. Ивандаев А. И. Распространение малых возмущений в смеси пара с каплями воды // Акуст. журн.— 1978.— Т. 24, № 1.
11. Oota E., Tajima K., Morii H. Experiments and analysis on shock waves propagating through a gas-particle mixture // Bull. JSME.— 1976.— V. 19, N 130.

Поступила 26/1 1987 г.

УДК 620.171.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКИХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

С. И. Герасимов, В. А. Жилкин

(Новосибирск)

При решении упругопластических задач принимаемая идеализация свойств деформируемой среды и в особенности граничных условий зачастую не позволяет уверенно считать результаты, полученные согласно теоретическим решениям механики пластического формоизменения тел (если они имеются), соответствующими реальному процессу.

В связи с этим важная роль принадлежит экспериментальным исследованиям, в процессе проведения которых удается реализовать натурные граничные условия и получить информацию о полях перемещений изучаемых участков поверхности реальных изделий. К таким методам, в частности, относится метод голографической интерферометрии (МГИ), с помощью которого в настоящее время успешно решаются задачи неразрушающего контроля, теории упругости, виброметрии и некоторые задачи теории пластичности [1—7].

В данной работе описаны известные применения МГИ при решении задач упругопластического деформирования балок и пластин и приводятся некоторые новые результаты, иллюстрирующие возможности этого оптического метода и те трудности, с которыми приходится сталкиваться экспериментатору при получении количественной информации о процессе деформирования изделия. Везде в дальнейшем будем использовать общепринятые в теории упругости обозначения проекций U , V и W вектора перемещения Δr на координатные декартовы оси x , y и z соответственно; ось z совпадает по направлению с внешней нормалью к поверхности изделия.

1. Методы голографической интерферометрии в экспериментальной механике. Методом голографической интерферометрии удается сравнительно легко и с высокой степенью точности определять перемещения W точек диффузной поверхности изделий. В классических схемах записи голограмм регистрирующая среда и объект исследования разнесены в пространстве на значительное расстояние друг от друга, что в связи с высокой чувствительностью метода к их взаимным смещениям обуславливает необходимость применения специализированных виброизолированных стендов (типа СИН, УИГ, ВИС и т. д.) и предъявляет жесткие требования к уровню перемещений изделия как абсолютно твердого тела, которые в данном случае являются «шумовыми», затрудняющими анализ деформированного состояния изучаемого участка поверхности тела. Это в свою очередь не позволяет использовать стандартное оборудование для нагружения изделий и вынуждает экспериментаторов либо изготавливать специальные нагрузочные приспособления, либо исследовать только те задачи, в которых заведомо перемещения испытываемого тела как жесткого целого невелики.

Поэтому большинство первых работ посвящено изучению деформированного состояния изгибаемых консольных балок и пластин с жестко-закрепленным контуром [8—13] или плоских коротких образцов, подвергаемых растяжению, у которых различными техническими приемами вблизи изучаемого участка поверхности образца обеспечивали зону с нулевыми перемещениями [14, 15]. В большинстве из перечисленных работ выполнялся качественный анализ интерференционных картин и экспериментально определялась только функция $W(x, y)$. Из этого ряда выпадают работы [8, 9], в которых приведены количественные результаты по определению остаточных напряжений в шлифованном и наклепанном слоях балки из сплава ЭИ 617, полученные в результате численной об-

работки экспериментальной информации, в процессе которой пришлось вычислять третьи производные от функции $W(x, y)$.

Первая попытка определения всех трех проекций вектора перемещения $\Delta \mathbf{r}$ на координатные оси по информации, получаемой с помощью МГИ, предпринята авторами [16], которые полагали, что соответствующим выбором направлений записи голограмм можно экспериментальным путем отдельно определить поля перемещений $U(x, y)$, $V(x, y)$, $W(x, y)$.

В настоящее время известно, что с помощью голографической интерферометрии эта задача не может быть решена, МГИ позволяет получить информацию о линиях уровня только функции $W(x, y)$, а в остальных случаях изофазные поверхности (или картины интерференционных полос) определяются сочетанием двух или трех проекций вектора перемещения $\Delta \mathbf{r}$.

В общем случае разрешающее уравнение метода голографической интерферометрии имеет вид [5]

$$(1.1) \quad \Delta \mathbf{r} \cdot (\rho_n - \rho_o) = N\lambda,$$

где $\Delta \mathbf{r} = U\mathbf{i} + V\mathbf{j} + W\mathbf{k}$; ρ_n, ρ_o — единичные векторы направлений наблюдения и освещения точки объекта: $\rho_n = \mathbf{i} \cos \alpha_n + \mathbf{j} \cos \beta_n + \mathbf{k} \cos \gamma_n$, $\rho_o = \mathbf{i} \cos \alpha_o + \mathbf{j} \cos \beta_o + \mathbf{k} \cos \gamma_o$; $\alpha_m, \beta_m, \gamma_m$ ($m = n, o$) — углы между единичным вектором направления n или o и осями координат x, y, z соответственно; N — порядок интерференционных полос; λ — длина волны излучения используемого источника света.

Из (1.1) следует, что только в случае симметрии направлений освещения и наблюдения за точкой объекта относительно нормали к поверхности образца порядок интерференционных полос (изофазных линий) станет пропорционален функции перемещений

$$(1.2) \quad W = N\lambda/2 \cos \gamma,$$

а в остальных случаях (1.1) будет содержать две или три проекции искомого вектора перемещения, для определения которых необходимо совместно решать два или три уравнения типа (1.1).

В 80-х годах количество публикаций по рассматриваемой тематике существенно не увеличилось, класс решаемых задач не расширился, но акцент в большинстве работ был сделан на разработку приемов и способов получения количественной информации об исследуемых процессах [17—20].

Причинами, тормозящими более широкое внедрение МГИ в экспериментальную механику в его классическом варианте с разнесенными в пространстве регистрирующей средой и объектом исследования, являются:

— невозможность использования стандартного испытательного оборудования из-за недопустимо больших перемещений изучаемого объекта как жесткого целого относительно регистрирующей среды в промежуток времени между двумя экспозициями фотоматериала;

— вибрации стандартного испытательного оборудования не позволяют осуществить запись голограмм высокого качества;

— низкая точность определения функций $U(x, y)$, $V(x, y)$ из системы типа (1.1) по данным расшифровки только одной интерферограммы ввиду ее малого апертурного угла либо нескольких интерферограмм из-за трудностей с нумерацией интерференционных полос.

От перечисленных недостатков свободны накладные голографические интерферометры [21, 22], в которых с целью снижения требований к виброизоляции элементов экспериментальных установок и повышения точности определения деформаций фоторегистрирующую среду закрепляют на поверхности изучаемого изделия [23], а голографические интерферограммы записывают во встречных пучках [24].

2. Накладные интерферометры. При изучении деформированного состояния массивных изделий регистрирующая среда на их поверхности может закрепляться механическими или магнитными прижимами [23, 25]

либо с помощью оптически прозрачной, непьезочувствительной и обладающей малой сдвиговой жесткостью резиноподобной среды [22]. При изучении тонкостенных конструкций применим только последний из перечисленных способов. В этом случае при освещении объекта плоской когерентной волной, падающей нормально на фотопластинку, разрешающее уравнение МГИ имеет вид $U \cos \alpha_k + V \cos \beta_k + W(n + \sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma_k}) = N\lambda$, где n — показатель преломления промежуточной прозрачной среды; k — индекс, характеризующий различные направления наблюдения.

Если регистрация интерференционных картин проводится с четырех попарно симметричных относительно оси z направлений ($k = 1, 2, 3, 4$), лежащих в двух взаимно перпендикулярных плоскостях xOz и yOz , то проекции U , V и W вектора перемещения Δr точек поверхности изделия могут быть найдены по формулам:

направления наблюдения 1 и 2 лежат в плоскости yOz

$$(2.1) \quad V = \lambda(N_1 - N_2)/2 \cos \beta_{1,2};$$

$$(2.2) \quad W = \lambda(N_1 + N_2)/(n + \sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma_{1,2}});$$

направления наблюдения 3 и 4 лежат в плоскости xOz

$$(2.3) \quad U = \lambda(N_3 - N_4)/2 \cos \alpha_{3,4};$$

$$(2.4) \quad W = \lambda(N_3 + N_4)/(n + \sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma_{3,4}}).$$

Определение проекции W из зависимости (2.2) и (2.4) требует знания абсолютного показателя преломления n , что несколько усложняет процесс расшифровки по сравнению с использованием соотношения (1.2). Поэтому накладные интерферометры используют в основном для определения плоскостных перемещений $U(x, y)$ и $V(x, y)$.

Преобразователем механических величин (перемещений) в оптический сигнал в МГИ является интерферограмма. Диапазон измеряемых с помощью такого преобразователя деформаций

$$(2.5) \quad D = (\min \psi_{\text{и}} \dots \max \psi_{\text{и}})/S$$

обратно пропорционален его чувствительности:

$$(2.6) \quad S_U = \cos \alpha_{3,4}/\lambda, \quad S_V = \cos \beta_{1,2}/\lambda,$$

где $\max \psi_{\text{и}}$, $\min \psi_{\text{и}}$ — максимальная и минимальная частоты интерференционных картин, определяемых уровнем осреднения деформаций на базе интерференционных полос и техническими характеристиками применяемого оборудования (чаще всего $\min \psi_{\text{и}} = 0,05$ линия/мм, $\max \psi_{\text{и}} = 1$ линия/мм). Числитель в выражении (2.5) не зависит от используемого оптического метода.

С учетом того, что для наиболее распространенного He — Ne-лазера $\lambda = 0,6328$ мкм, зависимость диапазона измеряемых МГИ деформаций от чувствительности преобразователя запишем в виде

$$(2.7) \quad D = (3-63) \cdot 10^{-5}/\cos \alpha.$$

В реальных условиях угол α не может быть равен нулю (в этом случае направление наблюдения ориентировано вдоль поверхности фотопластинки) и не должен быть равен 90° , ибо тогда чувствительность интерферометра к проекции вектора перемещения, лежащей в касательной плоскости, нулевая. При α , близких к 90° , чувствительность интерферометра к перемещению U (см. (2.6)) может быть в десятки раз меньше чувствительности к перемещению W (здесь принято $\alpha = 90^\circ - \gamma$): $S_W/S_U = (n + \sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma})/\sin \gamma$. Так, при $n = 1,5$ и $\gamma = 10^\circ$ $S_W/S_U \approx 17$.

Поэтому обычно α выбирают в пределах $30-60^\circ$. Для $\alpha = 60^\circ$ ($S_U = 790$ линия/мм) $D = 6 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-3}$, т. е. с помощью такого преобра-

ователя можно исследовать только упругие задачи механики деформируемой среды либо использовать его при изучении процессов пластического деформирования материала изделий в сочетании с другими оптическими методами, обладающими более низкой чувствительностью. Применение же МГИ как самостоятельного обуславливает необходимость использования поэтапных методов как нагружения образца, так и записи интерференционных картин. Если, например, требуется изучить деформированное состояние полосы, изготовленной из материала Д16П и испытываемой на центральное растяжение, то для достижения деформации $\epsilon_T = 4 \cdot 10^{-3}$, соответствующей пределу текучести образца [26], требуется последовательно записать четыре интерферограммы, так как при принятых предположениях каждая из интерферограмм перекроет диапазон деформаций $(0-1,26) \cdot 10^{-3}$. Для изучения кинетики деформирования образца вплоть до его разрушения необходимо записать около 200 интерферограмм. Понятно, что решение таких задач связано с разработкой способов автоматизированного съема экспериментальной информации и с созданием алгоритмов ее обработки на ЭВМ. В настоящее время время таких серийно выпускаемых автоматизированных комплексов обработки голографических интерферограмм не существует, но работы в этом направлении проводятся [27—29].

3. Определение деформированного состояния изучаемого участка поверхности изделия. Одна голограмма, записанная методом двух экспозиций, содержит всю необходимую информацию для анализа изменений деформированного состояния изучаемой поверхности изделия, которые произошли с ней в промежуток времени между двумя экспозициями. Регистрируя четыре интерференционные картины с четырех попарно симметричных относительно оси z направлений и используя зависимости (2.1)—(2.4), определим функции $U(x, y)$, $V(x, y)$, $W(x, y)$. Так как голографическая интерферометрия фиксирует только малые деформации (см. (2.7)), то компоненты ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} тензора деформаций найдем согласно соотношениям Коши [30]

$$(3.1) \quad \epsilon_x = \partial U / \partial x, \quad \epsilon_y = \partial V / \partial y, \quad \gamma_{xy} = \partial U / \partial y + \partial V / \partial x$$

численным или графическим дифференцированием экспериментально найденных функций U и V . Квазиглавные деформации $\epsilon_{1,2}$ на поверхности изделия и их ориентацию вычислим по формулам

$$(3.2) \quad \epsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \left((\epsilon_x + \epsilon_y) \pm \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \right);$$

$$(3.3) \quad \operatorname{tg} \alpha_1 = 2(\epsilon_1 - \epsilon_x) / \gamma_{xy}$$

(α_1 — угол между направлением главной деформации ϵ_1 и осью x).

Деформацию $\epsilon_z = \partial W / \partial z$ методом голографической интерферометрии непосредственно определить не удастся. По экспериментальным данным можно найти только две частные производные: $\partial W / \partial x$ и $\partial W / \partial y$, а с учетом того, что свободные от нагрузки площадки внешней поверхности изделия являются главными, — еще две частные производные: $\partial V / \partial z = -\partial W / \partial y$, $\partial U / \partial z = -\partial W / \partial x$, зная которые можно экстраполировать поведение функций U и V в подповерхностный слой изучаемого объекта. Деформацию ϵ_z получают через деформации ϵ_x и ϵ_y :

$$(3.4) \quad \epsilon_z = -\mu^*(\epsilon_x + \epsilon_y) / (1 - \mu^*),$$

где $\mu^* = 0,5 - (1 - 2\mu)E_c / 2E$ [31]; E , μ — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала изделия; $E_c = \sigma_0 / \epsilon_0$ — секущий модуль на кривой деформирования; $\sigma_0 = \sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$ — интенсивность напряжений; $\epsilon_0 = \epsilon_i + (1 - 2\mu)\sigma_i / E$;

$$(3.5) \quad \epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + 1,5\gamma_{xy}^2}$$

— интенсивность деформаций.

Итак, для того чтобы найти деформацию ε_z , необходимо предварительно построить обобщенную кривую деформирования $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ для материала изучаемого изделия и зависимость переменного параметра упругости μ^* от ε_i , но воспользоваться непосредственно этими зависимостями мы не можем, так как неизвестна ε_z , а следовательно, и ε_i . Для преодоления этого затруднения можно воспользоваться двумя путями: 1) учитывая незначительное влияние коэффициента Пуассона на распределение напряжений, положить $\mu = 0,5$, т. е. считать материал несжимаемым; 2) применить метод последовательных приближений: задаваясь $\mu_1^* = 0,5$, по зависимости (3.5) найти $\varepsilon_i^{(1)}$ и по графику $\mu^* = f_1(\varepsilon_i)$ — новое значение μ_2^* , далее процесс продолжается до тех пор, пока $|\mu_n^* - \mu_{(n-1)}^*| < \Delta$ (Δ — принятая точность сходимости приближений). Последний прием, в частности, можно использовать и для определения границы между упругой и пластически деформированной зонами материала изделия [32].

При переходе к анализу напряженного состояния необходимо воспользоваться одним из известных условий пластичности (Треска либо Мизеса) и одной из известных моделей пластичности: деформационной теорией Генки — Ильюшина, теориями течения Сен-Венана — Мизеса и Прандтля — Рейса.

Как уже указывалось, МГИ можно применять только при поэтапных способах записи информации. Поэтому зависимости (3.1)—(3.4) фактически определяют приращения компонент деформаций на очередном этапе нагружения изделия. В зависимости от выбора точек на кривой деформирования, соответствующих первой и второй экспозициям фотоматериала, восстановленные картины интерференционных полос будут нести информацию о приращении деформаций, отвечающих либо активному нагружению, либо разгрузке, либо остаточному формоизменению изделия [11, 33].

4. Экспериментальные результаты. Анализ деформированного состояния пластины из сплава Д16Т с центральным круговым отверстием при одноосном растяжении. Геометрические размеры исследуемого образца и диаграмма деформирования материала изделия приведены на рис. 1. Растягивающее усилие ориентировано вдоль оси симметрии, совпадающей с осью y . Перед испытаниями поверхность образца обрабатывалась мелкой абразивной бумагой для приближения формы индикатрисы рассеивания к сферической. Голограммы записывали на фотопластинки ЛОИ-2, закрепляемые на поверхности образца с помощью каучука СКГН-А, и проявляли в разбавленном (1 : 10) проявителе Петрова [34].

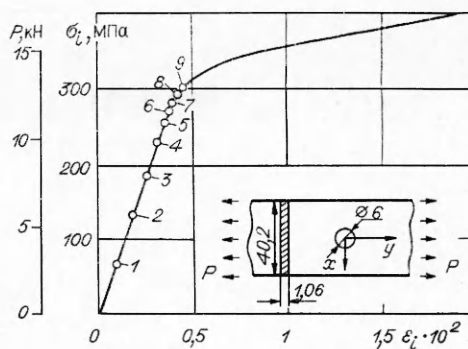


Рис. 1

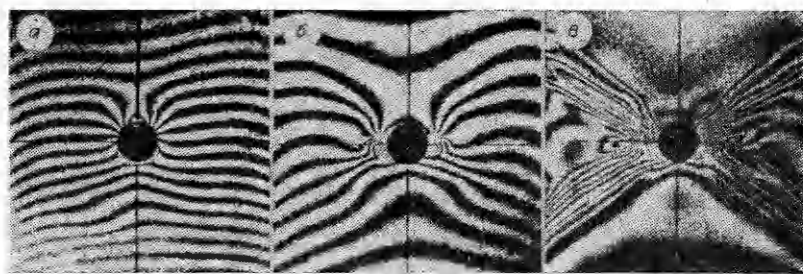


Рис. 2

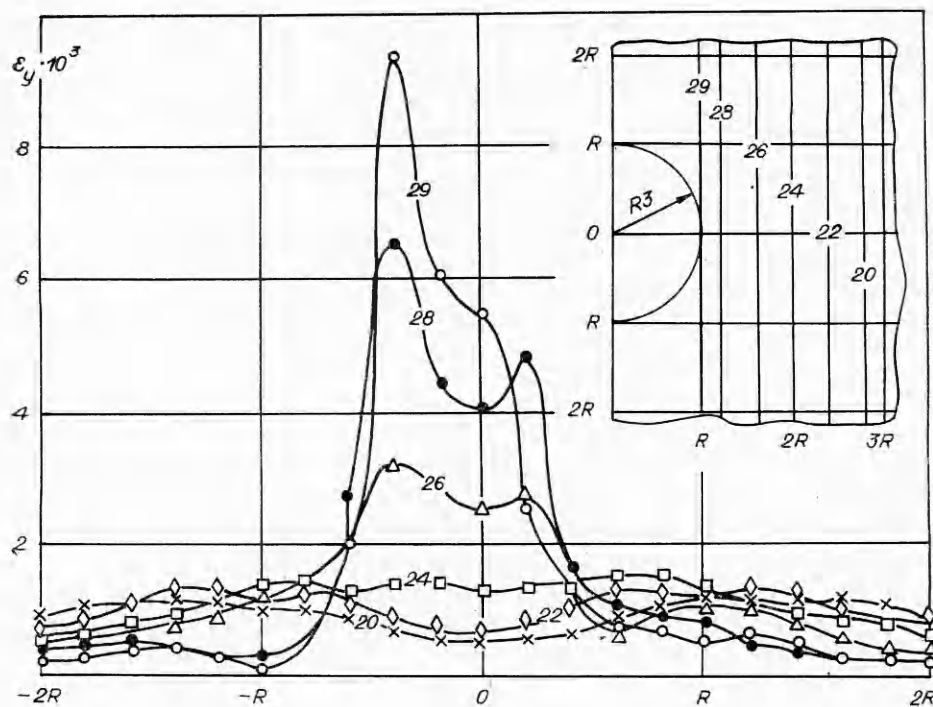


Рис. 3

Источником света служил He — Ne-лазер ЛГ-38. Испытания образца проводили на испытательной машине ДМ-30; при записи голограмм в помещении поддерживали слабое зеленое освещение. Контроль процесса нагружения осуществляли тензодатчиками ПКБ 10—100, приклеенными клеем ЦИАКРИН-ЭО (два на удалении от концентратора, два вблизи опасных точек у контура отверстия). Точки на диаграмме деформирования соответствуют этапам нагружения и регистрации двухэкспозиционных голограмм.

Начиная с шестого этапа, усилие на образец после окончания процесса нагружения падало (на рис. 1 указано конечное установившееся значение нагрузки). Вторую экспозицию осуществляли лишь тогда, когда скорость падения усилия становилась практически нулевой.

На рис. 2, а — в приведены фотографии, отвечающие первому ($P = 2,8$ кН, $\Delta P = 2,8$ кН), пятому ($P = 10,9$ кН, $\Delta P = 1,2$ кН) и восьмому ($P = 12,4$ кН, $\Delta P = 0,5$ кН) этапам нагружения (P — полная нагрузка, ΔP — ее приращение на этапе).

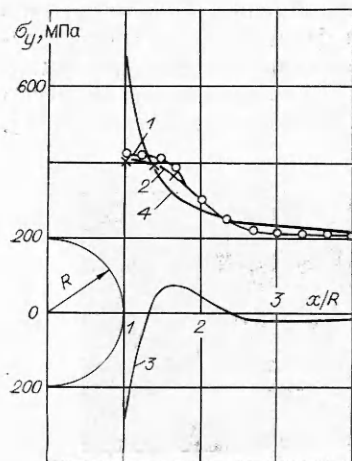


Рис. 4

Количественная расшифровка голографических интерферограмм проведена для первых пяти этапов. Были построены поля деформаций $\epsilon_x(x, y)$, $\epsilon_y(x, y)$, $\gamma_{xy}(x, y)$. На рис. 3 показано распределение деформаций ϵ_y в различных сечениях $x = \text{const}$ на пятом этапе нагружения образца.

Полагая $\mu^* = 0,5$, определяли ϵ_i , а затем по обобщенной кривой деформирования (см. рис. 1) находили σ_i . Начало пластического деформирования материала определяли по условию Мизеса $\sigma_i = \sigma_T$. Для нашего случая $\sigma_T = 333$ МПа, $\epsilon_i = 6,67 \cdot 10^{-3}$. На рис. 4 приведены эпюры σ_y для степени пластического деформирования $\psi = 0,687$, полученные по теории малых упругопластических деформаций 1 и теории течения Сен-

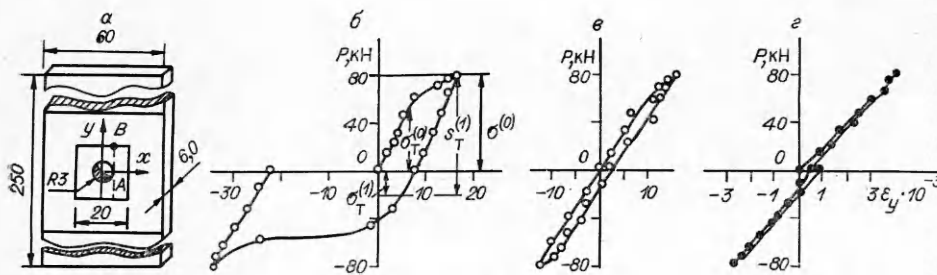


Рис. 5

Венана — Леви — Мизеса 2 (совпадение эюр удовлетворительное, как это и должно быть при простом нагружении), и эюра остаточных напряжений 3 в опасном сечении образца как рассчитанная разность эюр, одна из которых получена экспериментально, а другая вычислена по формулам теории упругости 4 в предположении идеальной упругости материала изделия [35].

Построение диаграммы деформирования в наиболее нагруженной точке пластины с отверстием при малоцикловом нагружении. Образцы изготавливали из листового материала Д16Т. Геометрические размеры образца и вид нанесенной на его поверхность координатной сетки представлены на рис. 5, а. Для предотвращения 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. Элементы оптической схемы установки (лазер ЛГ-38, линзы, диафрагма и т. п.) располагали рядом на обычном лабораторном столе. К образцу прикладывали знакопеременную нагрузку. При первом цикле нагружения зарегистрированы 23 голографические интерферограммы. По вычисленным значениям ϵ_y в точке А с координатами $x = R$, $y = 0$ построена зависимость амплитуды деформации от амплитуды прикладываемой к образцу знакопеременной нагрузки P (рис. 5, б).

Аналогично получены 22 голограммы через 350 циклов мягкого симметричного нагружения образца с амплитудой нагрузки 80 кН. Диаграмма деформирования материала образца в точке А на 351-м цикле нагружения приведена на рис. 5, в. Сопоставление кривых рис. 5, б и в показывает, что сплав Д16Т упрочняется. Диаграмме деформирования материала образца в точке В соответствует кривая рис. 5, г, внешний вид которой соответствует упругому характеру работы материала в этой точке.

Для количественной оценки эффекта Баушингера Мазинг предположил, что сумма напряжений, при котором началась разгрузка $\sigma^{(0)}$, и $\sigma_T^{(1)}$ (нового предела пропорциональности) при реверсивном нагружении — величина постоянная, равная удвоенному пределу пропорциональности в исходном нагружении:

$$(4.1) \quad \sigma^{(0)} + \sigma_T^{(1)} = S_T^{(1)} = 2\sigma_T^{(0)}.$$

В нашем случае $\sigma^{(0)} \approx 222$ МПа, $\sigma_T^{(1)} \approx 55$ МПа, $S_T^{(1)} \approx 278$ МПа, $\sigma_T^{(0)} \approx 140$ МПа, т. е. соотношение (4.1) выполняется с достаточно хорошей точностью.

Регистрация релаксационных процессов в сплаве Д16Т. Толстую пластину с круговым концентратором подвергали пластическому деформированию в зоне отверстия посредством стального сплошного цилиндра, диаметр которого примерно в 3 раза превышал диаметр отверстия. После снятия нагрузки в пластине образовалось углубление в 1,6 мм. С помощью трехточечного контакта в реальном времени во встречных пучках записы-

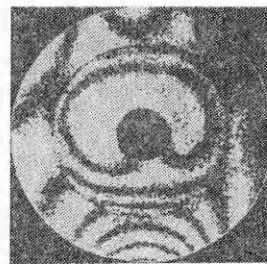


Рис. 6

валась голограмма такой деформированной поверхности. Спустя несколько суток, была сфотографирована картина интерференционных полос, появившаяся за этот промежуток времени (рис. 6). На фотографии в полосах конечной ширины отчетливо прослеживается различный характер формоизменения внутри и вне деформированной зоны. Нормальное перемещение внутренней зоны составило около 0,5 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы неразрушающих испытаний/Под ред. Р. Шарпа.— М.: Мпр, 1972.
2. Голографические неразрушающие исследования/Под ред. Р. К. Эрфа.— М.: Машиностроение, 1979.
3. Оптическая обработка информации/Под ред. Д. Кейсесента.— М.: Мир, 1980.
4. Кудрин А. Б., Полухин П. И., Чиченев Н. А. Голография и деформация металлов.— М.: Металлургия, 1982.
5. Вест Ч. Голографическая интерферометрия.— М.: Мир, 1982.
6. Козачок А. Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике.— М.: Машиностроение, 1984.
7. Джоунс Р.; Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия.— М.: Мир, 1986.
8. Селезнев В. Г., Архипов А. Н., Ибрагимов Т. В. Применение голографической интерферометрии для определения остаточных напряжений // Завод. лаб.— 1976.— Т. 42, № 6.
9. Селезнев В. Г., Архипов А. И., Ибрагимов Т. В. Определение остаточных напряжений, переменных по длине стержня, методом голографической интерферометрии // Завод. лаб.— 1977.— Т. 43, № 9.
10. Яковлев В. В., Щепинов В. П. Определение остаточных деформаций в вершине трещины методом голографической интерферометрии // Сб. науч. тр. Челябин. политехн. ин-та, 1976.— № 182.
11. Щепинов В. П., Яковлев В. В. Определение составляющих упругопластических деформаций методом голографической интерферометрии // ЖТФ.— 1979.— Т. 49, № 5.
12. Щепинов В. П., Яковлев В. В. Исследование процесса деформирования деталей методом голографической интерферометрии // ПМТФ.— 1979.— № 6.
13. Яковлев В. В., Щепинов В. П., Одинцов П. Н. Исследование начальных остаточных деформаций в деталях методом голографической интерферометрии // Пробл. прочности.— 1979.— № 10.
14. Хандогин В. А. Приложения когерентно-оптических методов измерений к решению некоторых задач теории трещин (обзор) // Голографические измерительные системы.— Новосибирск: НЭТИ, 1980.
15. Архипов В. И. Поле упругопластических деформаций в зоне устья трещины // ПМТФ.— 1980.— № 4.
16. Целиков М. И., Морозов Б. А. и др. Применение голографической интерферометрии для изучения процесса упругого и пластического деформирования // Пробл. прочности.— 1976.— № 6.
17. Остаточные напряжения и методы регулирования.— М.: ИПМ АН СССР, 1983.
18. Остаточные технологические напряжения.— М.: ИПМ АН СССР, 1985.
19. Lothar M. Ermittlung plastischer Verformungen mit Hilfe der holografischen Interferometrie // FMC-Ser. Inst. Mech. Akad. Wiss. DDR, 1982.— N 3.
20. Волков И. В. Исследование голографическим методом кинетики пластических деформаций // Учен. зап. ЦАГИ.— 1984.— Т. 15, № 2.
21. Жилкин В. А., Борыняк Л. А. Метод голографической интерферометрии с использованием голограмм Денисюка для исследования деформированного состояния объекта // Физические основы голографии: Материалы II Всесоюз. шк. по голографии.— Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1979.
22. Жилкин В. А., Герасимов С. И. О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного интерферометра // ЖТФ.— 1982.— Т. 52, № 10.
23. Neumann D. V., Penn R. C. Object motion compensation using reflection holography (A) // J. Opt. Soc. Amer.— 1972.— V. 62.
24. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // ДАН СССР.— 1962.— Т. 144, № 6.
25. Voone P. M. Use of reflection holograms in holographic interferometry and speckle correlation for measurement of surface displacements // Optica Acta.— 1975.— V. 22.
26. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов.— Киев: Наук. думка, 1975.
27. Гужов В. И., Дружинин А. И. и др. Измерительно-вычислительная система для исследования напряженно-деформированного состояния объектов // Автометрия.— 1982.— № 4.
28. Марченко Н. А., Пергамент А. Х. Обработка интерферограмм на ЭВМ.— М., 1982.— (Препринт/Ин-т прикл. мат. АН СССР; № 42).
29. Герасимов С. И., Гужов В. И. и др. Автоматизация обработки интерференционных картин при исследовании полей деформаций // Завод. лаб.— 1985.— Т. 51, № 4.

30. Писаренко Г. С., Можаровский Н. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести.— Киев: Наук. думка, 1981.
31. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопrotивление материалов.— М.: Наука, 1986.
32. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризацiонно-оптические методы механики деформируемого тела.— М.: Наука, 1973.
33. Жилкин В. А., Попов А. М. Голографический муаровый метод // Завод. лаб.— 1979.— Т. 45, № 11.
34. Петров В. Д. Скоростная обработка фотографических слоев при получении отражательных голограмм // ЖНПФик.— 1976.— Т. 21, № 3.
35. Биргер И. А. Остаточные напряжения.— М.: Машгиз, 1963.

Поступила 4/XI 1986 г.

УДК 532.593

ПЕРЕДАЧА УДАРНО-ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ НАСЫПНЫМИ СРЕДАМИ

Б. Е. Гельфанд, С. П. Медведев, А. Н. Поленов,
С. М. Фролов
(Москва)

В [1] исследовано скольжение воздушной ударной волны (ВУВ) вдоль поверхности пылевого слоя. Показано, что характер изменения давления на подложке при наличии слоя существенно отличается от распространения ВУВ вдоль чистой поверхности. В связи с практической важностью обнаруженного эффекта в настоящей работе проведено подробное экспериментальное изучение параметров волн давления, действующих на жесткую стенку, покрытую слоями различных сыпучих веществ, при ударно-волновом нагружении. Рассмотрены случаи как нормального падения ВУВ на слой, так и распространения ВУВ вдоль поверхности слоя.

1. Нормальное падение ВУВ на слой. Эксперименты проводились на вертикальной ударной трубе с внутренним диаметром 50 мм, длиной 3 м. Схема установки приведена на рис. 1, а. Камера высокого давления (КВД) 1 длиной 1,5 м отделена от камеры низкого давления (КНД) 2 разрывной мембраной 3. КНД оснащена пьезоэлектрическими датчиками давления 4—6. На торец КНД с вмонтированным датчиком 6 помещали слой сыпучих материалов. Характеристики исследуемых веществ (ρ_p , ρ_n , φ , d — соответственно плотность материала частиц, насыпная плотность, объемная доля твердой фазы и средний размер частиц) приведены в таблице. Для рассеивания использовались калиброванные сита. В опытах применялись пьезодатчики типа ЛХ с диаметром чувствительной поверхности 1 см, что много больше d . Датчик 5 помещался вблизи поверхности слоя, 4 — запускающий датчик. В КВД азот или гелий, в КНД воздух при давлении $p_0 = 0,1$ МПа. Сигналы пьезодатчиков регистрировались на осциллографах С8-17. Избыточное давление на фронте падающих ВВ $\Delta p = p_1 - p_0$ (p_1 — давление за фронтом волны) варьировалось в диапазоне 0,05—1 МПа.

Эксперименты показали, что при ударно-волновом нагружении характер давления на торце, покрытом сыпучим веществом, отличается от известного случая взаимодействия ВУВ с жесткой стенкой. После отражения падающей ВУВ от свободной поверхности насыпной среды на торец под слой приходит возмущение давления, характеризующееся выбросом на фронте и дальнейшим спадом с быстрозатухающими колебаниями до давления отражения на поверхности слоя p . Длительность выброса пропорциональна высоте слоя, а его амплитуда может в несколько раз превышать «стационарное» значение p , которое незначительно (на 10—20%) меньше давления отражения на жесткой стенке.

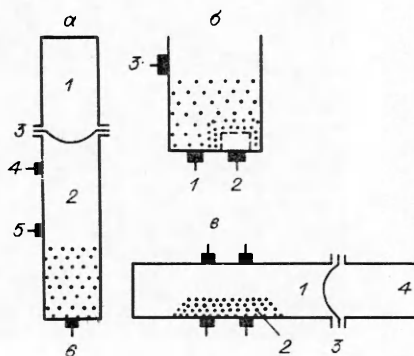


Рис. 1