

УДК 620.171.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ МЕТОДОМ НАКЛАДНОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

С. И. Герасимов, В. А. Жилкин*

Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049 Новосибирск

* Челябинский государственный агроинженерный университет, 454080 Челябинск

Рассмотрен новый экспериментальный метод изучения механических свойств кристаллических материалов, основанный на объединении преимуществ голографической интерферометрии и контактного способа крепления регистрирующей среды. Показана высокая эффективность предложенного подхода при определении поверхностных перемещений и деформаций.

Введение. Численному моделированию поведения поликристаллических тел под нагрузкой посвящены работы [1–3]. Трудности численного моделирования анизотропии физико-механических свойств кристаллов и условий на их границах обуславливают необходимость развития экспериментальных методов исследования полей перемещений, в частности оптических методов. Известны результаты применения метода спекл-фотографии к исследованию полей перемещений на поверхности плоских поликристаллических образцов [4, 5]. Используемый в этих работах при расшифровке спеклограмм метод поточечного сканирования трудоемок и не позволяет получать поля изолиний постоянной разности фаз на поверхности образца. В отличие от метода спекл-фотографии накладная голографическая интерферометрия позволяет визуально наблюдать поля перемещений, причем с более высоким пространственным разрешением и чувствительностью [6].

1. Подготовка образцов. Образцы с рабочей длиной 100 мм и поперечным сечением $16,2 \times 1,5$ мм изготавливали из технического алюминия фрезерованием. Затем их растягивали в испытательной машине ЦДМ-5/91, так как опытным путем установлено, что наибольший размер зерен в образце при отжиге и рекристаллизации получается при задании образцу начальной деформации 3%. Удлинение образцов контролировалось катетометром В-630. Отжиг производили в течение 3 ч при температуре 630°C в кварцевой трубе, вставленной в рабочую зону муфельной печи СУОЛ. Охлаждали образцы в течение 14 ч вместе с выключенной печью. Длительность травления образцов в крепком растворе едкого натра NaOH составила 40–60 мин. Момент окончания травления определяли по самостоятельному отделению белого налета с поверхности образцов при их извлечении из кюветы.

Перед началом эксперимента для определения границ зерен поверхности образцы фотографировали при различных направлениях их освещения (оптическая ось фотоаппарата устанавливалась перпендикулярно поверхности образца). Затем на поверхность образцов наносили металлизированные скрещенные растры с частотой линий $\psi_x = \psi_y = \psi = 840 \text{ мм}^{-1}$. Расположение зерен на одной из исследованных поверхностей образца приведено на рис. 1.

2. Деформации в зернах металла при статическом нагружении. *Физическое моделирование.* Методика проведения эксперимента изложена в [6]. На каждом из 11 эта-

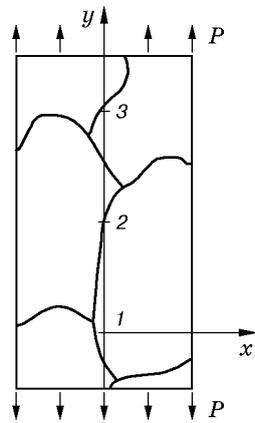


Рис. 1

n	P , кН	$\Delta l \cdot 10^{-5}$, м
1	0,15	10
2	0,25	17
3	0,35	31
4	0,46	51
5	0,55	93
6	0,59	112
7	0,60	122
8	0,60	134
9	0,60	144
10	0,60	159
11	0,60	178

пов нагружения образца растягивающей силой P записывались голографические интерферограммы. Удлинение образца Δl контролировалось индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Номера голограмм n , нагрузки P , приложенные к образцу, и его удлинения Δl представлены в таблице.

Фотографии интерференционных картин, наблюдаемых в ± 1 -м порядке дифракции в отраженном свете в плоскости yOz , представлены на рис. 2, *a, б* для 6-го и 11-го этапов нагружения соответственно. Фотографирование картин полос производили перпендикулярно поверхности образца, а освещали голограмму под углом $\gamma = 32,3^\circ$ в направлении первых дифракционных порядков раstra.

На поверхности поликристаллического образца можно выделить несколько характерных зон: области зерен и границы раздела между зернами (продольная ось симметрии образца практически совпала с границами зерен, в окрестности точек 2, 1 пересекаются три границы (см. рис. 1)).

Анализируя картины интерференционных полос, можно отметить следующее.

1. На первых двух этапах нагружения образец деформируется квазиоднородно.
2. На третьем этапе образец деформируется более интенсивно в области границ зерен в нижней части образца. Однако ввиду малой частоты интерференционных полос невозможно оценить уровень неоднородности деформирования зерен и их границ.
3. На последующих этапах нагружения образца его материал деформируется неоднородно.

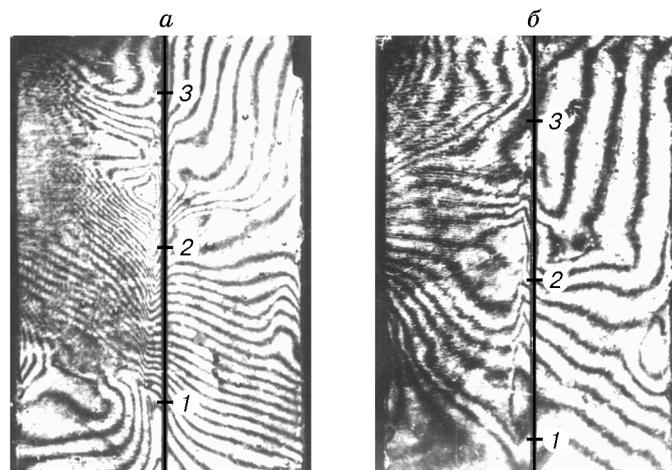


Рис. 2

родно. На правой от оси симметрии половине образца значителен вклад сдвиговых деформаций и жестких поворотов зерен. (На рис. 2 видно, что зерно, расположенное в правом верхнем углу, поворачивается как жесткое целое, так как в этой области градиент интерференционных полос близок к постоянному, а углы наклона полос к оси x близки к 90° .)

4. По мере нагружения образца характер деформирования отдельных его участков меняется. На 11-м этапе нагружения образца вся внешняя нагрузка (около 0,6 кН) воспринимается только границей между зёрнами в нижней части образца. Шаг между интерференционными полосами без учета масштаба примерно равен 0,75 мм, масштаб фотографии 0,59, тогда средняя деформация в области границы для данного этапа нагружения составит $\lambda/(2 \cdot 0,75 \cdot 0,59 \cdot \cos \gamma) \approx 0,84 \cdot 10^{-3}$ (λ — длина волны излучения лазера). Если принять модуль упругости равным $7,1 \cdot 10^4$ МПа, то средние напряжения составят примерно 59,8 МПа. В то же время эти напряжения равны отношению нагрузки 600 Н к части площади около 10^{-7} м², т. е. несколько больше половины площади поперечного сечения образца, и составят примерно 60 МПа.

Количественная расшифровка интерферограмм проведена для шестого этапа нагружения. Использовались программы USMI160 и USMI159 [7] локальной параболической аппроксимации функции порядков полос $N(x, y)$. Программа USMI160 предназначена для аппроксимации значений $N(x, y)$ в узлах неравномерной сетки и вычисления ее первой производной. Программа USMI159 позволяет осуществлять линейную комбинацию полей $N(x, y)$ для различных направлений наблюдения. Поскольку между образцом и фотопластинкой имеется воздушный зазор, то можно использовать следующие разрешающие уравнения [8]:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{2\psi} \left(\frac{\partial N_1}{\partial x} - \frac{\partial N_2}{\partial x} \right), \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{1}{2\psi} \left(\frac{\partial N_3}{\partial y} - \frac{\partial N_4}{\partial y} \right),$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{2\psi} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \omega_z = \frac{1}{2\psi} \left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x} \right).$$

Здесь $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ — деформации; γ_{xy} — сдвиги; ω_z — поворот; U, V — компоненты вектора перемещения вдоль осей x и y соответственно; N_1, N_2, N_3, N_4 — порядковые номера интерференционных полос, зарегистрированных с четырех попарно симметричных относительно оси z направлений наблюдения.

С целью проверки предположения о волновом характере пластической деформации [4, 5] на основе полученных экспериментально картин полей локальных сдвигов γ_{xy} и локальных поворотов ω_z приведены распределения этих компонент на продольной оси симметрии образца при увеличении полной деформации образца от 0,58 до 0,70 % (рис. 3). Распределение сдвиговой компоненты деформации в пределах одного зерна имеет экстремум, расположенный вблизи его центра.

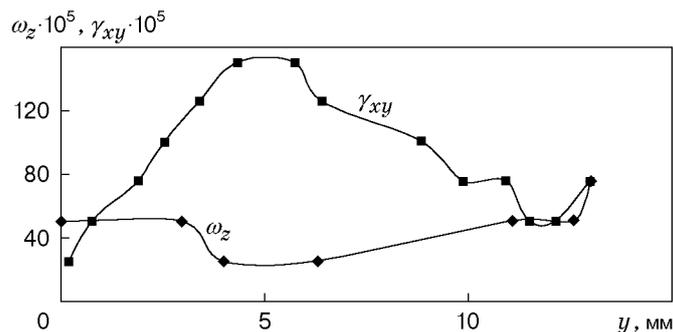


Рис. 3

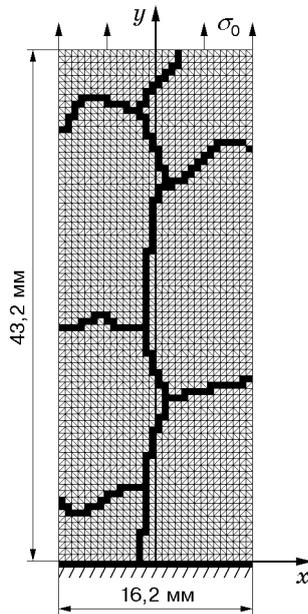


Рис. 4

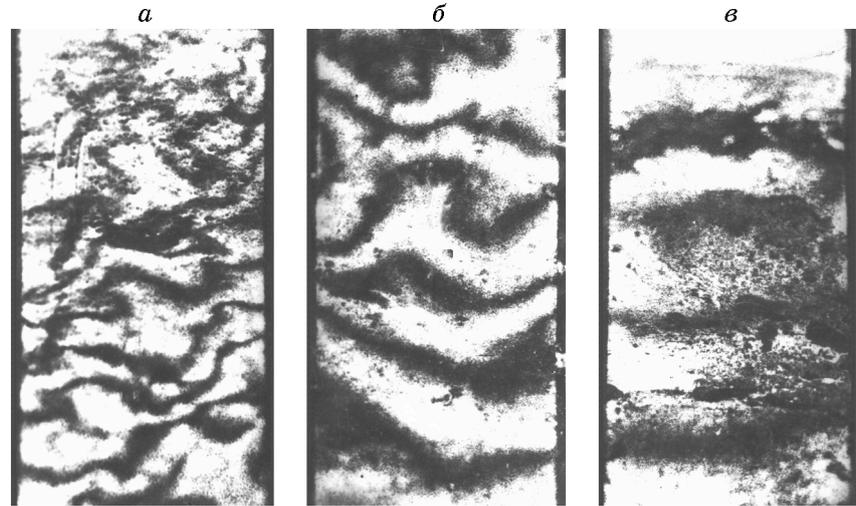


Рис. 5

Математическое моделирование. Рассмотренный пример показал высокую информативность картин интерференционных полос, что позволяет использовать метод голографической интерферометрии для оценки адекватности математических моделей деформирования поликристаллических образцов экспериментальным данным [2].

Исследовался процесс квазистатического нагружения элемента структурно-неоднородной среды, моделирующей реальный образец (см. рис. 1). Исходная геометрия образца, граничные условия (жесткое защемление нижней границы), система координат и расчетная конечно-элементная сетка показаны на рис. 4. Расчеты выполнялись с помощью программного комплекса COSMOS/M при следующих физико-механических характеристиках:

— для зерен $E_x = E_y = 7 \cdot 10^4$ МПа, $\nu_{xy} = 0,3$, $G_{xy} = 2,7 \cdot 10^4$, $\sigma_T = 300$ МПа, $E_{tg} = 515$ МПа;

— для межзеренных границ (темные линии) $E_x = E_y = 7 \cdot 10^3$ МПа, $\nu_{xy} = 0,4$, $G_{xy} = 2,5 \cdot 10^4$, $\sigma_T = 200$ МПа, $E_{tg} = 515$ МПа.

В качестве условия текучести применялось условие Мизеса.

Для статического решения задачи использовалось пошаговое приложение нагрузки по «времени». Параметр «время» представляет собой псевдопеременную, которая определяет последовательность нагружения образца. Явлением ползучести пренебрегали.

В соответствии с [4] диаграммы деформирования для зерен и межзеренных границ принимались различными. Растягивающее напряжение σ_0 задавалось последовательно: 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280 МПа. Сравнение численных результатов с экспериментальными показывает, что модель удовлетворительно описывает поведение образца лишь на стадии упругого деформирования (1–5-й этапы нагружения). Начиная с шестого этапа характер поля $V(x, y)$ сильно отличается от наблюдаемого в эксперименте.

3. Деформации в зернах металла при повторном нагружении. При повторном нагружении расположение зерен в образце подобно показанному на рис. 1. В ходе эксперимента образец последовательно нагружался от 0 до 0,5 кН с шагом $\Delta P = 0,05$ кН.

В процессе нагружения (первый цикл) в диапазоне 0,15 ÷ 0,30 кН записывали двухэкспозиционную голограмму (рис. 5, а). При разгрузке (первый цикл) в диапазоне 0,30 ÷ 0,15 кН регистрировали вторую интерферограмму. Полученная картина полос имела регу-

лярную структуру и была идентична изображенной на рис. 5, в. Второй цикл нагружения был проведен через 5 мин после окончания первого. Полученные две интерферограммы имели регулярную систему полос, подобную представленной на рис. 5, в. После двухциклового нагружения образец выдерживался при комнатной температуре в свободном состоянии в течение 48 ч, затем испытания повторяли. При нагрузках 0,15; 0,30 кН для третьего цикла записаны интерферограммы, картины полос которых представлены на рис. 5, б, в.

Из проведенных экспериментов следует:

— при первом нагружении образца диаграмма $P-\Delta l$ имеет нелинейный характер и кривая близка к параболе, интерференционная картина имеет нерегулярную структуру и в некоторой степени повторяет картину зерен, большинство полос имеет изломы;

— при первой разгрузке образца диаграмма $P-\Delta l$ линейна, картина полос имеет регулярную структуру и представляет собой обычную картину сжатия;

— после выдержки образца в течение 24–48 ч картина первого нагружения качественно повторялась, т. е. можно говорить о наличии эффекта разупрочнения.

Выводы. Из экспериментальных данных следует, что в упругой области результаты расчетов методом конечных элементов и методом голографической интерферометрии практически совпадают. В упругопластической области полученные экспериментально поля перемещений и деформаций могут служить основой для последующего численного определения напряженного состояния поликристаллического образца. Накладная голографическая интерферометрия обладает достаточной наглядностью, для того чтобы правильно оценивать характер процесса деформирования, не производя количественной расшифровки интерферограмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лихачев В. А., Малинин В. Г. Структурно-аналитическая теория прочности. СПб.: Наука. С-Петербург. отд-ние, 1993.
2. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / Под ред. В. Е. Панина. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990.
3. Dymny G., Kujawska M. Hybrid FEM/grating interferometry analysis of displacement and strain fields in ceramic-to-metal joint // Proc. of the 18th Symp. on experimental mechanics of solids, Jachranka, Poland, Oct. 14–16, 1998. Warsaw: Warsaw Univ. Technol., 1998. P. 205–210.
4. Физическая мезомеханика и компьютерное моделирование материалов / Под ред. В. Е. Панина. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1995.
5. Данилов В. И., Зуев Л. Б., Мних Н. М. и др. Волновые эффекты при пластическом течении поликристаллического Al // Физика металлов и металловедение. 1991. № 3. С. 188–194.
6. Герасимов С. И., Жилкин В. А. Исследование плоских упругопластических задач методом голографической интерферометрии // ПМТФ. 1988. № 2. С. 107–115.
7. Устименко А. П. Численное моделирование погрешности алгоритмов обработки экспериментальных данных // Применение лазеров в народном хозяйстве: Тез. докл. науч.-техн. семина. Челябинск: Челяб. политехн. ин-т, 1989. С. 43, 44.
8. Жилкин В. А., Герасимов С. И. О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного интерферометра // Журн. техн. физики. 1982. Т. 52, № 10. С. 2079–2085.

Поступила в редакцию 20/VIII 1998 г.,
в окончательном варианте — 12/XI 1998 г.