

УДК 669:620.18:539.37

А.М. Реков

Филиал Уральского федерального университета, г. Первоуральск

ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОСАДКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА

Аннотация. Методом делительных сеток с размерами ячеек, которые соизмеримы со средним размером зерна, определены параметры плотностей распределения деформаций и показателей напряженно-деформированного состояния зерен при осадке образца из стали 35ХНЗМФ. Построены нормированные корреляционные функции деформаций зерен.

Ключевые слова: осадка, цилиндрический образец, делительная сетка, пластическая деформация, зерно поликристалла, напряженно-деформированное состояние зерен, статистический анализ, функция распределения, корреляционная функция.

DISTRIBUTION FUNCTIONS OF PLASTIC DEFORMATIONS IN CYLINDRICAL UPSETTING SPECIMEN

Abstract. These parameters of deformation distribution density and indexes of the stress-deformed state of grains at 35ХНЗМФ metal cylindrical upsetting specimen are defined using dividing grids with cell dimensions similar to the average grain size. Standard correlation functions of grain deformation have been developed.

Keywords: upsetting, cylindrical specimen, dividing grid, the plastic deformation, polycrystalline grain, stress-deformed state of grains, statistic analysis, distribution function, correlation function.

Анизотропия свойств отдельных зерен металла, наличие границ зерен, неметаллических включений и иных дефектов структуры обуславливают неоднородность полей пластических деформации и различное напряженно-деформированное состояние зерен поликристалла [1 – 4].

Образцы для испытаний на осадку имеют форму цилиндра с высотой, равной диаметру (10×10 мм). Эксперименты проводили на прессе с максимальным усилием 500 кН. Для уменьшения трения на торцах образцов выполняли кольцевые канавки, которые перед испытаниями заполняли парафином. При этом уменьшаются силы трения между плитами прессы и торцами образца, что позволяет получать равномерную осадку по всей его высоте. Степень осадки контролировали с помощью набора колец заданной толщины. Вдоль образующей каждого образца выполняли прямоугольную площадку шириной 2 мм (рис. 1). Для этого образцы помещали в ванночку и заливали эпоксидной смолой ЭД-6. После затвердевания смолы образец притирали на чугунной плите с нанесенной на ее поверхность алмазной пастой. Процесс проводили до тех пор, пока не получали площадку требуемой ширины. Затем алмазной пастой с различной крупностью частиц от АСМ 28/20 до АСМ 3/2 осуществляли шлифовку и полировку ее поверхности. Перед каждой сменой пасты образец промывали в ацетоне для удаления остатков более крупных частиц, по сравнению с последующей фракцией пасты.

Делительную сетку, состоящую из квадратных ячеек со стороной 10 мкм (рис. 2, а), что соответствуют среднему размеру зерен стали 35ХНЗМФ, наносили

на поверхность образцов фотоспособом [1]. В процессе осадки ячейки сетки принимают различную форму: становятся прямоугольниками, параллелограммами, ромбами или иными геометрическими фигурами. Отметим, что если деформации сдвига достаточно малы, то прямые углы ячеек искажаются незначительно (рис. 2, б).

Измерения массивов делительных сеток (20×20 ячеек) проводили на металлографическом микроскопе Neofot-2 с помощью окулярного микрометра МОВ1×16 и устройства для автоматизации процесса записи координат микрообъектов [5]. Увеличение микроскопа подбирали таким образом, чтобы размер стороны ячейки составлял около 1 мм (1 мм соответствует 100 делениям лимба окулярного микрометра в пределах одного оборота его барабана). Для уменьшения величины случайной ошибки проекции длин сторон l_0 и l каждой ячейки делительной сетки на координатные оси (x, y)

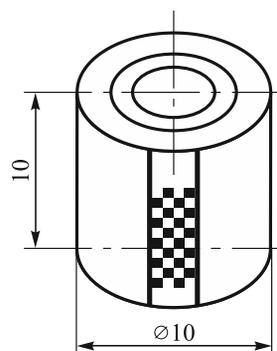


Рис. 1. Образец для испытаний

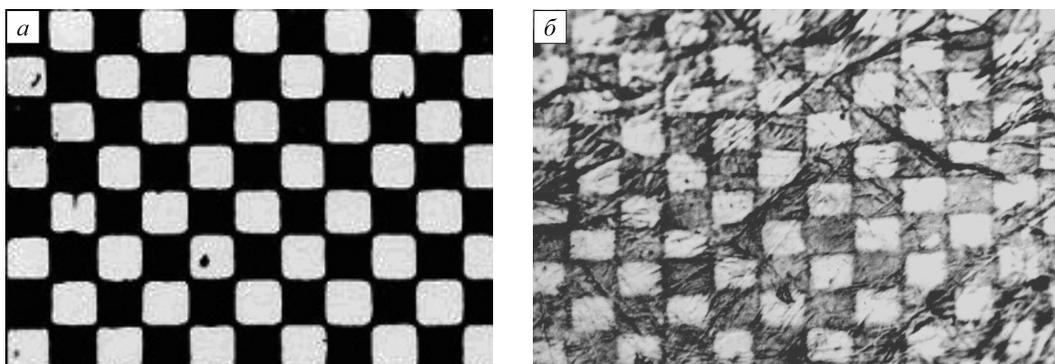


Рис. 2. Делительная сетка с размером ячеек 10 мкм:
а – до деформации; б – после деформации 14,7 %

до и после деформации измеряли несколько раз. Оптимальный результат, с точки зрения точности определения размеров ячеек, достигается при шестикратном проведении процесса измерений.

По результатам измерений рассчитывали деформации в ортогональных направлениях (вдоль оси ϵ_{11} и поперек оси образца ϵ_{22}), сдвиговые ϵ_{12} и главные деформации в плоскости образца $\epsilon_{1,2}$, а также их интенсивность ϵ_u [1, 4]:

$$\epsilon_u^2 = \frac{2[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]}{9},$$

где $\epsilon_{1,2} = \frac{1}{2}[\epsilon_{11} + \epsilon_{22} \pm \sqrt{(\epsilon_{11} - \epsilon_{22})^2 + \epsilon_{12}^2}]$ – главные деформации ($\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3$); величину третьей главной деформации ϵ_3 находили из условия несжимаемости металла при пластической деформации: $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$.

Деформированное состояние отдельных зерен оценивали с помощью параметра Надаи-Лоде в микроструктуре поликристалла [4]:

$$\chi = \frac{2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3}$$

и случайных коэффициентов поперечной деформации [6]

$$\eta_{31} = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} \text{ и } \eta_{21} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}.$$

Величину систематической ошибки при определении длин сторон ячеек делительной сетки определяли по зависимости $\Delta l = \sqrt{\delta^2 + \Delta l_i^2}$. Величина приборной ошибки окулярного микрометра составляет $\delta = 5$ мкм, а максимальное значение случайной ошибки Δl_i оценивали с помощью $t_{1-\alpha, k}$ критерия Стьюдента (при уровне значимости $\alpha = 0,05$ с числом степеней свободы $k = 6 - 1$) с учетом дисперсии размеров ячеек, которая определяется для всего массива. По результатам расчетов получили $\Delta l = 0,0075$ мм. Затем, с учетом этого значения, по правилам теории ошибок, определяли погрешности: линейных и сдвиговых деформаций, ко-

эффициентов Надаи-Лоде и поперечной деформации. Ошибки статистики, обусловленные ограниченным объемом выборки, находили по известным в математической статистике зависимостям [7, 8].

Распределение главных деформаций

Плотности распределения главных деформаций зерен образца из стали 35ХНЗМФ приведены на рис. 3. Величина интенсивности деформаций в этом случае равна $\bar{\epsilon}_u = 14,7\%$ (см. таблицу). Сплошные линии соответствуют нормальному распределению, а точками показаны экспериментальные значения. С помощью удвоенной функции Лапласа 2Φ выполнена оценка отклонения δ частоты m/n от постоянной вероятности в независимых испытаниях p [7, 8]:

$$P\left(\left|\frac{m}{n} - p\right| \leq \delta\right) = 2\Phi\left(\delta\sqrt{\frac{n}{p(1-p)}}\right).$$

Расчеты, проведенные для числа ячеек $n = 400$ при доверительной вероятности $p = 0,95$ показали, что величина отклонения частоты от вероятности составляет 0,021. Доверительные интервалы для экспериментальных значений плотностей распределения деформаций $\Delta = \pm\delta/(nc_i)$ показаны на рис. 3, 4. Здесь $n = 400$, c_i – цена интервала при построении графика.

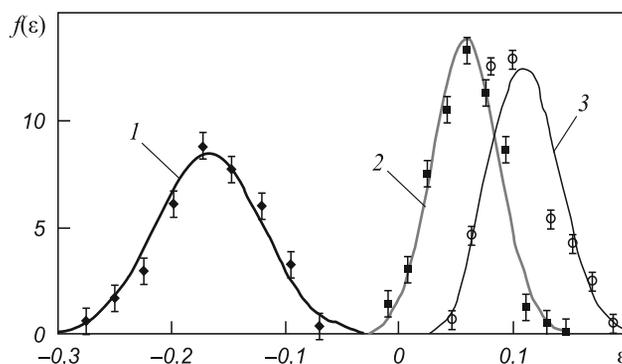


Рис. 3. Плотности распределения главных деформаций:
1 – ϵ_3 ; 2 – ϵ_2 ; 3 – ϵ_1

Параметры интенсивности главных деформаций при осадке образца из стали 35ХНЗМФ

$\bar{\varepsilon}_u, \%$	$\sigma_u, \%$	$J_u, \%$	$\rho_{1,2}^{\parallel}$	$\rho_{1,2}^{\perp}$
$8,54 \pm 0,11$	$2,1 \pm 0,1$	$24,6 \pm 0,9$	$0,33 \pm 0,05$	$0,45 \pm 0,04$
$9,28 \pm 0,11$	$2,2 \pm 0,1$	$23,7 \pm 0,9$	$0,17 \pm 0,05$	$0,40 \pm 0,04$
$14,7 \pm 0,2$	$3,2 \pm 0,1$	$21,6 \pm 0,8$	$0,17 \pm 0,05$	$0,55 \pm 0,04$
$17,4 \pm 0,2$	$4,9 \pm 0,2$	$28,2 \pm 1,1$	$0,21 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,02$

Соответствие экспериментальных распределений деформаций нормальному закону оценивали также с помощью критерия Пирсона χ^2 [8]. Критические значения критерия $\chi_{\alpha,k}^2$, при которых «нулевая» гипотеза не отвергается, принимали в соответствии с числом степеней свободы k и уровне значимости $\alpha = 5 \%$. Расчеты показали, что экспериментальные распределения отличаются от нормального закона. Исключения составляют плотности распределения главных деформаций ε_2 , для которых расчетные значения критерия χ^2 оказались во всех случаях меньше предельной величины $\chi_{\alpha,k}^2$. Таким образом, аппроксимировать плотности распределения деформаций плотностью нормального распределения можно только приближенно.

Поле деформаций является неоднородным. Величина стандарта интенсивности деформаций σ_u с ростом степени деформации изменяется от $2,1 \pm 0,1$ до $4,9 \pm 0,1 \%$. Значения коэффициентов вариации J_u при этом составляют от $21,6 \pm 0,8$ до $28,2 \pm 1,1 \%$ (см. таблицу).

С ростом величины стандарта σ_u графики функций распределения становятся более пологими (см. рис. 4). Соответственно при этом возрастает доля зерен, получивших большие деформации. Величина отклонений Δ (рис. 4, 5) от нормального закона уменьшается.

Взаимосвязь между деформациями отдельных зерен оценивали с помощью коэффициентов парной корреляции, расчет которых проводили при различных расстояниях τ между зернами. Значимость коэффициентов корреляции ρ также оценивали с помощью t распределения Стьюдента:

$$t = \frac{\rho}{\sigma_{\rho}} = \frac{\rho\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\rho^2}} > t_{1-\alpha,k},$$

где n – число пар зерен, между деформациями которых определяется корреляция; $t_{1-\alpha,k}$ – табличное значение критерия Стьюдента, определяемое на уровне значимости $\alpha = 0,05$ при числе степеней свободы $k = n - 2$; σ_{ρ} – стандартная ошибка коэффициента корреляции.

Как и в большинстве других экспериментов с применением делительных сеток [1, 2], при осадке образца наблюдается анизотропия полей деформаций, т.е. отмечается различный уровень линейной связи между деформациями отдельных зерен в зависимости от направления, в котором эта связь определяется. Коэффициенты корреляции деформаций пар зерен-соседей различны в ортогональных направлениях (вдоль и поперек вертикальной оси осадки образца). Так, при степени деформации $17,4 \%$ (см. таблицу), в направлении вертикальной оси образца величина коэффициента корреляции между деформациями пар зерен соседей составляет $\rho_{1,2}^{\parallel} = 0,21 \pm 0,05$, а в поперечном направлении значение коэффициента корреляции существенно иное: $\rho_{1,2}^{\perp} = 0,75 \pm 0,02$. Различие между коэффициентами корреляции сохраняется и при других деформациях (см. таблицу). Чем выше величина коэффициента корреляции, тем выше вероятность возникновения больших деформаций одновременно в двух соседних зернах [1]. Различие коэффициентов корреляции сохраняется также с ростом расстояния τ между зернами. Радиус корреляции (расстояние между зернами τ , при котором

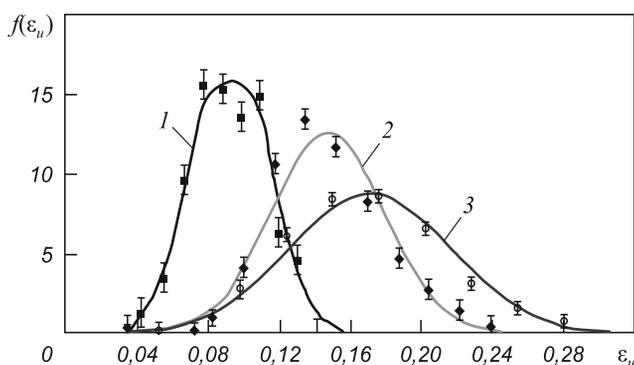


Рис. 4. Плотности распределения интенсивностей главных деформаций при интенсивности деформаций, %:
1 – 9,3; 2 – 14,7; 3 – 17,4

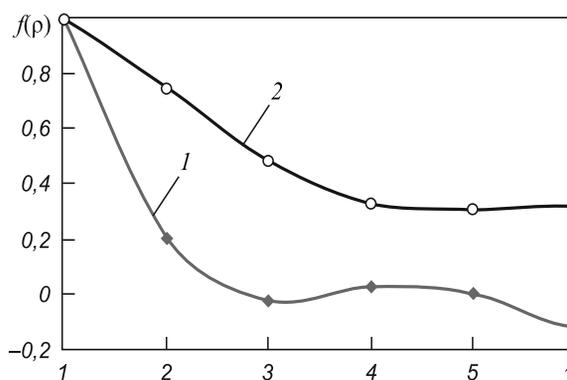


Рис. 5. Корреляционные функции интенсивностей главных деформаций:
1 – вдоль оси; 2 – поперек оси образца

связь между деформациями отдельных зерен затухает) составляет примерно 4 – 5 зерен (см. рис. 5).

Параметр Надаи-Лоде χ в микроструктуре может принимать значения в интервале от -1 до $+1$. Значение $\chi = -1$ соответствует одноосному растяжению (наиболее «жесткий» режим нагружения). Значение $\chi = +1$ соответствует одноосному сжатию, а $\chi = 0$ – чистому сдвигу. Величина относительной погрешности параметра Надаи-Лоде при деформациях образца, равных 14,7 и 17,4 %, составляет $\Delta\chi/\bar{\chi} = \pm 9$ %. Плотность распределения случайного параметра Надаи-Лоде в микроструктуре отличается от нормального закона [1, 3]. При осадке образца напряженно-деформированное состояние, соответствующее одноосному сжатию или близкое к нему, испытывает наибольшее число зерен поликристалла. Остальные зерна находятся в состоянии чистого сдвига $\chi = 0$ или имеют иное напряженно-деформированное состояние. Медиана распределения при различных степенях осадки образца составляет величину, равную $\chi = 0,70 \pm 0,06$. С ростом степени деформации возрастает доля зерен, для которых параметр $\chi \approx 1$.

Как следует из условия несжимаемости при пластической деформации образца, плотности распределения коэффициентов поперечной деформации η_{31} и η_{21} подобны и симметричны относительно оси, проходящей через значение 0,5. Относительная ошибка определения коэффициентов поперечной деформации составляет $\Delta\eta/\bar{\eta} = \pm 3$ %. Величины коэффициентов поперечной деформации связаны с напряженно-деформированным состоянием, в котором находятся зерна. Коэффициент корреляции между величиной поперечной деформации η_{21} и параметром Надаи-Лоде χ составляет значение, равное 0,99. Соответственно графики функций распределения χ и η_{21} также подобны один другому (рис. 6, 7).

Выводы. Определены параметры неоднородности пластических деформаций зерен при осадке образцов из стали 35ХНЗМФ. Выполнена оценка точности эксперимента. Приблизненно распределение деформаций при осадке можно аппроксимировать нормальным законом.

Корреляционные функции деформаций зерен поликристалла различны в ортогональных направлениях относительно оси осадки образца, что свидетельствует об анизотропии поля пластических деформаций при осадке.

Напряженно-деформированное состояние отдельных зерен отличается от напряженного состояния всего образца. Подавляющее число зерен при осадке образца находится в напряженно-деформированном состоянии, близком к одноосному сжатию. Ряд зерен находится в условиях чистого сдвига или испытывает иное напряженно-деформированное состояние.

Графики плотностей распределения коэффициентов поперечных деформаций симметричны относительно оси ординат, проходящей через значение, равное $-0,5$.

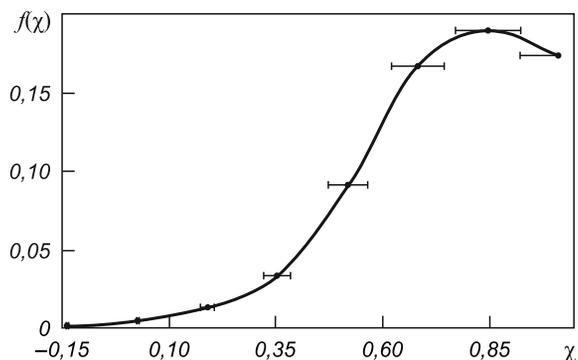


Рис. 6. Плотности распределения параметра Надаи-Лоде при интенсивности деформаций 14,7%

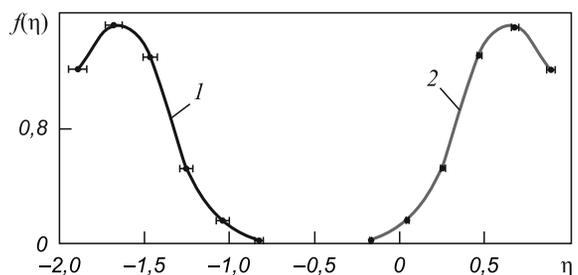


Рис. 7. Плотности распределения коэффициентов поперечной деформации при степени осадки 14,7%:

1 – η_{31} ; 2 – η_{21}

Отмечена линейная связь между величинами параметра Надаи-Лоде и значениями коэффициентов поперечной деформации зерен поликристалла при осадке образца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вайнштейн А.А., Алехин В.Н. Основы теории упругости и пластичности с учетом микроструктуры материала. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 382 с.
2. Вайнштейн А.А., Реков А.М. //Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 6. С.1984–1985.
3. Реков А.М., Корниенко В.Т., Корниенко Э.О. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 5. С. 2457 – 2459.
4. Реков А.М., Вайнштейн А.А., Березин В.В. Распределение главных микродеформаций // Вестник УГТУ-УПИ «Механика микронеоднородных материалов и разрушение»: Сб. научн. тр. 2004. № 22. С. 85 – 88.
5. Корниенко В.Т., Русинов П.С., Вайнштейн А.А. // Заводская лаборатория. 1984. № 3. С. 83 – 85.
6. Реков А.М., Вайнштейн А.А. Функции плотности распределения случайных коэффициентов Пуассона в микроструктуре материала // Снежинск и наука – 2003. Современные проблемы атомной науки и техники: Сб. научн. тр. Международной научно-практич. конф. – Снежинск: СГФТА, 2003. С. 94 – 95.
7. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
8. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.