

УДК 53.082.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ

А. И. Козинкина, Е. А. Козинкина

Южный федеральный университет 344090, Ростов-на-Дону
E-mail: akozinkina@mail.ru

На основе стадийной модели накопления повреждений и экспериментальных данных, полученных методом акустической эмиссии, описана и обоснована методика определения концентрации дефектов типа микропор и микротрещин, образующихся при пластическом деформировании материалов. Проводится сравнение экспериментальных данных, полученных различными методами, для ряда поликристаллических материалов.

Ключевые слова: пластическая деформация, деструкция, стадийность, накопление повреждений, микротрещины, концентрация, акустическая эмиссия.

Введение. Как известно, наличие дефектов типа трещин определяет реальную прочность твердых тел. К зарождению и развитию макроскопических трещин приводит постепенное накопление повреждений. Возникновение повреждений под действием механических напряжений обычно интерпретируется как процесс образования и роста микропор и микротрещин вследствие разрыва межатомных связей [1]. В металлах этот процесс происходит вследствие перемещения и концентрации дислокаций, в полимерах — вследствие разрыва связей между цепочками молекул, в керамике и композитах — в результате декогезии между матрицей и наполнителем. Таким образом, исследование общих закономерностей кинетики накопления повреждений и разработка методов количественной оценки структурных изменений в твердом теле представляют научный и практический интерес.

В основе физического подхода к разрушению как к кинетическому процессу лежит понятие о его многостадийности [1, 2]. Для большинства материалов, разрушение которых определяется пластической деформацией, обычно выделяются три основные стадии: начальная, основная и завершающая. Считается, что на начальной стадии разрушения происходит локализация деформации. Основная стадия определяется как накопление необратимых повреждений, которое заключается в образовании зародышевых несплошностей размером порядка 10^2 нм с последующим объединением этих несплошностей до тех пор, пока они не достигнут критических размеров, сопоставимых с размерами структуры гетерогенного материала. Это приводит к локальному критическому разуплотнению материала с несплошностями размером порядка $1 \div 100$ мкм и более, появлению шейки либо магистральной трещины. При этом происходит переход к завершающей стадии разрушения. С точки зрения неравновесной динамики таким процессам свойственны неравновесные фазовые переходы в особых точках (точках бифуркации), при достижении которых происходит изменение свойств материала [3]. При этом параметры, определяющие точки перехода, являются универсальными и инвариантными. Этот вывод подтверждает результаты исследования различных материалов [4]. При пластическом деформировании поликристаллических материалов в области деформационного упрочнения на диаграммах растяжения

была определена точка деструкции D , соответствующая переходу от пластической стадии деформирования к стадии, на которой происходит разрыхление материала [5].

Количественная оценка структурных изменений на стадии разрыхления проводится с использованием просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рассеяния рентгеновских лучей и видимого света, прецизионного измерения плотности, уменьшающейся вследствие образования несплошностей [6]. Существует также ряд косвенных методов, учитывающих изменение (по мере развития дефектов) физико-механических свойств материалов, таких как модуль упругости, скорость ультразвуковых волн, твердость, электрическое сопротивление и др. [7]. Однако, несмотря на высокую точность некоторых методов, требования к характеристикам или размерам исследуемых образцов, трудоемкость измерений, а также разрушающий характер этих методов в большинстве случаев ограничивают их применение.

К числу прямых методов измерения дефектности можно отнести метод акустической эмиссии (АЭ). Суть этого метода заключается в следующем: каждому коллективному акту повреждения структуры твердого тела ставится в соответствие первичный упругий импульс, процесс излучения которого представляет собой АЭ. Следовательно, измерение интенсивности потока актов АЭ и их общего количества в принципе позволяет исследовать кинетику накопления повреждений. Действительно, полученные к настоящему времени экспериментальные данные свидетельствуют о непосредственной взаимосвязи между интегральной характеристикой потока актов АЭ и процессами деформации и разрушения, причем в большинстве случаев корреляционные зависимости представляются в виде степенной функции [8].

Тем не менее для получения количественной оценки структурных изменений в твердом теле в технике неразрушающего контроля метод АЭ практически не применяется. Как правило, АЭ используется либо в качестве индикатора наличия дефектов, либо для получения оценки дефектности на основе сравнения с некоторым эталоном. Это приводит к снижению достоверности определения реальной поврежденности, развивающейся в материале, а следовательно, и точности прогнозирования прочности. В некоторой степени это обусловлено особенностями распространения, приема и анализа акустических сигналов, вследствие чего они искажаются, частично перекрываются и остаются за порогом дискриминации шумов. В настоящей работе показана возможность количественной оценки степени деформационной поврежденности в поликристаллических материалах с использованием данных АЭ и метода восстановления истинных характеристик потока актов АЭ по регистрируемым сигналам [9].

1. Вычисление концентрации дефектов. Рассмотрим пластическое деформирование тела, при котором происходит накопление дефектов типа микропор, концентрация c которых равна отношению объема несплошностей V_d к объему тела V . В этом случае увеличение пористости как за счет роста имеющихся пор, так и за счет образования новых пор описывается соотношением

$$\Delta c = \frac{\Delta V_d V - \Delta V V_d}{V^2},$$

из которого в силу предположения о несжимаемости пластически деформируемой матрицы получаем скорость изменения c

$$\dot{c} = (1 - c)\dot{\varepsilon}_{kk}^p \quad (1)$$

($\dot{\varepsilon}_{kk}^p$ — скорость изменения объемной пластической деформации тела).

Поскольку объем тела равен сумме объемов матрицы V_m и пор V_d , из (1) следует

$$\dot{\varepsilon}_{kk}^p = \int_{V_m} \frac{dc}{1 - c} + \int_{V_d} \frac{dc}{1 - c}. \quad (2)$$

Первый интеграл и объемная деформация матрицы в выражении (2) равны нулю, поэтому пластическая деформация, обусловленная образованием и развитием несплошностей, равна:

$$\varepsilon_d = -\ln(1 - c). \quad (3)$$

Раскладывая правую часть (3) в ряд Тейлора, получаем

$$c = \varepsilon_d. \quad (4)$$

Таким образом, концентрация дефектов определяется деструкционной составляющей пластической деформации.

2. Эксперимент и методика определения концентрации дефектов. При одноосном растяжении круглых отожженных образцов из различных поликристаллических материалов исследовалась интегральная характеристика потока актов АЭ, определяемая по формуле

$$N_{an} = f(\sigma/\sigma_u) = \int_0^t \dot{N}_a(t) dt / \int_0^\tau \dot{N}_a(t) dt,$$

где N_{an} — нормированное суммарное количество актов АЭ; σ_u — предел прочности; \dot{N}_a — текущая интенсивность потока актов АЭ; t — текущее время; τ — время нагружения до разрушения.

В испытательный блок входила нагружающая машина “Instron” и аппаратурный комплекс АП-51Э [10]. Для уменьшения неравномерности амплитудно-частотной характеристики и времени реверберации использовались преобразователи, состоящие из большого количества тонких однонаправленных пьезокристаллов. Особенностью таких преобразователей является избирательность по отношению к колебаниям продольного типа, что существенно увеличивает их помехоустойчивость [11].

Установлено, что зависимость N_{an} от остаточной деформации $N_{an} = f(\varepsilon_r^{1/2})$ близка к параболической и аппроксимируется ломаной линией с двумя характерными точками излома, разделяющими участки, соответствующие различным стадиям накопления повреждений. Сравнение с механическими деструкционными диаграммами [5] показало, что первая точка излома D является точкой деструкции, вторая точка излома U соответствует моменту образования макродефекта или началу заключительной стадии разрушения. Следует отметить, что эти особенности выявляются также на аналогичных зависимостях при нагружении материалов с низкой степенью активности АЭ. На рис. 1 представлены экспериментальные данные, полученные для образцов из стали марки Ст. 45 и технической меди, и их аппроксимация. В результате регрессионного анализа и статистической обработки данных установлено, что с вероятностью 0,95 доверительные интервалы значений тангенсов углов наклона аппроксимирующих линий не перекрываются (табл. 1). Таким образом, на основе построенной зависимости $N_{an} = f(\varepsilon_r^{1/2})$ можно определять различные стадии накопления повреждений, долю пластической и деструкционной составляющих деформации в общей остаточной деформации и, следовательно, концентрацию дефектов [12].

Из геометрических соотношений для диаграмм АЭ (рис. 2)

$$\delta_d = \delta - \delta_p, \quad \delta_p = (N_{an} - N_D + \gamma_1 \delta_D) / \gamma_1$$

и соотношения (4) следует выражение, связывающее концентрацию деформационных дефектов с общей остаточной деформацией:

$$c = (\varepsilon_r^{1/2} - \delta_D)^2 (1 - \gamma_2 / \gamma_1)^2. \quad (5)$$

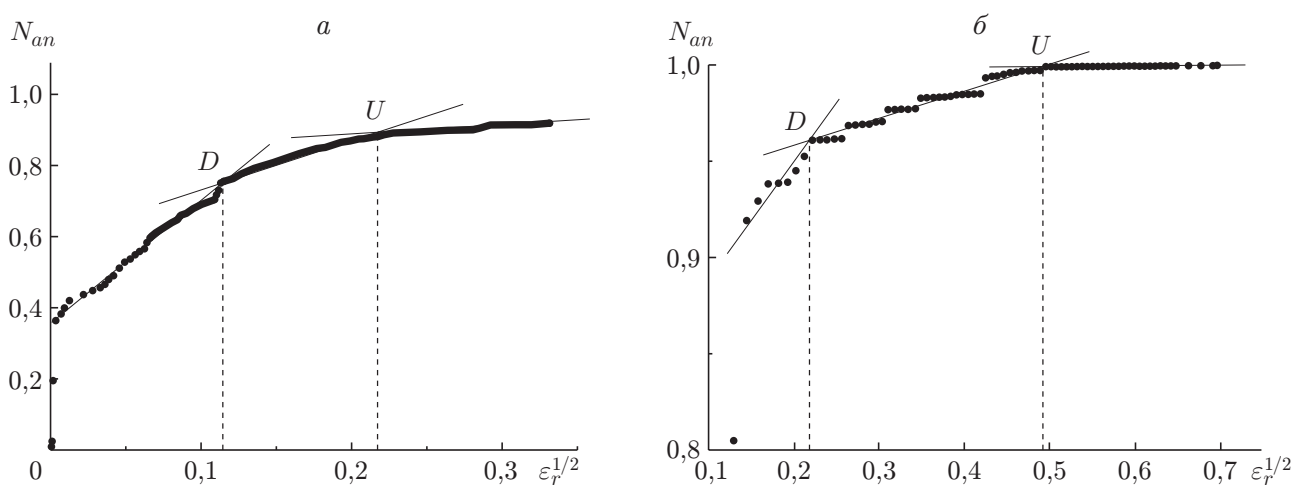


Рис. 1. Экспериментальная зависимость суммарного количества актов АЭ от продольной остаточной деформации (точки) и ее линейная аппроксимация (линии) при одноосном растяжении образца:

a — образец из стали марки Ст. 45; *б* — образец из технической меди

Таблица 1

Значения тангентов углов наклона линий аппроксимации зависимости $N_{an} = N_{an}(\varepsilon_r)^{1/2}$ и границы их 95 %-х доверительных интервалов для различных материалов

Материал	γ_1	$\gamma_1 - \Delta\gamma_1$	$\gamma_2 + \Delta\gamma_2$	γ_2	$\gamma_2 - \Delta\gamma_2$	$\gamma_3 + \Delta\gamma_3$	γ_3
Медь	0,4674	0,4247	0,1486	0,1473	0,1459	0,0033	0,0033
Алюминий	1,4309	1,3975	0,3597	0,3563	0,3530	0,0838	0,0835
Ст. 45	3,3283	3,3139	1,1933	1,1893	1,1853	0,2929	0,2906
Ст. 10ГН2МФА	1,5660	1,5592	0,6564	0,6553	0,6541	0,0700	0,0697
Ст. У9	0,2808	0,2686	0,0513	0,0508	0,0504	0,0324	0,0313

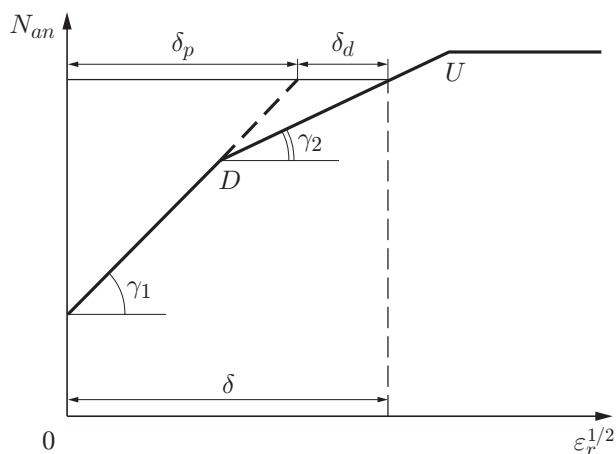


Рис. 2. Характерная зависимость суммарного количества актов АЭ от остаточной деформации $N_{an} = f(\varepsilon_r^{1/2})$

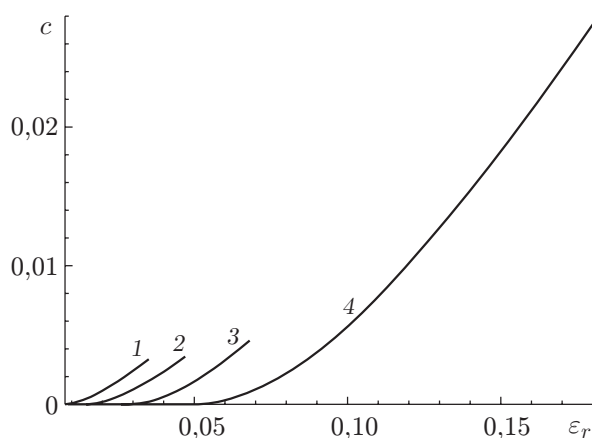


Рис. 3. Зависимости концентрации микродефектов от остаточной деформации для различных материалов:

1 — сталь марки Ст. 10ГН2МФА; 2 — сталь марки Ст. 45; 3 — алюминий; 4 — медь

Здесь δ , δ_p , δ_d — длины отрезков, соответствующих общей, пластической и деструкционной составляющим остаточной деформации; N_D , δ_D — координаты точки деструкции; γ_1 , γ_2 — тангенсы углов наклона аппроксимирующих линий.

На рис. 3 приведены зависимости концентрации дефектов от остаточной деформации для различных металлических материалов, полученные согласно (5) с использованием данных акустической эмиссии.

3. Обсуждение результатов. В табл. 2 приведены средние размеры L и максимальное наблюдаемое количество зародышевых несплошностей в единице объема k для некоторых металлических материалов, определенные с помощью методов сканирующей и высоковольтной просвечивающей электронной микроскопии, а также малоугловой рентгеновской дифракции [1]. На основе данных, представленных в табл. 2, вычислив, например, объем условной поры и объем материала, приходящегося на одну пору, можно определить начальную концентрацию дефектов c_0 :

$$c_0 = \pi L^3 k / 6.$$

В табл. 3 приведены значения концентрации деформационных дефектов в различных металлических материалах, определенные по диаграммам АЭ в точках $0,01\Delta\delta_d$, $0,5\Delta\delta_d$ и в точке U ($\Delta\delta_d$ — длина промежутка, соответствующего стадии деструкционного деформирования материала до точки U). Из табл. 3 следует, что точность определения концентрации дефектов с использованием данных АЭ по предложенной методике сравнима с точностью ее определения методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии. Полученные данные согласуются также с различными оценками критической концентрации

Таблица 2
Средние размеры и количество зародышевых микронесплошностей в единице объема

Материал	L , мкм		k , м ⁻³	
	Рентгеноскопия	Микроскопия	Рентгеноскопия	Микроскопия
Сталь	—	0,10	—	10^{15}
Алюминий	0,14	0,20	10^{17}	—
Медь	—	0,25	—	$5 \cdot 10^{17}$

Таблица 3

Начальная концентрация деформационных дефектов и их концентрация после отжига в течение 2 ч при различной температуре, определенные с помощью метода АЭ, для различных материалов

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	c_0	c		
			В точке $0,01\Delta\delta_d$	В точке $0,5\Delta\delta_d$	В точке U
Ст. У9	700	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Ст. 10ГН2МФА	700	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Ст. 45	700	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Технический алюминий марки АО	400	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Техническая медь марки МО	250	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$

дефектов в точке U , полученными в работе [1]. Так, в соответствии со статистической теорией разрушения зарождение макронесплошности происходит при достижении локальной концентрации микронесплошностей $c \approx 10^{-3} \div 10^{-2}$. Этот результат хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными при поперечной прокатке и при других испытаниях металлических материалов в режиме ползучести, а также с концентрационным критерием разрушения.

Сравнение концентраций деформационных дефектов для различных материалов позволяет сделать следующий вывод: чем выше пластичность материала, тем больше в нем концентрация несплошностей перед разрушением.

Необходимо также отметить, что согласно выражению (5) концентрация микродефектов монотонно увеличивается от нулевого значения. При достижении точки деструкции в поликристаллическом материале образуется k_0 дефектов. Таким образом, приведенные в табл. 3 значения можно считать нижней границей оценки c .

Заключение. С помощью метода акустической эмиссии исследована кинетика деформации и разрушения различных поликристаллических материалов при одноосном растяжении и выполнена оценка концентрации возникающей несплошности. Разработан метод построения деструкционных диаграмм с использованием данных АЭ, позволяющий выделять различные стадии накопления повреждений, определять условия образования микро- и макродефектов, оценивать ресурс пластичности, качество и технологические возможности металлических конструкционных материалов. Предложенная методика количественной оценки концентрации микродефектов может служить основой для контроля и диагностики прочности материалов в реальном масштабе времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черемской П. Г. Поры в твердом теле / П. Г. Черемской, В. В. Слезов, В. И. Бетехтин. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Иванова В. С. Разрушение металлов. М.: Металлургия, 1979.
3. Иванова В. С. Введение в междисциплинарное наноматериаловедение. М.: Сайнс-пресс, 2005.
4. Козинкина А. И. Переходный эффект в кинетике накопления повреждений // Дефектоскопия. 1999. № 9. С. 95–99.
5. Рыбакова Л. М. Механические закономерности деструкции металла при объемном и поверхностном пластическом деформировании // Пробл. машиностроения и надежности машин. 1998. № 5. С. 113–123.
6. Веттегрень В. И. Физические основы кинетики разрушения материалов / В. И. Веттегрень, С. О. Лазарев, В. И. Петров. Л.: Физ.-техн. ин-т, 1989.

7. Березин А. В., Козинкина А. И. Физические модели и методы оценки накопления повреждений в твердых телах // Пробл. машиностроения и надежности машин. 2002. № 3. С. 115–121.
8. **Неразрушающий** контроль: Справ. / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 7.
9. Буйло С. И., Козинкина А. И. К вопросу об оценке накопления повреждений и момента перехода от рассеянного к локализованному дефектообразованию по восстановленным значениям потока актов акустической эмиссии // Физика твердого тела. 1996. Т. 38, № 11. С. 3381–3384.
10. Трипалин А. С. Акустическая эмиссия: Физико-механические аспекты / А. С. Трипалин, С. И. Буйло. Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1986.
11. Трипалин А. С. Основные направления разработки и совершенствования приемных преобразователей акустической эмиссии // Акустическая эмиссия материалов и конструкций: Сб. науч. тр. Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1989. Ч. 1. С. 69–75.
12. Пат. 2298785 РФ, МПК G 01 N 29/14. Способ измерения концентрации дефектов при пластическом деформировании материалов в процессе силового воздействия / А. В. Березин, А. И. Козинкина. Оpubл. 10.05.07, Бюл. № 13.

Поступила в редакцию 21/IX 2009 г.
