

Распределение внутренних напряжений и плотности запасенной энергии внутри отдельного зерна деформированного поликристалла

Киселева С.Ф., Попова Н.А., Конева Н.А.[†], Козлов Э.В.

[†]koneva@tsuab.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

Distribution of internal stresses and stored energy density within a grain of deformed polycrystal

S.F. Kiseleva, N.A. Popova, N.A. Koneva, E.V. Kozlov

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Определены внутренние напряжения и плотность запасенной энергии в локальных местах по всему зерну поликристалла. В работе использована методика определения внутренних напряжений и плотности запасенной энергии для деформированного материала. В зависимости от природы деформации в каждом случае учтены либо составляющие упругой и пластической деформаций либо только пластической деформации. Определение внутренних напряжений выполнялось по параметрам изгибных экстинкционных контуров, наблюдаемых на электронно-микроскопических изображениях фольги деформированного материала. В статье обсуждаются полученные результаты распределения внутренних напряжений и плотности запасенной энергии внутри зерна на примере деформированной растяжением ($\epsilon = 25\%$) аустенитной стали 110Г13.

Ключевые слова: деформация, просвечивающая дифракционная электронная микроскопия, пластическая деформация, упруго-пластическая деформация, аустенитная сталь, изгибные экстинкционные контуры, деформационные микродвойники, внутренние напряжения, плотность запасенной энергии.

Internal stresses and stored energy density are determined in different parts of a grain in a deformed polycrystal. The electron microscopy method for internal stresses and stored energy density determination in a deformed material is used. Depending on the nature of deformation, either only plastic strain or both elastic and plastic strain were taken into account. The internal stresses were determined from the parameters of the bend extinction contours observed on the electron microscopy images of the deformed material foils. The distribution of internal stresses and stored energy density inside a grain are discussed for the austenitic steel deformed by tensile strain ($\epsilon = 25\%$).

Keywords: deformation, transmission diffraction electron microscopy, plastic deformation, elastic-plastic deformation, austenitic steel, bend extinction contours, deformation twins, internal stresses, stored energy density

Введение

Большинство металлических материалов – это поликристаллы. В деформированных поликристаллических материалах возникают внутренние поля напряжений. Источниками полей напряжений являются границы зерен, стыки зерен, уступы на межзеренных границах, деформационные микродвойники и др. [1-3]. Поля от этих источников охватывают большую часть зерна или все зерно. Внутри зерен наблюдаются дислокации, обра-

зующие определенную субструктуру (хаотическую, ячеистую, сетчатую и т.д.), деформационные микродвойники и т.п. Одной из важных задач при исследовании внутренних напряжений поликристаллического агрегата является изучение распределения внутренних полей напряжений по зерну. Возникшие в деформированном материале внутренние поля напряжений приводят к появлению на электронно-микроскопических изображениях изгибных экстинкционных контуров, по пара-

метрам которых можно восстановить поля напряжений [4-6]. Изгибные экстинкционные контуры отражают природу деформации локальных участков образца. Они идентифицируются по взаимной ориентации линии экстинкционного контура и вектора действующего отражения \vec{g} [2]. Локально деформация может быть как пластической, так и упруго-пластической [7]. Различают три типа деформации кристаллической решетки: изгиб, кручение или смешанный случай. Поэтому при определении внутренних напряжений необходимо учитывать обе компоненты тензора напряжений, а именно и компоненты изгиба, и компоненты кручения кристаллической решетки. В [8,9] авторы предложили методику определения компонент тензора внутренних напряжений и плотности запасенной энергии деформированного изотропного тела по кривизне-кручению кристаллической решетки. Компоненты тензора внутренних напряжений в обоих случаях восстанавливались по параметрам изгибных экстинкционных контуров, наблюдаемых на электронно-микроскопических изображениях деформированного материала. С использованием компонент тензора внутренних напряжений изгиба и кручения кристаллической решетки определялась плотность запасенной энергии деформированного тела.

Целью настоящей работы является изучение распределения внутренних напряжений и плотности запасенной энергии по зерну поликристалла деформированного материала. В качестве материала исследования использовалась аустенитная сталь 110Г13. Деформация стали осуществлялась растяжением со скоростью $3,4 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре. Степень деформации составляла 25%. Приготовленные из деформированных образцов фольги исследовались в электронном микроскопе при ускоряющем напряжении 125 кВ. Определение внутренних напряжений и плотности запасенной энергии деформированного тела проводилось с использованием параметров изгибных экстинкционных контуров, наблюдаемых на электронно-микроскопических изображениях деформированного материала. При определении внутренних напряжений и плотности запасенной энергии учитывались две составляющие деформации: пластическая и упругая. Также в каждом случае при расчете тензора внутренних напряжений определялись две компоненты: напряжения изгиба и кручения кристаллической решетки.

Определение компонент тензора внутренних напряжений пластической и упруго-пластической деформаций и плотности энергии дефектной структуры материала

В локальных участках внутри зерна поликристалла деформация может быть как пластической, так и упруго-пластической [8,9]. Внутренние напряжения, характеризующие деформацию, образуют тензоры второго ранга. Для кубических кристаллов тензор внутренних напряжений содержит только две независимых компоненты – изгиба σ_{11} и кручения σ_{12} . Остальные компоненты равны нулю или могут быть выражены через

напряжения σ_{11} и σ_{12} . В общем случае градиент разориентировок также образует тензор второго ранга. В этом тензоре присутствуют две независимых компоненты: χ_{11} , χ_{12} . При упруго-пластической деформации амплитуды внутренних полей напряжений изгиба σ_{11} и кручения σ_{12} кристаллической решетки соответственно записываются следующим образом [9]:

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \sigma_{11,пл} + \sigma_{11,упр} \\ \sigma_{12} &= \sigma_{12,пл} + \sigma_{12,упр}.\end{aligned}\quad (1)$$

Пластическая и упругая составляющие амплитуды внутренних напряжений при изгибе:

$$\begin{aligned}\sigma_{11,пл} &= \mu (\mathbf{b} \chi_{11,пл})^{1/2}, \\ \sigma_{11,упр} &= \mu t \chi_{11,упр}.\end{aligned}\quad (2)$$

Пластическая и упругая составляющие амплитуды внутренних напряжений при кручении:

$$\begin{aligned}\sigma_{12,пл} &= \mu (\mathbf{b} \chi_{12,пл})^{1/2}, \\ \sigma_{12,упр} &= \mu t \chi_{12,упр},\end{aligned}\quad (3)$$

где μ – модуль упругости, \mathbf{b} – вектор Бюргерса, t – толщина фольги, χ_{11} и χ_{12} – компоненты тензора кривизны-кручения кристаллической решетки.

Для определения компонент тензора кривизны-кручения кристаллической решетки χ_{11} и χ_{12} необходимо сделать построения, как показано в [8,9], и спроектировать составляющие ширины изгибного экстинкционного контура $\Delta L_{пл}$ и $\Delta L_{упр}$ на оси OX и OY . При этом ось OX должна быть направлена вдоль дифракционного вектора \vec{g} . Тогда компоненты тензора кривизны – кручения кристаллической решетки для составляющих упругой и пластической деформаций запишутся следующим образом. Пластическая и упругая составляющие градиента кривизны-кручения при изгибе [9]:

$$\begin{aligned}\chi_{11,пл} &= \Delta\varphi/\Delta L_{x,пл}, \\ \chi_{11,упр} &= \Delta\varphi/\Delta L_{x,упр}.\end{aligned}\quad (4)$$

Пластическая и упругая составляющие градиента при кручении [9]:

$$\begin{aligned}\chi_{12,пл} &= \Delta\varphi/\Delta L_{y,пл}, \\ \chi_{12,упр} &= \Delta\varphi/\Delta L_{y,упр}.\end{aligned}\quad (5)$$

При пластической деформации в расчетах внутренних напряжений изгиба и кручения использовались формулы (2) и (3) только для пластической составляющей. Упругая составляющая внутренних напряжений в этом случае отсутствует. Зная компоненты тензора внутренних напряжений изгиба σ_{11} и кручения σ_{12} кристаллической решетки, можно определить плотность энергии деформированного изотропного тела (для плоской задачи теории упругости) по формуле [10]:

$$\Delta U = \frac{1}{4\mu} [(1-\nu) \cdot (\sigma_{11})^2 + 2 (\sigma_{12})^2], \quad (6)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Результаты исследований и их обсуждение

Предложенная в [8,9] методика была использована в данной работе для определения внутренних напряжений и плотности запасенной энергии в образцах деформированной стали 110Г13. На рис. 1а приведено электронно-микроскопическое изображение структуры зерна поликристалла деформированной стали. Размер рассматриваемого зерна равен 19 мкм, средний размер зерна в стали 110Г13 составляет 34 мкм. На рис. 1б

представлено схематическое изображение зерна поликристалла. Границы зерна на схеме обозначены Γ_1 , Γ_2 . Внутри рассматриваемого зерна поликристалла видны дислокации, образующие сетчатую субструктуру, и деформационные микровдвойники одной ориентации (рис. 1а). Присутствуют как одиночные деформационные микровдвойники (обозначены буквой А на схеме рис. 1б), так и пакеты микровдвойников (обозначены буквой В на рис. 1б). На электронно-микроскопическом изображении наблюдаются также изгибные экстин-

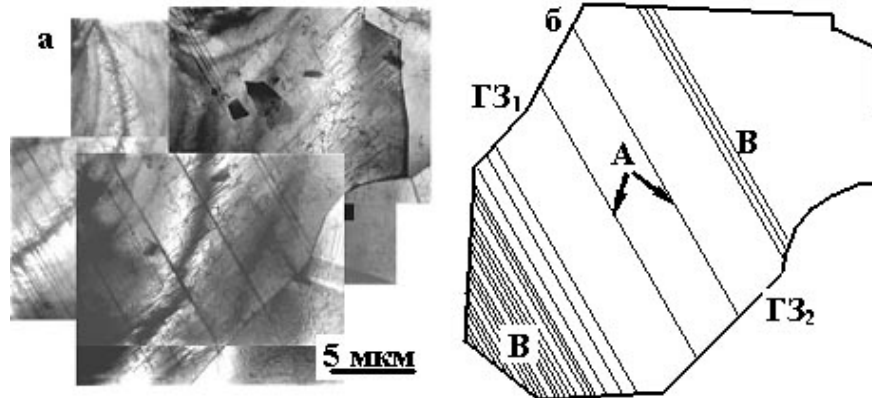


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры в зерне (а) и схема зерна (б) в стали 110Г13, деформированной растяжением до $\varepsilon = 25\%$ (А - отдельные деформационные микровдвойники, В - пакеты микровдвойников, Γ_1 и Γ_2 - границы зерна)

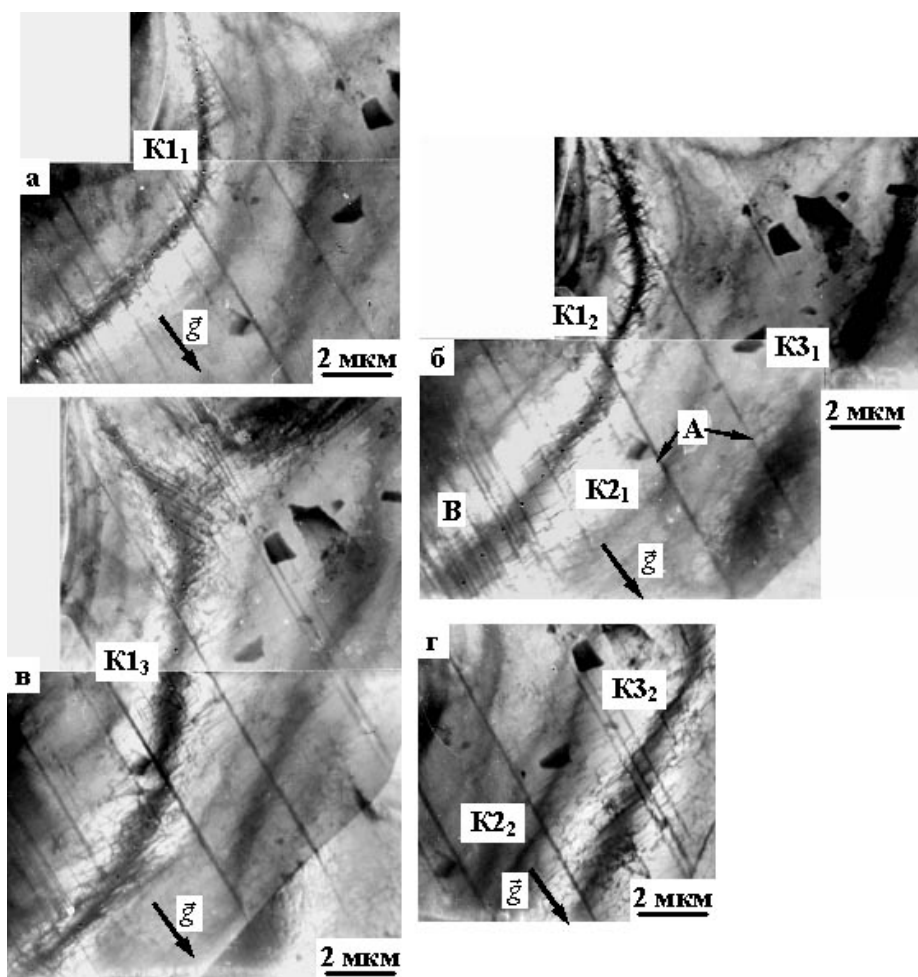


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения дислокационной структуры деформированной растяжением ($\varepsilon = 25\%$) стали 110Г13 с разными углами наклона оси гониометра (градусы): 4,3 (а), 6,1(б), 8,2 (в), 11,8 (г). На микрофотографиях отмечены выделенные участки наблюдаемых на них изгибных экстинкционных контуров K_1 , K_1 , K_1 , K_2 , K_2 , K_3 , K_3 . Показаны направления дифракционного вектора \vec{g} .

кционные контуры, что свидетельствует о наличии в зерне локальных внутренних напряжений. Наклоня с помощью гониометра образец в колонне микроскопа, перемещали наблюдаемый изгибный экстинкционный контур от одной границы зерна до другой. Перемещая экстинкционный контур таким способом, обнаруживали локальные места фольги с разными внутренними напряжениями и неодинаковой природой деформации. Неоднородность деформации приводит к тому, что наблюдаемые на электронно-микроскопическом изображении экстинкционные контуры имеют разные значения ширины (ΔL) и углов наклона контура (Θ) по отношению к дифракционному вектору \vec{g} . При контрольном угле наклона фольги в колонне микроскопа с помощью гониометра были проведены электронно-микроскопические съемки отдельного зерна поликристалла при разных углах наклона. Эти электронно-микроскопические изображения приведены на рис. 2а-г. Вектор действующего отражения \vec{g} в данном случае на снимках был перпендикулярен оси гониометра. Выбранный участок фольги, на котором проводились исследования, не содержал на пути перемещения контура границ раздела или разориентировки. Наблюдаемые

на электронно-микроскопических изображениях изгибные экстинкционные контуры обозначены $K1_1, K1_2, K1_3, K2_1, K2_2, K3_1, K3_2$. Совмещением схем контуров ($K1_1, K1_2, K1_3, K2_2, K3_1$), представленных на рис. 2а-г, получена суммарная схема расположения изгибных экстинкционных контуров по всему зерну поликристалла. Такая схема позволяет исследовать распределение внутренних полей напряжений по зерну поликристалла. В локальных участках зерна поликристалла на схему нанесены значения внутренних напряжений изгиба σ_{11} и кручения σ_{12} кристаллической решетки (для составляющей упругой деформации на рис. 3а и 3б, и для составляющей пластической деформации на рис. 4а и 4б).

Для тех же локальных точек образца на рис. 5а и 6а соответственно показаны значения внутренних напряжений σ , и распределение значений плотности запасенной энергии ΔU по зерну поликристалла. На рис. 5б и 6б приведены гistogramмы напряжений σ и плотности запасенной энергии ΔU , соответственно. Анализ полученных результатов показывает, что внутри зерна деформация неоднородна по природе, т.е. присутствуют упруго-пластическая и пластическая деформации, и неодинакова по её количественным характеристикам. Вдали

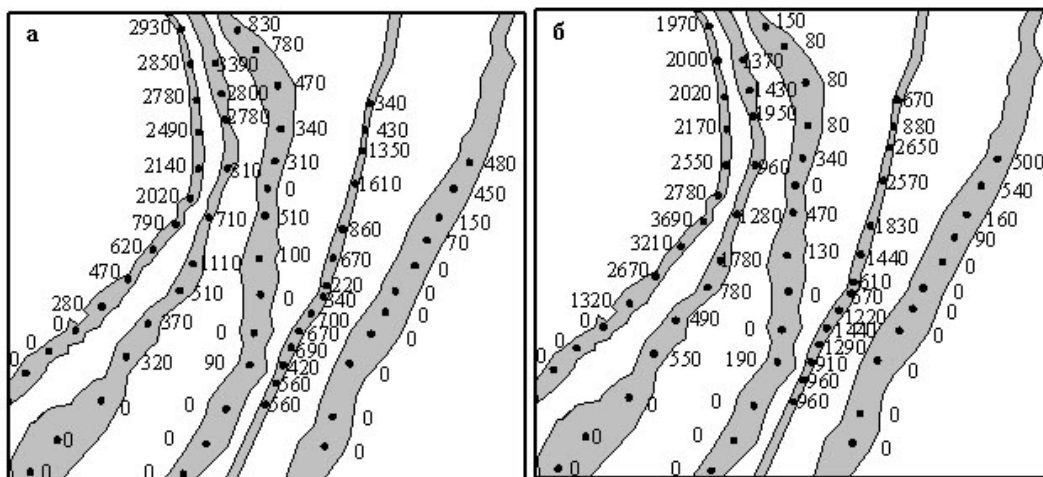


Рис. 3. Схемы распределения упругой составляющей напряжений изгиба $\sigma_{11, \text{упр}}$, МПа (а) и кручения $\sigma_{12, \text{упр}}$, МПа (б) кристаллической решетки внутри зерна. Экстинкционные контуры на схемах зерна (а,б) выделены серым цветом. Цифры около точек определяют значения напряжений изгиба (а) и кручения (б).

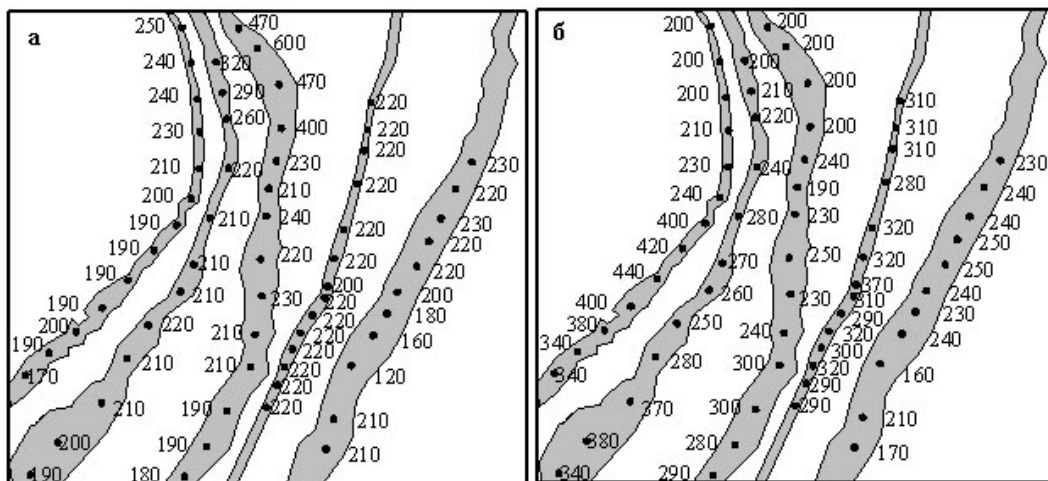


Рис. 4. Схемы распределения пластической составляющей напряжений изгиба $\sigma_{11, \text{пл}}$, МПа (а) и кручения $\sigma_{12, \text{пл}}$, МПа (б) кристаллической решетки внутри зерна. Экстинкционные контуры на схемах зерна (а,б) выделены серым цветом. Цифры около точек определяют значения напряжений изгиба (а) и кручения (б).

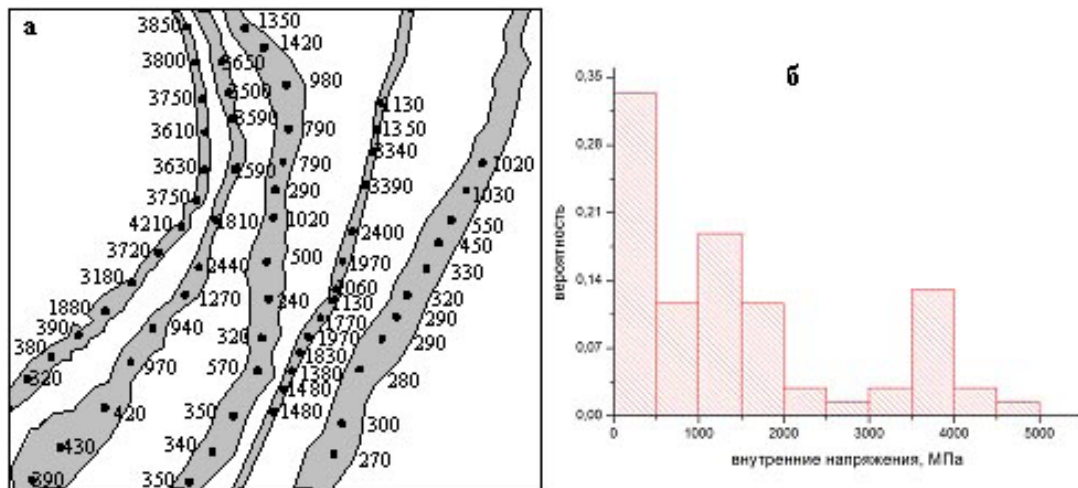


Рис. 5. Схема распределения внутренних напряжений σ , МПа (а) внутри рассматриваемого зерна и соответствующая им гистограмма (б). Экстинкционные контуры на схеме зерна (а) выделены серым цветом. Цифры около точек определяют значения внутренних напряжений (а).

от микродвойников - деформация упруго-пластическая, в то время как на участках, где присутствуют пакеты микродвойников, деформация - пластическая. Как видно из схемы (рис. 5а) и гистограммы (рис. 5б) внутренние напряжения σ внутри зерна распределяются следующим образом. Значения напряжения σ , равные 0-500 МПа и 1500-2000 МПа, встречаются чаще, чем другие значения, и распределяются по большей площади внутри зерна. Значения σ , превышающие 3000 МПа, присутствуют значительно реже и обнаруживаются в основном вблизи границы зерна ГЗ₁. Таким образом, можно сделать вывод, что вблизи границы зерна, обозначенной ГЗ₁ на рис. 1б, расположен наиболее напряженный участок фольги. Среднее значение внутреннего напряжения по зерну равно 1460 МПа, что соответствует на гистограмме интервалу довольно часто встречающихся значений внутренних напряжений. Как следует из представленных результатов, рассматриваемое локальное зерно является напряженным. Предел прочности в стали 110Г13 составляет 1150 МПа.

Компоненты тензора внутренних напряжений упругой составляющей деформации в среднем по зерну составляют следующие значения: напряжение изгиба

$\sigma_{11} = 990$ МПа, напряжение кручения кристаллической решетки $\sigma_{12} = 1240$ МПа. Средние значения компонентов тензора внутренних напряжений пластической составляющей деформации по зерну равны: напряжение изгиба $\sigma_{11} = 230$ МПа, напряжение кручения кристаллической решетки $\sigma_{12} = 280$ МПа. Суммарные значения составляющих упругой и пластической деформаций по зерну соответственно равны 1590 МПа и 360 МПа, и таким образом отличаются друг от друга примерно в 4,5 раза.

Из распределения плотности запасенной энергии внутри зерна (рис. 6б) видно, что на большей части зерна плотность энергии ΔU равна 0-20 Дж/см³. При этом среднее значение ΔU по зерну составляет 17 Дж/см³. Из схемы на рис. 6а следует, что плотность запасенной энергии более 50 Дж/см³ встречается не часто и концентрируется в основном вблизи границы ГЗ₁. На отдельных участках зерна плотность запасенной энергии может быть равной 68-107 Дж/см³. Эти значения плотности запасенной энергии соответствуют правой ветви распределения на рис. 6б. Были проведены измерения средней скалярной плотности дислокаций в зерне и плотности дислокаций в различных локальных участках зерна. Эти измерения дали следующие результаты. Средняя скалярная плот-

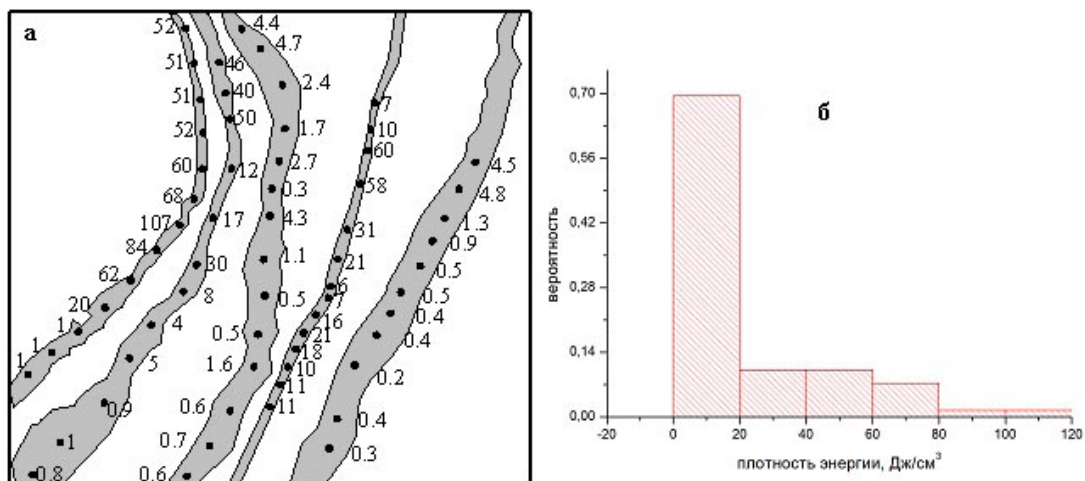


Рис. 6. Схема распределения плотности запасенной энергии ΔU , Дж/см³ (а) внутри рассматриваемого зерна и соответствующая гистограмма (б). Экстинкционные контуры на схеме зерна (а) выделены серым цветом. Цифры около точек определяют значения запасенной энергии(а).

ность дислокаций $(1,5-3,7) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Внутри пакета микродвойников скалярная плотность дислокаций равна $(1,2-1,5) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Значения скалярной плотности дислокаций $(2,0-2,5) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ соответствуют участкам вблизи одиночных микродвойников. В наиболее напряженной локальной области вблизи границы зерна ГЗ₁ значения средней скалярной плотности дислокаций равны $(3,2-3,7) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Распределение значений скалярной плотности дислокаций по зерну коррелирует со значениями полей внутренних напряжений (рис. 5), восстановленных по параметрам изгибных экстинкционных контуров. В локальных участках зерна, где значения скалярной плотности дислокаций невелики, внутренние напряжения также принимают меньшие значения. А в локальных местах с большей скалярной плотностью дислокаций внутренние напряжения выше. То же самое можно сказать и о значениях плотности запасенной энергии в рассматриваемом зерне (рис. 6).

Заключение

В статье представлены результаты определения внутренних напряжений и плотности запасенной энергии и их распределения по зерну поликристалла деформированной аустенитной стали 110Г13 с использованием метода просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Компоненты тензора внутренних полей напряжений восстанавливались по параметрам изгибных экстинкционных контуров, наблюдаемых на электронно-микроскопических изображениях деформированного материала. В расчетах учитывались пластические и упругие составляющие деформаций.

Анализ полученных результатов показал, что деформация по зерну поликристалла является неоднородной. Одновременно внутри отдельного зерна присутствуют и пластическая, и упруго-пластическая деформации. Внутренние напряжения по зерну распределяются также неравномерно. В локальных местах зерна, где плотность запасенной энергии принимает наибольшие значения, во внутренние напряжения больший вклад вносит компонента кручения кристаллической решетки. При этом плотность запасенной энергии составляет 50-107 Дж/см³. Внутри пакета микродвойников и вблизи микродвойников внутренние напряжения и плотность запасенной энергии значительно ниже. Внутренние напряжения и плотность запасенной энергии внутри пакета деформационных микродвойников соответственно принимают значения 300-400 МПа и 0,5-1,0 Дж/см³, а вблизи одиночных деформационных микродвойников они равны соответственно 900-1200 МПа и 18-22 Дж/см³. Экспериментально установлено, что присутствие микродвойников в аустенитной стали 110Г13 снижает внутренние напряжения и плотность запасенной энергии.

Литература

1. N.A. Koneva, L.I. Trishkina, E.V. Kozlov. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics **62**(7), 1097 (1998).
2. N.A. Koneva, E.V. Kozlov. Structural-phase conditions and properties of metallic systems. Ed. A. I. Potekaev. Tomsk: NTL Publisher (2004) 356p. (in Russian).
3. N.A. Koneva, L.I. Trishkina, E.V. Kozlov. Mater. Sci. Eng. **A319-321**, 156 (2001).
4. I.C. Umansky, B.N. Finkelstein, M.E. Blanter et al. Physical metallurgy. M.: State Scientific and Technical Publishing literature on ferrous and nonferrous metallurgy, (1955) 721p. (in Russian) [Уманский Я.С., Финкельштейн Б.Н., Блантер М.Е. и др. Физическое металловедение. М.: Гос. Научно-техническое изд-во литературы по чёрной и цветной металлургии (1955) 721с.]
5. R.W. Cahn, P. Haasen (eds). Physical metallurgy. Part 1 and 2, North-Holland Physics Publishing, Amsterdam (1983) 2050 p. [Физическое металловедение. Том.3. Физико-механические свойства металлов и сплавов. Под ред. Р.У. Кана и П. Хаазена. Пер. с англ. М.: Металлургия. 1987. 662с.]
6. C. S. Barrett, T. B. Massalski. Structure of Metals: crystallographic methods, principles and data. 3rd rev. ed. Oxford, New York: Pergamon (1980) 654 p.
7. E.V. Kozlov, D.B. Lychagin, N.A. Popova et al. Physics of Strength of heterogeneous materials. Ed. by A.E. Romanov, L.: Ioffe Physical Technical Institute (1988) p. 3, (in Russian) [Козлов Э.В., Лычагин Д.В., Попова Н.А. и др. Дальнейшие поля напряжений и их роль в деформации структурно-неоднородных материалов. Физика прочности гетерогенных материалов. Под ред. А.Е. Романова. Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе (1988) p. 3].
8. N.A. Koneva, S.F. Kiseleva, N.A. Popova, E.V. Kozlov. Fundamental Problems and Modern Technologies of Material Science **3**, 34 (2011), (in Russian).
9. S.F. Kiseleva, N.A. Popova, N.A. Koneva, E.V. Kozlov. Fundamental Problems and Modern Technologies of Material Science **1**, 7 (2012), (in Russian) [Киселева С.Ф., Попова Н.А., Конева Н.А., Козлов Э.В. Фундаментальные проблемы современного материаловедения **1**, 7 (2012).
10. A.A. Smirnov. Molecular-Kinetic Theory of Metals, M.: Nauka (1966) 488 p. (in Russian) [Смирнов А.А. Молекулярно-кинетическая теория металлов, М.: Наука (1966) 488 с].