

## ДЕФОРМАЦИОННЫЙ РЕЛЬЕФ – ОТРАЖЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ НИКЕЛЯ

© 2017

*Е.А. Алфёрова*, кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры технологии машиностроения и промышленной робототехники Института кибернетики  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск (Россия)

*Д.В. Лычагин*, доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой минералогии и геохимии  
Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск (Россия)

**Ключевые слова:** деформационный рельеф; EBSD-анализ; монокристалл; самоорганизация следов сдвига; дислокационная структура.

**Аннотация:** Несмотря на то, что деформационный рельеф находится в фокусе металлофизиков уже не одно десятилетие, до сих пор существует множество нерешенных вопросов, связанных с механизмами и целью его формирования. Кроме того, развитие приборной базы позволяет проводить более детальные экспериментальные исследования на недоступном ранее уровне. Одной из наиболее актуальных проблем при пластической деформации металлов является разрушение кристалла, которое обусловлено формированием мест с высокой локализацией деформации. Опираясь на деформационный рельеф, многие исследователи анализируют состояние материала с точки зрения сохранения целостности кристалла. Настоящая работа направлена на установление способов формирования структурных элементов деформационного рельефа различного типа (следы сдвига, мезо- и макрополосы, гофрированные структуры) и выявление роли каждого типа рельефа в повышении или снижении локальной деформации. В работе были проведены экспериментальные исследования по деформации сжатием ГЦК-монокристаллов никеля различной кристаллографической ориентации и последующее изучение деформационного рельефа. Для анализа рельефа применяли оптическую микроскопию, конфокальную лазерную сканирующую микроскопию, метод дифракции отраженных электронов, для обработки результатов использовали статистический и фрактальный анализ.

Определены способы формирования структурных элементов деформационного рельефа (следов сдвига, мезо- и макрополос, гофрированных структур), выделены их общие и отличительные черты.

Установлена цель самоорганизации следов сдвига в элементы рельефа более крупного масштабного уровня (пачки следов, мезо- и макрополосы). Выявлены способы самоорганизации следов сдвига на микро- и мезоуровне.

### ВВЕДЕНИЕ

Деформационный рельеф является источником информации о внутренних процессах. Он появляется на поли- и монокристаллах при различных способах нагружения и первоначально проявляет себя в виде тонких линий скольжения. Более ста лет назад Розенхайн и Эвинг обнаружили, что эти линии представляют собой ступеньки на поверхности, появляющиеся благодаря микроскопическому сдвигу вдоль кристаллографических плоскостей. Однако тот факт, что пластическая деформация реализуется не только с помощью трансляционного механизма, но и совместно с ротационным, был высказан еще в начале XX в. Р. Хоникомбом [1], А.Ф. Иоффе [2], Е. Шмидом и В. Боасом [3], В.Д. Кузнецовым [4] и др. Некоторое время спустя о переориентации кристаллической решетки при увеличении степени деформации сообщили С. Мадер и А. Зегер [5], а после и другие исследователи.

Благодаря развитию дифракционных методов удалось достоверно установить, что сдвиговая деформация в определенных условиях сопровождается переориентацией кристаллической решетки. На сегодняшний день очевидно, что трансляционные и ротационные механизмы деформации тесно взаимосвязаны. Переориентация локальных областей более характерна для высоких степеней пластической деформации и высокой плотности дислокаций. На начальных стадиях деформации изменение формы кристалла происходит за счет дислокационного скольжения.

Наиболее явным структурным элементом деформационного рельефа, сформированным трансляционным механизмом, является след скольжения или след сдвига. С началом пластической деформации следы сдвига наблюдаются при различных условиях нагружения. След сдвига состоит из пачки следов скольжения. В реальных экспериментах на поверхностях кристаллов можно наблюдать не только следы сдвига, но и более сложный деформационный рельеф [6–8], в частности пачки следов сдвига, мезо- и макрополосы, гофрированные (складчатые структуры) и др. Всю совокупность элементов деформационного рельефа мы предлагаем называть структурными элементами деформационного рельефа (СЭДР). При таком разнообразии деформационного рельефа возникает вопрос о том, какой тип СЭДР наиболее благоприятен с точки зрения сохранения целостности кристалла при нагружении, т. е. какой тип рельефа способствует более однородному протеканию деформации. Рассмотрение неоднородности деформации в моно- и поликристаллах на основании деформационного рельефа проводится во многих работах [9–11]. Благодаря такому анализу идентифицируются места как однородного, так и неоднородного протекания деформации.

Таким образом, на сегодняшний день понятно, что ротационные и трансляционные механизмы имеют место при пластической деформации металлов. Однако до конца не ясно, каким образом они функционируют и формируют различные типы деформационного рельефа.

Кроме того, остаются нерешенными вопросы, касающиеся цели формирования СЭДР различного типа.

Цель настоящей работы – установление закономерностей развития трансляционной и ротационной составляющей при формировании деформационного рельефа различного типа и установление роли каждого типа рельефа в сохранении целостности кристалла при деформации.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования был выбран монокристаллический никель (чистота 99,99 %) с ориентацией осей сжатия в углах стандартного стереографического треугольника. При исследовании монокристаллов благодаря отсутствию зерен, границ зерен, известной кристаллографической ориентации возможно установление фундаментальных закономерностей пластической деформации.

Деформацию сжатием проводили на испытательной машине Instron ElektroPuls E10000, скорость  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Картину деформационного рельефа исследовали на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS4100. Размер сканированного участка в каждом отдельном случае составлял  $0,066 \text{ мм}^2$  ( $0,256 \times 0,256 \text{ мм}$ ). Разрешение по глубине –  $0,06 \text{ мкм}$ . Для определения величины разориентации локальных областей применялась EBSD-приставка к микроскопу Tescan Vega II LMU. Ниже обсуждаются результаты, полученные с участков в центре грани образца для исключения приторцевых эффектов. Описанные результаты получены для величины деформации от 16 до 22 %.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При пластической деформации ГЦК-монокристаллов сжатием характерными структурными элементами деформационного рельефа являются следы скольжения, мезо-, макрополосы деформации и гофрирование (складчатые структуры) различного типа. Тип СЭДР зависит от кристаллографии образца [12].

Очевидным элементом рельефа, образующимся посредством сдвига в плоскости скольжения, является след скольжения. Несколько следов скольжения образуют след сдвига, который можно наблюдать при оптическом увеличении. В некоторых случаях для таких материалов, как твердые растворы с ближним атомным порядком и сплавы с невысоким значением энергии дефекта упаковки, а также для определенных кристаллографических ориентаций, например  $\{001\} \{001\}$  для никеля, может наблюдаться группирование следов сдвига в пачки, благодаря которым осуществляется

макроскопическое формоизменение кристалла. Для монокристаллов с осью сжатия  $[110]$  характерно формирование мезополос деформации. Макрополосы наблюдаются в  $[111]$ -монокристаллах, их размеры сопоставимы с размерами образца. Для этой же ориентации характерно формирование гофрированных (складчатых) структур различной морфологии. Варианты их классификации по различным признакам приведены в работах [8; 11]. На рис. 1 показаны отдельные СЭДР, характерные для никеля, по оптическим снимкам видно, что они имеют различную морфологию. Далее проанализируем их более детально. На рис. 1 г показан только один морфологический тип гофра.

Все рассмотренные способы изменения формы поверхности в процессе пластической деформации монокристаллов связаны с формированием квазипериодического профиля поверхности посредством следов сдвига, пачек следов, мезо- и макрополос деформации и гофров (складок) различного типа. В широком смысле можно сказать, что все структурные элементы деформационного рельефа подобны гофру, так как образованы чередованием выступов и впадин, т. е. изгибом поверхности без нарушения сплошности материала. При исследовании деформационного рельефа при помощи конфокальной микроскопии для всех типов СЭДР было обнаружено наличие ступенек на профиле поверхности (рис. 2).

Величина сдвига в следах составляет порядка  $0,07\text{--}0,13 \text{ мкм}$ , в мезополосе –  $1,9\text{--}3,8 \text{ мкм}$ ; при этом величина сдвига в следах, образующих мезополосу, –  $0,08\text{--}0,3 \text{ мкм}$ , величина сдвига в следах, образующих макрополосу, –  $0,100\text{--}1,300 \text{ мкм}$ . Различие в величине сдвига обусловлено степенью развития того или иного элемента рельефа, а следовательно, количеством вышедших на поверхность следов скольжения. В ранних работах установлено, что в чистых ГЦК-металлах (алюминий, медь, никель) величина сдвига в следе скольжения соответствует выходу  $15\text{--}32$  дислокаций на поверхность [1; 13; 14]. Оценки величины сдвига, изложенные в работе [15], показывают, что высота ступеньки на поверхности коррелирует с количеством дислокаций, генерируемых источником до его остановки. Как показано выше, величина сдвига в более крупном структурном элементе деформационного рельефа «набирается» благодаря сдвигу в отдельных следах. Аналогичный способ образования больших деформационных ступенек в результате последовательного суммирования элементарных ступенек описан в работе [16].

Анализ полученных экспериментальных результатов и результатов, описанных в литературе, позволяет говорить о наличии предельных значений величины сдвига, которые характерны для разных СЭДР.

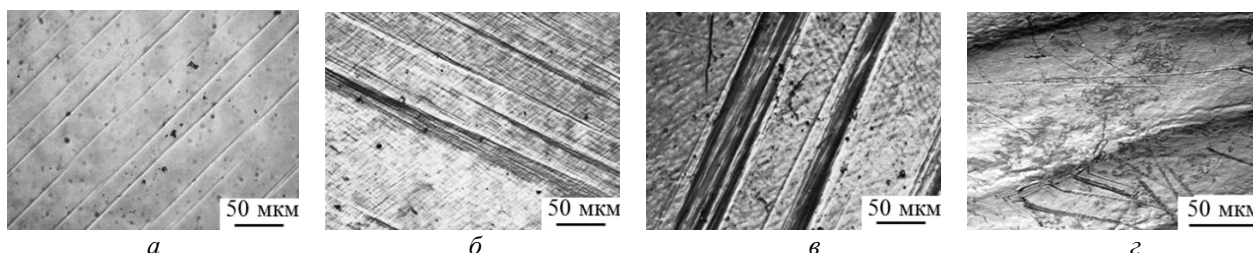


Рис. 1. СЭДР: следы сдвига (а), мезополосы (б), макрополосы (в), гофрированные структуры (г)

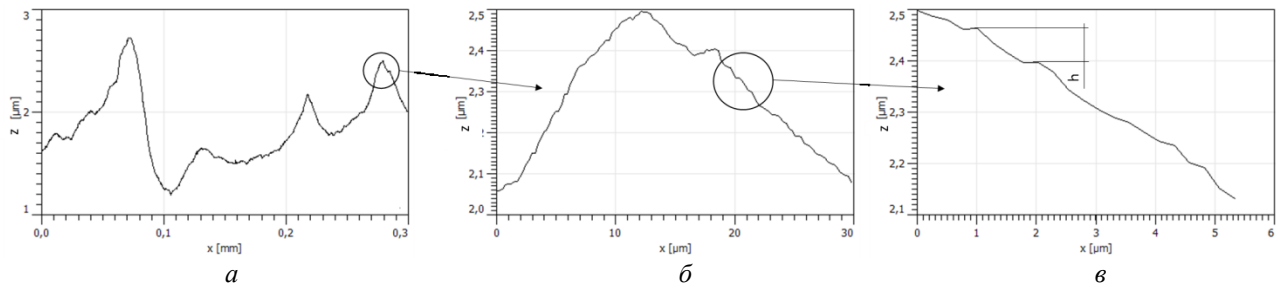


Рис. 2. Профиль поверхности перпендикулярно мезополосам (а), увеличенное изображение (б–в), h ступенька сдвига

В работе был проведен EBSD-анализ для областей, занятых различными СЭДР. Установлено, что при формировании следов сдвига и мезополос деформация обеспечивается посредством октаэдрического скольжения в рассмотренных степенях деформации, разориентации не наблюдались. В случае формирования макрополос дополнительно к механизму дислокационного скольжения обнаруживается присутствие ротационной компоненты, которое подтверждают данные EBSD-анализа, полученные с поверхности образца (рис. 3 б, 3 в, 3 г). Формирование гофрированных (складчатых) структур обеспечивается скольжением и переориентацией как на поверхности (рис. 3 д, 3 е, 3 ж), так и в объеме кристалла [8].

Для более детального исследования закономерностей переориентации локальных областей в зоне формирования гофрированной структуры был проведен EBSD-анализ с грани, перпендикулярной к грани, занятой гофрированной структурой (рис. 4).

Далее приводится описание результатов для области, занятой гофрированными структурами, попадающими в зону макровогнутости образца. Данная зона формируется при деформации образца сжатием и обусловлена кристаллографией [111] ГЦК монокристаллов.

При величине деформации 16 % области переориентации в зоне формирования гофрированных структур распространяются от поверхности вглубь на величину порядка 680 мкм. Более ярко полосы переориентации проявляются у поверхности образца на глубине до 350–380 мкм. У поверхности кристалла можно наблюдать углы разориентации более 15°, однако наибольшее количество границ имеют разориентацию порядка 2–8°. При продвижении вглубь образца доля границ с величиной разориентации более 2° постепенно снижается.

Сопоставление углов разориентации с параметрами дислокационной структуры показывает, что во внутренней области кристалла величина разориентации обеспечивается благодаря развитию ячеистой субструктуры, характерной для никеля при рассматриваемой степени деформации [17; 18]. При этом у поверхности образца разориентация происходит за счет поворота кристаллической решетки.

Расстояние между переориентированными полосами у поверхности кристалла составляет 40–85 мкм, на глубине 700 мкм от поверхности значение увеличивается до 70–115 мкм. Это свидетельствует о том, что в поверхностном слое деформационные процессы протекают более интенсивно.

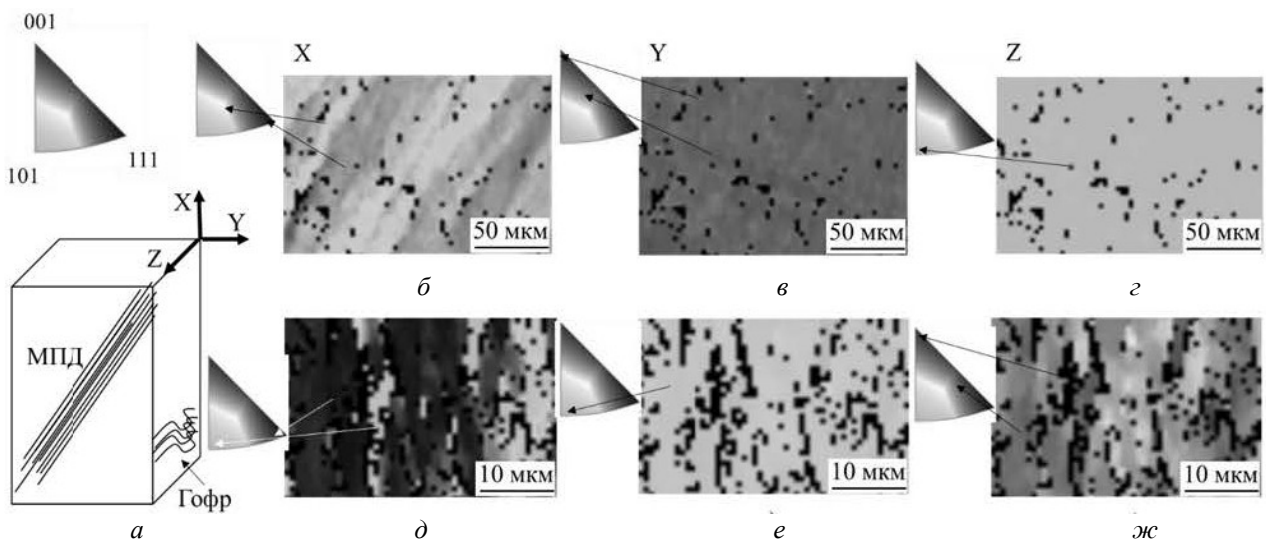


Рис. 3. Картина разориентации относительно осей: схема и стереографический треугольник (а); макрополоса на боковой грани (110) (б–г); гофр на боковой грани (112) (д–ж); деформация 16 %; стрелками указаны переориентированные области и соответствующие им направления переориентации

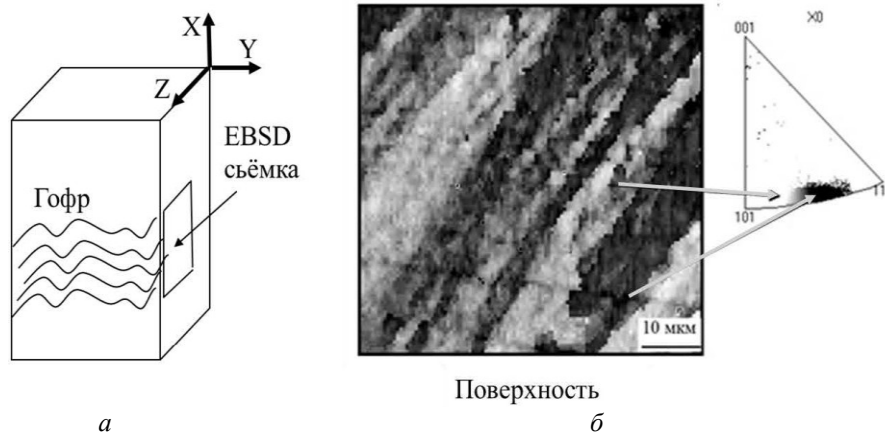


Рис. 4. EBSD-анализ: схема съемки (а), картина разориентации в области формирования гофра (б); деформация 16 %; стрелками указаны переориентированные области и соответствующие им направления переориентации

Отметим, что в [111]-монокристаллах октаэдрические плоскости не имеют свободного выхода на поверхности кристалла, они ограничены пунсонами испытательной машины. Следовательно, возникают обратные напряжения, которых нет при формировании следов сдвига, пачек следов и мезополос. Такие затрудненные условия для сдвига способствуют тому, что для сохранения целостности кристалла необходимо подключение дополнительного способа деформации (переориентация локальных объемов) с более ранних степеней деформации.

Квазипериодический профиль поверхности, формирующийся благодаря чередованию выступов и впадин, характерен для всех случаев деформационного рельефа. Каждая впадина представляет собой зону отрицательной кривизны, следовательно, в ней появляются добавочные сжимающие напряжения  $\sigma_a$ . Используя соотношение механики, оценить дополнительное сжимающее напряжение  $\sigma_a$  можно по формуле

$$\sigma_a = \sigma_0 \cdot w,$$

где  $\sigma_0$  – напряжение в образце;

$$w = (1 + 2 \cdot (a/r)^{-1/2});$$

$a$  – глубина впадины профиля;

$r$  – радиус кривизны профиля.

Коэффициент  $w$  в формуле по факту является коэффициентом повышения локального напряжения в зоне формирования впадины [19].

В работе был проведен оценочный расчет коэффициента  $w$  для СЭДР различного типа рельефа, результаты представлены в таблице 1.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что процесс формирования СЭДР более крупного масштаба (пачки, мезополосы, макрополосы и гофры) способствует снижению дополнительного напряжения  $\sigma_a$  в локальной области на мезо- и макроуровне по сравнению с отдельными следами сдвига. Следовательно, можно говорить о самоорганизации процесса пластической деформации, которая отражается в формирующемся рельефе и направлена на сохранение целостности кристалла при деформации. Кроме того, для определения размера зоны с самосогласованной дефор-

мацией была рассмотрена автокорреляционная функция для каждого типа деформационного рельефа. Автокорреляционная функция в данном случае анализирует значения высоты в соседних точках поверхности. Она позволяет оценить взаимодействие локальных областей кристалла, разделенных некоторыми интервалами. Радиус корреляции  $r_k$ , определяемый по указанной функции, обнаруживает размер зоны с самосогласованной деформацией. Полученные результаты сведены в таблице 1. Наибольший размер области со взаимосогласованной деформацией характерен для мезополос и макрополос.

Таблица 1. Значение коэффициента  $w$  и радиуса корреляции  $r_k$  для различных СЭДР, никель, интервал деформации 18–22 %

Тип СЭДР	$w$	$r_k$ , мкм	$H_1$	$H_2$
Следы сдвига	8,2	37±9	0,060	0,250
Пачки следов сдвига	4,7	36±1	0,050	0,078
Мезополосы	3,3	42±8	0,033	0,062
Макрополосы	6,3	43±5	0,091	0,263
Гофр*	1,6	18±1	0,012	0,049

\* Приведены данные только для одного морфологического типа гофрированной структуры.

Для обнаружения масштабно-инвариантных закономерностей процесса пластической деформации был использован фрактальный анализ деформационного рельефа на основе корреляционной функции высота – высота  $H(r)$  [20; 21]:

$$H(r) = \langle [Z(r^2) - Z(r^2 - r)]^2 \rangle,$$

где  $Z(r)$  – функция высоты поверхности по всем парам точек, отстоящим друг от друга на фиксированное расстояние  $r$ ; скобки указывают на усреднение по всем парам точек.

Из графика функции  $H(r)$  в логарифмических по наклону начального участка кривой был определен пока-

затель Хёрста ( $H$ ) для всех типов деформационного рельефа (см. таблицу 1). Длина корреляции  $L$  определяется проекцией линейного участка на ось абсцисс.

Анализ результатов показал, что на корреляционной длине  $L_1$  процесс носит антиперсистентный характер. Система имеет ярко выраженную тенденцию к сохранению среднего значения высоты рельефа. Корреляционная длина  $L_1$  для всех СЭДР составляет до 1,5–3 мкм. Сравнение  $L_1$  с параметрами дислокационной структуры, полученными авторами, а также с данными приведенными в литературе [17; 18], позволяет сказать, что взаимосогласованность деформации на этом масштабе осуществляется благодаря самоорганизации дислокационной структуры. Значения длины корреляции  $L_2$  составляет несколько десятков микрометров. Ее сравнение с характерными геометрическими размерами рассмотренных СЭДР, приведенными в работе [12], свидетельствует о том, что корреляционная длина  $L_2$  во всех случаях соизмерима с размерами мезопачек плоскостей сдвига. Таким образом, речь идет о самоорганизации пластической деформации на мезоуровне. Однако здесь стоит напомнить о размере зоны сканирования 0,066 мм<sup>2</sup>, который накладывает ограничения на возможность определения более крупного масштаба самоорганизации пластической деформации.

Вместе с тем видно, что значение индекса Хёрста  $H_2$  принимает различные значения для различных типов элементов рельефа (см. таблицу 1). Таким образом, тенденция к самоорганизации на мезоуровне прослеживается во всех случаях, но для мезополос и складок рассмотренного типа она выражена несколько сильнее, чем для следов и макрополос.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Определена величина сдвига в структурных элементах деформационного рельефа различного типа. Показано, что величина сдвига в элементе деформационного рельефа более крупного масштабного уровня набирается за счет последовательного суммирования элементарных сдвигов в следах.

Установлено, что следы сдвига и мезополосы в исследованном интервале деформации формируются благодаря дислокационному скольжению, для формирования макрополос дополнительно задействуется приповерхностная разориентация локальных областей, а для гофрирования также и разориентация внутри кристалла.

Благодаря комплексу использованных методов показано, что самоорганизация структурных элементов деформационного рельефа различного типа происходит с целью диссипации приложенного напряжения и сохранения целостности кристалла при деформации. Для снижения локальных напряжений на мезо- и макроуровне следы сдвига стремятся к самоорганизации в СЭДР следующего масштабного уровня (пачки следов, мезо- и макрополосы, гофр).

С использованием статистической обработки параметров деформационного рельефа на основе показателя Хёрста выявлено, что на микроуровне самоорганизация осуществляется за счет дислокационной структуры, на мезоуровне – за счет коррелированного сдвига в параллельных плоскостях скольжения.

Полученные результаты могут быть полезны ученым, работающим в области физики твердого тела,

а также при моделировании поведения отдельных зерен поликристаллического агрегата.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60007 мол а дк.*

*Статья подготовлена по материалам докладов участников VIII Международной школы «Физическое материаловедение» с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 3–12 сентября 2017 г.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Honeycombe R. The Plastic Deformation of Metals. London: Edward Arnold, 1984. 406 p.
2. Ioffe A.F. Physics of crystals. Leningrad: GIZ, 1929. 192 p.
3. Шмид Е., Боас В. Пластичность кристаллов в особенности металлических. Ленинград: Редакция технико-теоретической литературы, 1938. 316 с.
4. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. Томск: Красное знамя, 1941. 771 с.
5. Mader S., Seeger A. Untersuchung des gleitlinien bildes kubisch flächenzentrierter einkristalle // Acta met. 1960. Vol. 8. P. 513–522.
6. Khoddam S. Surface wrinkling of the twinning induced plasticity steel during the tensile and torsion tests // Mater. Des. Elsevier. 2014. Vol. 60. P. 146–152.
7. Lychagin D.V., Alfeyorova E.A. Folding in FCC metal single crystals under compression // Phys. Solid State. 2015. Vol. 57. № 10. P. 2034–2038.
8. Lychagin D.V. Strain-induced folding on [111] copper single crystals under uniaxial compression // Appl. Surf. Sci. Elsevier B.V. 2016. Vol. 371. P. 547–561.
9. Magid K.R. Mapping mesoscale heterogeneity in the plastic deformation of a copper single crystal // Philos. Mag. 2009. Vol. 89. № 1. P. 77–107.
10. Wang X.G. A dedicated DIC methodology for characterizing plastic deformation in single crystals // Exp. Mech. 2016. Vol. 56. № 7. P. 1155–1167.
11. Lychagin D.V., Alfeyorova E.A., Starenchenko V.A. Effect of crystallographic states on the development of macrobands and deformation inhomogeneity in [111] nickel single crystals // Phys. Mesomech. 2011. Vol. 14. № 1-2. P. 66–78.
12. Лычагин Д.В., Старенченко В.А., Соловьева Ю.В. Классификация и масштабная иерархия структурных элементов деформации ГЦК-монокристаллов // Физическая мезомеханика. 2005. Vol. 8. № 6. P. 67–77.
13. Taoka T., Sacata H. The effect of ordering on slip patterns // Acta met. 1957. Vol. 5. P. 61–63.
14. Ambrosi P., Schwink ChPias C. Slip line length of copper single crystals oriented along [100] and [111] // Scr. met. 1978. Vol. 12. P. 303–308.
15. Малыгин Г.А. Механизм образования деформационных ступенек нанометрических размеров на поверхности пластически деформируемых кристаллов // Физика твердого тела. 2001. Vol. 43. № 2. P. 248–253.
16. Веттегрень В.И., Рахимов С.Ш., Светлов В.Н. Изучение динамики субмикродфектор на поверхности нагруженного молибдена при помощи туннельного профилометра // Физика твердого тела. 1996. Т. 38. № 4. С. 1142–1148.

17. Малыгин Г.А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 9. С. 979–1010.
18. Конева Н.А. Классификация, эволюция и самоорганизация дислокационных структур в металлах и сплавах // Сорровский образовательный журнал. 1996. № 6. С. 99–107.
19. Мороз Л.С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. Ленинград: Машиностроение, 1984. 224 с.
20. Yang H.-N. Sampling-induced hidden cycles in correlated random rough surfaces // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 56. № 7. P. 4224–4232.
21. Pelliccione M., Lu T.-M. Evolution of Thin Film Morphology. Modeling and Simulations. New York: Springer, 2008. 206 p.
10. Wang X.G. A dedicated DIC methodology for characterizing plastic deformation in single crystals. *Exp. Mech.*, 2016, vol. 56, no. 7, pp. 1155–1167.
11. Lychagin D.V., Alfyorova E.A., Starenchenko V.A. Effect of crystallographic states on the development of macrobands and deformation inhomogeneity in [111] nickel single crystals. *Phys. Mesomech.*, 2011, vol. 14, no. 1-2, pp. 66–78.
12. Lychagin D.V., Starenchenko V.A., Solov'eva Yu.V. Classification and scale hierarchy of structural elements in compression-strained FCC single crystals. *Physical mesomechanics*, 2006, vol. 9, no. 1-2, pp. 63–72.
13. Taoka T., Sacata H. The effect of ordering on slip patterns. *Acta met.*, 1957, vol. 5, pp. 61–63.
14. Ambrosi P., Schwink ChPias C. Slip line length of copper single crystals oriented along [100] and [111]. *Scr. met.*, 1978, vol. 12, pp. 303–308.
15. Malygin G.A. Mechanism of the formation of deformation steps of nanometric sizes at the surface of plastically deformed crystals. *Physics of the solid state*, 2001, vol. 43, no. 2, pp. 257–262.
16. Vettegren V.I., Rakhimov S.Sh., Svetlov V.N. Tunneling profilometer study of the dynamics of submicrodefects on the surface of loaded molybdenum. *Physics of the solid state*, 1996, vol. 38, no. 4, pp. 632–635.
17. Malygin G.A. Dislocation self-organization processes and crystals plasticity. *Physics-uspekhi*, 1999, vol. 42, no. 9, pp. 887–916.
18. Koneva N.A. Classification, evolution and self-organization of dislocation structures in metals and alloys. *Sorovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 1996, no. 6, pp. 99–107.
19. Moroz L.S. *Mekhanika i fizika deformatsiy i razrusheniya materialov* [Mechanics and physics of deformation and destruction]. Ленинград, Mashinostroenie Publ., 1984. 224 p.
20. Yang H.-N. Sampling-induced hidden cycles in correlated random rough surfaces. *Phys. Rev. B*, 1997, vol. 56, no. 7, pp. 4224–4232.
21. Pelliccione M., Lu T.-M. *Evolution of Thin Film Morphology. Modeling and Simulations*. New York, Springer Publ., 2008. 206 p.

## REFERENCES

1. Honeycombe R. *The Plastic Deformation of Metals*. London, Edward Arnold Publ., 1984. 406 p.
2. Ioffe A.F. *Physics of crystals*. Ленинград, GIZ Publ., 1929. 192 p.
3. Schmid E., Boas V. *Plastichnost kristallov v osobennosti metallicheskih* [The plasticity of crystals, especially metal ones]. Ленинград, Redaktsiya tekhniko-teoreticheskoy literatury Publ., 1938. 316 p.
4. Kuznetsov V.D. *Fizika tverdogo tela* [Solid body physics]. Tomsk, Krasnoe znamya Publ., 1941. 771 p.
5. Mader S., Seeger A. Untersuchung des gleitlinien bildes kubisch flächenzentrierter einkristalle. *Acta met.*, 1960, vol. 8, pp. 513–522.
6. Khoddam S. Surface wrinkling of the twinning induced plasticity steel during the tensile and torsion tests. *Mater. Des. Elsevier*, 2014, vol. 60, pp. 146–152.
7. Lychagin D.V., Alfyorova E.A. Folding in FCC metal single crystals under compression. *Phys. Solid State*, 2015, vol. 57, no. 10, pp. 2034–2038.
8. Lychagin D.V. Strain-induced folding on [111] copper single crystals under uniaxial compression. *Appl. Surf. Sci. Elsevier B.V.*, 2016, vol. 371, pp. 547–561.
9. Magid K.R. Mapping mesoscale heterogeneity in the plastic deformation of a copper single crystal. *Philos. Mag.*, 2009, vol. 89, no. 1, pp. 77–107.

**DEFORMATION RELIEF IS THE REFLECTION OF INTERNAL PROCESSES  
DURING PLASTIC DEFORMATION OF SINGLE CRYSTALS**

© 2017

*E.A. Alfeyorova*, PhD (Physics and Mathematics),  
assistant professor of Chair of Mechanical Engineering and Industrial Robotics of Institute of Cybernetics  
*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk (Russia)*  
*D.V. Lychagin*, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,  
Head of Chair of Mineralogy and Geochemistry  
*National Research Tomsk State University, Tomsk (Russia)*

*Keywords:* deformation relief; EBSD analysis; single crystal; self-organization of slip tracks; dislocation structure.

*Abstract:* In spite of the fact that the deformation relief is the case study of the scientists of physics of metals for several decades, there are a large number of issues associated with the mechanisms and the objective of its formation. Moreover, the development of the instrumental base allows carrying out the detailed experimental studies at the better than ever level. One of the most relevant issues during plastic deformation of metals is the destruction of a crystal that is caused by the formation of areas with the high allocation of deformation. Basing on the deformation relief, many researchers analyze the state of a material from the point of view of preserving the crystal integrity. This study is aimed to determine the methods of formation of structural elements of deformation relief of various types (slip traces, meso- and macrobands, and corrugated surface) and to identify the role of each type of relief in the increase and decrease of local deformation. The authors carried out the experimental study on the compressive deformation of FCC nickel single crystals of different crystallographic orientation and the further study of the deformation relief. To analyze the relief, the authors used optical microscopy, confocal laser scanning microscopy, and the reflection electron diffraction method; to process the results, the statistical and fractal analysis was used.

The study determined the methods of formation of structural elements of the deformational relief (slip traces, meso- and macrobands, and corrugated surface), specified their common and distinctive features.

The paper sets the objective of self-organization of traces of slip into the relief elements of a larger scale level (band of slip tracks, meso- and macrobands) and identifies the methods of self-organization of slip traces at the micro- and mesolevel.