

07,01

## Образование складок в ГЦК-монокристаллах металлов при сжатии

© Д.В. Лычагин<sup>1</sup>, Е.А. Алфёрова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: katerina525@mail.ru, dvl-tomsk@mail.ru

(Поступила в Редакцию 7 июля 2014 г.

В окончательной редакции 23 сентября 2014 г.)

Представлены результаты анализа образования складок при деформации сжатием металлов с гранецентрированной кубической решеткой. Исследованы монокристаллы с ориентациями в углах стандартного стереографического треугольника и различными кристаллографическими ориентациями боковых граней. Установлено, что основным фактором, влияющим на интенсивность образования складок, является несимметричность сдвига по плоскостям скольжения относительно боковых граней. Такой сдвиг приводит к искривлению граней и образованию систем складок в местах наибольшей кривизны. Показано, что из всех рассмотренных ориентаций максимальной склонностью к образованию складок различного типа обладают монокристаллы с ориентацией оси сжатия  $[\bar{1}11]$ . Для данной ориентации методами интерференционной микроскопии и дифракции обратно рассеянных электронов прослежено развитие сдвиговой и ротационной составляющих при образовании складок. Выявлено, что при активизации сдвига в области формирования складки накапливается избыточная плотность дислокаций, что приводит к увеличению разориентировки в складке. Активизации этого процесса в гранецентрированных металлах способствует увеличение гомологической температуры деформации и энергии дефекта упаковки.

Исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования „Аналитический центр геохимии природных систем“ Национального исследовательского Томского государственного университета.

Данное научное исследование (№ 8.1.76.2015) выполнено при поддержке Программы „Научный фонд Томского государственного университета им. Д.И. Менделеева“ в 2015 г.

### 1. Введение

Явление складкообразования и гофрирования привлекает внимание специалистов из различных областей науки и техники. Анализ процесса гофрирования направлен на прогнозирование получения той или иной структуры материала после обработки давлением, а следовательно, и эксплуатационных свойств металла. Выявление причин возникновения складок дает возможность контролировать процесс их образования, что в свою очередь позволит повысить качество получаемых изделий.

Большое число работ Губернаторова с соавторами посвящено исследованию процесса гофрирования [1–4]. Ими было найдено, что при пластической деформации в очаге течения формируется особый род неоднородности, который обусловлен искажением плоскостности слоев материала, это в свою очередь приводит к формированию гофрированной структуры [4]. В качестве возможной причины образования гофра предлагается гипотеза о потере устойчивости слоями материала, которые испытывают стесненную деформацию, и возникновение знакопеременных напряжений на мезоуровне. Следовательно, такая структура может формироваться даже без базовых концентраторов напряжений. В работе [2] на основе концепции гофрирования разработа-

на геометрическая модель формирования структуры и текстуры материала. В [3] экспериментально доказано, что деформационная структура в виде гофра образуется как в исходно структурно-неоднородных материалах, так и в исходно структурно-однородных материалах (монокристаллах). С учетом этого делается заключение о том, что именно гофрирование материала формирует его текстурное и структурное состояние.

Работы, в которых изучается развитие деформационного рельефа при сжатии монокристаллических образцов [5,6], свидетельствуют о том, что складки являются неотъемлемой частью рельефа. В работах наблюдаются складки микро-, мезо- и макроскопического размера. Исследования, проводимые на монокристаллах, являются модельными, однако изучение физической природы формирования складок в монокристаллах чистых металлов представляется целесообразным. Это обусловлено определенной геометрией дислокационного скольжения и отсутствием влияния границ зерен. Изучение процессов складкообразования способствует углубленному пониманию механизмов релаксации и аккомодации поверхностных напряжений при различных методах деформации и обработки поверхности и может быть полезно при разработке технологических процессов обработки металлов.

Исходя из отмеченного выше, представляются важными исследование формирования складок на боковых поверхностях монокристалла и анализ условий их образования.

## 2. Материал и методика

В работе исследовались монокристаллы с разным значением энергии дефекта упаковки (ЭДУ): алюминий ( $170\text{--}300\text{ мДж/м}^2$ ), никель ( $120\text{--}150\text{ мДж/м}^2$ ), медь ( $40\text{--}60\text{ мДж/м}^2$ ) — с ориентацией осей сжатия в углах стандартного стереографического треугольника и разными наборами боковых граней. Методика приготовления и исследования образцов изложена в [6,7]. Структура образцов изучалась в интервале истинных (логарифмических) степеней деформации от 3 до 60%. Деформирование сжатием проводилось на испытательной машине Instron ElektroPuls E10000 со скоростью  $1.4 \cdot 10^{-3}\text{ с}^{-1}$  при комнатной температуре. Картина деформационного рельефа исследовалась на оптическом микроскопе Leica DM 2500P и растровом электронном микроскопе Tescan Vega II LMU с EBSD-приставкой для анализа разориентаций. Параметры деформационного рельефа определялись на микроинтерферометре NewView 7200.

## 3. Экспериментальные результаты

Формирование складчатой структуры на поверхностях монокристаллов можно наблюдать при разных ориентациях осей сжатия образцов. В каждом случае она будет иметь свои индивидуальные особенности. При рассмотрении складок следует обращать внимание на степень деформации и место их образования. В первую очередь при пластической деформации складки формируются в приторцевой зоне в области образования наплыва.

Анализ исследованных ГЦК-монокристаллов чистых металлов показал, что склонность к складкообразованию зависит от кристаллографической ориентации оси сжатия и боковых граней. Монокристаллы с осью сжатия  $[001]$  с боковыми гранями  $(100)$  и  $(110)$  и  $[110]$ -монокристаллы с боковыми гранями  $(001)$  и  $(\bar{1}10)$ , деформированные при комнатной температуре, не склонны к складкообразованию при умеренных степенях деформации. Наиболее склонными к образованию складчатых структур являются монокристаллы с ориентацией оси сжатия  $[\bar{1}11]$ . При высоких степенях деформации наблюдается существенное формоизменение монокристаллов. Этот процесс сопровождается значительным складкообразованием.

Кристаллографический анализ расположения октаэдрических плоскостей в объеме монокристалла показал, что все исследованные ориентации монокристаллов можно разделить на две группы. Ориентации, в которых плоскости скольжения вписаны симметрично относительно оси сжатия и боковых граней образца, и ориентации, в которых плоскости скольжения вписаны

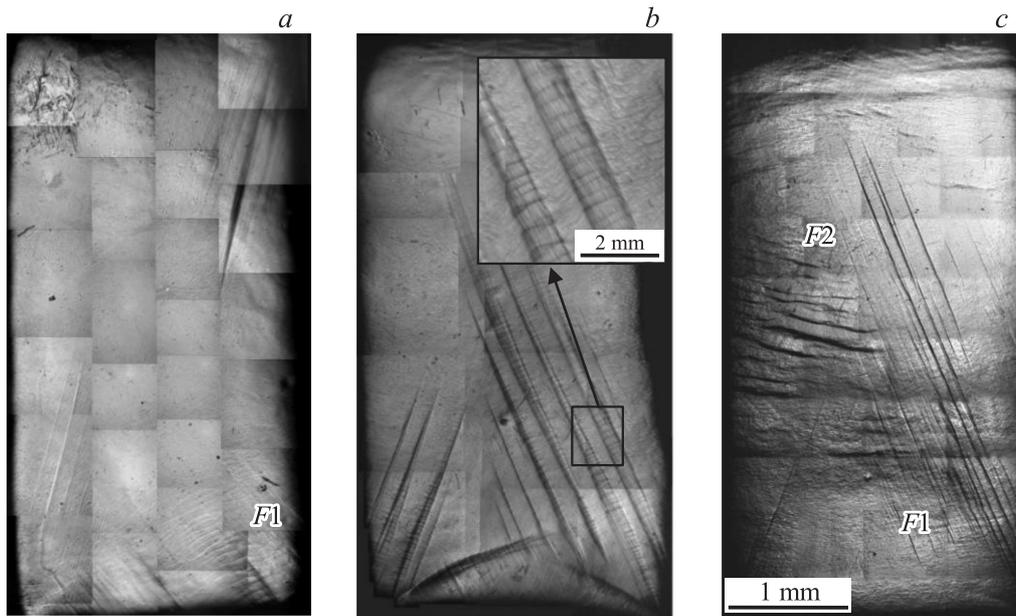
несимметрично. Последний случай способствует изгибу грани и образованию складчатости не только в приторцевой зоне, но и в центральной части образца. Несимметричная ориентация плоскостей скольжения в объеме монокристалла повышает вероятность искривления граней симметрично ориентированного монокристалла и, следовательно, вероятность формирования складок, что реализуется, например, в  $[110]$ -монокристаллах с другим набором боковых граней  $(112)$  и  $(111)$ .

Как отмечалось выше, наименее устойчивой к искривлению граней и складкообразованию при умеренных степенях деформации является ориентация  $[\bar{1}11]$ . Однако, как показали ранее проведенные исследования авторов [6], наименьшая устойчивость наблюдается для образцов в форме тетрагональной призмы (боковые грани  $(110)$  и  $(1\bar{1}2)$ ). Образцы в форме тригональной призмы (боковые грани  $(110)$  и  $(112)$ ) обладают большей устойчивостью к складкообразованию. Отметим, что дополнительной отличительной особенностью деформации этой ориентации являются образование систем макрополос деформации и наличие областей „затрудненного“ сдвига (на основании рассмотрения кристаллографической схемы расположения плотноупакованных плоскостей в объеме образца). Оба фактора влияют на место образования складчатой структуры в образцах.

При сравнении  $[\bar{1}11]$ -монокристаллов разных металлов нами также наблюдалось различие в складкообразовании. Далее приведены результаты, полученные для образцов в форме тетрагональной призмы. Большинство складок в монокристаллах меди наблюдается на гранях  $(1\bar{1}2)$ , где они занимают до 80–85% площади (деформация 13%), а на гранях  $(110)$  доля площади, занятая складками, составляет 30–35%. В монокристаллах никеля при деформации 10% эти величины составляют 32 и 3% соответственно. Различие площади, занятой складками, на взаимно перпендикулярных гранях также объясняется расположением октаэдрических плоскостей в объеме образца и их разным вкладом в формоизменение граней. При развитии сдвига происходит искривление граней образца, в первую очередь грани  $(1\bar{1}2)$ . Это приводит к тому, что на данной грани наблюдается наиболее раннее складкообразование.

Алюминий из всех исследованных металлов обладает наиболее высокой энергией дефекта упаковки и гомологической температурой деформации. Характерной чертой этого материала является развитие мелких складок у торца и перпендикулярно действующим системам макрополос. В этих местах формируется индивидуальная система складок. Характер мест складкообразования у торцов монокристалла в случае  $[\bar{1}11]$ -монокристаллов и в целом картина рельефа на гранях образца определяются наличием при деформации центра симметрии (центра инверсии).

В приторцевой области в алюминии наблюдается несколько типов складкообразования: макроскладки (область наплыва) и мезоскладки, занимающие значитель-



**Рис. 1.** Деформационный рельеф на боковой грани (110)  $[\bar{1}11]$ -монокристалла алюминия после деформации 5% (a), структура складок на боковой грани (112)  $[\bar{1}11]$ -монокристалла алюминия после деформации 9% (b), деформационный рельеф на боковой грани (112)  $[\bar{1}11]$ -монокристалла никеля после деформации 10% (c).

ную часть на одной грани кристалла и узкую часть на другой грани кристалла. Наряду со складкообразованием возле пуансонов испытательной машины можно наблюдать формирование складок перпендикулярно макрополосам. При этом наблюдается эффект более интенсивного образования складчатости перпендикулярно менее развитым системам макрополос (складки  $F1$  на рис. 1, a). Этот процесс наиболее выражен в монокристаллах алюминия. Складки формируются перпендикулярно границам макрополос и образуют „бамбуковую“ структуру, которая по мере увеличения степени деформации измельчается (рис. 1, b).

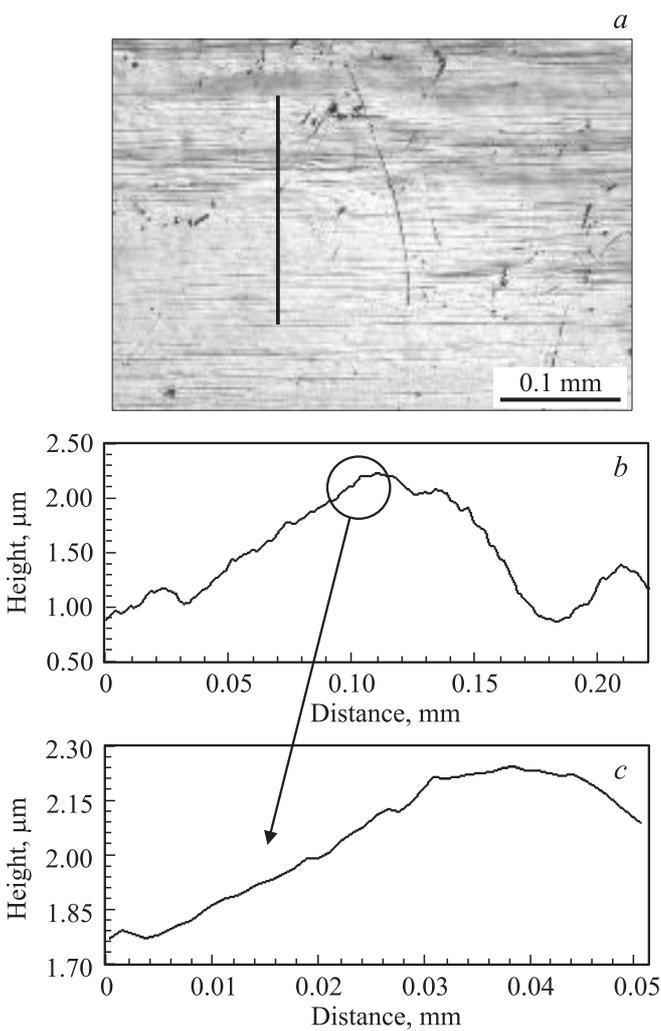
Деформация в системе макрополос обеспечивает формоизменение только в области, занятой этой системой, поэтому для деформации других областей кристалла требуется привлечение дополнительных механизмов на мезо- и макроуровнях. В результате можно наблюдать формирование систем складок  $F2$  в областях, соседних с областями, занятыми системами макрополос (рис. 1, c).

В то же время образование складок в никеле и меди отличается от их образования в алюминии как по степени развития складчатости при эквивалентных степенях деформации, так и по областям их локализации. Наиболее заметное влияние на размер области наплыва в приторцевой зоне оказывает гомологическая температура деформации. Между тем, как известно, формированию субграниц разориентации способствует поперечное скопление дислокаций, вероятность которого возрастает с увеличением ЭДУ. В то же время доля площади грани, занятой складками, в большей степени зависит от кристаллографического фактора (степень

точности ориентации оси сжатия и боковых граней). Это затрудняет более детальный анализ влияния гомологической температуры деформации и ЭДУ на процесс складкообразования.

Исследование накопления сдвига в складках, проведенное с использованием интерференционной микроскопии (рис. 2), и анализ кристаллографии сдвига в  $[\bar{1}11]$ -монокристаллах показали, что складки при деформации 10% образованы сдвигом по октаэдрическим плоскостям. На рис. 2, c можно разрешить отдельные ступени сдвига, величина сдвига в складках 80–350 нм. Следовательно, для их формирования необходимо 300–1500 дислокаций (так как вектор Бюргера никеля  $b = 0.249$  нм).

В рамках настоящей работы проведено исследование складчатой структуры с привлечением метода дифракции обратно рассеянных электронов (electron backscatter diffraction, EBSD-анализ). Карты, полученные с использованием EBSD-анализа (рис. 3), иллюстрируют распределение локальных областей с различной ориентацией и позволяют определить величины разориентации в них. На рис. 3 представлена картина разориентации на участке, где формируются системы макрополос и перпендикулярные им складки (рассмотренный участок находится в области одноосного сжатия). С увеличением степени деформации происходит накопление избыточной плотности дислокаций внутри кристалла, что способствует развитию разориентации [8]. В данном месте величина углов разориентации составляет порядка  $2^\circ$ . При этом при рассмотрении изменения углов разориентации вдоль секущей, указанной на рис. 3, a стрелкой, видно, что

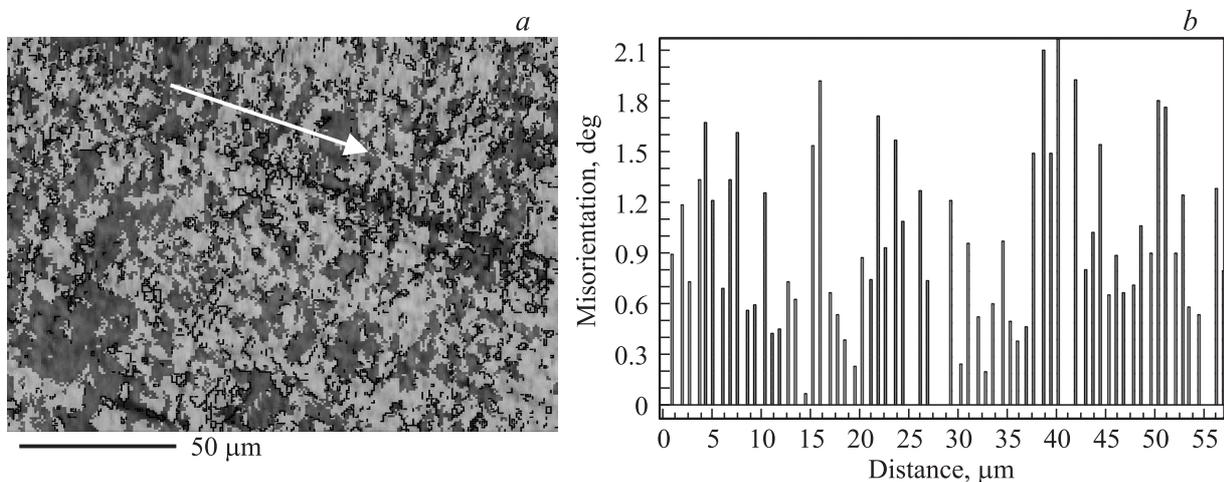


**Рис. 2.** Деформационный рельеф на боковой грани (112) монокристалла никеля с ориентацией оси сжатия [111] после деформации 10% с обозначением секущих (a), профиль поверхности вдоль соответствующих секущих (b, c).

наблюдается периодический характер изменения угла. Максимальные значения угла разориентации отмечаются с шагом примерно в  $5\ \mu\text{m}$ . Аналогичная картина наблюдается при рассмотрении складчатой структуры на границе областей с разной схемой напряженного состояния с той лишь разницей, что величина углов разориентации достигает  $8^\circ$  по границам складок.

Свой тип складчатой структуры образуется в области макроизгиба на грани (112), который формируется благодаря изгибу грани в результате работы систем макрополос, наблюдающихся на грани (110). Проведенный в работе анализ показал, что складки данного типа при деформации 16% представляют собой чередование областей с исходной ориентацией  $[\bar{1}11]$  относительно оси сжатия и областей с вновь сформировавшейся ориентацией [110]. При этом переход к ориентации [110] происходит постепенно через промежуточные ориентации, лежащие на стороне стереографического треугольника [111]–[110]. Ширина непереориентированных областей составляет порядка  $5\text{--}9\ \mu\text{m}$ , областей с новой ориентацией —  $2\text{--}3\ \mu\text{m}$ . В данном случае интересно отметить и тот факт, что в областях с ориентацией, близкой к исходной ориентации  $[\bar{1}11]$  относительно оси сжатия, фактор Шмида повышается до 0.35, а для областей с вновь сформировавшейся ориентацией [110] фактор Шмида достигает величины 0.45. Следовательно, можно наблюдать процесс переориентации материала к ориентации для наиболее эффективного скольжения.

Анализ величины углов разориентации и характера их изменения вдоль секущей показал результаты, подобные описанным выше для складок, сформировавшихся перпендикулярно системам макрополос: величина углов разориентации внутри прослоек исходной ориентации составляет порядка  $2\text{--}6^\circ$ . Рассмотрение изменения углов разориентации вдоль секущей позволяет наблюдать его периодический характер. Максимальные значения угла разориентации отмечаются с тем же шагом  $5\ \mu\text{m}$ ,



**Рис. 3.** Геометрический образ границ (a) и разориентация вдоль секущей (b) (направление секущей обозначено стрелкой).

что и в предыдущем случае. Однако угол разориентации на границах переориентированных областей заметно выше и составляет порядка 30–40°.

Обсудим причины наблюдаемых особенностей складкообразования в исследуемых материалах.

#### 4. Обсуждение результатов

Наиболее интенсивное складкообразование наблюдается в исследованных материалах в области максимальной кривизны. Одной из таких областей является участок на границе наплыва и основной части материала. Наплыв обусловлен схемой напряженного состояния и наличием торцевого трения.

Искривление граней образца и формирование складок в его центральной части, где реализуется схема одноосного сжатия, обусловлены несовместностью деформации соседних доменов. В этом случае складкообразование при умеренных степенях деформации существенно зависит от ориентации оси деформации монокристалла и его боковых граней.

Одновременно на складчатость влияет способ организации сдвига при скольжении по октаэдрическим плоскостям. Как показано в работах авторов [5,7], в зависимости от ориентации монокристаллов скольжение может сопровождаться образованием пачек следов скольжения, мезо- и макрополос деформации на поверхности кристалла. Склонность к образованию пачек следов скольжения зависит от ЭДУ. Наиболее интенсивно образование пачек следов скольжения идет в сплавах с низким значением ЭДУ. Формирование на поверхности кристалла выделенных выше структурных элементов рельефа задает периодический профиль поверхности, что обеспечивает формоизменение образца при приложении внешней нагрузки. Как показали наши исследования [7,9], периодический профиль поверхности эффективно способствует снижению неоднородности деформации. Это достигается следующими способами: 1) скольжением по параллельным плоскостям с периодическим чередованием величины сдвига; 2) согласованной деформацией в объеме при формировании мезо- и макрополос деформации; 3) образованием складчатой структуры на поверхности.

Образование складок в поверхностном слое, вероятно, связано с дислокационным скольжением. Сдвигу при меньших напряжениях способствует более низкая сдвиговая устойчивость поверхностного слоя [10]. В местах образования складок (в основном это области изгиба граней образца) действуют как сжимающие, так и растягивающие напряжения [11]. Они могут активировать или тормозить скольжение в локальных областях. Сложный характер кривизны способствует развитию различного типа складчатости.

Накоплению избыточной плотности дислокаций и разориентировок в локальных областях может способствовать заторможенный сдвиг или действие момента сил

на мезообласти. Последний случай, по всей видимости, реализуется на границе областей с разной схемой напряженного состояния [6,12].

#### 5. Заключение

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что первопричиной образования складчатой структуры является искривление граней образца. Места изгиба являются предпочтительными для формирования складчатой структуры. При этом степень изгиба образца в данном месте влияет на размер складок, а характер кривизны — на их морфологию.

На складкообразование также в значительной степени влияют схема напряженного состояния и кристаллография образца. В приторцевой зоне складка (наплыв) образуется всегда. Важной при рассмотрении кристаллографии сдвига является ориентация направлений сдвига относительно приложенной нагрузки и свободных поверхностей. При этом чем менее симметрична ориентация плоскостей сдвига относительно граней образца, тем более явно выражен процесс складкообразования.

Данные EBSD-анализа свидетельствуют о том, что процесс образования складок связан с накоплением избыточной плотности дислокаций одного знака и формированием разориентированных субструктур в приповерхностных слоях материала. Этому способствуют более высокие значения гомологической температуры деформации и величины энергии дефекта упаковки.

Кроме того, в работе показано, что поворот решетки может являться механизмом деформации наряду с октаэдрическим скольжением.

#### Список литературы

- [1] В.В. Губернаторов, Т.С. Сычева, Л.Р. Владимиров, В.С. Матвеева, А.И. Пятыхин, М.Б. Мельников. *Физ. мезомех.* **5**, 6, 95 (2002).
- [2] В.В. Губернаторов, Л.Р. Владимиров, Т.С. Сычева, Д.В. Долгих. *Физ. мезомех.* **4**, 5, 97 (2001).
- [3] В.В. Губернаторов, Б.К. Соколов, И.В. Гервасьева, Л.Р. Владимиров. *Физ. мезомех.* **2**, 1–2, 157 (1999).
- [4] В.В. Губернаторов, Б.К. Соколов, Л.Р. Владимиров, А.К. Сбитнев, И.В. Гервасьева. *ДАН* **364**, 4, 468 (1999).
- [5] Д.В. Лычагин. *Физ. мезомех.* **9**, 3, 103 (2006).
- [6] Д.В. Лычагин, Е.А. Алфёрова, В.А. Старенченко. *Физ. мезомех.* **13**, 3, 75 (2010).
- [7] Е.А. Алфёрова, А.Д. Лычагин, Д.В. Лычагин, В.А. Старенченко. *Фундаментальные проблемы современной материаловедения* **9**, 2, 218 (2012).
- [8] О.А. Кайбышев, Р.З. Валиев. *Границы зерен и свойства металлов. Металлургия, М.* (1987). 231 с.
- [9] Е.А. Alfurova, D.V. Lychagin. *Appl. Mech. Mater.* **379**, 66 (2013).
- [10] В.Е. Панин, А.В. Панин. *Физ. мезомех.* **8**, 5, 7 (2005).
- [11] С.И. Губкин. *Пластическая деформация металлов. Металлургиздат, М.* (1961). 376 с.
- [12] В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин. *Физ. мезомех.* **14**, 3, 7 (2011).