

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 539.379:538.911

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.014

ПОЛУЧЕНИЕ ФРАГМЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ МИКРО И НАНОУРОВНЯ В ЧИСТОЙ МЕДИ ПОСЛЕ ВОЛОЧЕНИЯ И РКУП

Наталья Владимировна Землякова^{1†}, Станислав Олегович Рогачев²

¹ Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН», ул. Белинского, 85, 603024, Нижний Новгород, Россия

² НИТУ «Московский институт стали и сплавов», Ленинский пр., 4, 119049, Москва, Россия

[†]serti222@ya.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8908-0091>

²csaap@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7769-7748>

Аннотация. В настоящее время представляет интерес возможность получения регламентированной субмикроструктуры меди методом равноканального углового прессования (РКУП). В работе показано изменение структуры субзерен чистой меди размером до 600 нм после интенсивной холодной пластической деформации. Цель работы – показать возможность получения микрофрагментов в регламентированной субструктуре меди на всех этапах холодной интенсивной пластической деформации. Для проведения работ был получен прутки технической чистой меди М1 диаметром 20 мм после холодной ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) деформации волочением (исходное состояние). Была проведена интенсивная пластическая деформация прутка методом РКУП по маршруту Vc за 4 и 8 проходов. Изображения субмикроструктуры и электронограмма образцов получены методом просвечивающей электронной микроскопии. В первичных субзернах, полученных после волочения, происходит сначала сдвиг с образованием деформационных дефектов в виде пакета нанодвойников, каждый толщиной 35 нм. Затем уже в объеме образца происходит аккомодационное скольжение, после чего пакеты нанодвойников разрушаются и образуются фрагменты округлой формы размером 100 нм. После четырех проходов РКУП в субзерне диаметром 500 нм были обнаружены фрагментированные микрополосы переориентации шириной от 70 нм и нанофрагменты шириной 20 нм. Отличие субструктуры меди, полученной в ходе интенсивной пластической деформации, состоит в том, что после четырех проходов РКУП присутствуют микрополосы переориентации, а после восьми проходов РКУП в границах и стыках субзерна образовались нанофрагменты диаметром от 35 нм. Микрополосы переориентации формировались под действием дисклинаций, расположенных в стыках и в субзеренных границах субзерна.

Ключевые слова: интенсивная холодная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, медь, субзерна, дефекты, дисклинации, полосы переориентации.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания России на фундаментальные научные исследования на 2021-2023 годы (тема № 0030-2021-0025).

Для цитирования: Землякова Н.В., Рогачев С.О. Получение фрагментированной структуры микро и наноуровня в чистой меди после волочения и РКУП // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 3. С. 406–413. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.014.

Original article

OBTAINING FRAGMENTED MICRO AND NANO LEVER STRUCTURE OF THE PURE COPPER AFTER DRAWING AND ECAP

Natalia V. Zemlyakova^{1†}, Stanislav O. Rogachev²

¹ Mechanical Engineering Research Institute, Branch of Federal Research Center, Institute of Applied Physics, The Russian Academy of Sciences, Belinsky Str., 85, Nizhny Novgorod, 603024, Russia

² NUST «Moscow Institute of Steel and Alloys», Leninsky Pr., 4, Moscow, 119049, Russia

[†]serti222@ya.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8908-0091>

²csaap@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7769-7748>

Abstract. At present, it is of interest to obtain the regulated copper submicrostructure after the equal-channel angular pressing (ECAP) method. The paper shows the change in the structure of subgrains of pure copper up to 600 nm in size after severe cold plastic deformation. The purpose of this work is to show the possibility of obtaining microfragments in a regulated copper substructure at all stages of cold severe plastic deformation. To carry out the study, a bar of commercially pure copper M1 with a diameter of 20 mm was obtained after cold ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) deformation by drawing (as delivered). Severe plastic deformation of the rod was carried out by the ECAP method along the route Bc through 4 and 8 passes. Images of the submicrostructure and electron diffraction patterns of the samples were obtained by transmission electron microscopy. In the primary subgrains obtained after drawing, shear first occurs with the formation of deformation defects in the form of a package of nanotwins, each 35 nm thick. Then, the accommodative slip occurs already in the bulk of the sample, after which the nanotwin packages are destroyed and rounded fragments 100 nm in size are formed. After four passes of ECAP, the fragmented reorientation microbands with a width of 70 nm and nanofragments with a width of 20 nm were found in a subgrain 500 nm in diameter. The difference between the copper substructure obtained during severe plastic deformation is that after four passes of ECAP, the reorientation microbands are present, and after eight passes of ECAP, nanofragments with a diameter of 35 nm or more are formed at the boundaries and joints of the subgrain. The reorientation microbands were formed under the action of disclinations located at the junctions and within the subgrain boundaries of the subgrain.

Keywords: severe cold plastic deformation, equal channel angular pressing, copper, subgrains, defects, disclinations, reorientation bands.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment of Russia for fundamental scientific research for 2021-2023 (subject No. 0030-2021-0025).

For citation: Zemlyakova, N. V. & Rogachev, S. O. (2023). Obtaining fragmented micro and nano lever structure of the pure copper after drawing and ECAP. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(3), 406–413. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.014.

Введение

Повысить прочность металлов можно за счет ультрамелкого размера структурных составляющих (0,2-1 мкм) и неравновесных границ. Для достижения этой цели применяют интенсивную пластическую деформацию [1-3]. Представляет интерес получение объемных поликристаллических материалов с субмикроструктурной структурой (50-200 нм) [4-18]. В настоящее время нет единого понимания схемы разбиения субзерна размером 500 нм на более мелкие фрагменты [3].

Компьютерные модели фрагментации показали, как на дефектных участках границ и стыков субзерен образуются новые субграницы. В качестве мезодефектов в модели представлены дисклинации и планарные дефекты [4]. Для получения новых субграниц требуется низкая энергия дефекта упаковки (ЭДУ) и малое количество систем скольжения материала [9]. При измельчении субзерен на мезоуровне большую роль играют механизмы ротационной и изгибной моды деформации [6].

Процесс фрагментации поликристаллов большими пластическими деформациями следующий: скольжение, образование стыковых дисклинаций, аккомодационное скольжение, образование оборванных дислокационных границ, окончательное образование самих фрагментов [1, 6].

Известно, что в металлах с низкой энергией дефекта упаковки, например, меди – затруднено поперечное переползание дислокаций, поэтому пластическая деформация проходит через образование переориентированных полос сдвига [1].

В работе [8] показано, что при больших деформациях, в металле с низкой ЭДУ при блокировке механизмов скольжения зарождаются полосы сброса «kink bands». Они имеют некристаллографическую природу, кристаллическая решетка внутри полос сильно развернута относительно прилегающих к ним областей. Эти полосы ориентированные под определенными углами к главным напряжениям, могут перерезать несколько зерен и имеют ширину порядка 300-500 нм. При пересечении «kink band» образуются мелкие равноосные фрагменты с неравновесными большеугловыми границами [8].

Теоретические исследования показывают, что незавершенные полосы переориентации образуются путем достройки диполя частичных дисклинаций дислокационными границами разного знака, и образуется незавершенная полоса переориентации [2].

При асимметричной схеме деформирования на границах, разделяющих два субзерна, формируются плоские скопления планарных дефектов. При сдвиге планарные мезодефекты

образуют ступеньки на межзеренной границе. При аккомодации от этих ступеней формируются полосы переориентации [4].

В настоящей работе показано, как в большом сечении (20 мм), в условиях жесткой холодной пластической деформации, без предварительного отжига после волочения получить регламентированную структуру меди. Рассмотрены детали получения микрофрагментов в субзерне 500 нм на каждом этапе деформации. Показана роль дефектов в формировании структуры меди после волочения и интенсивной холодной пластической деформации методом равноканального углового прессования (РКУП).

Результаты данной работы являются продолжением исследований предыдущих работ [19, 20].

Полученные в работе данные можно отнести к разработке новых технологий, пониманию схемы деления субзерен на фрагменты в ГЦК металле при сдвиговой деформации.

Материал и методика эксперимента

Был получен пруток из чистой меди М1 (99,95 %), диаметром 20 мм и длиной 150 мм в исходном крупнокристаллическом состоянии после деформации волочением с исходным размером зерна 200 мкм. Деформированные волочением образцы подвергали РКУП прохо-

ждением через канал пресса с прямым углом и с поворотом образца на 90 градусов после каждого прохода (маршрут *Вс*). Было проведено четыре и восемь проходов при комнатной температуре. РКУП проводили в МИСИС на вертикальном гидравлическом прессе марки RHP 250 с максимальным усилием 40 т.

Микроструктуру изучали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 (JEOL) в режимах светлого и темного поля на поперечных сечениях после волочения, четвертого и восьмого проходов РКУП. Для приготовления фольг из исследуемого материала вырезали пластины, которые механически шлифовали на наждачной бумаге до толщины 120-140 мкм и полировали с помощью специальных суспензий. Далее из полученных пластин вырезали диски диаметром 3 мм, которые подвергали струйной электрополировке на установке Struers Lectropol-5 с использованием электролита «метанол + азотная кислота». Измерение фрагментов субмикроструктуры проводили по ПЭМ изображениям методом секущих с определением условного диаметра d [21].

Результаты и их обсуждение

ПЭМ – изображения субмикроструктуры меди после волочения и РКУП представлены на рис.1-6.

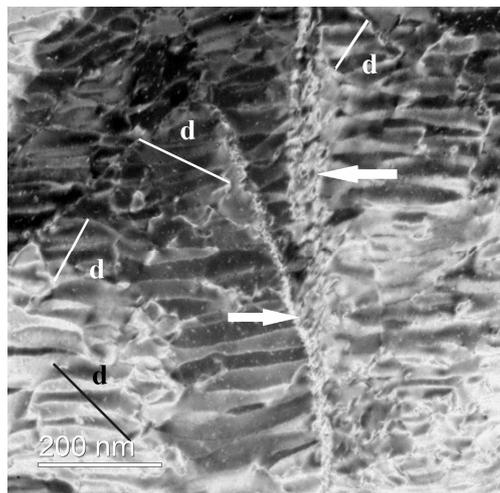


Рис.1. Структура субзерен (негатив) меди после волочения (ПЭМ): белые стрелки показывают границы субзерен – линзы, образованные фрагменты ($d = 150$ нм) внутри субзерен

Fig.1. Structure of subgrains (negative) of copper after drawing (TEM): white arrows show the boundaries of subgrains – lenses, formed fragments (150 nm) inside the subgrains

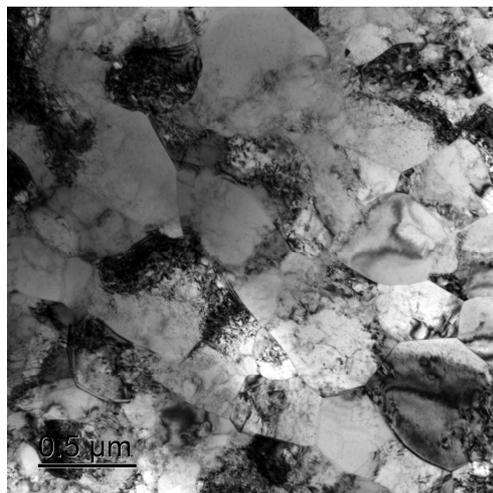


Рис.2. Структура субзерен меди после 4 проходов РКУП (ПЭМ): общий вид – полосы расположены под углом и состоят из субзерен: темные – дефектные, переходные, светлые – менее дефектные

Fig.2. Structure of subgrains of copper after 4 passes ECAP (TEM): general view – the stripes are located at an angle and consist of subgrains: dark - defective, transitional, and light – less defective

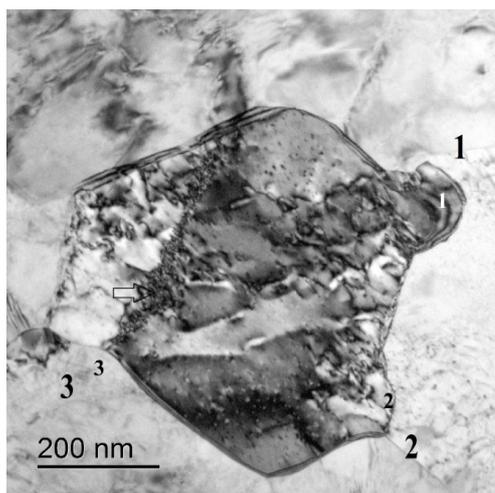


Рис.3. Структура субзерен меди после 4 проходов РКУП (ПЭМ): микрополосы, стыки границ субзерен 1–1, 2–2, 3–3, стрелкой показан дислокационный контур от стыка 3–3

Fig.3. Structure of subgrains of Cu after 4 passes ECAP (TEM): microbands, junctions of subgrain boundaries 1–1, 2–2, 3–3, the arrow shows the dislocation contour from junction 3–3

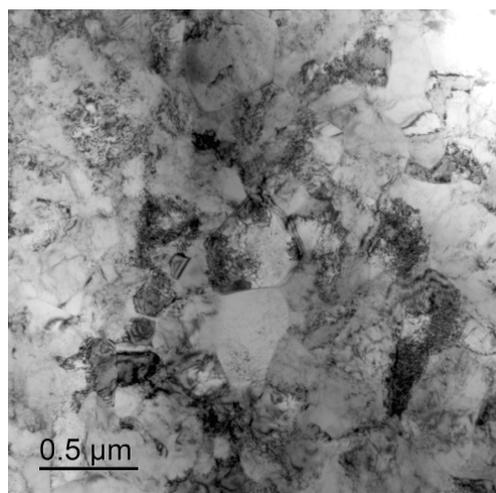


Рис.4. Структура субзерен меди после 8 проходов РКУП (ПЭМ), общий вид

Fig.4. Structure of subgrains of copper after 8 passes ECAP (TEM), general view

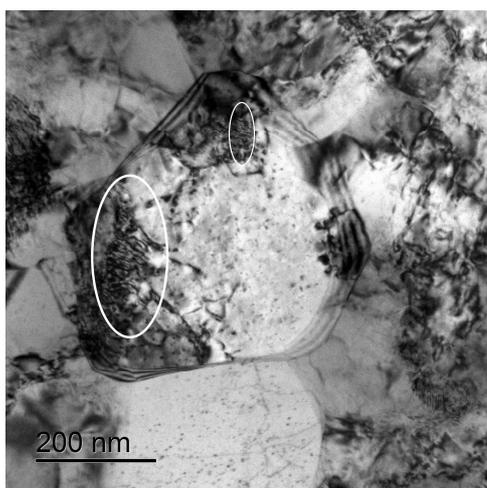


Рис.5. Структура субзерна меди размером 600 нм после 8 проходов РКУП (ПЭМ): в овалах дислокационные контуры, контуры напряжения по периметру, в области тройных стыков шириной 100–200 нм сформированы нанофрагменты $d = 35$ нм с дефектными границами

Fig.5. Structure of 600-nm subgrain of copper after 8 passes ECAP (TEM): dislocation contours in ovals, stress contours along the perimeter, in the region of triple junctions 100–200 nm wide, nanofragments $d = 35$ nm with defective boundaries are formed

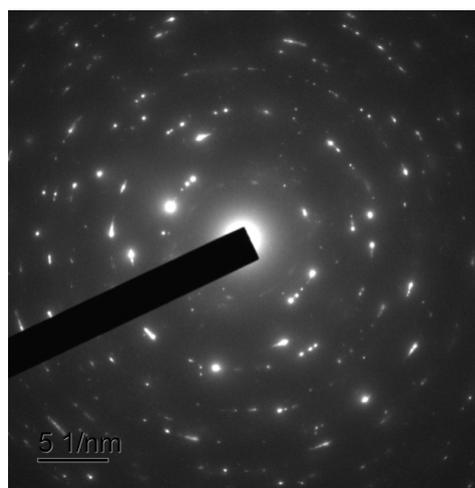


Рис.6. Электронограмма меди после 8 проходов РКУП: зеренно-субзеренная структура

Fig.6. SAED pattern of copper after 8 passes ECAP

Микроструктура меди после волочения представляет собой полосы – линзы (600×1200 нм) с лестницей из двойников деформации (рис.1). Образование двойников де-

формации подтверждает проблемы со скольжением в виде переползания дислокаций в поперечном направлении. Фрагментация субзерен начинается с границы (указана стрелкой), со-

стоящей из двойниковых дефектов упаковки – нанодвойникового зародыша [2]. Пластины двойников размером 35×200 нм расположены лестницей перпендикулярно границе субзерна – в направлении максимального сдвига. Аналогичная структура наблюдалась для магниевого сплава после РКУП за один проход [7].

В субзернах – линзах с двойниковыми пластинами видно, как при деформации произошло «перемальывание» этих пластин на фрагменты округлой формы $d = 100-150$ нм (рис.1). Получение подобной структуры при сдвиговой деформации приводится в работе [3].

После четырех проходов РКУП микроструктура меди представляет собой полосы деформации (светлого цвета) и переходные полосы (темного цвета) (рис.2). Фрагментация субзерен на мезоуровне определяется действием сдвиговой и ротационной мод деформации. Внутренние сдвиговые напряжения привели к появлению в полосовой деформационной структуре субзерна с неравновесными высокоугловыми границами (рис.3) [8].

На ПЭМ-изображении видно субзерно размером 600 нм правильной геометрической формы с расположенными внутри него полосами переориентации (рис.3). В центре субзерна расположен дислокационный жгут (белая стрелка рис.3). Контуры экстинкции по границе субзерна характерны для внутреннего напряженного состояния меди.

Известно, что большие внутренние напряжения возникают именно в месте сопряжения кристаллических решеток, то есть, в месте расположения стыков субзерен [1]. Дефекты в месте невязки кристаллических решеток уходят со стыка в объем зерна и образуют диполь частичных дисклинаций [18]. При высоких напряжениях границы дисклинаций переходят полосы переориентации, которые участвуют в делении субзерна на фрагменты.

После четырех проходов РКУП произошло разбиение субзерна $d = 600$ нм на микрополосовые фрагменты $d = 100$ нм и $d = 70$ нм и длиной до 400 нм. Границы микрополос имеют кривизну, что подтверждает наличие изгибной моды деформации [5]. В субзеренном стыке 2–2 дополнительно образовались полосы переориентации в виде трех нанополос шириной каждый по 20 нм и длиной 100 нм (рис.3). Разница в длине полос 100 нм и 400 нм очевидно, связана с уровнем напряжения в стыках субзерен. В работах [12] показано, что при большой кривизне решетки действие ротационной моды деформации приводит к образованию нанополос переориентации.

Полосы переориентации образовались в стыках границ субзерен под действием частичных дисклинаций [1, 4, 22, 23].

Интересно, что микрополосы имеют разное направление, различную длину от 100 нм до 400 нм и различную ширину от 20 нм до 70 нм. Это позволяет представить картину напряженного состояния субзерна. В нашем случае напряжения распределены неравномерно по межзеренным границам: в зоне 1–2 они были значительно больше, чем в зоне слева (рис.3).

Микроструктура меди после восьми проходов РКУП представлена на рис.4 и 5, а электронограмма на рис.6. Анализ полученных данных показал, что образована зеренно-субзеренная ультрамелкозернистая ($d = 250$ нм) полосчатая микроструктура.

Однако, при всей однородности полученной УМЗ структуре (рис.4), необходимо отметить некоторые моменты.

Во-первых, несмотря на то, что после восьми проходов РКУП в меди образована зеренно-субзеренная УМЗ структура, остались большие внутренние напряжения в виде:

- контуров экстинкции толщиной 70 нм на межзеренных границах субзерна 500 нм;
- толщинные экстинкционные контуры внутри субзерна: малый и большой (в овалах).

Во-вторых, процесс фрагментации не закончен до конца, так как появились новые фрагментированные зерна.

Рассмотрим подробнее разбиение субзерна $d = 500$ нм на фрагменты. Отметим, что субзерно имеет правильную геометрическую форму и высокоугловые границы субзерен (рис.5).

На ПЭМ микроструктуре (рис.5), можно видеть, что в угловых стыках (темного цвета) субзерна прошла фрагментация, с образованием нанофрагментов $d = 35$ нм с широкими (до 13 нм), рыхлыми границами, состоящими из дефектов. Подобная картина похожа на модель сдвига в кристалле, который привел к формированию квадрупольных клиновых дисклинаций [1].

В центре субзерна образовались сетка из выходов решеточных дислокаций, которые потенциально перейдут в полигонизованную структуру.

Заключение

В статье представлены экспериментальные результаты по разбиению субзерен меди $d = 500$ нм на микрофрагменты размерами в поперечнике от $d = 20$ нм до $d = 150$ нм после волочения, четырех и восьми проходов РКУП.

После волочения модель фрагментации с двойникованием заключается в расщеплении мезограниц и образовании однослойного дефекта упаковки двойников – зародыша микродвойниковой структуры [2]. Для получения многослойного двойника в каждом из параллельных слоев решетки сечения с дефектом упаковки, необходимо движение двойниковой дислокации [8]. На субзеренном уровне – это формирование лестницы деформационных двойников, которые затем разбиваются полосами сдвига в объеме образца с образованием фрагментов.

Показано, что после восьми проходов РКУП получены нанофрагменты ($d = 35$ нм), окруженные рыхлыми, широкими, дефектными границами.

Полученные экспериментальные данные по фрагментации субзерен меди после четырех и восьми проходов РКУП согласуются с данными работ Рыбина В.В., Сарафанова Г.Ф.

Список литературы

1. Золоторевский Н.Ю., Рыбин В.В. Фрагментация и текстурирование при деформации металлических материалов. Изд-во: СПбГУ, 2014. 207 с.
2. Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. Структура и свойства границ зерен. Нижний Новгород, ННГУ, 2012. 307 с.
3. Глезер А.М., Козлов Е.В., Конева Н.А. Основы пластической деформации наноструктурных материалов. М.: Физматлит, 2016. 360 с.
4. Сарафанов Г.Ф., Перевезенцев В.Н. Экранирование полей напряжений мезодефектов образованием ансамбля движущихся дислокаций и областей разориентации при пластическом деформировании металлов // Письма о материалах. 2011. Т. 1, № 1. С. 19–24.
5. Тюменцев А.Н., Дитенберг И.А. Нанодиполи частичных дисклинаций в зонах локализации упругих дисторсий // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 16, № 6. С. 81–86.
6. Константинова Т.Э. Эволюция дислокационной структуры металлических систем в условиях высоких давлений // Физика и техника высоких давлений. 2009. Т. 17, № 1. С. 7–30.
7. Скрябина Н.Э., Аптуков В.Н., Романов П.В. Влияние равноканального углового пресования на механические свойства и микроструктуру образцов магниевых сплавов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2014. № 3. С. 113–128.
8. Бейгельзимер Я.Е., Эфрос Б.М., Прокофьева О.В. Фрагментация структуры и разрушение металлических материалов при больших пластических деформациях: предпосылки к моделированию // Физика и техника высоких давлений 2004. Т. 14, № 3. С. 58–73.
9. Останина Т.В., Швейкин А.И., Трусов П.В. Измельчение зеренной структуры металлов и сплавов при интенсивном пластическом деформировании: экспериментальные данные и анализ механизмов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2020. № 2. С. 85–111.
10. Колбасников Н.Г. Теория обработки металлов давлением. Физические основы прочности и пластичности металлов. Изд-во: СПбГУ, 2004. 256 с.
11. Панин А.В., Сон А.А., Иванов Ю.Ф., Копылов В.И. Особенности локализации и стабильности пластической деформации субмикрорекристаллического армко-железа с полосовой фрагментированной субструктурой // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № 3. С. 5–16.
12. Козлов Э.В., Попова Н.А., Конева Н.А. Дислокационная структура и ее компоненты в стали мартенситного класса // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2015. Т. 58, № 1. С. 61–70.
13. Козлов Э.В., Тришкина Л.И., Попова Н.А., Конева Н.А. Место дислокационной физики в многоуровневом подходе к пластической деформации // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14, № 3. С. 95–110.
14. Kobaissy A.H., Ayoub G., Toth L.S. Continuum dislocation dynamics-based grain fragmentation modeling // Int. J. Plasticity. 2019. V. 114. P. 252–271.
15. Гуткин М.Ю., Ржавцев Е.А. Динамика формирования малоугловых границ наклона в металлах и сплавах при высоких скоростях нагружения // Физика твердого тела. 2015. Т. 57, Вып. 12. С. 2374–2385.
16. Полетаев Г.М., Новоселова Д.В., Ракитин Р.Ю., Семенов А.С. Моделирование формирования свободного объема в границах зерен и тройных стыках при кристаллизации никеля // Письма о материалах. 2020. Т. 10, № 3. С. 299–302.
17. Полетаев Г.М., Новоселова Д.В., Зоря И.В., Старостенков М.Д. Исследование формирования избыточного свободного объема в тройных стыках границ зерен при кристаллизации на примере никеля // Физика твердого тела. 2018. Т. 60, Вып. 5. С. 846–850.

18. Сарафанов Г.Ф., Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. Основы кинетической теории образования разориентированных структур при пластическом деформировании металлов. Н. Новгород: Литера, 2011. 359 с.

19. Землякова Н.В., Рогачев С.О.. Аккомодация структуры и механических свойств чистой меди в процессе интенсивной пластической деформации // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16, № 1. С. 131–136.

20. Rogachev S.O., Zemlyakova N.V. Structural accommodation by twinning of copper during severe plastic deformation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 709. P. 033001.

21. ASTM E1382-97. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semi-automatic and Automatic Image Analysis. ASTM International West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

22. Рыбин В.В., Перевезенцев В.Н., Свирина Ю.В. Модель формирования оборванных дислокационных границ на стыковых дисклинациях // *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86, № 6. С. 100–105.

23. Рыбин В.В., Перевезенцев В.Н., Свирина Ю.В. Физическая модель начальных стадий фрагментации поликристаллов в процессе развитой пластической деформации. // *Физика металлов и материаловедение*. 2017. Т. 118, № 12. С. 999–1003.

Информация об авторах

Н. В. Землякова – научный сотрудник Института проблем машиностроения РАН – филиала Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН».

С. О. Рогачев – кандидат технических наук, доцент НИТУ «Московский институт стали и сплавов».

References

1. Zolotarevsky, N. Yu. & Rybin, V. V. (2014). Fragmentation and texturing during deformation of metallic materials, St. Petersburg State University. P. 207. (In Russ.).

2. Perevezentsev, V. & Rybin, V. (2012). The structure and properties of grain boundaries, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod University press. P. 307. (In Russ.).

3. Glezer, A. M., Kozlov, E. V. & Koneva, N. A. (2016). Fundamentals of plastic deformation of nanostructured materials, Moscow, Fizmatlit. P. 360. (In Russ.).

4. Sarafanov G. F. & Perevezentsev V. N. (2011). Screening of mesodefekt stress fields by ensemble of moving dislocations and misorientation regions formation during plastic deformation of metals. *Letters on Materials*, 1(1), 19–24. (In Russ.).

5. Tyumentsev, A. N. & Ditenberg, I. A. (2015). Nanodipoles of partial disclinations in the region of localized elastic distortions. *Physical Mesomechanics*, 18, 158–162. (In Russ.).

6. Konstantinova, T. E. (2009). Evolution of the dislocation structure of metallic systems under conditions of high pressures. *Physics and technology of high pressures*, 17(1), 7–30. (In Russ.).

7. Skryabina, N. E., Aptukov, V. N., Romanov, P. V. & Fruchart, D. (2014). Impact of equal-channel angular pressing on mechanical behavior and microstructure of magnesium alloys. *PNRPU Mechanics Bulletin*, (3), 113–128. (In Russ.).

8. Beigelzimer, Ya. E., Efros, B. M. & Prokofieva, O. V. (2004). Fragmentation of the structure and destruction of metallic materials under severe plastic deformations: prerequisites for modeling. *Physics and technology of high pressures*, 14(3), 58–73. (In Russ.).

9. Ostanina, T. V., Shveykin, A. I. & Trusov, P. V. (2020). The grain structure refinement of metals and alloys under severe plastic deformation: experimental data and analysis of mechanisms. *PNRPU Mechanics Bulletin*, (2), 85–111. (In Russ.).

10. Kolbasnikov, N. G. (2004). Theory of metal forming. Physical foundations of strength and plasticity of metals, St. Petersburg State University. P. 256. (In Russ.).

11. Panin, A. V., Son, A. A., Ivanov, Yu. F. & Kopylov, V. I. (2004). Features of localization and stage character of plastic deformation of submicrocrystalline armco-iron with the fragmented band substructure. *Physical Mesomechanics*, 7(3), 5–16. (In Russ.).

12. Kozlov, E. V., Popova, N. A. & Koneva, N. A. (2015). Dislocation structure and its components in steel of martensite class. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 58(1), 61-70. (In Russ.).

13. Kozlov, E. V., Trishkina, L. I., Popova, N. A. & Koneva, N. A. (2011). Dislocation physics in a multilevel approach to plastic deformation.

- Physical Mesomechanics*, 14(3), 95–110. (In Russ.).
14. Kobaissy, A. H., Ayoub, G. & Toth, L. S. (2019). Continuum dislocation dynamics-based grain fragmentation modeling. *Int. J. Plasticity*, 114, 252–271. (In Russ.).
15. Gutkin, M. Yu. & Rzhavtsev, E. A. (2015). Dynamics of formation of low-angle tilt boundaries in metals and alloys at high loading rates. *Physics of the Solid State*, 57(12), 2447–2457. (In Russ.).
16. Poletaev, G. M., Novoselova, D. V., Rakitin, R. Yu. & Semenov, A. S. (2020). Modeling the formation of free volume at grain boundaries and triple junctions during nickel crystallization. *Letters on Materials*, 10(3), 299–302. (In Russ.).
17. Poletaev, G. M., Novoselova, D. V., Zorya, I. V. & Starostenkov, M. D. (2018). Formation of the Excess Free Volume in Triple Junctions during Nickel Crystallization. *Physics of the Solid State*, 60(5), 847–851. (In Russ.).
18. Sarafanov, G. F., Perevezentsev, V. N. & Rybin, V. V. (2011). Fundamentals of the kinetic theory of the formation of misoriented structures during plastic deformation of metals, Nizhny Novgorod, Litera. P. 359. (In Russ.).
19. Zemlyakova, N. V. & Rogachev, S. O. (2019). Accommodation of structure and mechanical properties of pure copper during severe plastic deformation. *Fundamental'nye problemy sovremennoogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 16(1), 131–136. (In Russ.).
20. Rogachev, S. O. & Zemlyakova, N. V. (2020). Structural accommodation by twinning of copper during severe plastic deformation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 709, 033001.
21. ASTM E1382-97. Standard Test Methods for Determining the Median Particle Size Using Semi-automatic and Automatic Image Analysis. ASTM International West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
22. Rybin, V. V., Perevezentsev, V. N. & Svirina, Yu. V. (2016). Model of formation of dangling dislocation boundaries on butt disclinations. *Journal of technical physics*, 86(6), 100–105. (In Russ.).
23. Rybin, V. V., Perevezentsev, V. N. & Svirina, Yu. V. (2017). A Physical Model for the Initial Stages of the Fragmentation of Polycrystals in the Process of Developed Plastic Deformation. *Physics of Metals and Metallography*, 118(12), 1171–1175. (In Russ.).

Information about the authors

N. V. Zemlyakova – Researcher, Mechanical Engineering Research Institute, Branch of Federal Research Center, Institute of Applied Physics, The Russian Academy of Sciences.

S. O. Rogachev – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, NUST «Moscow Institute of Steel and Alloys».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; одобрена после рецензирования 03.07.2023; принята к публикации 17.07.2023.

The article was received by the editorial board on 21 June 23; approved after reviewing 03 July 23; accepted for publication 17 July 23.