

УДК 539.89

DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-2-220-226

ФОРМА И РАЗМЕРЫ ФРАГМЕНТИРОВАННЫХ ПОЛОС ПОСЛЕ ХОЛОДНЫХ ВЫТЯЖКИ И ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕДНОГО ПРУТКА*

© 2021 г.

Землякова Н.В.¹, Рогачев С.О.²

¹Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН»,
Нижний Новгород, Российская Федерация

²Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",
Москва, Российская Федерация

serti222@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.02.2021

Экспериментальными методами изучено измельчение структуры технически чистой меди марки М1 после двояной холодной (при комнатной температуре) пластической деформации волочением и последующей интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования. Представлены результаты измерения структурных составляющих, полученных на шлифах и фольгах, вырезанных из поперечного сечения образцов диаметром 20 мм, после четырех и восьми проходов через канал прессы с поворотом на 90° после каждого прохода (маршрут *Вс*). Для изучения структуры использован просвечивающий электронный микроскоп. Для сравнения изменений в микроструктуре на мезоуровне (менее 3 мкм) использовались данные, полученные ранее при исследовании образцов меди на сканирующем электронном микроскопе. Показано, что после четырех проходов и восьми проходов образовались деформационные полосы-фрагменты, которые чередуются с переходными полосами-фрагментами с дислокационной структурой. После восьми проходов размер среднего фрагмента составил около 300 нм. В результате пересечения полос сдвига за восемь проходов сформированы зоны в форме ромба (1,5 × 1,5 мкм), в которых фрагментированные деформационные полосы с меньшим количеством дислокаций окружены переходными дислокационными полосами и фрагментами с дислокациями. На макроуровне структура меди, полученная после четырех проходов, может иметь анизотропию механических свойств, а после восьми проходов микроструктура полос уменьшается. Представленные в статье численные характеристики структурных составляющих меди после холодной интенсивной пластической деформации позволяют понять схему измельчения структуры на мезоуровне.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, чистая медь, полосы-фрагменты.

* Выполнено в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021–2023 гг. по теме № 0030-2021-0025.

Введение

Структура металла после интенсивной пластической деформации (ИПД) зависит от многих факторов: интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) или равноканального углового прессования (РКУП), температуры деформирования, выбора материала, предварительной термической обработки образцов, площади его сечения, маршрута прохождения через канал пресса, количества проходов [1–20]. Метод РКУП применяют для получения объемных образцов. Чтобы получить максимальную прочность для меди, достаточно провести 2 прохода РКУП, недостатком можно считать неоднородность получаемой структуры. После 4 проходов РКУП (маршрут *Bc*) возможно получить полосовую фрагментированную структуру [11]. Известно, что полосовая структура приводит к анизотропии механических свойств. Такая структура, безусловно, востребована, но не всегда желательна [12]. Важно получить более однородную структуру в больших сечениях образцов. Схема измельчения структуры при ИПД также важна. В публикациях [4, 6, 7, 13] представлены схема измельчения полос в структуре Fe после 4 проходов РКУП по маршруту *Bc* и схема измельчения зерна. На первой схеме представлены равновеликие полосы, которые постепенно поворачиваются, образуя одинаковые по размерам фрагменты. На второй схеме показано полосовое измельчение зерна аустенита. На практике картина измельчения полос имеет отличия от приведенных схем. Так, после холодной прокатки никеля со степенью деформации 4,5 получены полосы разной длины с неоднородно фрагментированной структурой [4]. В настоящее время остаются вопросы по схеме измельчения структуры после большой пластической деформации и, в частности, после 8 проходов РКУП по маршруту *Bc*. Желательно в модели измельчения структуры (зерна) привести какие-то численные характеристики, например размеры фрагментированных полос. Настоящая статья является продолжением исследований, представленных в [9, 10], в ней приводятся результаты изучения микроструктуры меди после жесткой холодной ИПД. Исследование проводилось в отсутствие стабилизирующей термической обработки после волочения с целью однородного деформирования для образцов большого сечения (20 мм). Приведены размеры полос после 4 и 8 проходов РКУП; рассмотрена схема измельчения структуры меди после 4 и 8 проходов РКУП по маршруту *Bc*.

Материалы и методика

Для исследования был получен пруток чистой меди (99,97%) диаметром 20 мм и длиной 150 мм. ИПД методом РКУП проводили на вертикальном гидравлическом прессе марки RHP 250 с максимальным усилием 40 т в течение 8 проходов по маршруту *Bc* при комнатной температуре. Структуру меди исследовали в поперечном сечении образцов после 4 и 8 проходов РКУП при температуре $T = 20$ °С с помощью электронного просвечивающего микроскопа (ПЭМ) JEM-2100 (JEOL).

Ход работы и обсуждение результатов

На рис. 1 представлена микроструктура меди, наблюдаемая с помощью ПЭМ (ПЭМ-микроструктура), после 4 и 8 проходов РКУП.

После 4 проходов РКУП на рис. 1а видно чередование переходных полос (ПП) и деформационных полос (ДП). Подобное расположение полос с неравномерной фрагментацией было получено для α -Fe после 4 проходов РКУП холодной дефор-

мации [11]. Причины малой длины полос несколько: во-первых, это пересечение волнистых линий скольжения между собой; во-вторых, влияние сдвиговой деформации, о чем свидетельствует ступенька в 200 нм между полосами №1 и №2 на рис. 1а. Прохождение полосы сдвига шириной 700 нм становится подтверждением образования субзерна из трех полосовых фрагментов с цифрой 1 в среднем из них (см. рис. 1а в овале). После 8 проходов РКУП остались полосы-фрагменты, средний размер фрагмента составил 300 нм. Можно выделить структуру в зоне ромба размером 1,5 × 1,5 мкм. На рис. 1б видно, что ПП расположены по периметру ромба, а в центре ромба расположились ДП белого цвета с меньшим количеством дислокаций. Подобная структура получена при пересечении полос сдвига в сплаве Inconel 718 после ИПДК со степенью деформации 3,5 при комнатной температуре [4]. Зная размер ромбов, можно рассчитать желаемое сечение детали с достаточно однородной структурой.

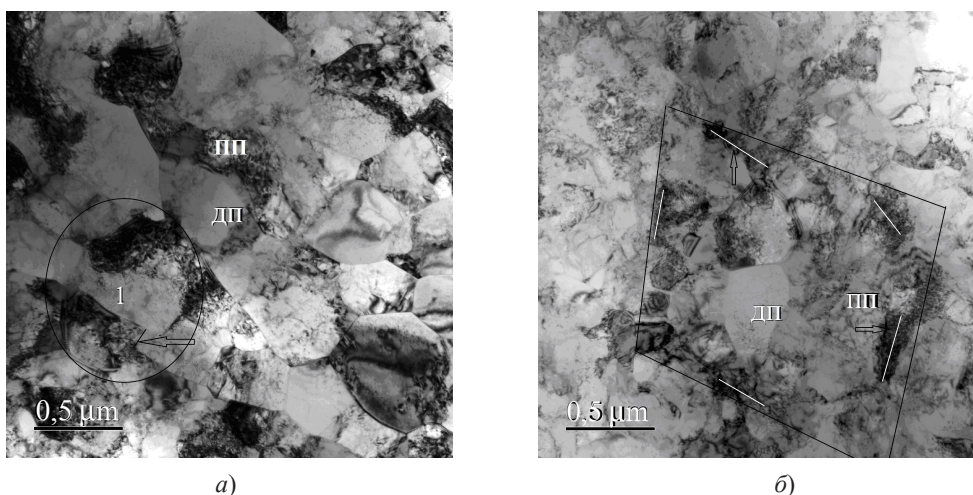


Рис. 1. ПЭМ-микроструктура меди после 4 проходов (а) и 8 проходов (б) РКУП

Наблюдаемая с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) микроструктура меди (СЭМ-микроструктура) после 8 проходов РКУП представлена на рис. 2 [9].

Видны светлые участки, которые состоят из фрагментов без дислокаций, и фрагменты с огранкой темного цвета с дислокациями размером 300 нм. Распределение зон – ромбов по сечению – было обнаружено ранее при изучении макроструктуры меди [9].

Сравнивая структуру меди, полученную после четырех и восьми проходов РКУП (см. рис. 1б и рис. 2), можно видеть, что общее количество субзерен с дислокациями (темного цвета) увеличилось незначительно, но увеличилась общая протяженность неравновесных границ субзерен. Фото микроструктуры меди, представленное на рис. 2, публикуется впервые.

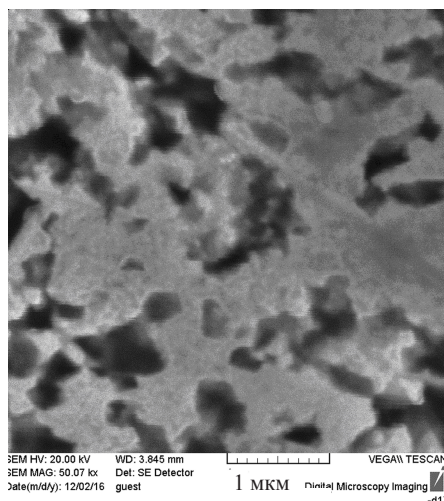


Рис. 2. СЭМ-микроструктура меди после 8 проходов РКУП

Заключение

В результате проведенных исследований выявлено измельчение структуры меди после 4 и 8 проходов РКУП. Отмечено, что полосовая структура в меди, полученная после 4 проходов, частично сохраняется после 8 проходов РКУП. Полосы имеют разную протяженность и разное количество дислокаций, содержание которых после 8 проходов увеличивается незначительно, однако растет суммарная протяженность неравновесных границ субзерен, поэтому прочность материала не изменяется, как показано в предыдущих работах.

Список литературы

1. Глезер А.М., Козлов Э.В., Конева Н.А. *Основы пластической деформации наноструктурных материалов*. М.: Физматлит, 2016. 304 с.
2. Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. *Структура и свойства границ зерен*. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2012. 307 с.
3. Рыбин В.В. *Большие пластические деформации и разрушение металлов*. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
4. Утяшев Ф.З. *Современные методы интенсивной пластической деформации*. Уфа: УГАТУ, 2008. 313 с.
5. Конькова Т.Н., Миронов С.Ю., Корзников А.В. Криогенная деформация меди. *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки*. 2009. №2(19). С. 280–283.
6. Рыбальченко О.В. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру, механические и служебные свойства стали 08X18H10T: *Дисс... канд. техн. наук*. Москва, 2014. 150 с.
7. Константинова Т.Е. Эволюция дислокационной структуры металлических систем в условиях высоких давлений. *Физика и техника высоких давлений*. 2009. Т. 19. №1. С. 7–30.
8. Xu C., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G. The deformation characteristics of pure aluminum processed by equal-channel angular pressing. In: *Nanostructured Materials by High-Pressure Severe Plastic Deformation*. Eds. Y.T. Zhu, V. Varyukhin. Dordrecht: Springer, 2006. P. 201–208. DOI: 10.1007/1-4020-3923-9.
9. 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. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2019.01.019.

10. Rogachev S.O., Zemlyakova N.V. Structural transformation of copper during severe plastic deformation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 709. Iss. 3. P. 033001-1 – 033001-4.
11. Dobatkin S.V., Kopylov V.I., Pippan R., Vasil'eva O.V. Formation of high-angle grain boundaries in iron upon cold deformation by equal-channel angular pressing. *Materials Science Forum*. 2004. Vols. 467–470. P. 1277–1282. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.467-470.1277>.
12. Hughes D.A., Hansen N. Microstructure and strength of nickel at large strains. *Acta Materialia*. 2000. Vol. 48. Iss. 11. P. 2985–3004. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00082-3.
13. Останина Т.В., Швейкин А.И., Трусов П.В. Измельчение зеренной структуры металлов и сплавов при интенсивном пластическом деформировании: экспериментальные данные и анализ механизмов. *ПНИПУ. Механика*. 2020. Вып. 2. С. 85–111. DOI: 10.15593/pern.mech/2020.2.08.
14. Chen M.-S., Zou Z.-H., Lin Y.C., Li H.-B., Wang G.-Q., Ma Y.-Y. Microstructural evolution and grain refinement mechanisms of a Ni-based superalloy during a two-stage annealing treatment. *Materials Characterization*. 2019. Vol. 151. P. 445–456. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.03.037.
15. Toth L.S., Gu C. Ultrafine-grain metals by severe plastic deformation. *Materials Characterization*. 2014. Vol. 92. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.02.003.
16. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*. 2006. Vol. 51. Iss. 7. P. 881–981. DOI:10.1016/j.pmatsci.2006.02.003.
17. Matsutani R., Nakada N., Onaka S. Increase in total elongation caused by pure shear deformation in ultra-fine-grained Cu processed by equal-channel angular pressing. *Metals*. 2020. Vol. 10. No 5. P. 654–658. DOI: 10.3390/met10050654.
18. Sabirov I., Estrin Yu., Barnettab M.R., Timokhina I., Hodgson P.D. Tensile deformation of an ultrafine-grained aluminium alloy: Micro shear banding and grain boundary sliding. *Acta Materialia*. 2008. Vol. 56. Iss. 10. P. 2223–2230. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.01.020>.
19. Zhilyaev A.P., Oh-ishi K., Raab G.I., McNelley T.R. Influence of processing parameters on texture and microstructure in aluminum after ECAP. *Materials Science Forum*. 2006. Vol. 503-504. P. 65–70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.503-504.65.
20. Paul H., Morawiec A., Bouzy E., Fundenberger J.-J., Piatkowski A. Shear banding in twinned structure of copper deformed at 77 K. *Journal of Microscopy*. 2006. Vol. 223. Iss. 3. P. 256–259. DOI: 10.1111/j.1365-2818.2006.01634.x.

References

1. Glezer A.M., Kozlov E.V., Koneva N.A. *Osnovy plasticheskoy deformatsii nanostrukturnykh materialov [Fundamentals of Plastic Deformation of Nanostructured Materials]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2016. 360 p. (In Russian).
2. Perevezentsev V.N., Rybin V.V. *Struktura i svoystva granits zeren [Structure and Properties of Grain Boundaries]*. Nizhny Novgorod. NNGU Publ. 2012. 307 p. (In Russian).
3. Rybin V.V. *Bolshie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov [Large Plastic Deformation and Destruction of Metals]*. Moscow. Metallurgiya Publ. 1986. 224 p. (In Russian).
4. Utyashev F.Z. *Sovremennye metody intensivnoy plasticheskoy deformatsii [Modern Methods of Severe Plastic Deformation]*. Ufa. UGATU Publ. 2008. 313 p. (In Russian).
5. Konkova T.N., Mironov S.Yu., Korznikov A.V. Kriogennaya deformatsiya medi [Copper cryogenic deformation]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki [Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences]*. 2009. No 2(19). P. 280–283 (In Russian).
6. Rybalchenko O.V. Vliyaniye intensivnoy plasticheskoy deformatsii na strukturu, mekhanicheskie i sluzhebnyye svoystva stali 08Kh18N10T [Influence of severe plastic deformation on the structure, mechanical and service properties of 08X18N10T steel]. *Dis... kand. tekhn. nauk [Cand. Sci. (Engineering). Dissertation]*. Moscow. 2014. 150 p. (In Russian).
7. Konstantinova T. Evolyutsiya dislokatsionnoy struktury metallicheskih sistem v usloviyakh vysokikh davleniy [Dislocation structure evolution in metal systems under high pressure]. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy [Physics and Technology of High Pressures]*. 2009. Vol. 19. No 1. P. 7–30] (In Russian).

8. Xu C., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G. The deformation characteristics of pure aluminum processed by equal-channel angular pressing. In: *Nanostructured Materials by High-Pressure Severe Plastic Deformation*. Eds. Y.T. Zhu, V. Varyukhin. Dordrecht. Springer. 2006. P. 201–208. DOI: 10.1007/1-4020-3923-9.
9. Zemlyakova N.V., Rogachev S.O. Akkomodatsiya struktury i mekhanicheskikh svoystv chisty medi v protsesse intensivnoy plasticheskoy deformatsii [Accommodation of structure and mechanical properties of pure copper during severe plastic deformation]. *Fundamentalnye problemy sovremennoy materialovedeniya* [Basic Problems of Material Science]. 2019. Vol. 16. No 1. P. 131–136. (In Russian).
10. Rogachev S.O., Zemlyakova N.V. Structural transformation of copper during severe plastic deformation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 709. Iss. 3. P. 033001-1–033001-4.
11. Dobatkin S.V., Kopylov V.I., Pippan R., Vasil'eva O.V. Formation of high-angle grain boundaries in iron upon cold deformation by equal-channel angular pressing. *Materials Science Forum*. 2004. Vols. 467–470. P. 1277–1282. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.467-470.1277>.
12. Hughes D.A., Hansen N. Microstructure and strength of nickel at large strains. *Acta Materialia*. 2000. Vol. 48. Iss. 11. P. 2985–3004. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00082-3.
13. Ostanina T.V., Shveykin A.I., Trusov P.V. Izmelchenie zerennoy struktury metallov i splavov pri intensivnom plasticheskom deformirovanii: eksperimentalnye dannye i analiz mekhanizmov [The grain structure refinement of metals and alloys under severe plastic deformation: experimental data and analysis of mechanisms]. *PNIPU. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin]. 2020. Iss. 2. P. 85–111 (In Russian).
14. Chen M.-S., Zou Z.-H., Lin Y.C., Li H.-B., Wang G.-Q., Ma Y.-Y. Microstructural evolution and grain refinement mechanisms of a Ni-based superalloy during a two-stage annealing treatment. *Materials Characterization*. 2019. Vol. 151. P. 445–456. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.03.037.
15. Toth L.S., Gu C. Ultrafine-grain metals by severe plastic deformation. *Materials Characterization*. 2014. Vol. 92. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.02.003.
16. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*. 2006. Vol. 51. Iss. 7. P. 881–981. DOI:10.1016/j.pmatsci.2006.02.003.
17. Matsutani R., Nakada N., Onaka S. Increase in total elongation caused by pure shear deformation in ultra-fine-grained Cu processed by equal-channel angular pressing. *Metals*. 2020. Vol. 10. No 5. P. 654–658. DOI: 10.3390/met10050654.
18. Sabirov I., Estrin Yu., Barnett M.R., Timokhina I., Hodgson P.D. Tensile deformation of an ultrafine-grained aluminium alloy: Micro shear banding and grain boundary sliding. *Acta Mater*. 2008. Vol. 56. Iss. 10. P. 2223–2230. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.01.020>.
19. Zhilyaev A.P., Oh-ishi K., Raab G.I., McNelley T.R. Influence of processing parameters on texture and microstructure in aluminum after ECAP. *Materials Science Forum*. 2006. Vol. 503-504. P. 65–70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.503-504.65.
20. Paul H., Morawiec A., Bouzy E., Fundenberger J.-J., Piatkowski A. Shear banding in twinned structure of copper deformed at 77 K. *Journal of Microscopy*. 2006. Vol. 223. Iss. 3. P. 256–259. DOI: 10.1111/j.1365-2818.2006.01634.x.

SHAPE AND DIMENSIONS OF FRAGMENTED BANDS AFTER COLD DRAWING AND INTENSE PLASTIC DEFORMATION OF THE COPPER

Zemlyakova N.V.¹, Rogachev S.O.²

¹*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences – Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the RAS”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*The National University of Science and Technology “MISIS”,
Moscow, Russian Federation*

In this work, experimental methods were used to study the refinement of the structure of commercially pure copper (grade M 1) after double cold (at room temperature) plastic deformation by drawing and subsequent severe plastic deformation by equal channel angular pressing. The paper presents the results of measuring the structural components obtained on thin sections and foils cut from the cross-section of samples with a diameter of 20 mm after four and eight passes through the press channel with a 90° rotation after each pass (route *Bc*). A transmission electron microscope was used to study the structure. To compare changes in the microstructure at the meso-level (less than 3 μm), we used the data obtained earlier in the study of copper samples using a scanning electron microscope. It is shown that after 4 passes and 8 passes, the deformation bands are formed – fragments (from 0,6 μm in length), which alternate with transition bands – fragments with a dislocation structure. After 8 passes, the average size of the fragment was about 300 nm. As a result of crossing the shear bands in eight passes, diamond-shaped zones (1,5 × 1,5 μm) was formed, in which fragmented deformation bands with less dislocation was surrounded by transition dislocation bands and fragments with dislocations. At the macro level, the copper structure obtained after 4 passes can have anisotropy of mechanical properties. The numerical characteristics of the structural components of copper after severe cold plastic deformation presented in the article make it possible to understand the structure refinement scheme at the mesoscale.

Keywords: severe plastic deformation, pure copper, stripes-fragments.