DOI: 10.18411/vntr2024-173-1

УДК 669.15

ОСОБЕННОСТИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕДИ В ПРОЦЕССЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

© Станислав Олегович Рогачев[1], Наталья Владимировна Землякова[2]
[1] Национальный – исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия
csaap@mail.ru
[2]Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПМ РАН), Нижний Новгород, Россия
serti222@ya.ru

Аннотация. *В работе методами просвечивающей электронной и оптической микроскопии изучали особенности рекристаллизации меди в процессе интенсивной пластической деформации при комнатной температуре. Использовался метод равноканального углового прессования по маршруту Вс с поворотом на 90 градусов после каждого прохода. Микроструктурный анализ проводился после 4, 6, 8 прохода РКУП. Показано, появление зародыша динамической рекристаллизации происходит в полосах деформации. Переход к мелкозернистой структуре возможен после динамической рекристаллизации и полигонизации. При выраженном изгибе деформационных полос образуется геометрически необходимое количество дислокаций для того, чтобы прошла динамическая полигонизация структуры.*

Ключевые слова: *медь, интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, зародыш рекристаллизации.*

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2024-2026 гг.(FFUF -2024-0031, № НИОКТР 1023032800130-3-2.3.2).

FEATURES OF COPPER RECRYSTALLIZATION DURING SEVERE PLASTIC DEFORMATION AT ROOM TEMPERATURE

© Stanislav Rogachev[1], Natalia Zemlyakova[2]
[1] National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia
csaap@mail.ru
[2] Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Science – Branch of Federal Research Center «A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences», Nizhny Novgorod, Russian Federation
serti222@ya.ru

Abstract. *The features of recrystallization of copper (20 mm in diameter rod) after severe plastic deformation using the equal-channel angular pressing method through route Bc and 4, 6, 8 passes ECAP of has been revealed. After the severe plastic deformation at room temperaturedynamic recrystallization nuclei are observed in the deformation bands. The transition to a fine-grained structure occurs after dynamic recrystallization and polygonization. With stable polygonization, the DR mechanism becomes "geometric."*
Keywords: *copper, severe plastic deformation, equal-channel angular pressing, recrystallization nucleus.*

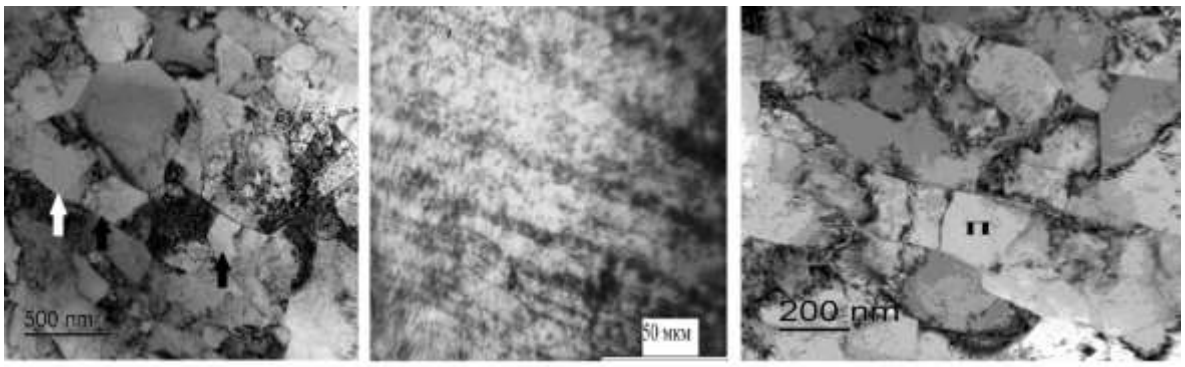
Acknowledgements. *The work was carried out within the state assignment to IAP RAS for fundamental scientific research for 2024-2026 (topic FFUF -2024-0031, No 1023032800130-3-2.3.2).*

Введение. Для создания материала с новыми физическими свойствами и ультрамелкозернистой структурой можно использовать интенсивную пластическую деформацию методом равноканального углового прессования (РКУП). Преобразование исходной микроструктуры в процессе РКУП имеют ряд особенностей, включая циклический характер структурно – фазовых превращений и низкотемпературную динамическую рекристаллизацию [1]. Начальная стадия ДР - динамическая полигонизация при больших степенях деформации приводит к формированию в объеме исходных (деформированных) зерен дислокационных скоплений («стенок»), окаймляющих почти бездислокационные субзерна («ячейки»). Начало динамической рекристаллизации определяется совместным действием нескольких факторов, прежде всего, степенью деформации и температурой, которые соответственно задают критическую плотность дислокаций и диффузионную активность материала [2]. В крупнокристаллическом материале при истинной степени деформации (e > 2) начало ДР наблюдают при температуре рекристаллизации 0,2 – 0,35Тпл. [2]. Этот интервал температур относят к теплой деформации. В процессе *теплой деформации* термический возврат всегда неполный, т. е. число вновь образующихся дислокаций здесь больше, чем число аннигилирующих. Из литературы известно, что после воздействия интенсивной пластической деформации температура начала ДР меди изменяется от Т = 270°С для крупного зерна (КЗ) до Т = 180°С до ультрамелкозернистого (УМЗ) [3, 4]. Нарастающая степень деформации во время РКУП позволяет создать условие для регулярного повышения плотности дислокаций и их диффузионной активности, поэтому деформационное упрочнение материала проходит при любой степени деформации вплоть до разрушения. Механизмы ДР также различны. Появление новых зерен по границам исходных деформированных происходит по Бейли – Хирша, внутризеренное зарождение через коалесценцию субзерен в результате механизма динамической полигонизации, которая проходит по Кану – Бюргерсу. После больших деформаций полигонизация, как правило, является начальной стадией рекристаллизации. Существует механизм ДР, который называют «геометрическим», когда в результате устойчивой полигонизации рекристаллизация идти не может. Таким образом, начало рекристаллизации может проходить в полосах деформации. Если при очень большой степени деформации размер субзерна становится равным размеру исходного зерна, то формируется мелкозернистая структура, где размер зерна равен размеру субзерна [3]. Подтверждением прошедшей ДР наличие деформационной субструктуры, искаженные двойники отжига, повышенная плотность дислокаций [3, 5 – 12]. Обычно, в

работах предлагается модель ДР для горячей деформации. Особенности характерной структурной ДР при холодной интенсивной деформации описаны недостаточно полно. Цель работы: выявить особенности динамической рекристаллизации меди при комнатной температуре в процессе РКУП.

Материалы и методика. Для исследования был получен пруток меди М1 диаметром 20мм, в исходном крупнокристаллическом состоянии и после 4, 6 и 8 проходов РКУП по маршруту *Вс* при комнатной температуре. В крупнокристаллическом состоянии микроструктура меди представляет двойниковые зерна размером 200×100 мкм.
Микроструктуру изучали на поперечных шлифах с помощью металлографического оптического микроскопа (ОМ) Neophot-32, сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA II и просвечивающего электронного микроскопе (ПЭМ) JEM-2100 (JEOL) в светлом и темном поле. Для подготовки фольги для ПЭМ из исследуемого материала вырезали пластины, которые механически (на абразивной бумаге) шлифовали до толщины 120 - 140 мкм и полировали с использованием специальной суспензии. Далее, из полученных пластин были разрезаны диски диаметром 3мм, которые подвергались струйной электрополировке на установке Struers Lectropol-5 с использованием электролита «метанол + азотная кислота».

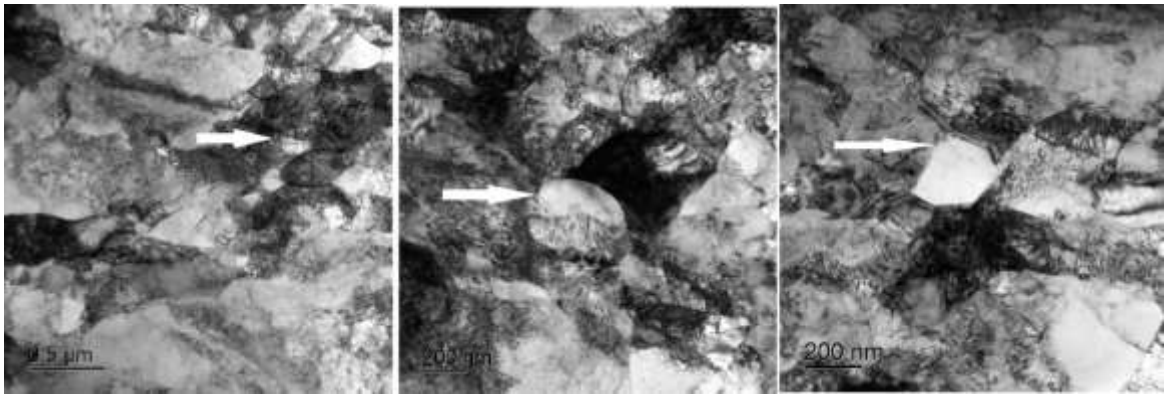
Результаты и обсуждение. Полученные данные изображений микроструктуры представлены на рис. 1 – 3.



а) б) в)

Рис. 1. ПЭМ (а, в) и ОМ (б) микроструктура меди после четырех проходов РКУП.

После 4 прохода РКУП получена полосовая фрагментированная структура в объеме образца с разным расстоянием между полосами (рис. 1,б). Видно, что в структуре после травления образованы деформационные полосы белого цвета и переходные полосы темного цвета (рис.1,б). Подобная микроструктура характерна для неравномерной деформации и отличается количеством дефектов, содержание которых в темных участках с упорядоченным расположением субзерен больше, по сравнению со светлыми полосами с развитой субзеренной структурой. В полосах светлого цвета можно видеть субзерна правильной формы с дефектами, которые получены в результате начальной стадии ДР, в темных, - переходных полосах расположены субзерна без дефектов вытянутой формы, которые образованы в результате динамической полигонизации (рис.1,в помечен буквой П) и рис. 1, а (по стрелкам).

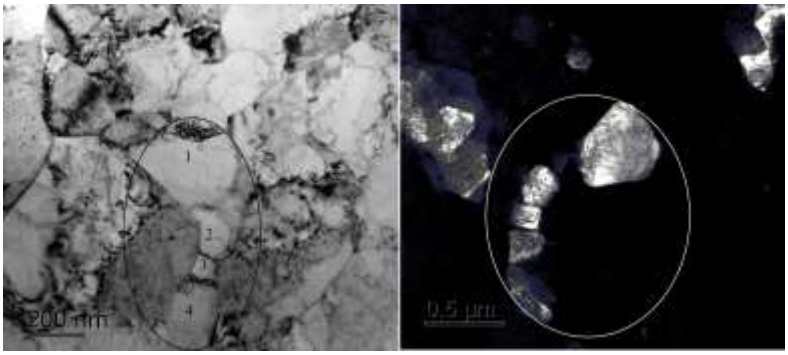


а) б) в)

Рис. 2. ПЭМ микроструктура меди после шести проходов РКУП.

После 6 прохода РКУП в структуре видны все виды появления зародыша динамической рекристаллизации (рис.2). На рис.2,а (по стрелке) видны цепочка зародышей рекристаллизованных зерен (белого цвета) в полосах сдвига. Это характерно для начальной стадии рекристаллизации меди. На рис.2,б виден зародыш рекристаллизованного зерна (белого цвета, продолговатой формы в центре), который образовался на границе субзерен с большим количеством дефектов (черного цвета) и меньшим (серого цвета внизу). Это первичная стадия рекристаллизации. На рис. 2,в видно рекристаллизованное зерно d = 300 нм (в центре с ограненными границами). По данным, представленным на рис.2, можно проследить динамику появления рекристаллизованного зерна.

На ПЭМ структуре после 8 проходов РКУП при изгибе образца в процессе РКУП образованы фрагментированные полосы деформации, состоящие из четырех (рис.3,а) или пяти субзерен на (рис.3,б), разделенных малоугловыми широкими границами. При наличии малоугловых границ зерно нельзя считать прошедшим динамическую рекристаллизацию.



а) б)

Рис.3. ПЭМ микроструктура меди после 8 проходов РКУП.

Заключение. 1**.** В процессе равноканального углового прессования в ультрамелкозернистой структуре меди образованы зародыши динамической рекристаллизации (полигонизации).

2. При холодном РКУП образование зародыша динамической рекристаллизации происходит после динамической полигонизации. В случае устойчивой полигонизации появление зародыша ДР невозможно. После 8 проходов РКУП образуется выраженный изгиб деформационных полос и при геометрическом необходимом количестве дислокаций получает развитие процесс динамической полигонизации.
3. Необходимо учитывать, что описанные процессы ДР и ДП в меди в процессе РКУП носят локальный характер, так как температура деформации значительно ниже, чем требуется для рекристаллизации меди в полном объеме.
4. ДР или ДП в меди в процессе РКУП определяли с появлением зерен без дефектов в них.

Список литературы

1. Козлов Э.В., Глезер А.М., Конева Н.А. Основы пластической деформации наноструктурных материалов. - М.: Физматлит, 2016. - 360с.
2. Трефилов В.И. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. – Киев: Наукова думка, 1989. - 254с.
3. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. - М.: МИСиС, 2005. - 432с.
4. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. - М.: Логос, 2000. - 272с.
5. Мальцев М.В. и др. Металлография цветных металлов и сплавов. - М.: Изд. - во литературы по черной и цветной металлургии, 1960. - 372с.
6. Утяшев Ф.Р. Современные методы интенсивной пластической деформации. – Уфа: 2008. – 314с.
7. Найзабеков А. Б. и др. Исследование структуры меди при равноканальном угловом прессовании. // Материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина». - Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2012. - С. 701 - 705.
8. Кондратьев Н.С., Трусов П.В. Механизмы образования зародышей рекристаллизации в металлах при термомеханической обработке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. - 2016. - № 4. - С. 151–174. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.4.09.
9. Malygin, G.A. Dislocation mechanism of dynamic polygonization of a crystal caused by its bending. Phys. Solid State. – 2002. - Vol. 44. - p. 1305 - 1309. https://doi.org/10.1134/1.1494626.
10. Тюменцев А.Н. Закономерности пластической деформации в высокопрочных и нанокристаллических металлических материалах. – Новосибирск: Изд - во Наука, 2018. - 254с.
11. Козлов Э. В., Глезер А.М., Конева Н.А. и др. Основы пластической деформации наноструктурных материалов. - М.: Физматлит, 2016. - 304с.
12. Землякова Н.В., Рогачев С.О. Аккомодация структуры и механических свойств чистой меди в процессе интенсивной пластической деформации// Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2019. - том 16. №1. - С.131 - 136.

References

1. Kozlov E.V., Glezer A.M., Koneva N.A. Fundamentals of plastic deformation of nanostructured materials. - M.: Fizmatlit, 2016. - 360 p.
2. Trefilov V.I. Strain hardening and fracture of polycrystalline metals. - Kiev: Naukova Duma, 1989. - 254p.
3. Gorelik S.S. Recrystallization of metals and alloys. – Moscow: MISiS, 2005. - 432 p.
4. Valiev R.Z. Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation. - M.: Logos, 2000. - 272 p.
5. Maltsev M.V. and others. Metallography of non-ferrous metals and alloys. - Moscow. Ed. - in the literature on ferrous and non-ferrous metallurgy, 1960. - 372 p.
6. Utyashev F.P. Modern methods of severe plastic deformation. – Ufa, 2008. - 314p.
7. Nayzabekov A. B. and al. Study of the structure of copper during equal-channel angular pressing // Innovative technologies in metallurgy and mechanical engineering: materials of the 6 th international youth scientific and practical conference «Innovative technologies in metallurgy and mechanical engineering. Ural Scientific and Pedagogical School named after Professor A.F. Golovin». - Ekaterinburg: Ural Publishing House. Univ., 2012. - P. 701-705.
8. Kondratyev N.S., Trusov P.V. Mechanisms of formation of recrystallization nuclei in metals during thermomechanical processing // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. - 2016. - No. 4. - P. 151 - 174. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.4.
9. Malygin, G.A. Dislocation mechanism of dynamic polygonization of a crystal caused by its bending. Phys. Solid State. 2002, Vol. 44. p. 1305 - 1309. https://doi.org/10.1134/1.1494626.
10. Tyumentsev A.N. Regularities of plastic deformation in high-strength and nanocrystalline metal materials. – Novosibirsk: Publishing house: Science, 2018. - 254 p.
11. Kozlov E.V., Glezer A.M., Koneva N.A. and others. Fundamentals of plastic deformation of nanostructured materials. - M.: Fizmatlit, 2016. - 304 p.
12. Zemlyakova N.V., Rogachev S.O. Accommodation of the structure and mechanical properties of pure copper in the process of severe plastic deformation// Fundamental problems of modern materials science. -2019. - Vol. 16, No. 1. - P.131 - 136.

Дата поступления: 23 апреля 2024 г.