

СЕКЦИЯ 2

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ СТРУКТУРА, СВОЙСТВА, ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ

МИКРОСТРУКТУРА НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО МЕДНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Cu-Mg ПОСЛЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Бодякова А.И., Пилипенко А.Г., Ткачев М.С., Беляков А.Н.

ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ», Россия, г. Белгород

bodyakova-ai@yandex.ru

Аннотация. Изучена эволюция микроструктуры низколегированного медного сплава системы Cu-Mg после равноканального углового прессования и прокатки. Прокатка и равноканальное угловое прессование приводят к развитию непрерывной динамической рекристаллизации, сопровождающейся образованием деформационных границ дислокационного происхождения, которые увеличивают разориентировку с ростом степени деформации и трансформируются в большеугловые границы, приводя к измельчению исходных зерен. После прокатки формируется ламельная структура, зерна вытянуты в направлении прокатки. Равноканальное угловое прессование обеспечивает формирование ультрамелких практически равноосных зерен размером около 1,8 мкм. Прокатка образцов после равноканального углового прессования приводит к вытягиванию ультрамелких зерен в направлении прокатки. Деформация сопровождается ростом плотности границ, доли БУГ и среднего угла разориентировки кристаллитов. В то же время средняя разориентировка кристаллической решетки внутри зерна уменьшается.

Ключевые слова: сплав системы Cu-Mg, микроструктура, прокатка, равноканальное угловое прессование

Введение

За последние 30 лет произошел значительный прорыв в области создания новых материалов и способов их обработки за счет развития методов интенсивной пластической деформации (ИПД), которые могут обеспечить производство материалов нового поколения с более высоким уровнем эксплуатационных свойств. Данный прорыв важен для развития систем электроснабжения, включающих контактные провода для высокоскоростной сети железнодорожного транспорта, контакты интегральных микросхем и электроды контактной сварки, миниатюризации интеллектуальных вычислительных систем и микроэлектроники, в которых в основном применяют медь и ее сплавы благодаря высоким проводящим свойствам. Лучшим кандидатом для электротехнических материалов могут быть сплавы системы Cu-Mg,

сочетающие невысокую стоимость с хорошими механическими и функциональными свойствами [1-4]. Воздействие ИПД на медные сплавы приводит к формированию равноосной ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры. Равноканальное угловое прессование (РКУП), как один из перспективных методов ИПД, обеспечивает образование равноосной УМЗ структуры за счет формирования 3-D сетки новых границ в результате развития нескольких систем скольжения внутри одного зерна и формирования нескольких семейств геометрически-необходимых границ [5-6]. Данное условие не может быть реализовано в процессе классических видов деформационного воздействия, таких как прокатка или волочение, в которых не происходит смена направления деформации. Кроме того, формирование равноосных зерен в процессе РКУП не приводит к сильной анизотропии механических характеристик и падению пластичности сплавов в сравнении с прокаткой и волочением [7]. Деформация классическими методами приводит к вытягиванию исходных зерен в направлении деформации и росту плотности дислокаций – дислокационному упрочнению. Последнее может достигать высоких значений после больших степеней деформации. Таким образом, с научной и практической точек зрения интересным представляется исследование влияния комплексной обработки включающей как процесс РКУП, так и прокатку на структуру, определение механизмов и закономерностей влияния сформированной при РКУП структуры на конечную микроструктуру медных сплавов.

Материал и методики

В качестве материала исследования был выбран сплав Cu-0,25%Mg (вес. %), который был подвергнут ковке при температуре 800°C до истинной деформации 1. Данное состояние считалось исходным. Далее сплав был деформирован по режимам, представленным в таблице 1. Холодную прокатку (ХП) и РКУП проводили при комнатной температуре. РКУП осуществляли по маршруту Вc в оснастке с углом пересечения каналов 90°.

Таблица 1. Режимы деформационной обработки сплава системы Cu-Mg

		Проходы РКУП			
		0	1	4	8
Обжатие при прокатке в %	0	+	+	+	+
	45	+	+	+	+
	65	+	+	+	+

Образцы для микроструктурных исследований вырезали из заготовки вдоль направления прокатки, перпендикулярно плоскости прокатки. Анализ микроструктуры осуществляли на растровом электронном микроскопе Quanta 600 FEI, оснащённом камерой для фиксации картин дифракции обратно-рассеянных электронов. Долю большеугловых границ (БУГ) и средний угол разориентировки границ рассчитывали с помощью программного обеспечения OIM Analysis, искажения кристаллической решетки внутри зерен были оценены с помощью функции Kernel Average Misorientation. Плотность границ кристаллитов была определена как отношение длины границ к площади снимка.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлена микроструктура низколегированного сплава Cu-Mg после РКУП, ХП и комбинированной обработки включающей как РКУП, так и ХП. В исходном состоянии наблюдаются зерна со средним диаметром 27,3 мкм, которые рассечены двойниками отжига. Скопление МУГ наблюдается вблизи БУГ. РКУП приводит к измельчению зерен и увеличению плотности границ, доля БУГ растет. Помимо ультрамелких кристаллитов, окруженных МУГ и БУГ, в структуре наблюдаются зерна размером 2-3 мкм свободные от МУГ, которые могли сформироваться в процессе постдинамической рекристаллизации [8]. После 8 проходов РКУП отмечается большая доля БУГ. Прокатка приводит к вытягиванию зерен вдоль направления прокатки и сокращению поперечного размера зерен. Плотность границ увеличивается, с повышением степени деформации наблюдается небольшое увеличение доли БУГ.

Прокатка образцов после РКУП приводит к вытягиванию ультрамелких зерен в направлении течения металла. После 4 проходов РКУП и прокатки наблюдаются области с высокой долей МУГ, в которых не успела сформироваться УМЗ структура. С ростом степени

деформации при холодной прокатке доля БУГ увеличивается. После 8 проходов РКУП и прокатки формируется развитая УМЗ структура, зерна вытянуты вдоль направления прокатки, отношение продольного к поперечному размеру зерен составляет 1,4.

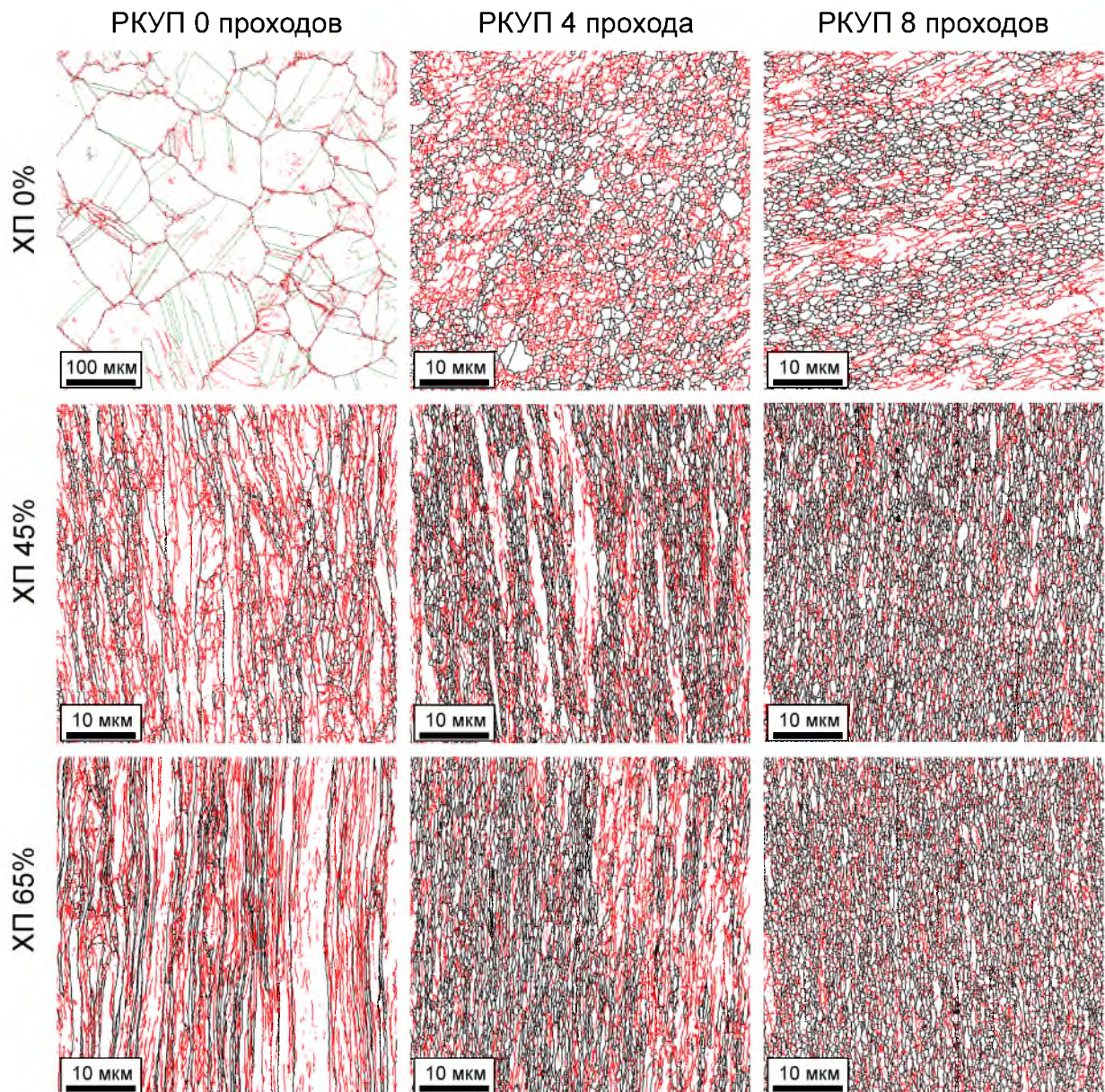


Рисунок 1. Микроструктура низколегированного медного сплава системы Cu-Mg после РКУП и прокатки. Красным цветом отмечены МУГ, черным – БУГ, зеленым – специальные границы $\Sigma 3$

Гистограммы распределения разориентировок границ кристаллитов по углам представлены на рисунке 2. В исходном состоянии в сплаве наблюдается высокая доля МУГ, пик приходится на границы от 2 до 5°. Кроме того наблюдается пик в области 58-60°, который может быть связан с протеканием прерывистой динамической рекристаллизации в процессе горячейковки и развитием

двойникования [8]. РКУП приводит к значительному снижению пика в области МУГ и росту доли БУГ во всем интервале углов разориентировок, что может быть следствием протекания непрерывной динамической рекристаллизации, заключающейся в постепенном увеличении разориентировки МУГ деформационного происхождения, которые с ростом степени деформации трансформируются в БУГ [8]. Вне зависимости от исходной микроструктуры, прокатка приводит к снижению доли МУГ вследствие развития непрерывной динамической рекристаллизации.

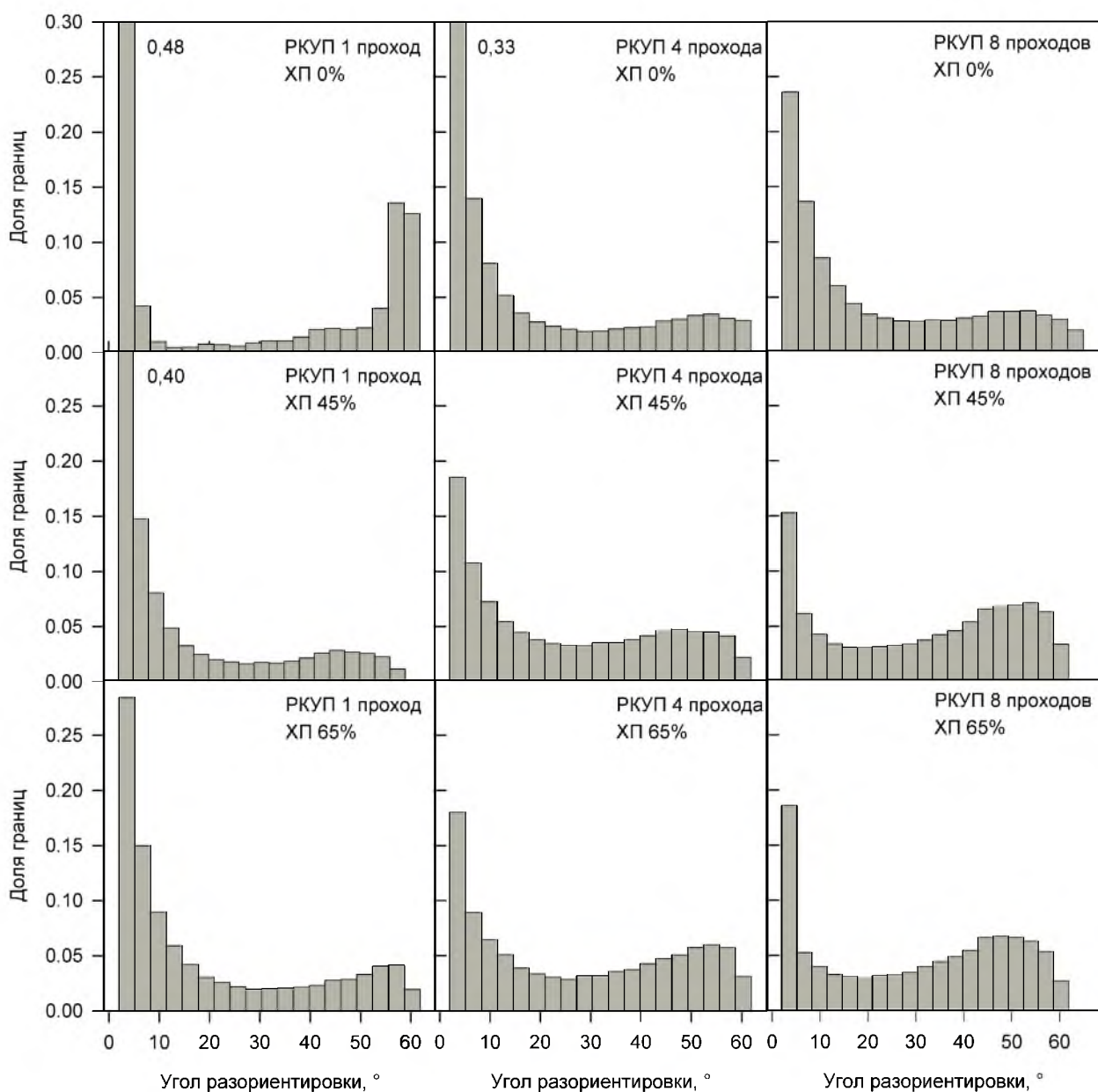


Рисунок 2. Гистограммы распределения разориентировки границ кристаллитов по углам разориентировки в низколегированном медном сплаве Cu-Mg после деформационной обработки

На рисунке 3 представлены данные об изменении параметров микроструктуры в зависимости от числа проходов РКУП и обжатия при ХП. Средний поперечный размер зерен снижается с ростом числа проходов РКУП и степени обжатия при прокатке (Рисунок 3а). В исходном состоянии средний поперечный размер зерен составляет 2,48 мкм. После 4 и 8 проходов РКУП происходит значительное измельчение зерен, средний поперечный размер достигает уменьшается до 1-2 мкм. Прокатка образцов после РКУП приводит к дальнейшему уменьшению поперечного размера зерен, после 4 и 8 проходов РКУП и 65% обжатия поперечный размер зерен составляет 0,6 мкм и 0,5 мкм, соответственно. Средний угол разориентировки границ кристаллитов падает после 45% обжатия при прокатке с 18° до 16° и затем увеличивает до 20° после 65% обжатия (Рисунок 3б). В образцах, подвергнутых 4 проходам РКУП, происходит увеличение среднего угла разориентировки границ кристаллитов с ростом степени деформации при прокатке с 20° до 27° . Прокатка образцов после 8 проходов РКУП до 45% обеспечивает увеличение среднего угла разориентировки границ кристаллитов с 21° до 31° . Увеличение степени деформации при прокатке до 65% не приводит к изменению среднего угла разориентировки. Характер изменения доли БУГ коррелирует с изменением среднего угла разориентировки кристаллитов. Искажения кристаллической решетки внутри зерна снижаются с ростом числа проходов РКУП и степени обжатия при прокатке (Рисунок 3в). Поскольку границы зерен являются местами стока дислокаций, увеличение доли БУГ может способствовать ускорению динамического возврата и уменьшению внутриверной плотности дислокаций с ростом степени деформации, что иллюстрирует линейная взаимосвязь средней величины искажения кристаллической решетки внутри зерна и доли БУГ на Рисунке 3г.

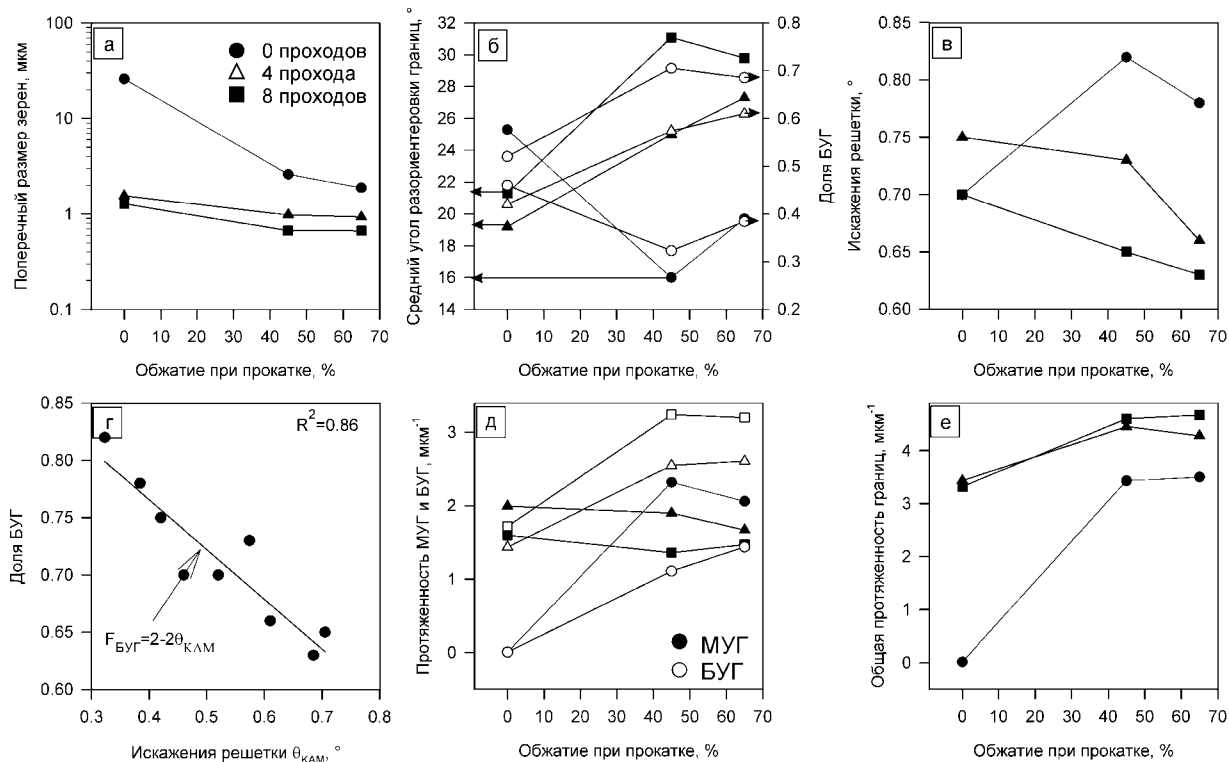


Рисунок 3. Влияние обжатия при прокатке на поперечный размер зерен (а), средний угол разориентировки границ кристаллитов (б), искажения кристаллической решетки внутри зерна (в), долю БУГ (г) и удельную протяженность границ (д, е) в низколегированном медном сплаве системы Cu-Mg

После прокатки и РКУП растет протяженность МУГ и БУГ на единицу площади (Рисунок 3д). После 4 и 8 проходов РКУП удельная протяженность границ почти одинакова и составляет 3,3-3,4 мкм⁻¹ (Рисунок 3е). Удельная протяженность МУГ после 8 проходов РКУП на 0,4 мкм⁻¹ ниже, чем после 4 проходов. С ростом степени деформации при прокатке постепенно увеличивается протяженность как МУГ, так и БУГ. Прокатка образцов после РКУП приводит к снижению протяженности МУГ и росту протяженности БУГ, тогда как общая протяженность границ растет после 45% обжатия на 1 мкм⁻¹ и остается неизменной при дальнейшей деформации. Неизменность общей удельной протяженности границ после РКУП с прокаткой и рост удельной протяженности БУГ при снижении удельной протяженности МУГ свидетельствует о трансформации МУГ в БУГ с ростом степени деформации при прокатке.

Выводы

1. Равноканальное угловое прессование и холодная прокатка сопровождаются протеканием процессов непрерывной динамической

рекристаллизации, заключающейся в формировании на ранних этапах обработки МУГ деформационного происхождения, которые с ростом степени деформации увеличивают разориентировку и трансформируются в БУГ.

2. После холодной прокатки формируется ламельная структура, зерна вытянуты вдоль направления прокатки. Равноканальное угловое прессование приводит к формированию практически равноосных зерен средним размером около 1,8 мкм.

3. Прокатка образцов после равноканального углового прессования приводит к вытягиванию ультрамелких зерен вдоль направления прокатки. Средний поперечный размер зерен составляет 0,5-0,6 мкм после 65% обжатия ХП. Средняя величина искажений кристаллической решетки внутри зерна снижается с ростом степени деформации при РКУП и прокатке, что может быть обусловлено ускорением динамического возврата из-за роста доли БУГ, которые являются местами стока дислокаций.

Благодарность

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 21-79-00062, <https://rscf.ru/project/21-79-00062/> с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".

Литература

1. Sun G. et al. Effects of Trace Ce Addition on Hot Deformation Behavior of Cu-0.8 Mg Alloy //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – Т. 29. – №. 2. – С. 776-786.
2. Ha S. H. et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Hardness of Cu–Mg Alloy with a Trace of Ca //Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2017. – Т. 17. – №. 10. – С. 7820-7823.
3. Guo X. et al. Microstructure and properties of Cu–Mg alloy treated by internal oxidation //Materials Science and Technology. – 2018. – Т. 34. – №. 6. – С. 648-653.
4. Yang D. et al. Fabrication of Cu-Mg alloy foam with close pore structure by gas release reaction powder metallurgical approach //Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Т. 766. – С. 851-858.
5. M. Furukawa, Z. Horita, T.G. Langdon // Mater. Sci. Eng. A 332(1-2) (2002) 97-109.
6. R.Z. Valiev, T.G. Langdon // Prog. Mater. Sci. 51(7) (2006) 881-981.
7. Н.Ю. Золоторевский, В.В. Рыбин. Фрагментация и текстурообразование при деформации металлических материалов // СПб.: Изд-во Политехи. ун-та. – 2014.
8. Humphreys F. J., Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena. – Elsevier, 2012.