

Металловедение и термическая обработка

Physical metallurgy and heat treatment

Научная статья

УДК 620.186.8

DOI: 10.14529/met240203

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ ГРАНИЦ ЗЕРЕН В ГАФНИЕВОЙ БРОНЗЕ

Р.М. Фалахутдинов^{1✉}, falahutdinov@imp.uran.ru

В.В. Попов¹, vpopov@imp.uran.ru

С.А. Судакова¹, murzinova_svetlana1993@mail.ru

Е.В. Шорохов², e.v.shorokhov@vniitf.ru

К.В. Гаан², kvgaan@mail.ru

¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия

Аннотация. Цель работы состоит в оценке относительной энергии границ зерен гафниевой бронзы, продеформированной методом динамического канально-углового прессования (ДКУП), с помощью сканирующей туннельной микроскопии. В процессе работы проведены следующие исследования.

1. Отработана методика пробоподготовки образцов Cu–Hf, подвергнутых интенсивной пластической деформации (ИПД) методом ДКУП, для последующих исследований методом туннельной сканирующей микроскопии, обеспечивающая усредненное значение среднеквадратичной шероховатости поверхности около 2 нм.

2. С помощью сканирующей туннельной микроскопии получены изображения структуры поверхности гафниевой бронзы, которые обработаны с помощью программы-приложения Gwyddion. В результате рассчитаны профили границ зерен, на основании которых вычислялись значения двугранных углов у дна канавок травления и рассчитывались относительные энергии границ зерен.

3. Установлено, что после деформации ДКУП средняя относительная энергия границ зерен почти в два раза превышает относительную энергию границ зерен поликристаллической меди. Таким образом, в результате ДКУП в образцах формируются неравновесные границы зерен.

4. Показано, что с увеличением числа проходов ДКУП происходит увеличение средней относительной энергии границ зерен, что свидетельствует об увеличении степени их неравновесности.

Ключевые слова: гафниевая бронза, интенсивная пластическая деформация, сканирующая туннельная микроскопия, относительная свободная энергия

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Функция» № 122021000035-6). При частичной поддержке молодежного проекта ИФМ УрО РАН им. М.Н. Михеева № м3-23.

Авторы выражают благодарность за помощь в подготовке образцов ведущему технологю лаборатории диффузии Л.И. Мамаевой.

Для цитирования: Влияние динамического канально-углового прессования на относительную энергию границ зерен в гафниевой бронзе / Р.М. Фалахутдинов, В.В. Попов, С.А. Судакова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2024. Т. 24, № 2. С. 20–28. DOI: 10.14529/met240203

INFLUENCE OF DYNAMIC CHANNEL-ANGLE PRESSING ON RELATIVE ENERGY OF GRAIN BOUNDARIES IN HAFNIUM BRONZE

R.M. Falahutdinov^{1✉}, falahutdinov@imp.uran.ru

V.V. Popov¹, vpopov@imp.uran.ru

S.A. Sudakova¹, murzinova_svetlana1993@mail.ru

E.V. Shorokhov², e.v.shorokhov@vniitf.ru

K.V. Gaan², kvgaan@mail.ru

¹ M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

² Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia

Abstract. The aim of the work is to evaluate the relative energy of grain boundaries of hafnium bronze deformed by dynamic channel-angle pressing (DCAP) using scanning tunneling microscopy. In the course of this work, the following studies were carried out.

1. The sample preparation technique of Cu-Hf samples subjected to severe plastic deformation (SPD) by DCUP for subsequent scanning tunneling microscopy studies was perfected, providing an averaged RMS surface roughness value of about 2 nm.

2. Scanning tunneling microscopy images of the hafnium bronze surface structure were obtained and processed using the Gwyddion application program. As a result, grain boundary profiles were calculated, on the basis of which the values of dihedral angles at the bottom of etching grooves were calculated and the relative energies of grain boundaries were calculated.

3. It was found that after deformation of DCUP, the average relative energy of grain boundaries is almost two times higher than the relative energy of grain boundaries of polycrystalline copper. Thus, non-equilibrium grain boundaries are formed in the samples as a result of DCUP.

4. It is shown that with the increase in the number of ACP passes there is an increase in the average relative energy of grain boundaries, which indicates an increase in the degree of their non-equilibrium.

Keywords: hafnium bronze, severe plastic deformation, scanning tunneling microscopy, relative free energy

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia (theme “Function” No. 122021000035-6). With partial support of the youth project of the IPM Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. M.N. Mikheeva No. m3-23.

The authors express their gratitude to the leading technologist of the diffusion laboratory L.I. Mamaeva for assistance in preparing samples.

For citation: Falahutdinov R.M., Popov V.V., Sudakova S.A., Shorokhov E.V., Gaan K.V. Influence of dynamic channel-angle pressing on relative energy of grain boundaries in hafnium bronze. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2024;24(2):20–28. (In Russ.) DOI: 10.14529/met240203

Введение

Низколегированные бронзы находят широкое применение в электротехнической промышленности, поскольку они обладают достаточной прочностью наряду с хорошей электропроводностью [1]. В последние годы применяется легирование хромистой бронзы гафнием [2–4].

Для улучшения свойств металлических материалов широко применяют интенсивную пластическую деформацию (ИПД), позволяющую получать ультрамелкозернистую (УМЗ)

структуру [5]. Применение ИПД к низколегированным бронзам с Cr, Zr и Hf продемонстрировало возможность получения в них ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры и высокой прочности [2–4, 6, 7].

Материалы, полученные ИПД, имеют высокую плотность границ зерен (ГЗ). Кроме того, в ряде исследований показано, что состояние ГЗ в таких материалах отличается от состояния обычных высокоугловых ГЗ [8]. В работах А.А. Назарова с соавторами была предложена теоретическая модель для дефор-

мационно-модифицированных зернограничных структур, формирующихся при ИПД, основанная на поглощении решеточных дислокаций во время деформации, и полученные в результате ИПД высокоугловые границы зерен с дополнительной избыточной плотностью свободной энергии были названы «неравновесными» границами зерен [9, 10]. Согласно этой модели «неравновесные» границы характеризуются тремя основными особенностями, а именно: избыточной энергией границ зерен, присутствием дальнедействующих упругих напряжений и повышенным свободным объемом.

К настоящему времени уже разработано много методов ИПД, основными из которых признаны кручение под высоким давлением (КВД) и равноканальное угловое прессование (РКУП) [11]. Относительно новым методом ИПД является динамическое канально-угловое прессование (ДКУП), разработанное в Российском Федеральном Ядерном Центре [12]. Это высокоскоростной вариант РКУП, где вместо прессового оборудования используется энергия пороховых газов.

В работах [3, 4] нами было исследовано влияние ИПД методом ДКУП на структуру гафниевого бронзы. При этом было показано, что такая обработка приводит к существенно упрочнению и измельчению структуры.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния ДКУП на состояние ГЗ в гафниевого бронзы. Наиболее прямой метод количественной оценки состояния границ – это определение их энергии. В настоящей работе была поставлена задача оценить влияние ДКУП на относительную энергию границ зерен в гафниевого бронзы, применяя метод сканирующей туннельной микроскопии.

Материал и методика

Исследования проводились на гафниевого бронзы, химический состав которой представлен в табл. 1.

Отливки бронзы подвергались горячей ковке при 600 °С, а затем закалялись в воду

от 950 °С. Такой режим обработки был выбран с учетом диаграммы состояния Cu–Hf и данных о растворимости гафния в меди [13]. Эти данные показали, что в случае закалки от 950 °С можно ожидать образования однофазного твердого раствора.

Цилиндрические образцы бронзы диаметром 10 мм и длиной 50 мм деформировали по методу ДКУП на 1 и 2 прохода со скоростью 10^4 – 10^5 с⁻¹, при начальной скорости ~ 250 м/с и давлении на образец 2 ГПа. После каждого прохода образец поворачивался на 180°. Диаметр каналов – 10 мм.

Проведенные ранее исследования показали, что после закалки от 950 °С формируется крупнокристаллическая структура и интерметаллиды полностью растворяются [3]. Микротвердость закаленных образцов составляла 720 МПа. После 1 прохода формируется неоднородная структура. На большинстве участков видны двойники шириной 30–40 нм. Двойники и полосы между ними разделены на мелкие субзерна с малоугловыми границами. На участках другого типа наблюдается ячеистая дислокационная структура. Микротвердость уже после 1 прохода значительно возрастает (до 1600–1800 МПа). После 2 проходов ДКУП происходит дальнейшая фрагментация, и структура становится более однородной. В ней по-прежнему преобладают двойники, а внутри соседствующих с ними полос видно разделение на мелкие фрагменты с постепенным переходом от малоугловой к высокоугловой разориентации. Микротвердость после такой обработки еще сильнее возрастает (до 1800–2170 МПа). После ДКУП закаленной бронзы практически весь Hf остается в твердом растворе.

Наиболее широко используемым методом определения энергии границ зерен является метод измерения двугранного угла канавки термического травления. Канавки травления в месте выхода границ зерен на поверхность получают путем нагрева металла в вакууме или соответствующей атмосфере.

Таблица 1

Химический состав Cu–Hf

Table 1

Chemical composition of Cu–Hf

Элемент примеси	Hf	Fe	Ni	Zn	Sn
ат. %	0,28	~ 0,001	~ 0,005	~ 0,005	~ 0,003
мас. %	0,78	~ 0,001	~ 0,005	~ 0,005	~ 0,005

В этом случае относительная энергия границы зерна может быть рассчитана по формуле

$$\gamma_{rel} = \frac{\gamma_{gb}}{\gamma_s} = 2 \cos \frac{\psi}{2}, \quad (1)$$

где γ_{rel} , γ_{gb} и γ_s – безразмерная энергия границы зерна, энергия границы зерна и энергия свободной поверхности, соответственно, а ψ – угол у дна канавки.

Данным методом получают результаты для измерения относительной энергии равновесных границ (см., например, [14, 15]).

Имеются примеры использования этого метода для характеристики состояния деформационно-модифицированных (неравновесных) границ зерен с использованием туннельного или атомно-силового микроскопов для определения углов у дна канавок в ультрамелкозернистых материалах. Так, в работе [16] было показано, что границы зерен в УМЗ меди после РКУП находятся в сильно неравновесном состоянии и не релаксируют полностью при температуре отжига 400 °С.

Однако нужно отметить, что при температурах, необходимых для образования канавок при использовании термического травления, возможно протекание процессов возврата в границах зерен, в результате чего их состояние может значительно измениться. В то же

время известно, что скорость травления границ в зеренно-субзеренной структуре металлов зависит от степени их неравновесности [17]. Поэтому получила распространение методика измерения относительной энергии границ зерен путем измерения двугранного угла в канавках, сформированных в результате химического травления [18–20]. Сопоставление значений относительных энергий равновесных границ зерен в меди, полученных измерением углов в канавках термического [16] и химического [19] травления, показывает, что они достаточно близки: в случае термического травления относительная энергия границ зерен составляет 0,24, а в случае химического травления – 0,19. Таким образом, можно заключить, что определение относительных энергий границ зерен с использованием канавок химического травления достаточно корректно.

В настоящей работе относительная энергия границ зерен оценивалась на образцах с канавками, полученными химическим травлением.

В данной работе была отработана методика пробоподготовки образцов для сканирующей туннельной микроскопии. Подготовка образцов включает в себя следующие этапы.

1. Шлифовка образца на наждачной бумаге различной зернистости.

Таблица 2
Состав электролита для электрополировки меди и бронз
Table 2
Composition of electrolyte for electropolishing of copper and bronze

Компонент	Концентрация компонента, мл
Ортофосфорная кислота H_3PO_4	100

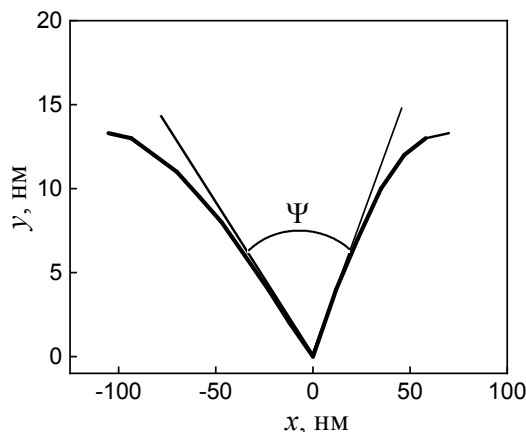


Рис. 1. Пример профиля для расчета двугранного угла
Fig. 1. Example of a profile for calculating the dihedral angle

2. Механическая полировка с использованием алмазной пасты 1,0 мкм для создания зеркальной поверхности. Контроль чистоты поверхности проводился на микроскопе Carlzeiss Jena при увеличении $\times 80$.

3. Электролитическая полировка образца в растворе, состав которого приведен в табл. 2, для формирования более гладкого рельефа после механической полировки. Для оценки качества электрополировки образцов было проведено исследование состояния поверхности с помощью сканирующего мультимикроскопа СММ-2000 и оценена среднеквадратичная шероховатость, которая составила около 2 нм, что свидетельствует о гладкой поверхности исследуемых образцов

4. Химическое травление границ зерен проводилось в растворе, полученном путем смешивания 5 г FeCl_3 с 10 мл $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ и 2 мл HCl .

Состояние границ зерен исследовали с помощью сканирующего мультимикроскопа, работающего в режиме сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Обработка изображений, полученных с помощью СТМ, про-

водилась в приложении Gwyddion путем построения линий перпендикулярно границам зерен, на основании которых вычислялось значение двугранного угла у дна канавки травления. Пример такого профиля приведен на рис. 1. Затем с использованием выражения (1) рассчитывалась относительная энергия границы зерна.

Результаты и обсуждение

Примеры СТМ изображений зеренной структуры гафниевой бронзы в исходном состоянии и после ДКУП на 1 и 2 прохода показаны на рис. 2.

Результаты определения относительной энергии ГЗ были обработаны, и построены гистограммы распределения границ зерен по относительным энергиям в гафниевой бронзе в исходном закаленном состоянии и после 1 и 2 проходов ДКУП (рис. 3). Для каждого образца были обработаны несколько СТМ-микрофотографий и определены относительные энергии более 100 ГЗ. Средние относительные энергии ГЗ приведены в табл. 3.

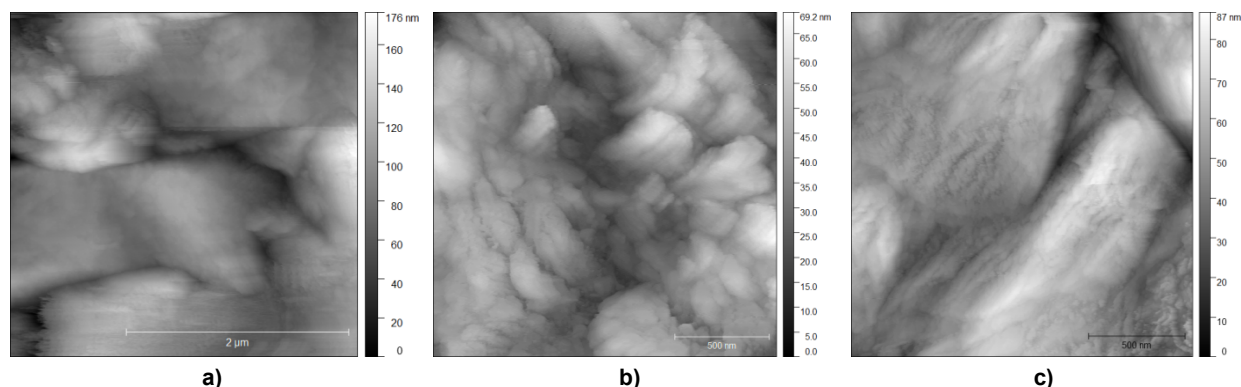


Рис. 2. СТМ-изображение структуры бронзы с примерами траекторий в гафниевой бронзе в исходном состоянии после закалки (а) и после 1 (b) и 2 (c) проходов ДКУП
Fig. 2. STM image of the structure of bronze with examples of trajectories in hafnium bronze in the initial state after quenching (a) and after 1 (b) and 2 (c) passes of DCAP

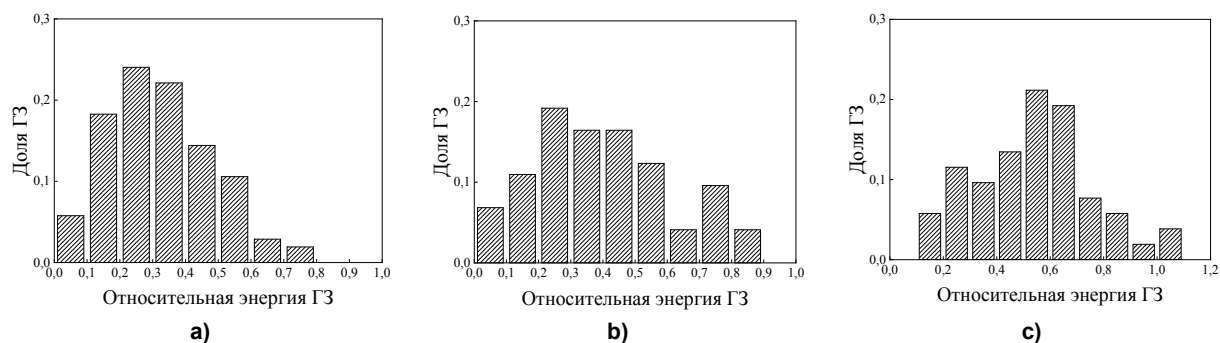


Рис. 3. Распределения границ зерен в гафниевой бронзе по относительным энергиям в исходном состоянии после закалки (а) и после 1 (b) и 2 (c) проходов ДКУП
Fig. 3. Distribution of grain boundaries in hafnium bronze by relative energies in the initial state after quenching (a) and after 1 (b) and 2 (c) passes of DCAP

Таблица 3
Средняя относительная энергия границ зерен гафниевой бронзы
после закалки и деформации ДКУП на 1 и 2 прохода

Table 3
Average relative energy of hafnium bronze grain boundaries
after quenching and deformation of DCAP for 1 and 2 passes

Обработка	Средняя относительная энергия границ зерен
Закалка от 950 °С	0,32
ДКУП, 1 проход	0,40
ДКУП, 2 прохода	0,55

Средняя относительная энергия границ зерен в гафниевой бронзе в исходном закаленном состоянии составляет 0,32. Это несколько больше, чем в крупнозернистой меди после отжига (0,24 [16]). По-видимому, это объясняется влиянием гафния, который препятствует полной релаксации ГЗ. Тем не менее, доля ГЗ с относительной энергией более 0,6 незначительна. Это свидетельствует о том, что большинство ГЗ после закалки находятся в релаксированном состоянии [16].

После деформации ДКУП на 1 проход средняя относительная энергия ГЗ несколько увеличивается, достигая значения 0,40. При этом появляется заметное количество ГЗ, относительная энергия которых больше 0,6. Это свидетельствует о том, что после такой обработки заметная, хотя и относительно небольшая доля ГЗ находится в деформационно-модифицированном (неравновесном) состоянии.

Еще сильнее спектр энергий ГЗ меняется после деформации ДКУП на 2 прохода. После такой обработки средняя относительная энергия ГЗ достигает значения 0,55, и значительная доля ГЗ имеет энергии больше 0,6.

Таким образом, полученные результаты показывают, что после высокоскоростной интенсивной пластической деформации формируются деформационно-модифицированные (неравновесные) ГЗ, и доля таких ГЗ увеличи-

вается с увеличением степени деформации. Это позволяет предполагать, что определенный вклад в упрочение при деформации методом ДКУП, наряду с фрагментацией структуры, может быть обусловлен формированием неравновесных ГЗ.

Заключение

Отработана методика пробоподготовки образцов сплавов на основе меди, подвергнутых ИПД, для последующих исследований методом туннельной сканирующей микроскопии. С помощью сканирующей туннельной микроскопии проведена оценка относительной энергии границ зерен в гафниевой бронзе, после закалки и последующей деформации методом динамического канально-углового прессования. Показано, что после деформации ДКУП средняя относительная энергия границ зерен заметно превышает относительную энергию границ зерен после закалки. Это позволяет сделать вывод о формировании в процессе ДКУП неравновесных границ зерен. Показано, что с увеличением числа проходов ДКУП происходит увеличение средней относительной энергии границ зерен и доли ГЗ с повышенной относительной энергией. Высказано предположение, что повышенные прочностные свойства гафниевой бронзы после ДКУП частично обусловлены формированием неравновесных ГЗ.

Список литературы

1. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы: отечественные и зарубежные марки: справочник. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.
2. Influence with alloying with hafnium on the microstructure, texture and properties of Cu–Cr alloy after equal channel angular pressing / D. Shangina, Yu. Maksimenkova, N. Bochvar et al. // J. Mater. Sci. 2016. Vol. 51. P. 5493–5501. DOI: 10.1007/s10853-016-9854-2
3. Влияние исходной обработки на структуру гафниевой бронзы при высокоскоростном прессовании / В.В. Попов, Е.Н. Попова, А.В. Столбовский и др. // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121, № 5. С. 501–508. DOI: 10.31857/S0015323020050113

4. Влияние исходного состояния на эволюцию структуры гафниевой бронзы при старении / Р.М. Фалахутдинов, В.В. Попов, Е.Н. Попова и др. // *Физика металлов и металловедение*. 2022. Т. 123, № 9. С. 962–970. DOI: 10.31857/S0015323022090030
5. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances / K. Edalati, A. Bachmaier, V.A. Beloshenko et al. *Materials Research Letters*. 2022;10(4):163–256.
6. Effect of deformation schedules and initial states on structure and properties of Cu–0.18% Zr alloy after high-pressure torsion and heating / S.V. Dobatkin, D.V. Shangina, N.R. Bochvar, M. Janecek // *Mater. Sci. Eng. A*. 2014. Vol. 598. P. 288–292. DOI: 10.1016/j.msea.2013.12.104
7. Dobatkin S.V., Bochvar N.R., Shangina D.V. Aging Processes in Ultrafine-Grained Low-Alloyed Bronzes Subjected to Equal Channel Angular Pressing // *Advanced engineering materials*. 2015. Vol. 17, no. 12. P. 1862–1868. DOI: 10.1002/adem.201500099
8. Wilde G., Rösner H., Divinski S. Internal Interfaces in Severely Deformed Metals and Alloys: Coupling of Kinetics, Structure and Strain with Properties and Performance // *Materials Transactions*. 2023. Vol. 64, no. 7. P. 1331–1345. DOI: 10.2320/matertrans.MT-MF2022009
9. Nazarov A., Romanov A., Valiev R.Z. On the structure, stress fields and energy of nonequilibrium grain boundaries // *Acta Metall. Mater.* 1993. Vol. 41. P. 1033–1040. DOI: 10.1016/0956-7151(93)90152-I
10. Nazarov A.A. Ensembles of gliding grain boundary dislocations in ultrafine grained materials produced by severe plastic deformation // *Scripta Mater.* 1997. Vol. 37, no. 8. P. 1155–1161.
11. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation / R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita et al. // *JOM*. 2006. Vol. 58. P. 33–39. DOI: 10.1007/s11837-006-0213-7
12. Патент RU 2283717 С2. Способ динамической обработки материалов / Е.В. Шорохов, И.Н. Жгилев, Р.З. Валиев. Опубл. 20.09.2006, Бюл. № 26.
13. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. Т. 2. 1024 с.
14. Amouyal Y., Rabkin E., Mishin Y. Correlation between Grain Boundary Energy and Geometry in Ni-rich NiAl // *Acta Materialia*. 2005. Vol. 53, iss. 14. P. 3795–3805. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.04.043
15. Measurement of the grain boundary energy of commercially pure grade 2 titanium at high temperature / C.C. Camilo, E.C. de Souza, P.L. Di Lorenzo, J.M.D. de Almeida Rollo // *Braz. J. Biom. Eng.* 2011. Vol. 27, no. 3. P. 175–181. DOI: 10.4322/rbeb.2011.014
16. Amouyal Y., Rabkin E. A Scanning Force Microscopy Study of Grain Boundary Energy in Copper Subjected to Equal Channel Angular Pressing // *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55, iss. 20. P. 6681–6689.
17. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976. 271 с.
18. Применение сканирующей туннельной микроскопии для характеристики зеренно-субзеренной структуры СМК никеля после низкотемпературного отжига / П.В. Кузнецов, И.В. Петракова, Т.В. Рахматуллина и др. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78, № 4. С. 26–34.
19. Энергия внутренних границ раздела как характеристика эволюции структуры ультрамелкозернистых меди и никеля после отжига / П.В. Кузнецов, Т.В. Рахматуллина, И.В. Беляева, А.В. Корзников // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118, № 3. С. 255–262. DOI: 10.7868/S0015323017030111
20. Применение сканирующей туннельной микроскопии для оценки степени неравновесности границ зерен в никеле, полученном кручением под высоким давлением / Е.В. Осинников, И.В. Блинов, А.Ю. Истомина, В.В. Попов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика»*. 2022, Т. 14, № 3. С. 79–85. DOI: 10.14529/mmph220309

References

1. Osintsev O.E., Fedorov V.N. *Med' i mednye splavy: otechestvennye i zarubezhnye marki: spravochnik* [Copper and copper alloys: Domestic and foreign grades. Reference book]. Moscow: Mashinostroenie; 2004. 336 p. (In Russ.)
2. Shangina D., Maksimenkova Yu., Bochvar N. et al. Influence with alloying with hafnium on the microstructure, texture and properties of Cu–Cr alloy after equal channel angular pressing. *J. Mater. Sci.* 2016;51:5493–5501. DOI: 10.1007/s10853-016-9854-2

3. Popov V.V., Popova E.N., Stolbovsky A.V. et al. Influence of the initial treatment on the structure of hafnium bronze upon high-speed pressing. *Physics of Metals and Metallography*. 2020;121(5):452–459. DOI: 10.1134/S0031918X20050117
4. Falakhutdinov R.M., Popov V.V., Popova E.N. et al. The effect of the initial state on the structure evolution of hafnium bronze under annealing. *Physics of Metals and Metallography*. 2022;123(9):900–907. DOI: 10.1134/S0031918X22090034
5. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A. et al. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*. 2022;10(4):163–256.
6. Dobatkin S.V., Shangina D.V., Bochvar N.R., Janecek M. Effect of deformation schedules and initial states on structure and properties of Cu–0.18% Zr alloy after high-pressure torsion and heating. *Mater. Sci. Eng. A*. 2014;598:288–292. DOI: 10.1016/j.msea.2013.12.104
7. Dobatkin S.V., Bochvar N.R., Shangina D.V. Aging Processes in Ultrafine-Grained Low-Alloyed Bronzes Subjected to Equal Channel Angular Pressing. *Advanced engineering materials*. 2015;17(12):1862–1868. DOI: 10.1002/adem.201500099
8. Wilde G., Rösner H., Divinski S. Internal Interfaces in Severely Deformed Metals and Alloys: Coupling of Kinetics, Structure and Strain with Properties and Performance. *Materials Transactions*. 2023;64(7):1331–1345. DOI: 10.2320/matertrans.MT-MF2022009
9. Nazarov A., Romanov A., Valiev R.Z. On the structure, stress fields and energy of nonequilibrium grain boundaries. *Acta Metall. Mater.* 1993;41:1033–1040. DOI: 10.1016/0956-7151(93)90152-I
10. Nazarov A.A. Ensembles of gliding grain boundary dislocations in ultrafine grained materials produced by severe plastic deformation. *Scripta Mater.* 1997;37(8):1155–1161.
11. Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z. et al. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation. *JOM*. 2006;58:33–39. DOI: 10.1007/s11837-006-0213-7
12. Shorokhov E.V., Zhgilev I.N., Valiev R.Z. Method for dynamic deforming of metals. Patent RU 2283717 C2, 2006. (In Russ.)
13. Lyakishev N.P. (Ed.). *Diagrammy sostoyaniya dvoynnykh metallicheskih sistem: spravochnik: v 3 t. T. 2* [State diagrams of double metallic systems: Reference book: In 3 volumes. Vol. 2]. Moscow: Mashinostroenie; 1996. 1024 p. (In Russ.)
14. Amouyal Y., Rabkin E., Mishin Y. Correlation between Grain Boundary Energy and Geometry in Ni-rich NiAl. *Acta Materialia*. 2005;53(14):3795–3805. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.04.043
15. Camilo C.C., de Souza E.C., Di Lorenzo P.L., de Almeida Rollo J.M.D. Measurement of the grain boundary energy of commercially pure grade 2 titanium at high temperature. *Braz. J. Biom. Eng.* 2011;27(3):175–181. DOI: 10.4322/rbeb.2011.014
16. Amouyal Y., Rabkin E. A Scanning Force Microscopy Study of Grain Boundary Energy in Copper Subjected to Equal Channel Angular Pressing. *Acta Materialia*. 2007;55(20):6681–6689.
17. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya* [Stereometric metallography]. Moscow: Metallurgiya; 1976. 271 p. (In Russ.)
18. Kuznetsov P.V., Petrakova I.V., Rakhmatullina T.V., Baturin A.A., Korznikov A.V. The use of scanning tunneling microscopy in characterizing the grain-subgrain structure of SMC nickel after low temperature annealing. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials = Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2012;78(4):26–34. (In Russ.)
19. Kuznetsov P.V., Rakhmatullina T.V., Belyaeva I.V., Korznikov A.V. Energy of internal interfaces as a characteristic of the structural evolution of ultrafine-grained copper and nickel after annealing. *Physics of Metals and Metallography*. 2017;118(3):241–248. DOI: 10.1134/S0031918X17030115
20. Osinnikov E.V., Blinov I.V., Istomina A.Yu., Popov V.V. Application of scanning tunneling microscopy for evaluation of the non-equilibrium state of grain boundaries in nickel subjected to high pressure torsion. *Bulletin of the South Ural State University. Series “Mathematics. Mechanics. Physics”*. 2022;14(3):79–85. DOI: 10.14529/mmph220309

Информация об авторах

Фалахутдинов Руслан Мавлетханович, младший научный сотрудник лаборатории диффузии, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия; falahutdinov@imp.uran.ru.

Попов Владимир Владимирович, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории диффузии, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия; vpopov@imp.uran.ru.

Судакова Светлана Андреевна, младший научный сотрудник лаборатории диффузии, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия; murzinova_svetlana1993@mail.ru.

Шорохов Евгений Вениаминович, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия; e.v.shorokhov@vniitf.ru.

Гаан Константин Викторович, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия; kvgaan@mail.ru.

Information about the authors

Ruslan M. Falahutdinov, Junior Researcher, Laboratory of Diffusion, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; falahutdinov@imp.uran.ru.

Vladimir V. Popov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Laboratory of Diffusion, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; vpopov@imp.uran.ru.

Svetlana A. Sudakova, Junior Researcher, Laboratory of Diffusion, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; murzinova_svetlana1993@mail.ru.

Evgeniy V. Shorokhov, Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia; e.v.shorokhov@vniitf.ru.

Konstantin V. Gaan, Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia; kvgaan@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 15.03.2024

The article was submitted 15.03.2024