

Металловедение и термическая обработка

Physical metallurgy and heat treatment

Научная статья
УДК 620.186.8
DOI: 10.14529/met250303

ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННельНОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ГРАНИЦ ЗЕРЕН В НИОБИИ, ПОЛУЧЕННОМ КРУЧЕНИЕМ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Е.В. Осинников[✉], egor.osinnikov@rambler.ru

А.Ю. Истомина, istomina@imp.uran.ru

И.В. Блинов, blinoviv@mail.ru

В.В. Попов, vpopov@imp.uran.ru

Р.М. Фалахутдинов, falahutdinov@imp.uran.ru

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

Аннотация. В работе исследована средняя относительная энергия границ зерен в ниобии после кручения под высоким давлением (КВД) с использованием сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Установлено, что деформация методом КВД приводит к формированию ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры со средним размером зерен ~100 нм и значительному увеличению твердости (до 2800 МПа). С помощью СТМ-анализа количественно оценено энергетическое состояние границ зерен: в крупнокристаллическом ниобии средняя относительная энергия границ зерен составила 0,27, тогда как после КВД на 5 оборотов – 0,71.

Обнаружено, что в УМЗ-ниобии преобладают границы с высокой относительной энергией (более 0,6), что свидетельствует о формировании неравновесных (деформационно-модифицированных) границ зерен. Полученные результаты согласуются с данными для других металлов и сплавов (Ni, Cu, Cu-Ni), подвергнутых интенсивной пластической деформации.

Работа подтверждает перспективность СТМ-микроскопии для количественной оценки энергии границ зерен в наноструктурированных материалах, что важно для понимания их механических свойств и оптимизации методов обработки.

Ключевые слова: ниобий, сканирующая туннельная микроскопия, кручение под высоким давлением, границы зерен, энергия границ, ультрамелкозернистая структура

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

Для цитирования: Применение сканирующей туннельной микроскопии для оценки средней относительной энергии границ зерен в ниобии, полученном кручением под высоким давлением / Е.В. Осинников, А.Ю. Истомина, И.В. Блинов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 3. С. 29–37. DOI: 10.14529/met250303

APPLICATION OF SCANNING TUNNEL MICROSCOPY TO ASSESS THE DEGREE OF NON-EQUILIBRIUM OF GRAIN BOUNDARIES IN NIOBIUM OBTAINED BY HIGH PRESSURE TORSION

E.V. Osinnikov[✉], egor.osinnikov@rambler.ru

A.Yu. Istomina, istomina@imp.uran.ru

I.V. Blinov, blinoviv@mail.ru

V.V. Popov, vpopov@imp.uran.ru

R.M. Falahutdinov, falahutdinov@imp.uran.ru

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

Abstract. The average relative energy of grain boundaries in niobium after high-pressure torsion (HPT) using scanning tunneling microscopy (STM) has been investigated in this work. It was found that deformation by HPC leads to the formation of an ultrafine-grained (UFG) structure with an average grain size of ~ 100 nm and a significant increase in hardness (up to 2800 MPa). The energy state of grain boundaries was quantitatively evaluated by STM analysis: in coarse-crystalline niobium, the average relative energy of grain boundaries was 0.27, whereas after 5-turn HPT, it was 0.71.

It was found that in UFG-niobium, the boundaries with high relative energy (more than 0.6) prevail, which indicates the formation of non-equilibrium (strain-modified) grain boundaries. The results obtained are consistent with the data for other metals (Ni, Cu, and hafnium bronze) subjected to severe plastic deformation.

The work confirms the promising potential of STM microscopy for quantifying the energy of grain boundaries in nanostructured materials, which is important for understanding their mechanical properties and optimizing processing methods.

Keywords: niobium, scanning tunneling microscopy, high-pressure torsion, grain boundaries, boundary energy, ultrafine-grained structure

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the IMP UB RAS.

For citation: Osinnikov E.V., Istomina A.Yu., Blinov I.V., Popov V.V., Falahutdinov R.M. Application of scanning tunnel microscopy to assess the degree of non-equilibrium of grain boundaries in niobium obtained by high pressure torsion. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2025;25(3):29–37. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250303

Введение

Современные исследования металлов и сплавов, имеющих ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру, полученных с использованием методов интенсивной пластической деформации (ИПД), вызывают значительный интерес благодаря своим уникальным механическим свойствам [1].

Одними из наиболее перспективных методов ИПД являются кручение под высоким давлением (КВД), равноканальное угловое прессование (РКУП), динамическое канальное угловое прессование (ДКУП) [2], которые обеспечивают создание материалов с высокой плотностью дефектов кристаллической решетки и границ зерен, известных как «нерав-

новесные» или «деформационно-модифицированные» границы зерен [3–5]. Эти границы выполняют основную роль в формировании улучшенных механических свойств, таких как прочность, вязкость и устойчивость к разрушению и др. [6] Подобные границы имеют решающее значение для достижения повышенных показателей прочности, вязкости и сопротивления разрушению. Оценка относительной энергии границ зерен выполняется различными методами, такими как просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ) и сканирующая туннельная микроскопия (СТМ). СТМ особенно эффективна для изучения состояния границ зерен [7–9], что делает ее цен-

ным инструментом для анализа структурных особенностей материалов.

Существуют альтернативные подходы выявления особого состояния границ зерен, в частности, мессбауэровская спектроскопия (эмиссионная ядерная гамма-резонансная спектроскопия) [10, 11], послойный радиометрический анализ [12–14]. Так, например, в работах [10, 11] установлено, что величина изомерного сдвига в крупнокристаллическом образце выше, чем в УМЗ-образце, полученном методом КВД. Из этого следует, что структура границ зерен претерпела значительные искажения, а именно в них образовался избыточный свободный объем [15], который является характерным признаком, указывающим на специфическое состояние границ в исследуемом материале, наряду с такими, как повышенная относительная энергия и дальнедействующие поля упругих напряжений [16]. В работах [13, 14] проведено исследование зернограницной диффузии Со-57 в отожженном (КК) и продеформированном (УМЗ) образцах. Установлено существенное отличие в параметрах диффузии по границам зерен между двумя типами образцов. Данное наблюдение позволяет утверждать о том, что процесс деформации вызывает изменения в структуре и свойствах, оказывая влияние на скорость диффузионных процессов вдоль границ зерен за счет так называемых деформационно-модифицированных границ зерен.

Ниобий является металлом, представляющим особый интерес как перспективный функциональный материал, входящий в состав таких важных электротехнических материалов, как высокопрочные композиты и многослойные сверхпроводники [3]. При деформации методом КВД ниобий подвергается значительным изменениям микроструктуры, включая формирование субмикронных и нанометровых зерен, что требует детального анализа состояния границ этих зерен. Однако для более полного понимания необходимо характеризовать состояние границ зерен не только на качественном уровне, но и при помощи количественных показателей. Наиболее прямым методом количественной оценки состояния границ является измерение их энергии с использованием сканирующей туннельной микроскопии. Ранее такие исследования с применением СТМ и АСМ проводились на примере никеля [17, 18], меди [19, 20], гафниево-бронзы [5], которые подвергались раз-

личным способам интенсивной пластической деформации (РКУП, ДКУП, КВД).

Целью данной статьи является применение СТМ для оценки относительной энергии границ зерен в крупнокристаллическом ниобии и УМЗ-ниобии, полученном кручением под высоким давлением на 5 оборотов.

Материалы и методы

Исследования проводились на Nb с процентным содержанием примесей не более 0,02. Исходным материалом для формирования крупнозернистой структуры являлся поликристаллический ниобий, который подвергался термической обработке при температуре 850 °С на протяжении двух часов в условиях динамического вакуума при давлении 10^{-2} – 10^{-3} Па. Средний размер зерен в полученном материале равен ~ 25 мкм [10]. Твердость таких образцов составляла 800 МПа.

Процесс деформации ниобия осуществлялся согласно методике, описанной в [18]. Повышенный интерес вызывает структура ниобия после КВД на 5 оборотов, поскольку при таком деформировании достигается стадия насыщения – наблюдается формирование УМЗ-структуры, равномерной по всей площади образца. При этой стадии дальнейшее уменьшение размера зерна и увеличение твердости становятся несущественными. Проведенные электронно-микроскопические исследования показали, что величина твердости этих образцов составила 2800 МПа, а средний размер кристаллитов после КВД – 100 нм, что согласуется с ранее проведенными исследованиями [14, 21].

Получение качественных СТМ-изображений поверхности структуры ниобия является одной из важных задач в исследованиях. Для этого подобрана специальная методика подготовки образцов, схожая с описанной в работах [5, 18]. После механической шлифовки образец подвергали электролитической полировке в кислотах $H_2SO_4:HF$ в соотношении 9:1. Травление границ зерен выполнялось химически в растворе $H_2O:H_2O_2:NH_4OH$ в соотношении 7:2:1.

СТМ-изображения зеренной структуры получены на сканирующем туннельном микроскопе СММ-2000 в режиме поддержания туннельного тока [22, 23] со следующими параметрами: размер области сканирования от $1,0 \times 1,0$ мкм до $40,0 \times 40,0$ мкм, скорость сканирования 1...10 мкм/с, параметр быстрогодей-

ствия системы поддержания туннельного тока τ 120...300 мс. В качестве иглы использовалась резаная Pt проволока чистотой 99,9 % диаметром 0,3 мм. Съемка проводилась на середине радиуса исследуемых образцов. Методика расчета относительной энергии границ зерен представлена в работах [5, 16–20].

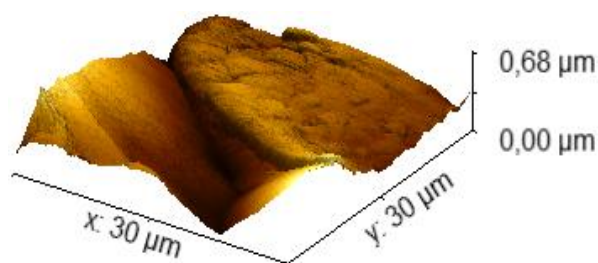
Результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 представлены СТМ-изображения поверхности крупнокристаллического ниобия и УМЗ-ниобия соответственно.

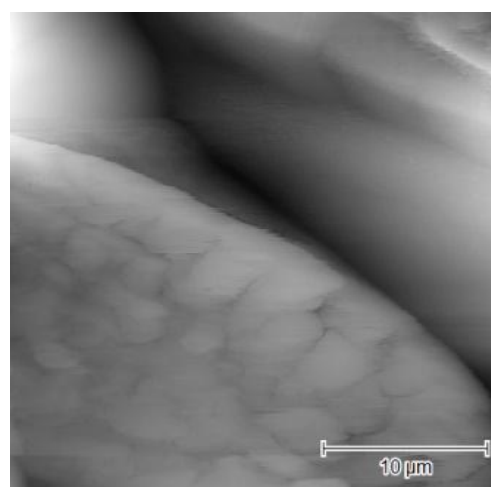
Исходя из анализа профилей, полученных на основе изображений, представленных на

рис. 1b и 2b, построены гистограммы распределения энергий границ зерен ниобия в двух состояниях: крупнокристаллическом и после КВД на 5 оборотов. Гистограммы приведены на рис. 3. Для каждого образца использовалось не менее десяти СТМ-изображений, которые позволили определить относительные энергии более чем 100 границ зерен.

Показанные на рис. 3a данные свидетельствуют о незначительном количестве границ с относительной энергией более 0,6 в отожженном образце. В отличие от этого, в образце ультрамелкозернистого ниобия (рис. 3b) наблюдается преобладание границ с энергий



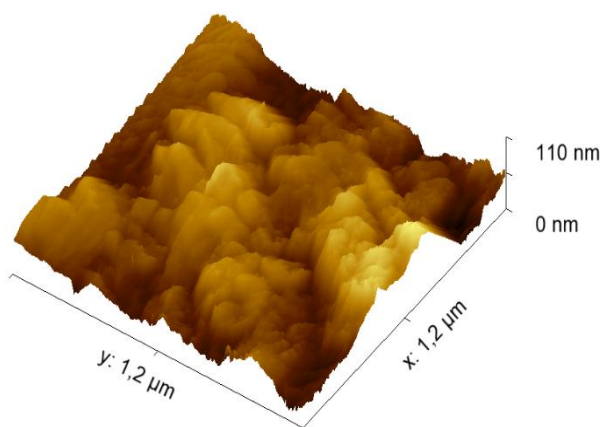
a)



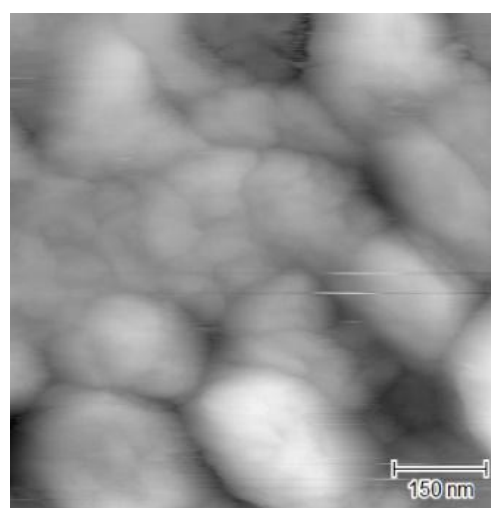
b)

Рис. 1. СТМ-изображение поверхности крупнокристаллического ниобия: а – 3D-вид; б – плоскость для расчета энергии ГЗ

Fig. 1. STM image of the surface of coarse-grained niobium: a – 3D view; b – the plane is used for calculating the energy of grain boundaries



a)



b)

Рис. 2. СТМ-изображение поверхности УМЗ-ниобия: а – 3D-вид; б – плоскость для расчета энергии ГЗ

Fig. 2. STM image of the surface of UFG niobium: a – 3D view; b – the plane is used for calculating the energy of grain boundaries

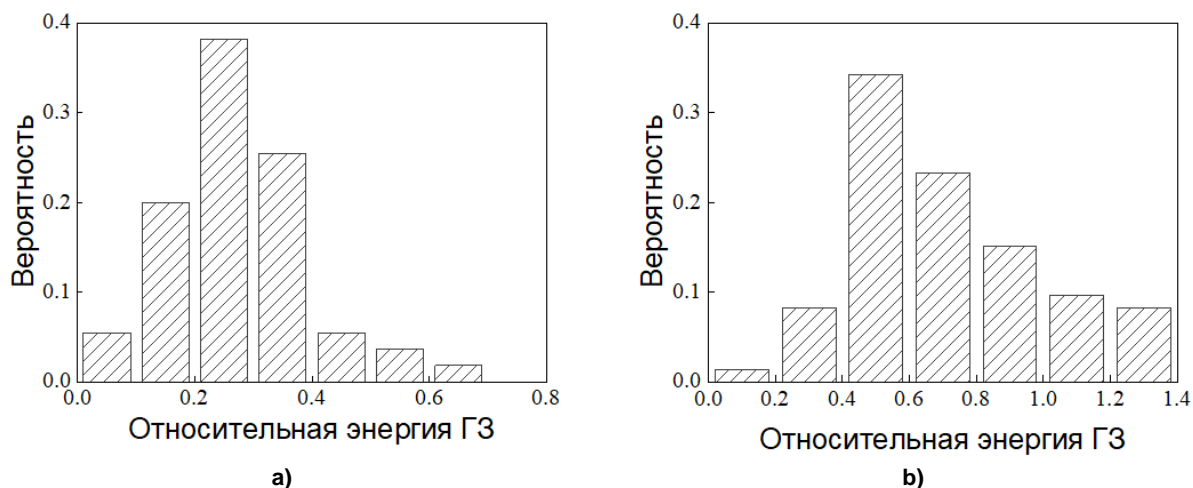


Рис. 3. Гистограммы распределения относительных энергий в ниобии:
а – крупнокристаллический образец; б – КВД на 5 оборотов
Fig. 3. Distribution histograms of the relative energy in niobium:
а – coarse-grained sample; б – subjected by HTP for 5 revolutions

выше 0,6. Максимальная зафиксированная энергия в данном случае достигает 1,4. Повышение концентрации высокоугловых границ зерен влечет за собой увеличение относительной энергии границ зерен.

Согласно данным [24, 25], для материалов, обладающих границами зерен рекристаллизационного происхождения, максимальная относительная энергия обычно не превышает диапазон 0,5–0,6. В рамках настоящего исследования выявлено, что в УМЗ-ниобии существенная часть границ зерен обладает относительной энергией, превышающей 0,6. Данный факт указывает на то, что преобладающее число границ зерен в УМЗ-ниобии находится в неравновесном или деформационно-модифицированном состоянии.

В [5, 16, 17] выполнена оценка средней относительной энергии ГЗ с помощью СТМ-микроскопии в никеле и гафниево-бронзе, полученных методами ИПД (ДКУП, РКУП, КВД). Результаты этих исследований показывают, что применение деформации приводит к формированию неравновесных границ зерен, обладающих повышенной энергией.

В настоящей работе также установлено, что в УМЗ-ниобии происходит рост средней относительной энергии границ зерен относительно непродеформированного образца (0,27 в крупнокристаллическом образце и 0,71 в образце, подвергнутом КВД на 5 оборотов).

Таким образом, обнаружено, что при использовании ИПД происходит заметное повышение средней относительной энергии, что позволяет сделать вывод о том, что в метал-

лических материалах с ГЦК и ОЦК-решеткой формируются деформационно-модифицированные границы зерен, имеющие избыточный свободный объем, а величина максимальной энергии границ ограничена величиной 1,2–1,4 [5, 17, 18, 25].

Заключение

1. Применение СТМ позволило количественно оценить относительную энергию границ зерен в ниобии до и после деформации методом КВД. Методика электролитической полировки и химического травления обеспечила высокое качество СТМ-изображений.

2. В крупнокристаллическом ниобии средняя относительная энергия границ зерен составила 0,27, что характерно для равновесных границ. После КВД на 5 оборотов средняя энергия возросла до 0,71, а доля границ с энергией более 0,6 достигла максимума, что указывает на формирование неравновесных границ. УМЗ-структура демонстрирует повышенную твердость (2800 МПа) и нанометровый размер зерен (около 100 нм).

3. Полученные данные свидетельствуют о том, что эффект формирования деформационно-модифицированных границ зерен с повышенной энергией является универсальным для металлов с различным типом кристаллической решетки и химическим составом при обработке методами ИПД. Это открывает возможности для целенаправленного управления структурой и свойствами металлических материалов путем варьирования параметров деформации.

Список литературы

1. 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. P. 881–981. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.003
2. Патент RU 2283717 С2. Способ динамической обработки материалов / Е.В. Шорохов, И.Н. Жгилев, Р.З. Валиев. № 2004131484/02; заявл. 28.10.2004; опубл. 20.09.2006, Бюл. № 26.
3. Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications // *Progress in Materials Science*. 2008. Vol. 53. P. 893–979. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.03.002
4. Zhu Y.T., Lowe T.C., Langdon T.G. Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation // *Scripta Materialia*. 2004. Vol. 51. P. 825–830. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.05.006
5. 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
6. Sutton A.P., Balluffi R.W. *Interfaces in crystalline materials*. Oxford: Oxford University Press, 1995. 520 p.
7. *Handbook of Materials Characterization* / S.K. Sharma, D.S. Verma, L.U. Khan, S. Kumar, S.B. Khan (Eds.). Springer International Publishing, 2018. 613 p. DOI: 10.1007/978-3-319-92955-2
8. Auer A., Giessibl F.J., Kunze-Liebhäuser J. Combining Electrochemical Scanning Tunneling Microscopy with Force Microscopy // *ACS Nano*. 2025. Vol. 19. P. 8401–8410. DOI: 10.1021/acsnano.5c00591
9. Scanning Tunneling Microscopy Examination of Molecules with Fused Thiophene and Pyrrole Groups Adsorbed on the Electrified Au(111) Interface / R. Balasaravanan, Ch. Hsieh, M. Jhou et al. // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2024. Vol. 128, no. 11. P. 4796–4802. DOI: 10.1021/acs.jpcc.4c00118
10. Попов В.В., Осинников Е.В. Механизм зернограницной диффузии и зернограницная сегрегация ^{57}Co в поликристаллическом ниобии // *Физика металлов и металловедение*. 2021. Т. 122, № 9. С. 957–962. DOI: 10.31857/S0015323021090102
11. Попов В.В., Осинников Е.В., Фалахутдинов Р.М. Эмиссионная мессбауэровская спектроскопия границ зерен ультрамелкозернистого ниобия, полученного интенсивной пластической деформацией // *Физика металлов и металловедение*. 2022. Т. 123, № 8. С. 881–887.
12. Wilde G., Divinski S. Grain Boundaries and Diffusion Phenomena in Severely Deformed Materials // *Materials Transactions*. 2019. Vol. 60, iss. 7. P. 1302–131. DOI: 10.2320/matertrans.MF201934
13. Зернограницная диффузия ^{57}Co в ниобии / В.В. Попов, Е.В. Осинников, А.Ю. Истомина, Р.М. Фалахутдинов // *Физика металлов и металловедение*. 2023. Т. 124, № 3. С. 298–302. DOI: 10.31857/S0015323022601672
14. Зернограницная диффузия ^{57}Co в ультрамелкозернистом ниобии, полученном интенсивной пластической деформацией / В.В. Попов, Е.В. Осинников, А.Ю. Истомина и др. // *Физика металлов и металловедение*. 2023. Т. 124, № 6. С. 477–482.
15. Nazarov A.A. Review: Nonequilibrium Grain Boundaries in Bulk Nanostructured Metals and their Recovery under the Influences of Heating and Cyclic Deformation // *Letters on Materials*. 2018. Vol. 8, no. 3. P. 372–381. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-3-372-381
16. Nazarov A.A., Romanov A.E., Valiev R.Z. On the structure, stress fields and energy of nonequilibrium grain boundaries // *Acta Metall. Mater.* 1993. Vol. 41, no. 4. P. 1033–1040. DOI: 10.1016/0956-7151(93)90152-i
17. 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.
18. 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

19. 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. DOI: 10.1016/j.actamat.2007.08.023
20. Энергия внутренних границ раздела как характеристика эволюции структуры ультрамелкозернистых меди и никеля после отжига / П.В. Кузнецов, Т.В. Рахматулина, И.В. Беляева, А.В. Корзников // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118, № 3. С. 255–262. DOI: 10.7868/S0015323017030111
21. Термическая стабильность нанокристаллического ниобия, полученного интенсивной пластической деформацией / Е.Н. Попова, В.В. Попов, Е.П. Романов, В.П. Пилюгин // *Физика металлов и металловедение*. 2006. Т. 101, № 1. С. 58–64.
22. Hansma P.K., Tersoff J. Scanning tunneling microscopy // *J. Appl. Phys.* 1987. Vol. 61, no. 2. P. R1–R24.
23. Moresco F. Local Information with Scanning Tunneling Microscopy // *Springer Handbook of Surface Science*. 2020. P. 225–243. DOI: 10.1007/978-3-030-46906-1_8
24. Relative grain boundary energies in ultrafine grain Ni obtained by high pressure torsion / J. Zimmerman, A. Sharma, S.V. Divinski, E. Rabkin // *Scripta Materialia*. 2020. Vol. 182. P. 90–93. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2020.03.008
25. Нохрин А.В., Макаров И.М. Особенности методики исследований зеренной структуры нано- и микрокристаллических металлов методом атомно-силовой микроскопии // *Микросистемная техника*. 2003. № 3. С. 19–28.

References

1. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*. 2006;51:881–981. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.003
2. Shorokhov E.V., Zhgilev I.N., Valiev R.Z. *Method for dynamic deforming of metals*. Patent RU 2283717 C2, 2006.
3. Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*. 2008;53:893–979. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.03.002
4. Zhu Y.T., Lowe T.C., Langdon T.G. Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation. *Scripta Materialia*. 2004;51:825–830. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.05.006
5. 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
6. Sutton A.P., Balluffi R.W. *Interfaces in crystalline materials*. Oxford: Oxford University Press, 1995. 520 p.
7. Sharma S.K., Verma D.S., Khan L.U., Kumar S., Khan S.B. (Eds.). *Handbook of Materials Characterization*. Springer International Publishing, 2018. 613 p. DOI: 10.1007/978-3-319-92955-2
8. Auer A., Giessibl F.J., Kunze-Liebhäuser J. Combining Electrochemical Scanning Tunneling Microscopy with Force Microscopy. *ACS Nano*. 2025;19:8401–8410. DOI: 10.1021/acsnano.5c00591
9. Balasaravanan R., Hsieh Ch., Jhou M. et al. Scanning Tunneling Microscopy Examination of Molecules with Fused Thiophene and Pyrrole Groups Adsorbed on the Electrified Au(111) Interface. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2024;128(11):4796–4802. DOI: 10.1021/acs.jpcc.4c00118
10. Popov V.V., Osinnikov E.V. Mechanism of Grain-Boundary Diffusion and Grain-Boundary Segregation of ⁵⁷Co in Polycrystalline Nb. *The Physics of Metals and Metallography*. 2021;122(9):891–895. DOI: 10.1134/S0031918X21090106
11. Popov V.V., Osinnikov E.V., Falakhutdinov R.M. Mössbauer Emission Spectroscopy of Grain Boundaries in Ultrafine-Grained Niobium Obtained by Severe Plastic Deformation. *The Physics of Metals and Metallography*. 2022;123(8):825–830. DOI: 10.1134/S0031918X22080063
12. Wilde G., Divinski S. Grain Boundaries and Diffusion Phenomena in Severely Deformed Materials. *Materials Transactions*. 2019;60(7):1302–1311. DOI: 10.2320/matertrans.MF201934
13. Popov V.V., Osinnikov E.V., Istomina A.Yu., Falakhutdinov R.M. Grain-Boundary Diffusion of ⁵⁷Co in Niobium. *The Physics of Metals and Metallography*. 2023;124(3):285–289. DOI: 10.1134/S0031918X22602153

14. Popov V.V., Osinnikov E.V., Istomina A.Yu. et al. Grain-Boundary Diffusion of ^{57}Co in Ultrafine-Grained Niobium after Severe Plastic Deformation. *The Physics of Metals and Metallography*. 2023;124(6):561–566. DOI: 10.1134/S0031918X23600781
15. Nazarov A.A. Review: Nonequilibrium Grain Boundaries in Bulk Nanostructured Metals and their Recovery under the Influences of Heating and Cyclic Deformation. *Letters on Materials*. 2018;8(3):372–381. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-3-372-381
16. Nazarov A.A., Romanov A.E., Valiev R.Z. On the structure, stress fields and energy of nonequilibrium grain boundaries. *Acta Metall. Mater.* 1993;41(4):1033–1040. DOI: 10.1016/0956-7151(93)90152-i
17. 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.)
18. 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. (In Russ.) DOI: 10.14529/mmp220309
19. 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. DOI: 10.1016/j.actamat.2007.08.023
20. Kuznetsov P.V., Rakhmatulina 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. *The Physics of Metals and Metallography*. 2017;118(3):241–248. DOI: 10.1134/S0031918X17030115
21. Popova E.N., Popov V.V., Romanov E.P., Pilyugin V.P. Thermal stability of nanocrystalline Nb produced by severe plastic deformation. *The Physics of Metals and Metallography*. 2006;101(1):52–57. DOI: 10.1134/S0031918X06010078
22. Hansma P.K., Tersoff J. Scanning tunneling microscopy. *J. Appl. Phys.* 1987;61(2):R1–R24.
23. Moresco F. Local Information with Scanning Tunneling Microscopy. In book: *Springer Handbook of Surface Science*. 2020. P. 225–243. DOI: 10.1007/978-3-030-46906-1_8
24. Zimmerman J., Sharma A., Divinski S.V., Rabkin E. Relative grain boundary energies in ultrafine grain Ni obtained by high pressure torsion. *Scripta Materialia*. 2020;182:90–93. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2020.03.008
25. Nohrin A.V., Makarov I.M. Peculiarity of Nano- and Microcrystalline Metals Grain Structure Investigations by Atomic-Force Microscopy. *Microsystems technology*. 2003;(3):19–28.

Информация об авторах

Осинников Егор Вячеславович, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории диффузии, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия; egor.osinnikov@rambler.ru.

Истомина Анастасия Юрьевна, младший научный сотрудник лаборатории диффузии, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия; istomina@imp.uran.ru.

Блинов Илья Викторович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории диффузии, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия; blinoviv@mail.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.

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

Information about the authors

Egor V. Osinnikov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Researcher, Diffusion Laboratory, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; egor.osinnikov@yandex.ru.

Anastasiya Yu. Istomina, Junior Researcher, Diffusion Laboratory, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; istomina@imp.uran.ru.

И'я V. Blinov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, Diffusion Laboratory, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; blinoviv@mail.ru.

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

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

Статья поступила в редакцию 10.04.2025

The article was submitted 10.04.2025