

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

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург,

Российская Федерация

E-mail: osinnikov@imp.uran.ru

Аннотация. Цель работы состоит в оценке относительной свободной энергии границ зерен никеля, продеформированного методом кручения под высоким давлением (КВД), с помощью сканирующей туннельной микроскопии. В процессе работы проведены следующие исследования:

1) Отработана методика пробоподготовки образцов Ni, подвергнутых интенсивной пластической деформации (ИПД) методом КВД, 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 никеля, 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 КВД средняя относительная энергия границ зерен значительно превышает относительную энергию границ зерен крупнозернистого никеля с границами зерен рекристаллизационного происхождения. Таким образом, в результате КВД в образцах формируются неравновесные границы зерен.

4) Показано, что с увеличением степени деформации КВД происходит увеличение средней относительной энергии границ зерен, что свидетельствует об увеличении степени их неравновесности.

5) Продемонстрировано, что ИПД методом КВД позволяет достигнуть более высокого уровня относительной энергии границ зерен, чем деформация методом равноканального углового прессования (РКУП).

Ключевые слова: никель; интенсивная пластическая деформация; сканирующая туннельная микроскопия; относительная свободная энергия.

Введение

В последние десятилетия были разработаны различные методы интенсивной пластической деформации (ИПД) для изготовления ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов [1]. Эти материалы обладают очень высокой плотностью границ зерен, которые играют важную роль в достижении новых свойств. В работе [2] было высказано предположение, что ГЗ в УМЗ-материалах, производимых ИПД, находятся в сильно «неравновесном» метастабильном состоянии. По мнению авторов работы [3], эти «неравновесные» ГЗ отвечают за улучшенные механические свойства материалов, обработанных интенсивной пластической деформацией, которые превышают свойства, ожидаемые только на основе уменьшения размеров зерен.

Согласно [4, 5], эти «неравновесные» границы характеризуются тремя основными особенностями, а именно избыточной энергией границ зерен, присутствием дальнедействующих упругих напряжений и повышенным свободным объемом. Еще одним свойством неравновесных границ зерен является сверхбыстрая зернограницная диффузия [6].

Обнаружить особое деформационно-модифицированное состояние границ зерен позволяют различные методы: электронная микроскопия высокого разрешения [7], эмиссионная ядерная гамма-резонансная (мессбауэровская) спектроскопия [8], измерение параметров зернограницной

диффузии [9]. Однако, желательно характеризовать состояние границ зерен не только качественно, но и количественно. Наиболее прямой метод количественной оценки состояния границ – это определение их энергии.

В работах [10, 11] была исследована зернограницная диффузия в крупнозернистом поликристаллическом никеле и УМЗ никеле, полученном ИПД методом кручения под высоким давлением. Было показано, что коэффициент зернограницной диффузии в УМЗ никеле, подвергнутом ИПД, на несколько порядков выше, чем в крупнозернистом образце с границами зерен рекристаллизационного происхождения. Это свидетельствует о том, что в материале, подвергнутом ИПД, присутствуют «неравновесные» границы зерен.

В настоящей работе была поставлена задача оценить относительную энергию границ зерен в никеле, продеформированном кручением под высоким давлением.

Материал и методика

Исследования проводились на Ni номинальной чистоты 99,98 %. Содержание примесей в образце приведено в таблице 1.

Таблица 1

Содержание примесей в Ni образце											
Элемент примеси	Al	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mg	P	Si	Ti	V
Содержание, 10 ⁻⁴ % вес	61	35	<3	17	4	<1	13	<30	10	7	7

Цилиндрические прутки никеля диаметром 10 мм были нарезаны на тонкие диски толщиной 1,5 мм. Деформирование проводилось в наковальнях Бриджмена при комнатной температуре, на 0,5 и 5 оборотов при давлении 4 ГПа, с угловой скоростью 0,3 об/мин.

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.

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

$$\gamma_{\text{rel}} = \frac{\gamma_{\text{gb}}}{\gamma_{\text{s}}} = 2 \cos \frac{\Psi}{2}, \quad (1)$$

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

Этот метод дает хорошие результаты для измерения относительной энергии равновесных границ (см. например, [12, 13]).

Есть 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 [14] 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 [15]. Поэтому получила распространение методика измерения относительной энергии границ зерен путем измерения двугранного угла в канавках, сформированных в результате химического травления [16, 17]. Сопоставление значений относительных энергий равновесных границ зерен в меди, полученных измерением углов в канавках термического [14] и химического [17] 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.
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 таблице 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 в 11 % растворе персульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ для выявления границ зерен.

Состояние границ зерен исследовали с помощью сканирующего мультимикроскопа, работающего в режиме сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Съёмка проводилась на середине радиуса исследуемых образцов. Обработка изображений, полученных с помощью СТМ, проводилась в приложении Gwyddion путем построения линий перпендикулярно границам зерен. В результате был получен профиль границы зерна, совместимый с программой Origin, на основании которого 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

Изображения зеренной структуры никеля после КВД на 5 оборотов показаны на рис. 2.

На рис. 3 приведены гистограммы относительного распределения границ зерен для никеля, прокрученного на 0,5 (а) и 5 (б) оборотов.

Средняя относительная энергия границ зерен в никеле, после КВД составляет 0,47 и 0,88 при 0,5 и 5 оборотов, соответственно. С увеличением степени деформации КВД с 0,5 до 5 оборотов относительная энергия границ зерен увеличивается. Согласно [16] средняя относительная энергия границ зерен в крупнозернистом поликристаллическом никеле с границами зерен рекристаллизационного происхождения равна 0,3, а энергия границ зерен после ИПД методом равноканального углового прессования по маршруту В_c (4 прохода) составляет 0,57. Это больше энергии границ зерен при КВД на 0,5 оборота, но меньше, чем в случае деформации на 5 оборотов. Очевидно, что после деформации КВД на 0,5 оборота степень неравновесности границ зерен меньше, чем в случае деформации методом равноканального прессования на 4 прохода. В то же время после деформации КВД на 5 оборотов удается достигнуть большей степени неравновесности границ зерен, чем после равноканального углового прессования.

Таким образом, ИПД методом кручения под высоким давлением приводит к формированию границ зерен с повышенной относительной энергией, что позволяет сделать вывод об их неравновесном характере.

Заключение

Отработана методика пробоподготовки образцов Ni, подвергнутых ИПД, для последующих исследований методом туннельной сканирующей микроскопии. С помощью сканирующей

Таблица 2

Состав электролита
для электрополировки никеля

Компонент	Концентрация компонента, г/л
Серная кислота H_2SO_4	1200
Ортофосфорная кислота H_3PO_4	120 – 150
Лимонная кислота	15 – 20

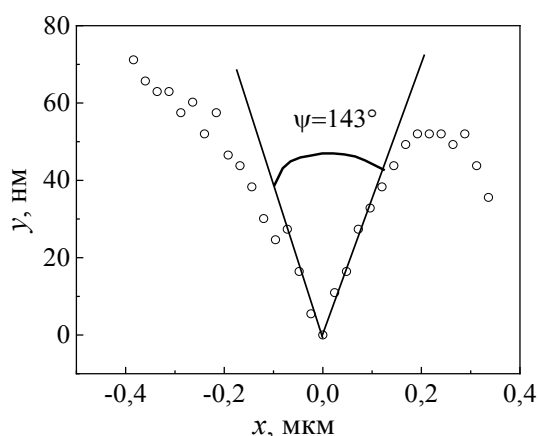


Рис. 1. Пример профиля для расчета двугранного угла

туннельной микроскопии проведена оценка относительной энергии границ зерен в никеле, подвергнутому кручению под высоким давлением. Показано, что после деформации КВД, средняя относительная энергия границ зерен значительно превышает относительную энергию границ зерен в крупнозернистом никеле. Это позволяет сделать вывод о формировании в процессе КВД неравновесных границ зерен. Показано, что с увеличением степени деформации КВД происходит увеличение средней относительной энергии границ зерен, что свидетельствует об увеличении степени их неравновесности. Установлено, что ИПД методом КВД позволяет достигнуть более высокого уровня относительной энергии границ зерен, чем деформация методом РКУП.

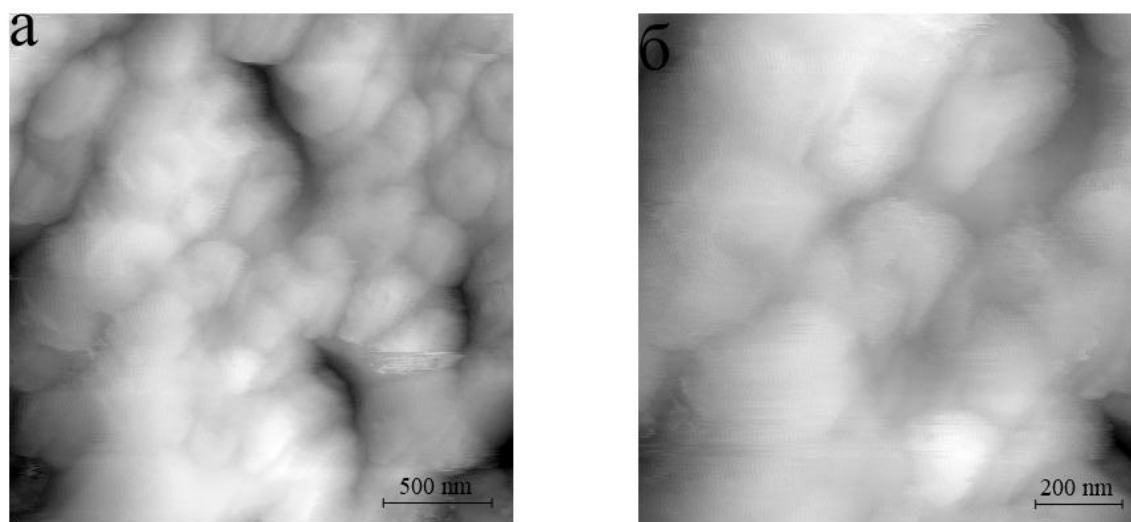


Рис. 2. СТМ-изображение структуры никеля, подвергнутого кручению на 5 оборотов на разных масштабных уровнях. Размер приведенных СТМ-изображений: а – 2500 × 2500 нм; б – 1200 × 1200 нм

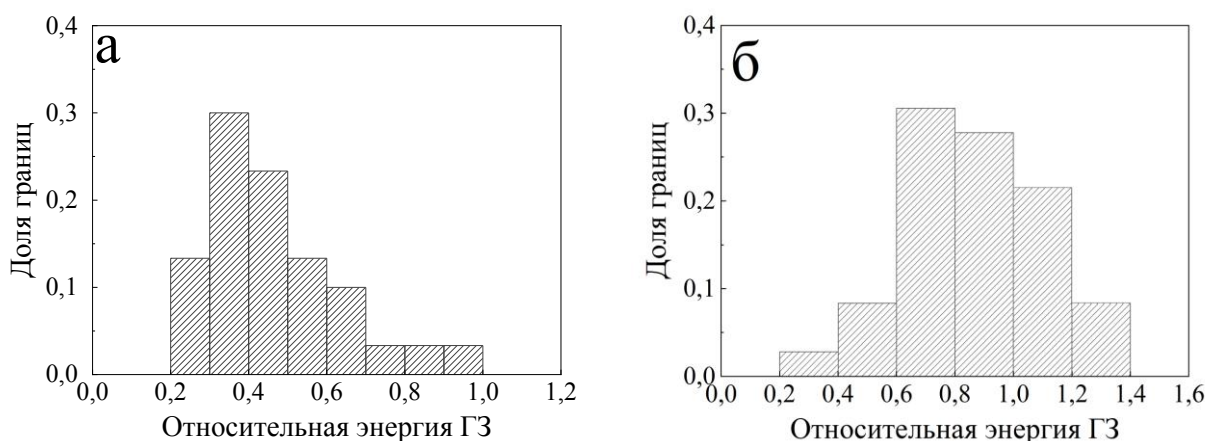


Рис. 3. Распределение относительной энергии в никеле, подвергнутом КВД на 0.5 об (а) и 5 об (б)

Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь в подготовке образцов м.н.с лаборатории диффузии Р.М. Фалахутнидову и ведущему технологу лаборатории диффузии Л.И. Мамаевой.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Функция» номер госрегистрации 122021000035-6) при частичной поддержке РФФИ, проект № 20-32-90100.

Литература

1. 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.
2. Valiev, R.Z. Grain boundary structure and properties under external influences / R.Z. Valiev, V. Yu. Gertsman, O.A. Kaibyshev // Phys. Stat. Sol. (a). – 1986. – Vol. 97, Iss. 1. – P. 11–56.

3. Valiev, R.Z. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. / R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov // *Progress in Materials Science*. – 2000. – Vol. 45, no. 2. – P. 103–189.
4. Nazarov, A.A. On the structure, stress fields and energy of nonequilibrium grain boundaries. / A.A. Nazarov, A.E. Romanov, R.Z. Valiev // *Acta Metall. Mater.* – 1993. – Vol. 41, no. 4. – P. 1033–1040.
5. Nazarov, A.A. Review: Nonequilibrium Grain Boundaries in Bulk Nanostructured Metals and their Recovery under the Influences of Heating and Cyclic Deformation / A.A. Nazarov // *Letters on Materials*. – 2018. – Vol. 8, no. 3. – P. 372–381.
6. Effect of Heat Treatment on Diffusion, Internal Friction, Microstructure and Mechanical Properties of Ultra-Fine-Grained Nickel Severely Deformed by Equal-Channel Angular Pressing / Divinski S.V., Reglitz G., Golovin I.S. *et al.* // *Acta Mater.* – 2015. – Vol. 82. – P. 11–21.
7. Observations of Grain Boundary Structure in Submicrometer-Grained Cu and Ni Using High-Resolution Electron Microscopy / Z. Horita, D.J. Smith, M. Nemoto *et al.* // *Journal of Materials Research*. – 1998. – Vol. 13, no 2. – P. 446–450.
8. Popov, V.V. Mossbauer Spectroscopy of Interfaces in Metals. / V.V. Popov // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2012. – Vol. 113, no. 13. – P. 1257–1289.
9. Wilde, G. Grain Boundaries and Diffusion Phenomena in Severely Deformed Materials / G. Wilde, S. Divinski // *Mater. Trans.* – 2019. – Vol. 60, Iss. 7. – P. 1302–1315.
10. Grain boundary diffusion of ^{57}Co in nickel / V.V. Popov, E.V. Osinnikov, S.A. Murzinova *et al.* // *Journal of phase equilibria and diffusion*. – 2020. – Vol. 41, no. 2. – pp. 132–137.
11. Зернограницная диффузия ^{57}Co в ультрамелкозернистом никеле, полученном интенсивной пластической деформацией / Е.В. Осинников, С.А. Мурзинова, А.Ю. Истомина и др. // *Физика металлов и металловедение*. – 2021. – Т. 122, № 10. – С. 1049–1053.
12. Amouyal, Y. Correlation between Grain Boundary Energy and Geometry in Ni-rich NiAl / Y. Amouyal, E. Rabkin, Y. Mishin // *Acta Materialia*. – 2005. – Vol. 53, Iss. 14. – P. 3795–3805.
13. 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.
14. Amouyal, Y. A Scanning Force Microscopy Study of Grain Boundary Energy in Copper Subjected to Equal Channel Angular Pressing / Y. Amouyal, E. Rabkin // *Acta Materialia*. – 2007. – Vol. 55, Iss. 20. – P. 6681–6689.
15. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография / С.А. Салтыков. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.
16. 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
17. 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.

Поступила в редакцию 14 апреля 2022 г.

Сведения об авторах

Осинников Егор Вячеславович – младший научный сотрудник, лаборатория диффузии, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: osinnikov@imp.uran.ru.

Блинов Илья Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатория диффузии, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: blinov@imp.uran.ru.

Истомина Анастасия Юрьевна – младший научный сотрудник, лаборатория диффузии, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: zhuk.1111@mail.ru.

Попов Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория диффузии, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: vpopov@imp.uran.ru.

APPLICATION OF SCANNING TUNNELING MICROSCOPY FOR EVALUATION OF THE NON-EQUILIBRIUM STATE OF GRAIN BOUNDARIES IN NICKEL SUBJECTED TO HIGH PRESSURE TORSION

E. V. Osinnikov, I.V. Blinov, A.Yu. Istomina, V.V. Popov

*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
E-mail: osinnikov@imp.uran.ru*

Abstract. The goal of the study is to estimate the relative free energy of grain boundaries in nickel deformed by high-pressure torsion (HPT) using scanning tunneling microscopy. In the process of work, the following studies have been carried out.

The technique has been developed for sample preparation of Ni samples subjected to severe plastic deformation (SPD) by the HPT method for subsequent studies by scanning tunneling microscopy, which provides an average value of the root-mean-square surface roughness of approximately 2 nm. Using scanning tunneling microscopy, images of the nickel surface structure have been obtained, which have been processed using the Gwyddion application program.

As a result, the grain boundary profiles have been calculated, based on which the values of the dihedral angles at the bottom of the etching grooves have been calculated and the relative energies of the grain boundaries have been calculated.

It has been established that after HPT deformation, the average relative energy of grain boundaries significantly exceeds the relative energy of grain boundaries of coarse-grained nickel with grain boundaries of recrystallization origin. Thus, because of HPT, non-equilibrium grain boundaries are formed in the samples.

It has been shown that with an increase in the degree of HPT deformation, an increase in the average relative energy of grain boundaries occurs, which indicates an increase in the degree of their non-equilibrium.

It has been demonstrated that SPD by the HPT method makes it possible to achieve a higher level of relative energy of grain boundaries than deformation by the equal-channel angular pressing (ECAP) method.

Keywords: Nickel; severe plastic deformation; scanning tunneling microscopy; relative free energy.

References

1. Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J., Zhu Y.T. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *JOM*, 2006, Vol. 58, pp. 33–39. DOI: 10.1007/s11837-006-0213-7
2. Valiev R.Z., Gertsman V.Yu., Kaibyshev O.A. Grain Boundary Structure and Properties under External Influences. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1986, Vol. 97, Iss. 1, pp. 11–56. DOI: 10.1002/pssa.2210970102
3. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progr. Mater. Sci.*, 2000, Vol. 45, no. 2, pp. 103–189. DOI: 10.1016/S0079-6425(99)00007-9
4. 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, pp. 1033–1040. DOI: 10.1016/0956-7151(93)90152-I

5. Nazarov, A.A. 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, pp. 372–381. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-3-372-381
6. Divinski S.V., Reglitz G., Golovin I.S., Peterlechner M., Lapovok R., Estrin Y., Wilde G. Effect of Heat Treatment on Diffusion, Internal Friction, Microstructure and Mechanical Properties of Ultra-Fine-Grained Nickel Severely Deformed by Equal-Channel Angular Pressing. *Acta Mater.*, 2015, Vol. 82, pp. 11–21. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.08.064
7. Horita Z., Smith D.J., Nemoto M., Valiev R.Z., Langdon T.G. Observations of Grain Boundary Structure in Submicrometer-Grained Cu and Ni Using High-Resolution Electron Microscopy. *Journal of Materials Research*, 1998, Vol. 13, no. 2, pp. 446–450. DOI: 10.1557/JMR.1998.0057
8. Popov V.V. Mossbauer Spectroscopy of Interfaces in Metals. *The Physics of Metals and Metallography*, 2012, Vol. 113, no. 13, pp. 1257–1289. DOI: 10.1134/S0031918X12130029
9. Wilde G., Divinski S. Grain Boundaries and Diffusion Phenomena in Severely Deformed Materials. *Mater. Trans.*, 2019, Vol. 60, Iss. 7, pp. 1302–1315. DOI: 10.2320/matertrans.MF201934
10. Popov V.V., Osinnikov E.V., Murzinova S.A., Stolbovsky A.V., Falahutdinov R.M. Grain boundary diffusion of ^{57}Co in nickel. *Journal of phase equilibria and diffusion*, 2020, Vol. 41, no. 2, pp. 132–137. DOI: 10.1007/s11669-020-00794-5
11. Osinnikov E.V., Murzinova S.A., Istomina A.Yu., Popov V.V., Stolbovskiy A. V., Falahutdinov R.M. Grain-Boundary Diffusion of ^{57}Co in Ultrafine Nickel after Severe Plastic Deformation. *The Physics of Metals and Metallography*, 2021, Vol. 122, no. 10, pp. 976–980. DOI: 10.1134/S0031918X21100082
12. Amouyal Y., Rabkin E., Mishin Y. Correlation between grain boundary energy and geometry in Ni-rich NiAl. *Acta Materialia*, 2005, Vol. 53, Iss. 14, pp. 3795–3805. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.04.043
13. 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, Vol. 27, no. 3, pp. 175–181. DOI: 10.4322/RBEB.2011.014
14. 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, pp. 6681–6689. DOI: 10.1016/j.actamat.2007.08.023
15. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya* (Stereometric Metallography). Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 271 p. (in Russ.).
16. 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. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2012, Vol. 78, no. 4, pp. 26–34.
17. 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, Vol. 118, no. 3, pp. 241–248. DOI: 10.1134/S0031918X17030115

Received April 14, 2022

Information about the authors

Osinnikov Egor Vyacheslavovich is Junior Research Fellow, Diffusion Laboratory, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: osinnikov@imp.uran.ru.

Blinov Il'ya Viktorovich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Senior Staff Scientist, Diffusion Laboratory, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: blinov@imp.uran.ru.

Istomina Anastasiya Yur'evna is Junior Research Fellow, Diffusion Laboratory, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: zhuk.1111@mail.ru.

Popov Vladimir Vladimirovich is Dr. Sc. (Engineering), Professor, Chief Scientist Officer, Diffusion Laboratory, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: vpopov@imp.uran.ru.