ISSN: 0368-0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Том 60. № 2. С. 133 – 139. © 2017. Шляхова Г.В., Бочкарёва А.В., Баранникова С.А., Зуев Л.Б., Мартусевич Е.В.

УДК 620.22:620.186

ВОЗМОЖНОСТИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ТЕРМООБРАБОТКИ*

Шляхова Г.В.^{1, 2}, к.т.н., научный сотрудник, доцент кафедры «Машины и аппараты химических и атомных производств» (shgv@ispms.tsc.ru)

Бочкарёва А.В.^{1,3}, к.т.н., младший научный сотрудник, доцент кафедры «Теоретическая

и прикладная механика» (avb@ispms.tsc.ru)

Баранникова С.А.^{1,4}, д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник, профессор

кафедры «Механика деформируемого твердого тела» (bsa@ispms.tsc.ru)

Зуев Л.Б.^{1,4}, д.ф.- м.н., профессор, заведующий лабораторией физики прочности, профессор

кафедры «Теория прочности и проектирования» (lbz@ispms.tsc.ru)

Мартусевич Е.В.⁵, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин

им. В.М. Финкеля (martusevich_ev@physics.sibsiy.ru)

 ¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4)
 ² Северский технологический институт НИЯУ МИФИ (636036, Россия, Томская область, Северск, пр. Коммунистический, 65)
 ³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет (634036, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)
 ⁴ Национальный исследовательский Томский государственный университет (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36)
 ⁵ Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

Аннотация. Представлены результаты комплексных исследований нержавеющей стали 40Х13. С использованием методов оптической, растровой и атомно-силовой микроскопии получены изображения микро- и наноструктур. Проведено сопоставление полученных изображений структур и фазового состава стали в трех различных состояниях (после отжига, закалки и высокотемпературного отпуска) с результатами электронной и оптической микроскопии. Полученные оптические изображения феррито-перлитной структуры со значительным содержанием глобулярных карбидов состава (Cr, Fe)₂₃C₆, которая получается после отжига, приводится в сравнении с результатами исследования растровым и атомно-силовым микроскопами. Показано, что использование атомно-силовой и растровой электронной микроскопии в работе позволяет сделать качественные выводы о микроструктуре стали, не только совпадающие с данными оптической металлографии, но и превосходящие последние по детализации структурных характеристик. Использование в исследованиях растрового электронного микроскопа позволило установить, что крупные карбиды расположены по границам ферритных зерен; также имеется некоторое количество карбидов внутри мелких зерен феррита; определены размеры включений. После закалки образуется структура, состоящая из грубоигольчатого мартенсита. Использование АСМ-изображений позволило получить структуру с явно выраженным по сравнению с РЭМ-изображением игольчатым строением с возможностью построения наглядных трехмерных изображений. Форма нерастворенных карбидов также оказалась глобулярной. Определены размеры мартенситных пластин. Структура стали после высокотемпературного отпуска (сорбит отпуска) образуется в результате распада мартенсита на феррито-карбидную смесь с выделением карбидов правильной округлой формы. Образовавшиеся одиночные и строчные карбиды (Cr, Fe)₂₃C₆ содержат сильный карбидообразователь – хром, что подтверждается результатами спектрального анализа. Такая структура отличается более высокой, по сравнению с мартенситом, прочностью. Для всех состояний приводятся результаты механических испытаний по схеме одноосного растяжения, определена твердость НВ.

Ключевые слова: нержавеющая сталь, микроструктура, наноструктура, граница зерна, мартенсит, карбиды.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-133-139

Необходимость постоянного совершенствования и разработки новых материалов приводит к тому, что металлография является очень востребованной и актуальной. Значительными перспективами в этой области, наряду с уже известными и традиционно используемыми методами оптической и световой микроскопии [1, 2], обладают методы, основанные на исследовании топологии трехмерной поверхности, полученной с высоким (10⁻⁶ м) пространственным разрешением. Такими методами являются, например, туннельная и атомно-силовая микроскопия [3 – 7]. Возможности атомно-силовой

^{*} Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Государственной академии наук в 2015 – 2020 гг. и гранта РФФИ № 16-08-00385-а.

микроскопии позволяют не только получить реальное 3D-изображение элементов структуры поверхности металлографического шлифа, но также позволяют проводить анализ структуры сталей с целью идентификации их фазового состава и получать количественные данные для оценки структурных составляющих и фаз [8 – 12], например, среднего размера зерен, размера перлитных колоний, включений карбидного типа.

Использование новых наукоемких методов исследования для подробного изучения перспективных материалов (таких как высоколегированные нержавеющие стали) в сочетании с традиционными металлографическими методами позволяет существенно уточнить представления о микроструктуре металла.

В настоящей работе приводятся результаты комплексных исследований металлографической структуры с использованием оптической, растровой, атомно-силовой микроскопии и механических свойств нержавеющей стали 40Х13, содержащей 0,4 % С, 12,5 % Сг. Оптимальное соотношение прочностных и пластических свойств этой стали наряду с ее высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах (атмосферный воздух, вода и ряд кислот) предполагает широкие возможности ее использования в ответственных конструкциях и агрегатах.

Нержавеющую сталь 40Х13 целесообразно использовать после отжига при температуре T = 920 К. Эта сталь имеет хорошую коррозионную стойкость и твердость с температуры, которая способна обеспечить полное растворение карбидов. Для этого проводят закалку при 1320 К в течение 3 ч с быстрым охлаждением на воздухе. В результате закалки получается высокопрочный и хрупкий мартенсит. Для увеличения пластичности с целью получения конструкционного материала проводят высокотемпературный отпуск при 870 К в течение 3 ч с последующим охлаждением с печью [13, 14]. Таким образом, в работе исследована сталь 40Х13 в состоянии поставки после отжига (1), в закаленном состоянии (2) и после высокотемпературного отпуска (3).

Механические испытания плоских стальных образцов по схеме одноосного растяжения со скоростью 6,67·10⁻⁵ с на универсальной машине LFM-125 (Швейцария) позволили установить основные механические свойства стали в указанных состояниях. Определена твердость по методу Бринелля.

Металлографические исследования хромистой нержавеющей стали 40X13 проводили с использованием:

 – оптического микроскопа отраженного света Neophot 21 (Германия);

– атомно-силового микроскопа Solver PH47-PRO (ЗАО «Нанотехнология-МДТ», Зеленоград, Россия [8]) (программное обеспечение прибора Solver PH47-PRO, конструкция, а также тип используемого кантилевера позволяют использовать разные режимы анализа поверхности твердых тел и наблюдать всевозможные особенности структуры на изучаемых поверхностях); – растрового электронного микроскопа «Hitachi TM-1000» (Япония) с программным комплексом, который позволяет получить разрешение до 100 нм;

– детектора TM-1000 EDS для указанного выше электронного микроскопа «Hitachi».

Химический состав определяли путем измерения энергии рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии электронного пучка с поверхностью образца [15].

Подготовку проб образцов для исследований проводили в соответствии с рекомендациями работы [16], шероховатость поверхности металлографического шлифа не превышала 15 нм. Металлографическую структуру выявляли химическим травлением.

Кривые нагружения в координатах s-e (где $s = = \sigma(1 + \varepsilon) - истинное напряжение; <math>e = \ln(1 + \varepsilon) - истин-$ ная деформация; $\sigma - условное напряжение; <math>\varepsilon - условная$ деформация) подробно изучены в работе [17]. Кривые нагружения стали 40Х13 в указанных трех состояниях представлены на рис. 1.

Результаты механических испытаний и измерения твердости по Бринеллю при разной термической обработке образцов приведены ниже:

Образец	$s_{\rm B}$, МПа	е	HB
1	817	0,180	238
2	1300	0,015	468
3	1210	0,055	303

Микроструктуры стали 40Х13 после отжига, полученные методами оптической микроскопии (ОМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ), представлены на рис. 2, *a* – *c*. Сталь имеет зернистую структуру, состоящую из ферритной матрицы, зернистого перлита с



Рис. 1. Кривые нагружения стали 40Х13 после отжига (1), в закаленном состоянии (2) и после высокотемпературного отпуска (3)

Fig. 1. Stress-strain curves of stainless steel after annealing (1), quenching (2) and tempering (3)



Рис. 2. Микроструктура стали 40Х13 после отжига (при 920 К): *a* – ОМ-изображение; *б* – РЭМ-изображение; *в* – 2D АСМ-изображение области 16×16 мкм; *г* – 3D АСМ-изображение отсканированной области

Fig. 2. Microstructure of the chromium steel after annealing (under temperature of 920 K):

a – optical image; δ – scanning microscopy image; *s* – 2D AFM-image of the surface area of 16×16 µm; *e* – 3D AFM-image of the surface area of 16×16 µm

крупными и мелкими частицами карбида (Cr, Fe)₂₃C₆ (рис. 3) [19], при этом наблюдается чередование крупнозернистого и мелкозернистого феррита. В крупных ферритных зернах карбиды встречаются, как правило, вблизи или по границам зерен. Зерна феррита имеют полиэдрическую форму, средний размер зерна составил приблизительно 7 мкм. Твердость нержавеющей стали составила 238 HB.

Изображение, полученное методом РЭМ (рис. 2, *б*), позволяет не только выявить, что большие зерна ферри-





Fig. 3. Scanning microscopy analysis of the chromium steel after annealing: microstructure of the steel is a mixture of ferrite and carbide phases: a - X-ray microanalysis of the surface area shown on figure 2, δ ; δ – elemental analysis; e – elements histogram та содержат мелкие карбидные выделения, но и определить их размер: приблизительно 200 нм. Крупные карбиды размером 1,5 мкм расположены по границам зерен. Также отмечается небольшое количество карбидов внутри мелких зерен феррита.

Результаты исследования структуры контактным методом на атомно-силовом микроскопе представлены на рис. 2, *в*, *г*. Следует заметить, что АСМ-изображение позволяет фиксировать зерна и частицы карбидов очень мелких размеров, поэтому средние размеры структурных элементов могут несколько отличаться от данных оптической металлографии, однако такой результат, по мнению авторов, является более достоверным (рис. 2, *в*, *г*).

Совершенно иную структуру имеет сталь 40Х13 после закалки (при 1320 К в течение 3 ч с быстрым охлаждением на воздухе). В результате образуется структура, состоящая из грубоигольчатого мартенсита смешанного типа балла 10 [20], небольшого количества дисперсных карбидов и остаточного аустенита (рис. 4, a). Анализ полученных АСМ-изображений показывает, что матрица представляет собой преимущественно игольчатый мартенсит, где помимо игл мартенсита встречаются отдельные кристаллы, имеющие форму пластин (реек) (рис. 4, e, d). Ширина таких пла-

стин в поперечном направлении составляет от 100 нм до 3 мкм.

Если на РЭМ-изображении структура просматривается не явно, то на ACM-изображениях та же структура имеет ярко выраженный характер, игольчатое строение металлографической поверхности в трехмерном изображении выявляется достаточно четко (рис. 4, e, e). Нерастворенные частицы карбида хрома имеют в основном форму глобулей, максимальный размер которых составил до 500 нм (рис. 4, d). Наряду с крупными частицами карбидов хрома наблюдаются также очень мелкие частицы, имеющие вытянутую форму. Следует заметить, что такие мелкие выделения не могут быть выявлены методом оптической металлографии. Твердость после закалки увеличилась и составила 468 HB.

На рис. 5 представлены изображения структуры стали после высокотемпературного отпуска (при 870 К в течение 3 ч с последующим охлаждением с печью). При таком отпуске происходит распад мартенсита на феррито-карбидную смесь и выделение карбидов типа $Me_{23}C_6$ (рис. 5, *a*). Структура стали становится гетерогенной, ферритная матрица обедняется хромом, в результате чего образуется сорбит отпуска (рис. 5, *б*). При такой температуре отпуска происходит заметное укрупнение карбидных частиц в ферритной матрице (рис. 5, *в*, *г*).



Рис. 4. Микроструктура стали 40Х13 после закалки:

а – ОМ-изображение; б – РЭМ-изображение; е – 2D АСМ-изображение области 50×50 мкм; г – 3D АСМ-изображение отсканированной области 50×50 мкм; ∂ – 2D АСМ-изображение области 9×9 мкм

Fig. 4. Microstructure of the chromium steel after quenching:

a – optical image; δ – scanning microscopy image; *s* – 2D AFM-image of the surface area of 50×50 µm; *z* – 3D AFM-image of the surface area of 50×50 µm; *d* – 2D AFM-image of the surface area of 9×9 µm



Рис. 5. Микроструктура стали 40Х13 после высокотемпературного отпуска: *a* – ОМ-изображение; *б* – РЭМ-изображение; *в* – 2D АСМ-изображение области 10×10 мкм; *г* – 3D АСМ-изображение отсканированной области 2,5×2,5 мкм

Fig. 5. Microstructure of the chromium steel after high-temperature tempering:

a – optical image; δ – scanning microscopy image; *s* – 2D AFM-image of the surface area of 10×10 µm; *z* – 3D AFM-image of the surface area of 2,5×2,5 µm

Форма частиц правильная, округлая или слегка вытянутая, а размер в поперечном направлении не превышает 1 мкм. Твердость стали после высокотемпературного отпуска составляет 303 HB.

Выводы. Приведенные результаты исследования особенностей структуры и механических свойств нержавеющей стали 40Х13 в отожженном состоянии, после закалки и высокотемпературного отпуска показали, что в отличие от зернистой структуры стали после отжига, состоящей из ферритной матрицы, зернистого перлита с крупными и мелкими частицами карбидов (Cr, Fe)₂₃C₆, после закалки сталь приобретает высокую твердость благодаря образованию мартенсита с незначительным количеством карбидов и остаточного аустенита. При высоком отпуске закаленной стали происходит мартенситный распад, формируется сорбитная структура, при этом твердость снижается незначительно. Образовавшиеся одиночные и строчные карбиды (Cr, Fe)₂₃C₆ сферической формы содержат сильный карбидообразователь - хром, что подтверждается результатами спектрального анализа. Использование атомно-силовой и растровой электронной микроскопии в работе позволило сделать качественные выводы о микроструктуре стали, не только совпадающие с данными оптической металлографии, но и превосходящие последние по детализации структурных характеристик. Таким образом, применение в материаловедении комплексного подхода, включающего в себя совокупность различных методов и методик, позволяет получить более полную качественную и количественную информацию о структуре сталей, избежать неточной интерпретации полученной картины для сопоставления результатов с требованиями стандартов, разработанных для традиционной металлографии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Экснер Г.Е. Качественная и количественная микроскопия поверхности. – В кн.: Физическое металловедение. В 3 томах. Т. 1. / Под ред. Р.У. Кана, П.Т. Хаазена. – М.: Металлургия, 1987. С. 50 – 111.
- Кнехтель Х.Э. Металлографические методы исследования. В кн.: Приборы и методы физического металловедения / Под ред. Ф. Вейнберга. – М.: Мир, 1973. С. 203 – 276.

- Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. Atomic force microscope // Physical Review Letters. 1986. Vol. 56. No. 9. P. 930 – 933.
- Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – М.: Техносфера, 2004. – 143 с.
- Lapshin R.V. Feature-oriented scanning methodology for probe microscopy and nanotechnology // Nanotechnology. 2004. Vol. 15. No. 9. P. 1135 – 1151.
- Зуев Л.Б., Шляхова Г.В. О возможностях атомно-силовой микроскопии в металлографии углеродистых сталей // Материаловедение. 2014. № 7. С. 7 – 12.
- Dobrotvorskii A.M., Maslikova E.I., Shevyakova E.P. etc. Metallographic study of construction materials with atomic force microscopy method // Inorganic Materials. 2014. Vol. 50. No. 15. P. 1487 – 1494.
- Ulyanov P.G., Usachov D.Yu., Fedorov A.V. etc. Microscopy of carbon steels: Combined AFM and EBSD study // Applied Surface Science. 2013. Vol. 267. P. 216 – 218.
- 9. Быков И.В. Методика поточечных измерений рельефа, сил взаимодействия и локальных свойств: новый подход для комплексного анализа в атомно-силовой микроскопии // Научное приборостроение. 2009. № 4 (19). С. 38 – 43.
- Danilov V.I., Shlyakhova G.V., Semukhin B.S. Plastic deformation macrolocalization. Local stress and fracture in ultrafine grain titanium // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 682. P. 351 – 356.
- Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Zuev L.B. Nanostructure of superconducting Nb-Ti cable // Steel in Translation. 2013. Vol. 43. No. 10. P. 640 – 643.

- Zuev L.B., Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Kolosov S.V. Microstructure of the elements of a superconducting alloy Nb-Ti cable // Russian metallurgy (Metally). 2013. Vol. 2013. No. 3. P. 229 – 234.
- Металлы и сплавы: Справочник / В.К. Афонин, Б.С. Ермаков, Е.Л. Лебедев и др.; под ред. Ю.П. Солнцева. – СПб.: Профессионал, 2007. – 1092 с.
- Pelleg J. Mechanical Properties of Materials. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer, 2013.
- Wiesendanger R. Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy. Methods and Applications. – Cambridge: University Press, 1994. – 637 p.
- Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления. Справочник. – М.: Металлургия, 1988. – 400 с.
- Barannikova S.A., Bochkareva A.V., Lunev A.G. etc. Changes in ultrasound velocity in the plastic deformation of high-chromium steel // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 8. P. 552 – 557.
- Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. – Киев: Наукова думка, 1989. – 256 с.
- 19. Металлография железа. Атлас сталей в 3 томах. / Под ред. Ф.Н. Тавадзе. – М.: Металлургия, 1972. – 760 с.
- ГОСТ 8233 56. Сталь. Эталоны микроструктуры. М.: Изд-во стандартов, 2004.

Поступила 14 ноября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 2, pp. 133-139.

APPLICATION OF ATOMIC FORCE MICROSCOPY FOR STAINLESS STEEL MICROSTRUCTURE STUDY AT VARIOUS KINDS OF HEAT TREATMENT

G.V. Shlyakhova^{1,2}, A.V. Bochkareva^{1,3}, S.A. Barannikova^{1,4}, L.B. Zuev^{1,4}, E.V. Martusevich⁵

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

² Seversk Technological Institute, National Research Nuclear University, Seversk, Russia

³National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

⁴National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

⁵Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The paper presents the results of complex researches of 40Cr13 stainless steel. Using the methods of optical, scanning and atomicforce microscopy, micro- and nanostructures have been obtained, as well as has been given the comparison of the received images of structures and phase states of steel in three different states (after annealing, hardening and high-temperature tempering) with the results of electron and optical microscope investigations. The received optical images of a ferrite-pearlite structure of a valuable content of globular carbide with the composite of (Cr, Fe)₂₃C₆, received after annealing, are given in comparison with the research results of scanning and atomic-force microscope investigations. It has been shown that the use of atomic-force and scanning electron microscopy in this work allows to make conclusions on steel microstructure, which coincide not only with the data of optical metallography but also exceed the latter in specification of structural characteristics. The usage of scanning electron microscopy allows establishing that large carbides are situated along the borders of ferrite grains. There are also some number of carbides inside the fine grains of ferrite; the sizes of inclusions have been defined. After hardening there are some structures which consist of macroacicular martencite. The usage of the images of atomic-force microscopy allows receiving the structure with the expressed acicular structure in comparison with scanning electron microscopy with the possibility to build visual 3D-images. The form of undissolved carbides is also globular. The sizes of martensitic lamella have been defined. The steel structure after high-temperature tempering (secondary sorbite) is formed as the result of the cracking of martensite on ferrite-carbide mixture with the formation of carbides of right round shape. The formed single and line carbides contain strong carbide-former – chromium (Cr, Fe)₂₃C₆. It was confirmed by the results of spectrum analysis. Such structure differs from martensite in higher strength. For all the states the authors have given the results of mechanical tests by the scheme of axial extension, as well as have defined the HB hardness.

Keywords: stainless steel, microstructure, nanostructure, grain boundary, martensite, carbide.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-133-139

REFERENCES

- Eksner G.E. Quality and quantity surface microscopy. In: *Fiziches-koe metallovedenie*. V 3 tomakh. T. 1. [Physical metallurgy. In 3 vols. Vol. 1]. Kan R.U., Khaazen P.T. eds. Moscow: Metallurgiya, 1987, pp. 50–111. (In Russ.).
- Knechtel H.E., Kindle W.F., McCallJ.L., Buchheit R.D. Metallography. In: *Metallography. Tools and Techniaues in Physical Metallurgy. Vol. 1.* Weinberg F. ed. New York: McGraw-Hill, 1970, pp. 329–400. (Russ.ed.: Knechtel H.E. Metallograficheskie metody issledovaniya. In book: *Pribory i metody fizicheskogo metallovedeniya*. Weinberg F. ed. Moscow: Mir, 1973, pp. 203–276.)
- Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. Atomic force microscope. *Physical Review Letters*. 1986, vol. 56, no. 9, pp. 930–933.
- Mironov V.L. Osnovy skaniruyushchei zondovoi mikroskopii [Basics of scanning probe microscopy]. Moscow: Tekhnosfera, 2004, 143 p. (In Russ.).
- Lapshin R.V. Feature-oriented scanning methodology for probe microscopy and nanotechnology. *Nanotechnology*. 2004, vol. 15, no. 9, pp. 1135–1151.

- 6. Zuev L.B., Shlyakhova G.V. On possibilities of atomic force microscopy in metallography of carbon steels. *Materialovedenie*. 2014, no. 7, pp. 7–12. (In Russ.).
- Dobrotvorskii A.M., Maslikova E.I., Shevyakova E.P., Ul'yanov P.G., Usachev D.Y., Senkovskiy B.V., Adamchuk V.K., Pushko S.V., Mal'Tsev A.A., Balizh K.S. Metallographic study of construction materials with atomic force microscopy method. *Inorganic Materials*. 2014, vol. 50, no. 15, pp. 1487–1494.
- Ulyanov P.G., Usachov D.Yu., Fedorov A.V., Bondarenko A.S., Senkovskiy B.V., Vyvenko O.F., Pushko S.V., Balizh K.S., Maltsev A.A., Borygina K.I., Dobrotvorskii A.M., Adamchuk V.K. Microscopy of carbon steels: Combined AFM and EBSD study. *Applied Surface Science*. 2013, vol. 267, pp. 216–218.
- **9.** Bykov I.V. Methods of point-by-point relief measurements, action forces and local properties: new approach for complex analysis in atomic force microscopy. *Nauchnoe priborostroenie*. 2009, no. 4 (19), pp. 38–43. (In Russ.).
- Danilov V.I., Shlyakhova G.V., Semukhin B.S. Plastic deformation macrolocalization. Local stress and fracture in ultrafine grain titanium. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 682, pp. 351–356.
- Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Zuev L.B. Nanostructure of superconducting Nb-Ti cable. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 10, pp. 640–643.
- Zuev L.B., Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Kolosov S.V. Microstructure of the elements of a superconducting alloy Nb-Ti cable. *Russian metallurgy (Metally)*. 2013, vol. 2013, no. 3, pp. 229–234.
- Afonin V.K., Ermakov B.S., Lebedev E.L. etc. *Metally i splavy:* Spravochnik [Metals and alloys: Reference book]. Solntsev Yu.P. ed. St. Petersburg: Professional, 2007, 1092 p. (In Russ.).
- 14. Pelleg J. *Mechanical Properties of Materials*. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer, 2013.
- Wiesendanger R. Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy. Methods and Applications. Cambridge: University Press, 1994, 637 p.
- Beckert M., Klemm H. Handbuch der metallographischen Ätzverfahren. 3. Aufl. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, VEB, 1976, 410 S. (Russ.ed.: Beckert M., Klemm H. Sposoby metallograficheskogo travleniya. Spravochnik. Moscow: Metallurgiya, 1988, 400 p.).

- Barannikova S.A., Bochkareva A.V., Lunev A.G., Shlyakhova G.V., Zuev L.B. Changes in ultrasound velocity in the plastic deformation of high-chromium steel. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 8, pp. 552–557.
- Trefilov V.I., Moiseev V.F., Pechkovskii E.P. *Deformatsionnoe uprochnenie i razrushenie polikristallicheskikh metallov* [Mechanical hardening and destruction of polycrystalline metals]. Kiev: Naukova dumka, 1989, 256 p. (In Russ.).
- Metallografiya zheleza. Atlas stalei v 3 tomakh [Iron metallography. Atlas of steels in 3 vols.]. Tavadze F.N. ed. Moscow: Metallurgiya, 1972, 760 p. (In Russ.).
- GOST 8233–56. Stal'. Etalony mikrostruktury [State Standard 8233–56. Steel. Reference standards of microstructure]. Moscow: Izd-vo standartov, 2004. (In Russ.).
- *Acknowledgements*. The work was performed in the frameworks of the Program of Fundamental Researches of the Russian Academy of Science in 2015 2020 and the grant of RFBR no. 16-08-00385-a.

Information about the authors:

G.V. Shlyakhova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate, Assist. Professor of the Chair "Machines and Devices of Chemical and Atomic Productions" (shgv@ispms.tsc.ru)

A.V. Bochkareva, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher, Assist. Professor of the Chair "Theoretical and Applied Mechanics" (avb@ispms.tsc.ru)

S.A. Barannikova, Dr. Sci. (Phys.-math.), Assist. Professor, Leading Researcher, Professor of the Chair "Mechanics of Strained Solids" (bsa@ispms.tsc.ru)

L.B. Zuev, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of Laboratory of Physics of Strength, Professor of the Chair "Theory of Strength and Designing" (lbz@ispms.tsc.ru)

E.V. Martusevich, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel

(martusevich_ev@physics.sibsiy.ru)

Received November 14, 2016