

ЗАВИСИМОСТЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ОТ СРОКА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

М.А. Трофимов, Р.А. Глоба

*Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1*



При эксплуатации ядерных реакторов на трубопроводы ЯЭУ воздействуют различные факторы, приводящие к эрозии внутренней поверхности и увеличению ее микрорельефа (шероховатости). На поверхности, имеющей более высокое значение параметра шероховатости, возникает коррозия металла и распространяется она быстрее. Разрушения путем эрозионного износа основного металла происходят преимущественно в зоне изгиба трубопровода. Шероховатость внутренней поверхности трубопроводов оказывает значительное влияние на затухание сигнала при проведении ультразвуковой диагностики стенок трубопроводов. В ходе планово-предупредительных ремонтов были вырезаны дефектные участки основного трубопровода, с которых были взяты образцы с различными сроками эксплуатации. Для проведения экспериментального определения фактической величины шероховатости внутренней поверхности трубопровода были использованы по пять дефектных участков трубопроводов из стали 12Х18Н10Т аустенитного класса, вырезанные из трубопровода обвязки подогревателя высокого давления, и дефектные участки трубопровода из стали 20 перлитного класса, прошедшие различную продолжительность эксплуатации. Кроме того, были вырезаны по одному фрагменту из новой трубы $\varnothing 273 \times 12$ из стали 12Х18Н10Т и новой трубы $\varnothing 159 \times 6$ из стали 20. Шероховатость внутренней поверхности измерялась на различных участках. Получены зависимости величины шероховатости от срока эксплуатации и типа участка трубопровода. В результате работы были изготовлены образцы предприятия, на внутренней стороне которых получена поверхность с шероховатостью, соответствующей различным срокам эксплуатации трубопроводов. Их наличие позволило учесть влияние шероховатости внутренней поверхности трубопроводов на затухание сигнала при ультразвуковом контроле целостности сварных соединений и при ультразвуковом измерении величины размера зерна околошовной зоны после ремонта сварных соединений.

Ключевые слова: продление срока эксплуатации, шероховатость поверхности, коррозия металла, условия эксплуатации, измеритель шероховатости Elcometer 7061 Marsurf PS1, основной металл, планово-предупредительный ремонт.

ВВЕДЕНИЕ

С середины 1990-х гг. организация, эксплуатирующая российские АЭС, совместно с обеспечивающими предприятиями реализует задачи продления срока службы своих АЭС, которые в последние годы рассматриваются в контексте более широкой задачи управления сроком службы энергоблоков.

После ремонтов сварных швов трубопроводов АЭС обязателен контроль наличия дефектов, а в околошовной зоне – размера зерен основного металла. Нарушение технологии сварки (увеличение сварочного тока или времени сварки) приводит к увеличению размера зерен, что снижает прочность металла стенок трубопроводов, а также к возникновению межкристаллитной коррозии, что ведет к появлению и развитию трещин в околошовной зоне. При ультразвуковом измерении размеров зерен металла околошовной зоны основным методом является измерение затухания (уменьшения амплитуды) сигнала, которое сильно зависит от качества поверхности стенок трубопроводов. Если параметры внешней поверхности стенки можно либо измерить, либо изменить в процессе обработки, то доступа к внутренней поверхности, как правило, нет. Поэтому изменение шероховатости внутренней поверхности является основным источником ошибок при измерении размера зерен металла околошовной зоны сварных швов. Также на поверхности, имеющей более высокое значение параметра шероховатости, возникает коррозия металла и распространяется она быстрее [1 – 3]. Примером является разрушение паропровода турбинной установки, трубопровода обвязки подогревателя высокого давления и т.д. Спрогнозировав изменение микрорельефа внутренней поверхности с течением времени эксплуатации трубопровода, в дальнейшем можно учитывать его при проведении ультразвуковых исследований.

Целью работы является получение информации о влиянии срока эксплуатации трубопроводов ЯЭУ на шероховатость внутренней поверхности. Полученные данные в дальнейшем предполагается использовать для определения влияния этого параметра на результат ультразвуковых исследований металла трубопроводов АЭС при продлении их срока эксплуатации и изготовления образцов предприятий с прогнозируемым параметром шероховатости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Шероховатость поверхности – это совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины. Микрорельеф поверхности схематически представлен на рис. 1 [4].

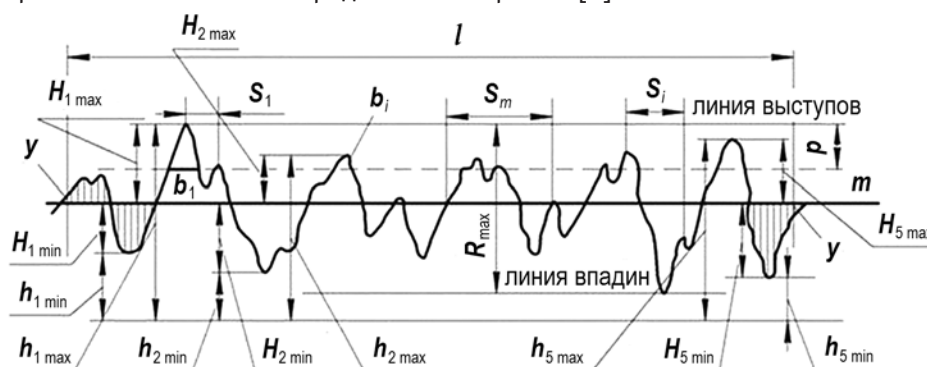


Рис. 1. Схематическое представление микрорельефа поверхности

На рисунке приняты следующие обозначения: l – базовая длина; m – средняя линия профиля; S_m – средний шаг неровностей профиля; S – средний шаг местных

выступов профиля; $H_{i \max}$ – отклонения пяти наибольших максимумов профиля; $H_{i \min}$ – отклонения пяти наибольших минимумов профиля; $h_{i \max}$ – расстояние от высших точек пяти наибольших максимумов до линии, параллельной средней и не пересекающей профиль; $h_{i \min}$ – расстояние от низших точек пяти наибольших минимумов до этой же линии; R_{\max} – наибольшая высота профиля; u – отклонения профиля от линии; p – уровень сечения профиля; b_i – длина отрезков, отсекаемых на заданном уровне p [5].

Для определения возможной величины шероховатости внутренней поверхности эксплуатируемых трубопроводов ЯЭУ были изготовлены образцы из вырезанных элементов трубопроводов при проведении их планово-предупредительных ремонтов [6, 7].

На состояние внутренней поверхности трубопроводов сильное влияние оказывает эрозионный износ, изменяющий ее шероховатость в процессе эксплуатации. В зависимости от участка, на котором эксплуатируется трубопровод, механическое воздействие на внутреннюю поверхность различно. Например, из-за криволинейности поверхности эрозионный износ участка отвода больше, чем прямолинейного участка. С этим связана возможность увеличения разброса данных по шероховатости для трубопроводов, прошедших одинаковую продолжительность эксплуатации. Поэтому полученный результат максимального значения величины шероховатости донной поверхности нужно считать ориентировочными. Но для оценки максимального значения шероховатости донной поверхности экспериментальных образцов этого достаточно [8 – 10].

Для экспериментального определения фактической величины шероховатости внутренней поверхности трубопровода были использованы по пять дефектных участков трубопроводов из сталей 12X18H10T и 20, прошедших различную продолжительность эксплуатации. Кроме того, были вырезаны по одному фрагменту из новой трубы $\varnothing 273 \times 12$ из стали 12X18H10T и новой трубы $\varnothing 159 \times 6$ из стали 20. Всем фрагментам были присвоены технологические номера, приведенные в табл. 1.

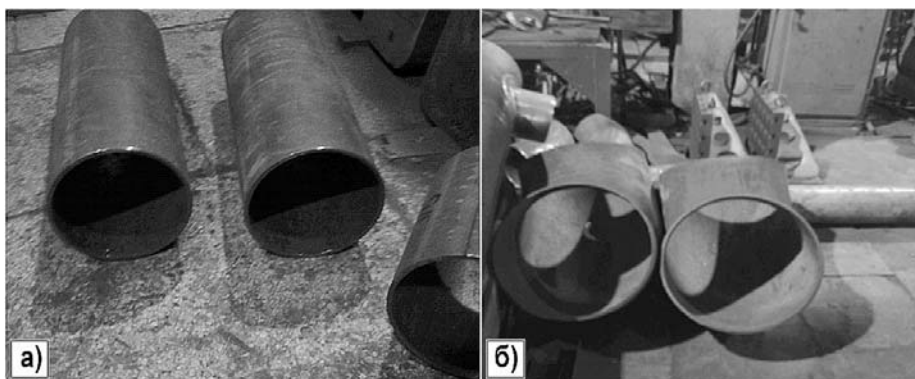


Рис. 2. Дефектные участки трубопроводов, вырезанных из систем АЭС: а) – из стали 12X18H10T; б) – из стали 20

Для иллюстрации на рис. 2 показан вид дефектных участков трубопровода из стали 12X18H10T аустенитного класса (рис. 2а), вырезанных из трубопровода обвязки подогревателя высокого давления, и дефектные участки трубопровода из стали 20 перлитного класса (рис. 2б), вырезанные из паропровода турбинной установки.

Внутренняя поверхность каждого дефектного участка была очищена и визуально осмотрена [4, 11, 12]. В местах наихудшего состояния поверхности каждого образца в трех местах были измерены шероховатости поверхности с помощью измерителя шероховатости Elcometer 7061 Marsurf PS1, который имеет следующие основные технические параметры: диапазон измерений R_z – 350/180/90 мкм; погрешность

измерения – не более 15%. Схема проведения измерений дана на рис. 3.

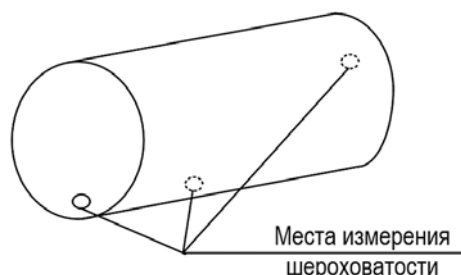


Рис. 3. Схема измерений шероховатости фрагментов

В таблице 1 приведены технологические номера, продолжительность эксплуатации и результаты измерения шероховатости внутренней (донной) поверхности фрагментов трубопроводов в трех точках, по которым подсчитано среднее значение шероховатости [13 – 16].

Таблица 1

Результаты измерения шероховатости фрагментов

Номер фрагмента	Время эксплуатации фрагмента, сут	Шероховатость R_z , мкм	
		В точках измерения	Среднее
Сталь 12X18H10T			
1	0	32,99; 33,20; 30,15	32,11
2	180	75,36; 73,83; 82,56	77,52
3	360	108,81; 137,00; 120,28	122,03
4	540	164,48; 172,20; 162,93	166,53
5	720	215,71; 219,05; 239,35	224,70
6	900	267,86; 214,08; 208,39	230,11
Сталь 20			
7	0	46,80; 44,93; 40,84	44,19
8	180	78,60; 76,20; 81,20	78,67
9	360	159,12; 144,16; 147,84	150,37
10	540	160,20; 167,10; 193,23	173,51
11	720	262,64; 235,81; 274,34	257,60
12	900	245,28; 263,21; 241,35	249,95

Графики зависимостей шероховатости донной поверхности фрагментов от продолжительности эксплуатации представлены на рис. 4 для стали 12X18H10T и на рис. 5 для стали 20. При математической обработке данных с помощью программы SigmaPlot использовался метод наименьших квадратов для аппроксимации линейной зависимости. Получены следующие результаты:

– сталь 12X18H10T: $R_z = 36,6 + 0,234 \cdot t$; $R^2 = 0,97$,

– сталь 20: $R_z = 45,6 + 0,252 \cdot t$; $R^2 = 0,97$,

где t – время эксплуатации, сут; R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации.

Экспериментальным путем получено (см. табл. 1), что максимальная шероховатость R_z для стали 12X18H10T зафиксирована на уровне 230 мкм, а для стали 20 – на уровне 258 мкм. Период эксплуатации систем был взят три года, так как по исте-

чении этого времени по наблюдениям шероховатость внутренней поверхности трубопроводов R_z изменяется незначительно.

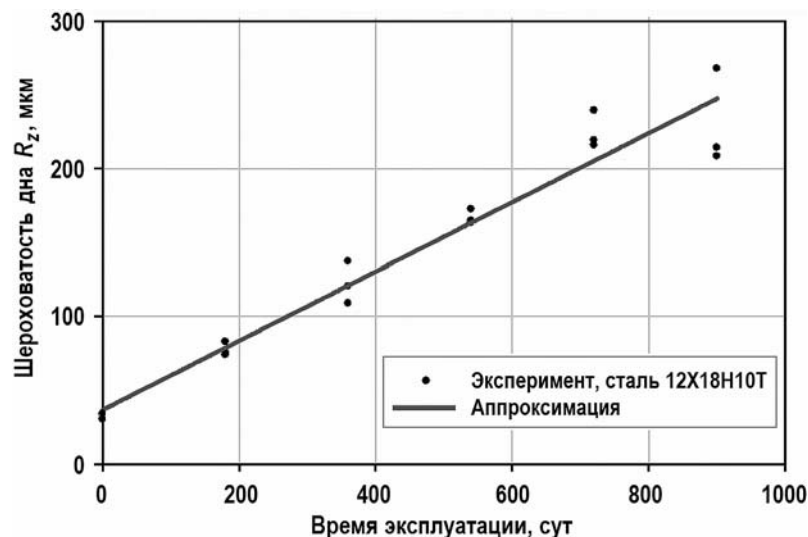


Рис. 4. Зависимость шероховатости донной поверхности трубопровода обвязки подогревателя высокого давления от времени эксплуатации

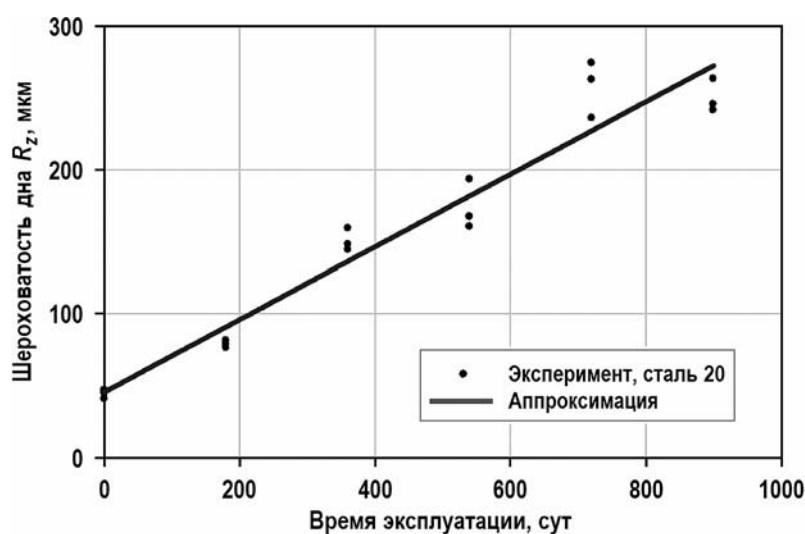


Рис. 5. Зависимость шероховатости донной поверхности паропровода турбинной установки от времени эксплуатации

Прогноз на 3 года (3×365 сут) по полученным соотношениям дает величину шероховатости для стали 12X18H10T $R_z = 293$ мкм и для стали 20 $R_z = 321$ мкм. На донной поверхности образцов реализован максимальный уровень шероховатости $R_z = 313$ мкм для стали 12X18H10T и $R_z = 337$ мкм для стали 20 (см. табл. 1). Таким образом, образцы, изготовленные для проведения экспериментов по определению зависимости амплитудного сигнала от шероховатости донной поверхности, закрывают трехлетний период эксплуатации трубопроводов ЯЭУ [17, 18].

ВЫВОДЫ

В процессе эксплуатации трубопроводов ЯЭУ происходит изменение микрорельефа внутренней поверхности трубы, что приводит к изменению параметра шерохо-

ватости внутренней поверхности. Изменение шероховатости внутренней поверхности трубопровода может значительно исказить данные ультразвукового измерения размера зерен околосварной зоны после ремонта сварного шва трубопроводов АЭС.

Экспериментальным путем получена максимальная шероховатость R_z для стали 12Х18Н10Т, значение которой соответствует 230 мкм, а для стали 20 – 258 мкм.

Установлены зависимости шероховатости донной поверхности от продолжительности эксплуатации трубопроводов, изготовленных из сталей 12Х18Н10Т и 20.

Изготовлены образцы предприятия для проведения ультразвукового контроля, позволяющие учесть затухание сигнала от внутренней поверхности трубопровода с разной шероховатостью [1 – 4, 15].

Литература

1. Трофимов М.А., Глоба Р.А. Исследование зависимости акустического эхо-сигнала от среднего размера зерен в сварном соединении. // Евразийское научное объединение. – 2015. – Т. 1. – № 10 (10). – С. 54-57.
2. Трофимов М.А., Глоба Р.А. Измерение среднего размера зерен в сварном соединении питательного трубопровода реакторной установки. // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 11-12. – С. 28-31.
3. Трофимов М.А., Глоба Р.А. Методика ультразвукового контроля двухкомпонентного металла реакторной установки ВК-50. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 3. – С. 32.
4. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Электронный ресурс: <https://internet-law.ru/gosts/gost/1419/> (дата доступа 04.04.2019).
5. Бакуменко В.И., Бондаренко В.А., Косоруков С.Н. и др. Краткий справочник конструктора нестандартного оборудования. В 2-х томах. Том 1. – М.: Машиностроение, 1997. – 544 с.
6. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
7. Попов С.А. Шлифовальные работы. / Учебник для СПТУ. – М.: Высшая школа, 1987. – 383 с.
8. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. – М.: Металлургия, 1991. 673 с.
9. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. – М.: Тиссо, 2005. 326 с.
10. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. – С.-Пб.: Радиоавионика, 1995. – 317 с.
11. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Введ. 01.01.1983. Электронный ресурс: <https://internet-law.ru/gosts/gost/30103/> (дата доступа 04.04.2019).
12. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. Электронный ресурс: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58916/> (дата доступа 04.04.2019).
13. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.
14. Гуляев А.П. Металловедение. / Учебник для вузов. 6-е издание. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
15. Van Der Voort G.F. Metallography: Principles and Practice. – ASM International, 1999. – 437 p.
16. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Байтеряков А.В. Методика определения акустических структурных шумов металла // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1. – С. 143-148.
17. Чернявский К.С. Стереология в металловедении. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
18. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. / Под ред. И.Н. Жестковой. 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001.

Поступила в редакцию 07.04.2019 г.

Авторы

Трофимов Максим Адольфович, профессор, д-р техн. наук

E-mail: trofimovma@mail.ru.

Глоба Руслан Анатольевич, аспирант

E-mail: gra_80@mail.ru.

UDC 621.644, 621.9.08

**ROUGHNESS OF THE NUCLEAR REACTOR PIPING INNER SURFACE
DEPENDING ON OPERATING TIME**

Trofimov M.A., Globa R.A.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg. 249040 Russia

ABSTRACT

During operation of nuclear reactors, there are various factors that affect the NPP piping leading to erosion of the pipe inner surface and its increased microrelief (roughness). Metal corrosion occurs and propagates faster on the surface having a higher value of the roughness parameter. Failures through erosive wear of the parent metal take place predominantly in the pipe bending area. The roughness of the pipe inner surface has a sizeable effect on the signal attenuation in the process of the pipe wall ultrasonic inspection. Defective main pipeline segments were cut out as part of preventive maintenance from which samples having different operating times were taken. Five defective pipe segments of the austenitic 12Kh18N10T-grade steel cut out from a high-pressure preheater's piping and defective pipe segments of the perlite-class grade 20 steel with different operating times were used to determine experimentally the actual value of the pipe inner surface roughness. In addition, one piece of a new $\varnothing 273 \times 12$ pipe of 12Kh18N10T steel and one piece of a $\varnothing 159 \times 6$ pipe of grade 20 steel were cut out. The inner surface roughness in different segments was measured. Dependences of the roughness value on the operating time and the pipe segment type were obtained. As the result of the study, company specimens were obtained the insides of which had the surface roughness being in accordance with the different pipe operating times. This made it possible to take into account the effects of the pipe inner surface roughness on the signal attenuation in the process of the weld integrity ultrasonic testing and during ultrasonic measurements of the weld adjacent zone grain size value following the weld repair.

Key words: life extension, surface roughness, metal corrosion, operating conditions, Elcometer 7061 Marsurf PS1 roughness meter, parent metal, preventive maintenance.

REFERENCES

1. Trofimov M.A., Globa R.A. Investigation of the dependence of acoustic echo signal on the average grain size in a welded joint. *Eurasian Scientific Association*. 2015, v. 1, no. 10 (10), pp. 54-57 (in Russian).
2. Trofimov M.A., Globa R.A. Measurement of the average grain size in the welded joint of the feed line of the reactor installation. *Tyazhyloye Mashinostroyeniye*. 2014, no. 11-12, pp. 28-31 (in Russian).
3. Trofimov M.A., Globa R.A. Technique for ultrasonic testing of a two-component metal reactor system VK-50. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 3, p. 32 (in Russian).

4. GOST 2789-73 *Surface Roughness. Parameters and Characteristics*. Available at: <https://internet-law.ru/gosts/gost/1419/> (accessed Apr 04, 2019) (in Russian).
5. Bakumenko V.I., Bondarenko V.A., Kosorukov S.N., Atminis S.A., Bersenev Yu.V., Vorontsov Yu.P., Komarov V.I., Kudryavtsev A.V., Lavrov L.P., Mikhalev O.R., Netsvetaev S.A., Paveliev V.I., Svalov G.F., Svechnikov V.B., Tinnikov O.N., Finashin V.N. *Quick Reference for Designer of Non-Standard Equipment*. In 2 volumes. Vol. 1. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1997, 544 p. (in Russian).
6. Demkin N.B., Ryzhov E.V. *Surface Quality and Contact Details of Machines*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1981, 244 p. (in Russian).
7. Popov S.A. *Grinding Work*. Tutorial. Moscow. Vysshaya Shkola Publ., 1987, 383 p. (in Russian).
8. Krautkremer Y., Krautkremer G. *Ultrasonic Control of Materials*. Moscow. Metallurgiya Publ., 1991, 673 p. (in Russian).
9. Scherbinsky V.G. *Technology of Ultrasonic Testing of Welded Joints*. Moscow. Tissot Publ., 2005. 326 p. (in Russian)
10. Kretov E.F. *Ultrasonic Flaw Detection in Power Engineering*. St. Petersburg. Radioavionika Publ., 1995, 317 p. (in Russian).
11. GOST 5639-82. *Steel and Alloys. Methods of Detection and Determination of Grain Size*. Available at: <https://internet-law.ru/gosts/gost/30103/> (accessed Apr 04, 2019) (in Russian)
12. GOST R ISO 4287-2014. *Geometric Characteristics of Products (GPS). Surface Structure Profile Method. Terms, Definitions and Parameters of Surface Structure*. Available at: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58916/> (accessed Apr 04, 2019) (in Russian)
13. Saltykov S. A. *Stereometric Metallography*. Moscow. Metallurgiya Publ., 1976, 271 p. (in Russian).
14. Gulyaev A.P. *Metal Science*. Textbook for universities. 6th edition. Moscow. Metallurgiya Publ., 1986, 544 p. (in Russian).
15. Van Der Voort G.F. *Metallography: Principles and Practice*. ASM International, 1999, 437 p.
16. Muravev V.V., Muraveva O.V., Bayteryakov A.V. Method of determining the acoustic structural noise of a metal. *Intellectual'nye systemy v proizvodstve*. 2013, no. 1, pp. 143-148 (in Russian).
17. Chernyavsky K.S. *Stereology in Metallurgy*. Moscow. Metallurgiya Publ., 1977, 208 p. (in Russian).
18. Anurev V.I. *Designer's Handbook – Mechanical Builder*. In 3 volumes, 8-th ed., revised and extended. Moscow. Mashinostroenie Publ., 2001 (in Russian).

Authors

Трофимов Максим Адольфович, профессор, д-р техн. наук

E-mail: trofimovma@mail.ru.

Глоба Руслан Анатольевич, аспирант

E-mail: gra_80@mail.ru.