

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБОГАЩЕНИЯ ОТХОДОВ ТИТАНОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**С.В. Лановецкий, О.Г. Мелкомукова, С.Г. Худяков**

Сергей Викторович Лановецкий *, Ольга Геннадьевна Мелкомукова, Семен Григорьевич Худяков
Кафедра химической технологии и экологии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр., 29, Пермь, Российская Федерация, 614990
E-mail: lsv98@mail.ru*, xtlab@bf.pstu.ru, xt@bf.pstu.ru

В работе представлено исследование процесса обогащения отходов титанового производства (песчано-шлаковой смеси) методами механической и магнитной сепарации с целью уменьшения потерь полезного компонента в технологии переработки ильменитового концентрата. Состав исходной фракции исследуемой смеси и фракций, полученных в процессе механической и магнитной сепарации, оценивали при помощи рентгенофазового и рентгеноспектрального анализов. Оценку размера частиц анализируемой смеси выполняли с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения «S-3400N» и оптического микроскопа «МБС-1» с цифровой фотокамерой Webbers MYscope 560MCCD. В результате разделения анализируемой смеси методом механической классификации показано, что фракция 0,16 – 0,4 мм содержит значительную долю песка (до 94%) и может быть полностью удалена из технологии без дальнейшей переработки. Остальные фракции помимо диоксида титана, железа и его оксидов содержат значительную долю диоксида кремния, отделить которую методом ситовой классификации не представляется возможным. Исследования по разделению анализируемой смеси методом магнитной сепарации показали, что в немагнитную фракцию удается выделить фазы песка и диоксида титана без примесей железа. При этом в магнитной части остается практически все железо с его трехвалентным оксидом, а также большая доля частиц диоксида кремния и титана, вплавленная в более крупные куски магнитной фракции. Показано, что в процессе магнитной сепарации в магнитную фракцию уходит до 100% Fe+Fe₂O₃, 20% SiO₂ и 73% TiO₂. При этом с немагнитной фракцией, в среднем, уходит до 80% SiO₂ и 27% TiO₂.

Ключевые слова: механическая классификация, магнитная сепарация, титановый шлак, диоксид кремния, диоксид титана

INVESTIGATION OF ENRICHMENT PROCESS OF WASTES OF TITANIUM PRODUCTION**S.V. Lanovetskiy, O.G. Melkomukova, S.G. Khudyakov**

Sergeiy V. Lanovetskiy *, Olga G. Melkomukova, Semen G. Khudyakov
Department of Chemical Technology and Ecology, Perm National Research Polytechnical University, Komsomolskiy ave., 29, Perm, 614990, Russia
E-mail: lsv98@mail.ru*, xtlab@bf.pstu.ru, xt@bf.pstu.ru

The paper presents a study of the process of enriching the waste of titanium production (sand and slag mixture) by mechanical and magnetic separation methods in order to reduce the losses of the useful component in the technology of processing ilmenite concentrate. The composition of the initial fraction of the test mixture and fractions obtained in the process of mechanical and magnetic separation was evaluated using X-ray and X-ray spectral analyzes. The particle size of the analyzed mixture was evaluated by means of a high-resolution scanning electron microscope «S-3400N» and an optical microscope «MBS-1» from a digital camera Webbers MYscope 560MCCD. As a result of the separation of the analyzed mixture by mechanical classification, it was shown that the fraction «0.16 – 0.4 mm» contains a considerable proportion of sand (up to

94%) and can be completely removed from the technology without further processing. The remaining fractions in addition to titanium dioxide, iron and its oxides contain a sufficiently large fraction of silicon dioxide, which can not be separated by the sieve classification method. Studies on the separation of the analyzed mixture by the magnetic separation method have shown that it is possible to separate out phases of sand and titanium dioxide without iron impurities into the nonmagnetic fraction. At the same time, virtually all iron with its trivalent oxide remains in the magnetic part, as well as a sufficiently large fraction of silica and titanium particles, fused in larger pieces of the magnetic fraction. It is shown that in the process of magnetic separation, up to 100% of Fe + Fe₂O₃, 20% of SiO₂ and 73% of TiO₂ are transferred to the magnetic fraction. At the same time, with a non-magnetic fraction, on average, up to 80% of SiO₂ and 27% of TiO₂ are consumed.

Key words: mechanical classification, magnetic separation, titanium slag, silicon dioxide, titanium dioxide

Для цитирования:

Лановецкий С.В., Мелкомукова О.Г., Худяков С.Г. Исследование процесса обогащения отходов титанового производства. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 3. С. 37–42

For citation:

Lanovetskiy S.V., Melkomukova O.G., Khudyakov S.G. Investigation of enrichment process of wastes of titanium production. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 3. P. 37–42

ВВЕДЕНИЕ

Титан является одним из перспективных металлов, широко используемых в качестве конструкционных материалов во многих отраслях промышленности – от авиации, космоса и судостроения до энергетики и медицины [1-12]. Содержание титана в земной коре достаточно велико и составляет около 0,63% [13]. На сегодняшний день известно около 80 минералов, в которых титан является одной из главных составных частей. Наибольшее значение имеют группы рутила и ильменита.

Несмотря на большие запасы титана в земной коре, стоимость этого конструкционного материала достаточно велика, что обусловлено чрезвычайной сложностью извлечения титана из руд [14-16]. Так стоимость тонны титановой губки в сотни раз превышает стоимость такого же количества титана, содержащегося в необогащенной руде. Данный факт объясняется высокой прочностью химических связей титана в его природных соединениях, а также хорошим химическим средством титана ко многим элементам [17, 18].

На сегодняшний день самый распространенный метод получения титана – это магниетермическое восстановление тетрахлорида титана (метод Кролля), первая стадия которого заключается в рудно-термической плавке титановой шихты [19, 20]. Цель данной стадии в обогащении исходного продукта оксидом титана путем избирательного восстановления основной примеси – оксидов железа. В результате протекания высокотемпературного процесса восстановления образуются два про-

дукта: обогащенный оксидами титана титановый шлак и попутный металл, состоящий из металлического железа с незначительными примесями других металлов. Технология разделения полученных продуктов плавки основана на разности плотностей шлака и попутного металла [17]. Более тяжелый расплав металла сливается из рудно-термической печи в песчаные формы, остывает и отправляется на хранение. В процессе остывания полученных слитков происходит осыпание частиц песка, титанового шлака и попутного металла и, по мере их накопления, песчано-шлаковая смесь вывозится на полигон отходов. При этом происходят безвозвратные потери титансодержащего материала.

Целью представленной работы является исследование процесса обогащения отходов титанового производства (песчано-шлаковой смеси) методами механической и магнитной сепарации для уменьшения потерь полезного компонента в технологии переработки ильменитового концентрата.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве предмета исследования использовали смесь песка, титанового шлака и частиц металла, полученную в процессе остывания попутного металла в песчаных формах.

Для оценки возможности разделения исследуемой смеси использовали метод механической классификации и магнитной сепарации.

Процесс механической классификации осуществляли при помощи виброгрохота ПЭ-6800 и четырех лабораторных сит ГК «Экрос» (ТУ 3618-001-39436682-98, диаметр сит – 200 мм, размер ячейки 0,16; 0,4; 0,63; 1,0 мм).

Магнитную сепарацию анализируемой смеси проводили при помощи электромагнита, выполненного в виде катушки (диаметр провода (d) – 0,77 мм; количество витков (N) – 460) со стальным сердечником (длина сердечника (l) – 160 мм; радиус сердечника (R) – 10 мм). Величина напряженности магнитного поля во время проведения экспериментов оставалась неизменной и составляла 14264 А/м.

Состав исходной фракции исследуемой смеси и фракций, полученных в процессе механической и магнитной сепарации, оценивали при помощи рентгеновского дифрактометра «XRD-7000» японской фирмы «Shimadzu». Обработка полученных рентгенограмм осуществлялась при помощи программного обеспечения «XRD 6000/7000 Ver. 5.21». Определение фазового состава исследуемых образцов проводилось с использованием базы данных «ICDD PDF-4+ 2014» и программного обеспечения «SIROQUANT V.4».

Гранулометрический состав исходной смеси определяли при помощи ситового анализа. Размеры отдельных частиц и их элементный состав оценивали с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения «S-3400N» японской фирмы «Hitachi» с приставкой для энергодисперсионного анализа фирмы «Bruker». Визуализацию частиц песчано-шлаковой смеси выполняли при помощи оптического микроскопа «МБС-1» и цифровой фотокамеры Webbers MYscope 560MCCD.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены фотографии частиц исходной песчано-шлаковой смеси. На изображении, полученном методом электронной микроскопии (рис. 1а), отчетливо видна фракция смеси с диаметром частиц, не превышающим 0,5 мм. Рентгеноспектральный анализ данной фракции показал (рис. 2), что частицы белого цвета округлой формы – это металлическое железо, покрытое оксидной пленкой. Светло-серые частицы с острыми неровными гранями – это диоксид титана, а частицы с темным оттенком продолговатой формы – диоксид кремния.

Более крупные частицы исходной смеси показаны на рис. 1б. Анализ фотографии, выполненной при помощи оптического микроскопа, показал, что на поверхности крупных агломератов диаметром более 1 мм присутствуют вкрапления более мелких частиц песка.

Исследование фазового состава исходной смеси (рис. 3) показало, что продукт состоит из

51,4% SiO_2 (минерал «Quartz»), 27,5% TiO_2 (минерал «Rutile»), 7,5% Fe (минерал «Iron»), 13,6% Fe_2O_3 (минерал «Hematite»).

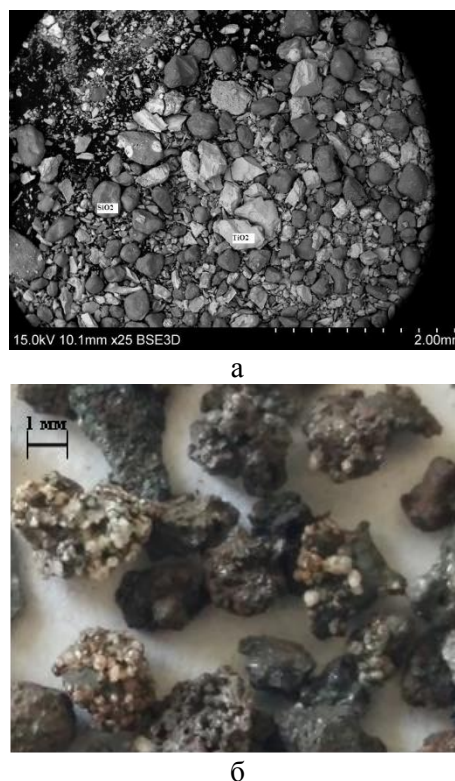


Рис. 1. Микрофотографии исходной песчано-шлаковой смеси, полученные при помощи: а – электронного микроскопа, б – оптического микроскопа

Fig. 1. Microphotographs of the initial sand-slag mixture obtained with the help of: а – electron microscope, б – optical microscope

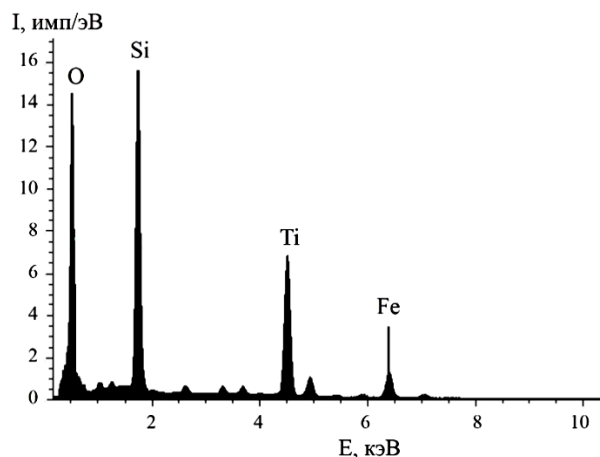


Рис. 2. EDX анализ элементов, содержащихся в исходной смеси

Fig. 2. EDX analysis of the elements containing in the initial sand-slag mixture

Анализ микрофотографии исходной смеси показал, что частицы песка по своему гранулометрическому составу отличаются от частиц титанового шлака и, следовательно, использование сито-

вой механической классификации даст возможность провести отделение частиц диоксида кремния от исходной смеси.

Результаты ситового анализа песчано-шлаковой смеси представлены в табл. 1.

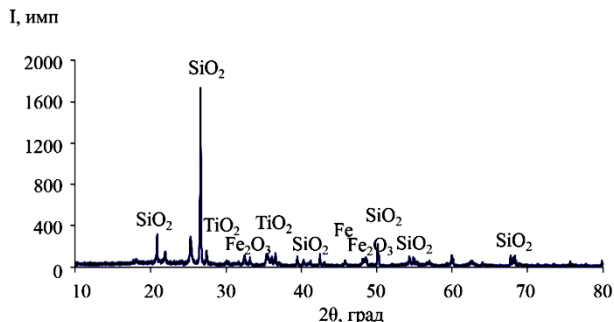


Рис. 3. Рентгенограмма исходной песчано-шлаковой смеси
Fig. 3. X-ray diffraction pattern of the initial sand-slag mixture

Таблица 1

Результаты ситового анализа исходной песчано-шлаковой смеси
Table 1. The results of the sieve analysis of the initial sand-slag mixture

Фракция, мм	Доля в общей смеси, % мас.
более 1,0	41,5
0,63 - 1,0	5,9
0,4 - 0,63	8,8
0,16 - 0,4	28,5
менее 0,16	15,3

Анализ полученных данных показал, что в исходной смеси массовая доля достаточно крупных частиц размером более 1 мм составляет – 41,5%. Фазовый состав самой крупной фракции «более 1,0 мм» содержит 40,6% TiO_2 (минерал «Rutile»), 13,8% Fe (минерал «Iron»), 15,5% Fe_2O_3 (минерал «Hematite») и около 24% SiO_2 (минерал «Quartz»). При этом, как видно из рис. 4, более мелкие частицы песка и диоксида титана вплавлены в более крупные частицы железа.

На втором месте по массе (28,5%) расположена фракция «0,16-0,4 мм». Фазовый состав данной фракции представлен в основном диоксидом кремния (SiO_2), доля которого достигает 94%. При этом всего лишь около 5% приходится на TiO_2 и 2% на Fe_2O_3 .

Фракция «менее 0,16 мм» занимает третье место по массе (8,8%) в исходной песчано-шлаковой смеси. Фазовый состав фракции представлен 74% диоксида кремния, 22% диоксида титана и 4% трехвалентного оксида железа.

На четвертом месте по массе расположилась фракция «0,4-0,63 мм». Состав смеси представлен фазами SiO_2 – 68,3%, TiO_2 – 23%, Fe_2O_3 – 8,7%.

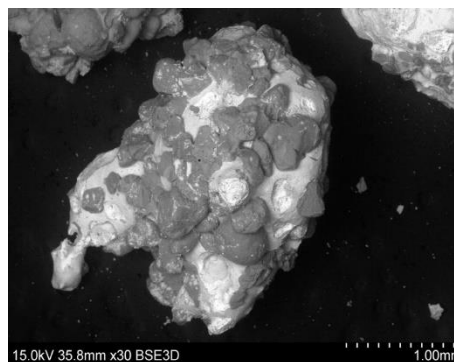


Рис. 4. Микрофотографии частиц фракции «более 1,0 мм»
Fig. 4. Microphotographs of particles of fraction «more than 1.0»

На последнем месте расположилась фракция «0,63-1,0 мм», массовая доля которой в общей массе анализируемой смеси не превышает 6%. По своему составу фракция представлена следующими фазами: SiO_2 – 39,2%, TiO_2 – 40%, Fe – 8,5%, Fe_2O_3 – 12,3%.

Таким образом, в результате разделения исходной смеси методом механической классификации показано, что фракция «0,16-0,4 мм» содержит значительную долю песка (до 94%) и может быть полностью удалена из технологии без дальнейшей переработки. Остальные фракции помимо диоксида титана, железа и его оксидов содержат значительную долю диоксида кремния, отделить которую методом ситовой классификации не удалось.

С этой целью проведены исследования по оценке возможности разделения полученных фракций методом магнитной сепарации.

Результаты разделения фракций «более 1,0 мм», «0,63-1,0 мм», «0,4-0,63 мм», «менее 0,16 мм» методом магнитной сепарации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты разделения фракций песчано-шлаковой смеси методом магнитной сепарации
Table 2. The results of separation of fractions of a sand-slag mixture by the magnetic separation method

Фракция, мм	Магнитная доля смеси, %	Немагнитная доля смеси, %
более 1,0	88,9	11,1
0,63-1,0	47,7	52,3
0,4-0,63	24,7	75,3
менее 0,16	15,9	84,1

Анализ представленных табличных данных показал, что с уменьшением размера частиц происходит снижение доли магнитной фракции и рост немагнитной составляющей. Фазовый анализ магнитной доли самой крупной фракции «более 1,0 мм» представлен 38% TiO_2 , 16,4% Fe, 19,6% Fe_2O_3 , и

около 20% SiO₂. При этом более мелкие частицы диоксида кремния и титана вплавлены в более крупные частицы железа и его оксидов (рис. 4).

Немагнитная часть фракции «более 1,0 мм» содержит около 30% SiO₂ и 68% TiO₂.

Магнитная часть фракции «0,63-1,0 мм» представлена такими фазами как SiO₂ – 27,7%, TiO₂ – 42%, Fe – 10,1%, Fe₂O₃ – 15,7%. В немагнитной части данной фракции обнаружено около 54% диоксида кремния и 42% диоксида титана.

Магнитная часть фракции «0,4-0,63 мм» представлена фазами SiO₂ – 51,3%, TiO₂ – 30%, 7,4% – Fe, 10,4% – Fe₂O₃. В немагнитной части данной фракции обнаружено около 84% диоксида кремния и 14% диоксида титана.

В последней фракции «менее 0,16 мм» составы магнитной и немагнитной частей распределены следующим образом. Магнитная часть представлена фазами TiO₂ – 44,2%, SiO₂ – 20,4%, Fe – 15,6%, Fe₂O₃ – 19,8%. Немагнитная часть: SiO₂ – 58,5%, TiO₂ – 40,2%.

Представленные результаты экспериментальных исследований по разделению анализируемой смеси методом магнитной сепарации показали, что в немагнитную фракцию удается выделить фазы песка и диоксида титана без примесей

железа. При этом в магнитной части остается практически все железо с его трехвалентным оксидом, а также достаточно большая доля частиц диоксида кремния и титана, вплавленная в более крупные куски магнитной фракции.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований по оценке возможности обогащения отходов титанового производства (песчано-шлаковой смеси) методами механической и магнитной сепарации установлено, что смесь песка и металлического шлака содержит в своем составе около 51 % песка, 28% диоксида титана и 21 % смеси металлического железа и его оксидов.

В процессе механической классификации с фракцией «0,16-0,4 мм» возможно удалить до 55% песка.

Методом магнитной сепарации удается отделить практически все железо, однако вместе с железом удаляется часть титанового шлака и песка, покрытых каплями соединений железа.

В процессе магнитной сепарации в магнитную фракцию уходит до 100% Fe+Fe₂O₃, 20% SiO₂ и 73% TiO₂; с немагнитной фракцией в среднем уходит до 80% SiO₂ и 27% TiO₂.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орыщенко А.С., Кудрявцев А.С., Михайлов В.И., Леонов В.П. Титановые сплавы для морской техники и атомной энергетики. *Вопр. материаловед.* 2011. № 1 (65). С. 60-74.
2. Бубнов В.А., Князев А.Н. Титан и его сплавы в машиностроении. *Вестн. Курган. ун-та. Сер.: Технич. науки.* 2016. № 3 (42). С. 92-96.
3. Горынин И.В., Леонов В.П., Михайлов В.И. Морские титановые сплавы. *Судостроение.* 2009. № 5. С. 22-24.
4. Przekora A., Benko A., Nocun M., Wyrwa J., Blazewicz M., Ginalska G. Titanium coated with functionalized carbon nanotubes - A promising novel material for biomedical application as an implantable orthopaedic electronic device. *Mater. Sci. Eng. C.* 2014. V. 45. P. 287-296. DOI: 10.1016/j.msec.2014.09.025.
5. Гарифутдинова М.А., Астахов М.В., Колобов Ю.Р., Фадеева И.В., Трифонов Б.В., Храмов Г.В., Колобова А.Ю. Методы модификации поверхностей материалов и формирования биоактивных покрытий на медицинских имплантатах (обзор). *Материаловедение.* 2013. № 12. С. 44-52.
6. Жукова Ю.С., Филонов М.Р., Прокошкин С.Д. Новые биосовместимые сверхупругие титановые сплавы для изготовления медицинских имплантов. *Нанотехнологии и охрана здоровья.* 2012. Т. 4. № 11. С. 8-15.
7. Струков Н.Н., Сметкин А.А. Разработка углерод-титановых композиционных материалов для медицинских имплантатов с использованием технологии наплавки. *Металлообработка.* 2015. № 3 (87). С. 58-61.
8. Колсанов А.В., Николаенко А.Н., Иванов В.В., Приходько С.А., Платонов П.В. Определение биосовместимости и цитотоксичности пористых материалов на основе титана в эксперименте. *Наука и инновации в медицине.* 2017. № 3 (7). С. 18-22.

REFERENCES

1. Oryshchenko A.S., Kudryavtsev A.S., Mikhailov V.I., Leonov V.P. Titanium alloys for sea equipment and atomic power engineering. *Voprosy Materialoved.* 2011. N 1 (65). P. 60-74 (in Russian).
2. Bubnov V. A., Knyazev A.N. Titanium and its alloys in mechanical engineering. *Vestn. Kurgan. Gos. Un-ta. Ser.: Tekhnich. Nauki.* 2016. N 3 (42). P. 92-96 (in Russian).
3. Gorynin I.V., Leonov V.P., Mikhailov V.I. Titanium alloys in marine technique. *Sudostroenie.* 2009. № 5. P. 22-24. (in Russian).
4. Przekora A., Benko A., Nocun M., Wyrwa J., Blazewicz M., Ginalska G. Titanium coated with functionalized carbon nanotubes - A promising novel material for biomedical application as an implantable orthopaedic electronic device. *Mater. Sci. Eng. C.* 2014. V. 45. P. 287-296. DOI: 10.1016/j.msec.2014.09.025.
5. Garafutdinova M.A., Astakhov M.V., Kolobov Yu.R., Fadeeva I.V., Trifonov B.V., Khramov G.V., Kolobova A.Yu. Methods of surface modification of materials and the formation of bioactive coatings on medical implants (review). *Materialovedenie.* 2013. N 12. P. 44-52 (in Russian).
6. Zhukova Yu.S., Filonov M.R., Prokoshkin S.D. New biocompatible superelastic titanium alloys for the manufacture of medical implants. *Nanotekhnol. Okhrana Zdorov'ya.* 2012. V. 4. N 11. P. 8-15 (in Russian).
7. Strukov N.N., Smetkin A.A. The development of carbontitanium composite materials for medical implants with the use of surfacing technology. *Metalloobrabotka.* 2015. N 3 (87). P. 58-61 (in Russian).

9. **Изотова А.Ю., Гришина О.И., Шавнев А.А.** Композиционные материалы на основе титана, армированные волокнами (обзор). *Труды ВИАМ*. 2017. № 5 (53). С. 5. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-5-5.
10. **Ольшанецкий В.Е., Овчинников А.В., Джуган А.А.** Возможность использования несферических титановых порошков для аддитивных технологий. *Актуал. пробл. в машиностр.* 2016. № 3. С. 82-87.
11. **Zhao Y.** The new main titanium alloys used for shipbuilding developed in china and their applications. *Materials China*. 2014. V. 33. N 7. P. 698-404. DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.07.03.
12. **Kotsar M., Lavrikov S., Nikonov V., Alexandrov A., Alexandrov A., Akhtonov S.** High-purity titanium, zirconium and hafnium in nuclear-power engineering. 12th World Conference on Titanium. Beijing. 2012. V. 3. P. 2237-2239.
13. **Глинка Н.Л.** Общая химия. М.: Интеграл-Пресс. 2000. 728 с.
14. **Zhang W., Zhu Z., Cheng C.Y.** A literature review of titanium metallurgical processes. *Hydrometallurgy*. 2011. V. 108. N 3-4. P. 177-188. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.04.005.
15. **Лупинос С.М., Грищенко С.Г., Прутцков Д.В., Коцарь М.Л., Александров А.В.** Станет ли титан дешевле завтра? О перспективах разработки непрерывной технологии магнетермического производства титана. *Титан*. 2015. № 3 (49). С. 14-21.
16. **Парфенов О.Г., Пашков Г.Л.** Проблемы современной металлургии титана. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2008. 276 с.
17. **Тарасов А.В.** Металлургия титана. М.: ИКЦ Академкнига. 2003. 325 с.
18. **Цивадзе А.Ю., Ионова Г.В., Ионова И.С., Михалко В.К., Герасимова Г.А.** Моделирование металлических наночастиц титана и их свойств. *Физикохим. пов-ти и защита мат-лов*. 2018. Т. 54. № 3. С. 211- 217. DOI: 10.7868/S0044185618030014.
19. **Nakamura K., Iida T., Nakamura N., Araike T.** Titanium sponge production method by Kroll process at OTC. *Mater. Trans.* 2017. V. 58. N 3. P. 319-321. DOI: 10.2320/matertrans.MK201634.
20. **Евдокимов В.И., Крнев В.А.** Непрерывный магнетермический способ получения титана. *Цветные металлы*. 2002. № 9. С. 69-72.
8. **Kolsanov A.V., Nikolaenko A.N., Ivanov V.V., Prikhodko S.A., Platonov P.V.** Determination of biocompatibility and cytotoxicity of porous titanium-based materials in experiment. *Nauka Innovats. Medits.*. 2017. N 3 (7). P. 18-22 (in Russian).
9. **Izotova A.Yu., Grishina O.I., Shavnev A.A.** Fiber-reinforced titanium based composites (review). *Trudy VIAM*. 2017. N 5 (53). P. 5 (in Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-5-5.
10. **Olshanetskiy V.E., Ovchinnikov A.V., Dzhugan A.A.** Possibility of using of non-spherical titanium powders for additive technologies. *Aktual. Probl. Mashinostr.* 2016. N 3. C. 82-87. (in Russian).
11. **Zhao Y.** The new main titanium alloys used for shipbuilding developed in china and their applications. *Materials China*. 2014. V. 33. N 7. P. 698-404. DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.07.03.
12. **Kotsar M., Lavrikov S., Nikonov V., Alexandrov A., Alexandrov A., Akhtonov S.** High-purity titanium, zirconium and hafnium in nuclear-power engineering. 12th World Conference on Titanium. Beijing. 2012. V. 3. P. 2237-2239.
13. **Glinka N.L.** General chemistry. М.: Integral-Press. 2000. 728 p. (in Russian).
14. **Zhang W., Zhu Z., Cheng C.Y.** A literature review of titanium metallurgical processes. *Hydrometallurgy*. 2011. V. 108. N 3-4. P. 177-188. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.04.005.
15. **Lupinos S.M., Grishchenko S.G., Prutskov D.V., Kotsar M.L., Alexandrov A.V.** Would titanium be cheaper tomorrow? On prospects of implementing continuous process of magnesiothermal titanium production. *Titan*. 2015. N 3 (49). P. 14-21 (in Russian).
16. **Parfenov O.G., Pashkov G.L.** Problems of modern titanium metallurgy. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. 2008. 276 p. (in Russian).
17. **Tarasov A.V.** Metallurgy of titanium. М.: ИКЦ Академкнига. 2003. 325 p. (in Russian).
18. **Tsivadze A.Yu., Ionova G.V., Ionova I.S., Mikhalko V.K., Gerasimova G.A.** Modeling of metallic titanium nanoparticles and their properties. *Fizikokhim. Pov-ti Zashch. Mater.* 2018. V. 54. N 3. P. 211-217 (in Russian). DOI: 10.7868/S0044185618030014.
19. **Nakamura K., Iida T., Nakamura N., Araike T.** Titanium sponge production method by Kroll process at OTC. *Mater. Trans.* 2017. V. 58. N 3. P. 319-321. DOI: 10.2320/matertrans.MK201634.
20. **Evdokimov V.I., Krenev V.A.** Continuous magnesium-thermal method for the titanium production. *Tsvetn. Metall.* 2002. N 9. P. 69-72 (in Russian).

Поступила в редакцию 04.06.2018
Принята к опубликованию 29.11.2018

Received 04.06.2018
Accepted 29.11.2018