

ВЛИЯНИЕ ВИДА И РАЗМЕРА МЕЛЮЩИХ ТЕЛ НА СВОЙСТВА РЕАКТИВНОГО ГЛИНОЗЕМА ДЛЯ ОГНЕУПОРНОГО БЕТОНА

Г.Э. Левин, Л.А. Виноградова, Ф.Р. Иксанов, Е.А. Агапов

Глеб Эдуардович Левин, Любовь Алексеевна Виноградова (ORCID 0000-0002-3779-6984)*

Кафедра Технологии керамики и наноматериалов, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: glevin2009@yandex.ru, lavinogradova@ya.ru*

Фарид Равильевич Иксанов, Егор Александрович Агапов

Центр Совершенствования Технологий и Производства, АО «Боровичский комбинат огнеупоров», Международная ул., 1, Боровичи, Российская Федерация, 74411

E-mail: Fiksanov@aobko.ru, eagapov@aobko.ru

Огнеупорная бетонная продукция находит свое применение в различных сферах производства, таких как металлургия, керамика, стекольная, цементная и даже атомная промышленность. В любых местах, где используется высокая температура, требуется своего рода «защитник» от агрессивных сред, таких как жидкость, газ, твердые материалы. Как раз таким материалом выступает монолитный огнеупор, или же по-простому огнеупорный бетон. Такой бетон, так же как и обычный строительный, состоит из различного рода заполнителей, которые обладают как высокими температурами плавления, так и сильными механическими свойствами, которые придают конечному композиту необходимые свойства. В данной статье приведены результаты исследования влияния вида и размера мелющих тел в вибромельнице на свойства реактивного глинозема для огнеупорного бетона. Исследования показали, что использование в качестве мелющих тел шаров Ø12-18 наиболее оптимально. Микроскопический анализ показал, что форма и размер мелющих тел влияет на размер и форму частиц реактивного глинозема, так как позволяет снизить время помола с 30 мин (цех) до 20 мин, что с экономической точки зрения уменьшает издержки производства за счет снижения затрат на электроэнергию и увеличения срока эксплуатации вибромельницы. Так же за счет повышения по сравнению с цеховым (8500 см²/г) величины удельной поверхности до 11838 см²/г, возможно добиться лучшей упаковки частиц в бетоне. Таким образом, получены высокие показатели реактивного глинозема, которые позволяют улучшить строительно-технические свойства огнеупорного бетона.

Ключевые слова: огнеупорный бетон, неформованные огнеупоры, бетон, корунд, модифицирование бетона, заполнитель

INFLUENCE OF THE TYPE AND SIZE OF GRINDING MEDIA ON THE PROPERTIES OF REACTIVE ALUMINA FOR REFRACTORY CONCRETE

G.E. Levin, L.A. Vinogradova, F.R. Iksanov, E.A. Agapov

Gleb E. Levin, Lyubov A. Vinogradova (ORCID 0000-0002-3779-6984)*

Department of Technology of Ceramics and Nanomaterials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: glevin2009@yandex.ru, lavinogradova@ya.ru*

Farid R. Iksanov, Egor A. Agapov

Center for Technology and Production Improvement, Borovichi Refractories Plant JSC, Mezhdunarodnaya st., 1, Borovichi, 74411, Russia

E-mail: Fiksanov@aobko.ru, eagapov@aobko.ru

Refractory concrete products are used in various fields of production, such as metallurgy, ceramics, glass, cement and even nuclear industry. In any places where high temperature is used, a kind of "protector" is required from aggressive media, such as liquid, gas, solid materials. Just such a material is monolithic refractory, or simply refractory concrete. Such concrete, as well as ordinary construction, consists of various kinds of aggregates that have both high melting temperatures and strong mechanical properties that give the final composite the necessary properties. This article presents the results of a study of the effect of the type and size of grinding media in a vibrating mill on the properties of reactive alumina for refractory concrete. Studies have shown that the use of Ø12-18 balls as grinding media is the most optimal. Microscopic analysis showed that the shape and size of the grinding media affects the size and shape of the particles of reactive alumina. Since it allows you to reduce the grinding time from 30 min (workshop) to 20 min, which from an economic point of view reduces production costs by reducing energy costs and increasing the service life of the vibrating mill. Also, by increasing the specific surface area to 11838 cm²/g compared to the workshop (8500 cm²/g), it is possible to achieve better packing of particles in concrete. Thus, high indicators of reactive alumina were obtained, which will improve the construction and technical properties of refractory concrete.

Key words: refractory concrete, unshaped refractories, concrete, corundum, concrete modification, aggregate

Для цитирования:

Левин Г.Э., Виноградова Л.А., Иксанов Ф.Р., Агапов Е.А. Влияние вида и размера мелющих тел на свойства реактивного глинозема для огнеупорного бетона. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 9. С. 105–111. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6693.

For citation:

Levin G.E., Vinogradova L.A., Iksanov F.R., Agapov E.A. Influence of the type and size of grinding media on the properties of reactive alumina for refractory concrete. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 9. P. 105–111. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6693.

INTRODUCTION

The use of monolithic refractories continues to prove its advantage over molded ones, as concretes allow for higher performance and functionality. The tendency to replace molded refractories with monolithic ones is confirmed by an increase in the share of sales of unmolded refractories in the refractory products market. In this regard, at the moment, active development is underway in the field of new compositions of refractory concrete products and modification of existing products in order to improve quality and performance.

Many works of the authors are aimed at studying the selection of raw materials with specified physical and chemical characteristics [1-9]. So, they pay great attention to the study of corundum aggregates in the body of concrete. One of the most common aggregates used is reactive alumina with different fineness of grinding. One of the stages in the production of reactive alumina is grinding in vibratory mills [10-19]. Both balls of various sizes and cylinders can act as grinding media. Actually, more attention is riveted to grinding bodies, the study of grinding bodies is an urgent problem, since there is no understanding that it is

better to use balls of various sizes or cylinders as grinding bodies for grinding α -corundum [19-29].

In this regard, the topic of this article is to identify the influence of the type and size of grinding media on the properties of the aggregate for refractory concrete. Our task is to test balls Ø14, cylinders and balls Ø12-18 mm as grinding media and compare how they affect the quality characteristics of reactive alumina.

EXPERIMENTAL TECHNIQUE

To determine the chemical composition of reactive alumina, we used a multichannel X-ray spectrometer of the SRM-25 brand, designed to analyze discrete samples of materials by the fluorescence X-ray spectral method simultaneously for any 12 samples.

The specific surface index was determined on a PSKh 12sp instrument. The device calculates the specific surface area (S , cm²/g) and mass-average particle size (d , μ m) of the studied dispersed materials and visualizes them on the NOTEBOOK display.

The distribution of particles in the powder was analyzed using a laser particle analyzer Microsizer 201A, which is designed to quickly and accurately measure the distribution of particle sizes in the range of 0.2-300 μ m.

Photographs of the particle shape were taken with a NIKON optical microscope. with Nikon digital photo-video documentation system, NikonView photo image processing and Video Test photo image analysis software. The system for measuring the microhardness of materials PMT-"LOMO" (Vickers diamond pyramid method).

RESULTS AND DISCUSSION

According to Table, it can be said that, regardless of the grinding media, the D_{50} and D_{90} indicators decrease with increasing grinding time. But $\varnothing 12-18$ mm balls and cylinders provide the best post-grinding performance compared to $\varnothing 14$ mm balls, and can also reduce grinding time by 10 min, which leads to a reduction in reactive alumina production costs by reducing energy costs and increasing service life equipment.

The use of balls $\varnothing 12-18$ mm led to the highest specific surface area at 20 min of grinding (11838 cm^2/g), which in theory can lead to the most dense packing of particles in the refractory concrete matrix and, accordingly, to an improvement in quality characteristics.

Grinding using $\varnothing 14$ mm balls showed the worst result, therefore it is most expedient to use cylinders and balls $\varnothing 12-18$ mm as grinding media for a vibrating mill, but the operation of the cylinders leads to strong iron oxide grinding, which, in theory, can adversely affect the quality characteristics of the refractory concrete.

Based on Fig. 1,2,3, it can be noted that the particle distribution curve, regardless of the type of grinding media, is bimodal.

In Fig. 4, under the letter A, the minimum particle size was 0.5-0.7 μm , the maximum was 3.0-5.0 μm , the main one was 1.0-1.5 μm .

Table

Experimental summary

Таблица. Сводные данные эксперимента

Name	20 min	30 min	40 min	50 min
Balls $\varnothing 14$				
$D_{50}, \mu\text{m}$	2.91	2.13	2.07	2.04
$D_{90}, \mu\text{m}$	11.5	7.00	4.01	4.55
Specific surface, cm^2/g	7693	7881	7888	7697
Cont. $\text{Fe}_2\text{O}_3, \%$	0.14	0.17	0.18	0.21
Cylinders				
$D_{50}, \mu\text{m}$	1.50	1.40	1.24	1.26
$D_{90}, \mu\text{m}$	6.76	3.73	2.89	2.97
Specific surface, cm^2/g	10441	10792	11034	11042
Cont. $\text{Fe}_2\text{O}_3, \%$	0.15	0.22	0.23	0.25
Balls $\varnothing 12-18$				
$D_{50}, \mu\text{m}$	1.35	1.19	1.17	1.13
$D_{90}, \mu\text{m}$	3.90	3.49	3.46	2.71
Specific surface, cm^2/g	11838	11830	12142	12516
Cont. $\text{Fe}_2\text{O}_3, \%$	0.12	0.13	0.15	0.15

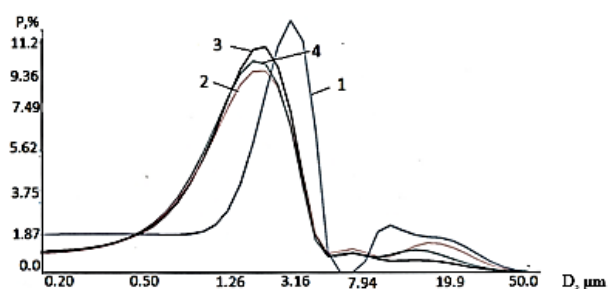


Fig.1. Distribution of particles after grinding on balls $\varnothing 14$ depending on the grinding time, min: 1) 20; 2) 30; 3) 40; 4) 50
Рис.1. Распределение частиц после помола на шарах $\varnothing 14$ в зависимости от времени помола, мин: 1) 20; 2) 30; 3) 40; 4) 50

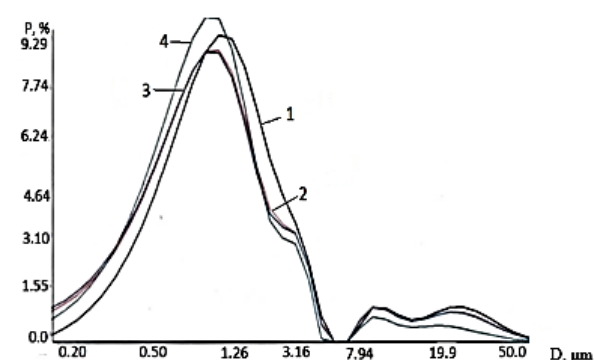


Fig.2. Distribution of particles after grinding on balls $\varnothing 12-18$ depending on the grinding time, min: 1) 20; 2) 30; 3) 40; 4) 50
Рис.2. Распределение частиц после помола на шарах $\varnothing 12-18$ в зависимости от времени помола, мин: 1) 20; 2) 30; 3) 40; 4) 50

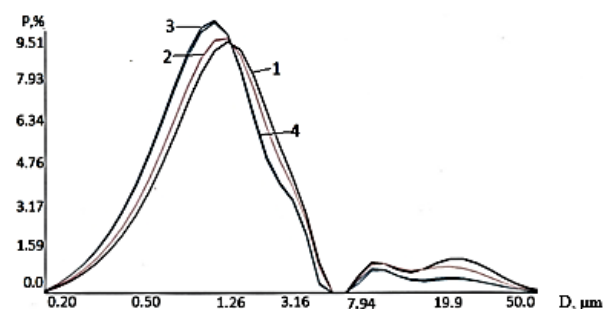


Fig.3. Distribution of particles after grinding on balls cylinders depending on the grinding time, min: 1) 20; 2) 30; 3) 40; 4) 50
Рис.3. Распределение частиц после помола на цилиндрах в зависимости от времени помола, мин: 1) 20; 2) 30; 3) 40; 4) 50

The shape of the particles is tabular and irregular, small rounded particles. Under the letter B, the minimum particle size was 0.5-0.7 μm , the maximum was 3.0-4.0 μm , the main one was 1.0-1.5 μm . The shape of the particles is tabular and irregular, small rounded particles. Under the letter B, the minimum particle size was 0.4-0.6 μm , the maximum was 3.0-5.0 μm , the main one was 1.0-1.5 μm .

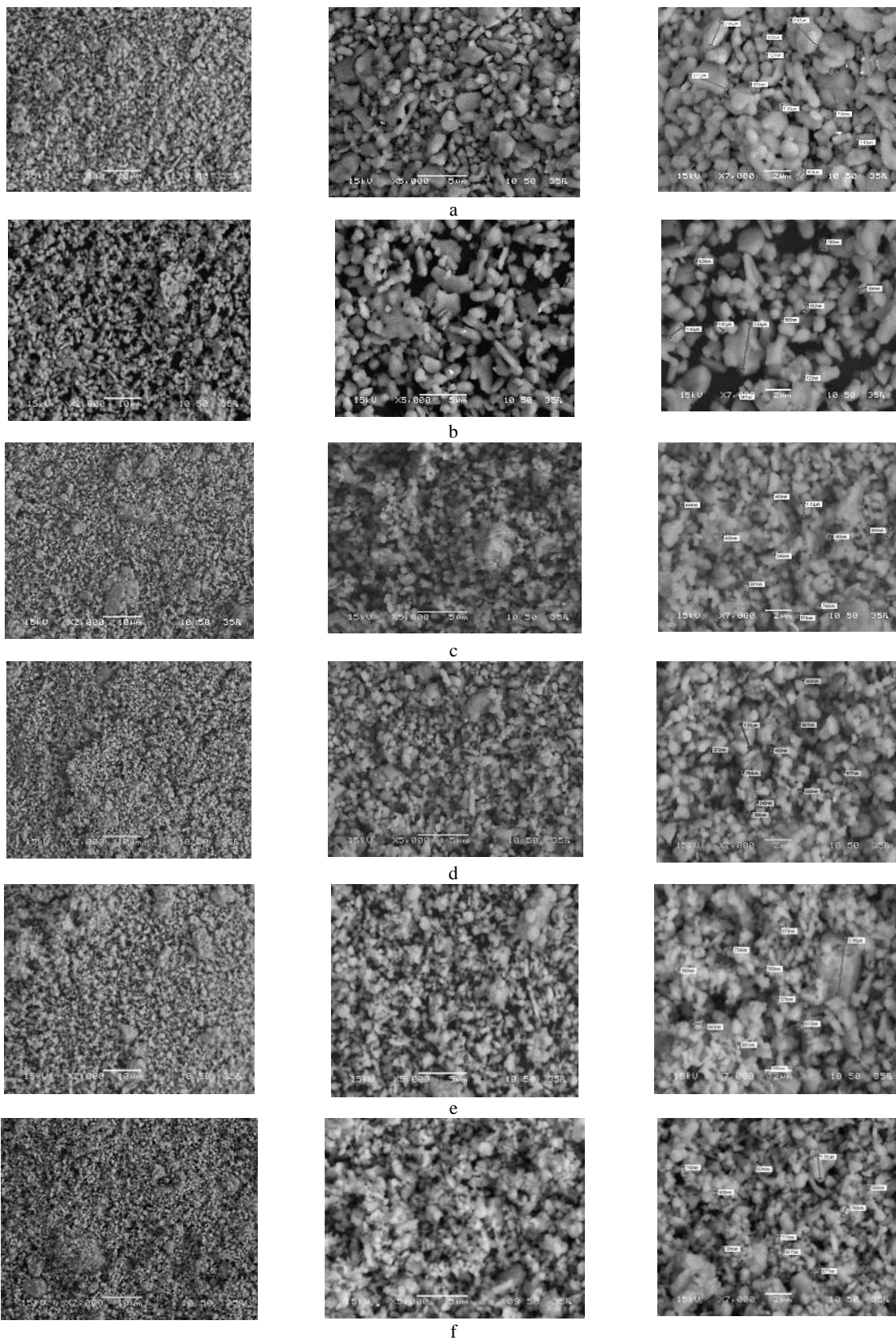


Fig.4. Microscopic examination of finely ground α -corundum, grinding on: a - balls Ø14 - 20 min; b - balls Ø14 - 50 min; c - cylinders - 20 min; d - cylinders - 50 min; e - balls Ø12-18 - 20 min; f - balls Ø12-18 - 50 min

Рис.4. Микроскопическое исследование тонкомолотого α -корунда, помол на: а - шарах Ø14 - 20 мин; б - шарах Ø14 - 50 мин; в - цилиндрах - 20 мин; г - цилиндрах - 50 мин; д - на шарах Ø12 - 18-20 мин; е - шарах Ø12 - 18-50 мин

The shape of the particles is predominantly irregular, there are small particles of a rounded shape. Under the letter G, the minimum particle size was 0.4-0.6 μm , the maximum was 2.5-5.0 μm , the main one was 0.7-1.0. The shape of the particles is predominantly irregular, there are small particles of a rounded shape. Under the letter D, the minimum particle size was 0.5-0.6 μm , the maximum was 2.5-5.0 μm , the main one was 0.8-1.0. The shape of the particles is predominantly irregular. Under the letter E, the minimum particle size was 0.4-0.6 μm , the maximum was 2.0-4.0 μm , the main one was 0.8-1.0. The shape of the particles is predominantly irregular.

The obtained data showed that depending on the use of different types and sizes of grinding media at different grinding times, the shape and size of particles in finely ground α -corundum change.

CONCLUSIONS

According to the results of the study, it can be concluded that:

1. An increase in grinding time leads to an increase in the specific surface area of reactive alumina. The use of balls with $\varnothing 12-18$ mm as grinding media showed the best result, it was possible to obtain the highest specific surface area of 11838 cm^2/g after 20 min of grinding, which can positively affect the quality indicators of refractory concrete due to denser particle packing.

2. Increasing the grinding time leads to a decrease in D_{50} and D_{90} . The use of grinding media $\varnothing 12-18$ led to the best distribution of particles ($D_{50} = 1.35$ and $D_{90} = 3.90$) meeting the requirements of TU 14-194-280-07 with amendment 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лотов В.А., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Зубкова О.А.** Процессы тепловыделения при гидратации и твердении цемента в присутствии микрокремнезема и суперпластификатора. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 62. Вып. 2. С. 79-87. DOI: 10.6060/ivkkt.20226502.6490.
2. **Тептерева Г.А., Пахомов С.И., Четвертнев И.А.** Возобновляемые природные сырьевые ресурсы, строение, свойства, перспективы применения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 9. С. 4-121. DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465.
3. ГОСТ 2409-95. Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. М.: ИПК Изд-во стандартов. 2004. 8 с.
4. TU 14-194-280-07 с изм.1. Глинозем реактивный тонкодисперсный ГРТ. Боровичи: АО «БКО». 2016. 4 с.
5. **Маргишвили А.П., Русакова Г.В., Гвоздева И.А., Алексеев П.А., Кузнецова О.С.** Новые низко- и ультранизкоцементные огнеупорные бетоны производства ОАО «Боровичский комбинат огнеупоров» для металлургии и стекольной промышленности. *Новые огнеупоры*. 2008. Вып. 3. С. 121-126.

3. Chemical analysis revealed an increase in the proportion of iron oxide with increasing grinding time, in the case of using cylinders as grinding bodies, the content of iron oxide is the highest. When using balls $\varnothing 12-18$, the amount of iron is the smallest.

4. Microscopic analysis showed that the shape and size of the grinding media affects the size and shape of the particles of reactive alumina.

5. Studies have shown that the use of $\varnothing 12-18$ balls as grinding media is the most optimal. Since it allows reducing the grinding time from 30 min (workshop) to 20 min, which, from an economic point of view, reduces production costs by reducing energy costs and increasing the life of the vibrating mill. Also, due to the increase in the specific surface area up to 11838 cm^2/g compared to the workshop (8500 cm^2/g), it is possible to achieve better packing of particles in concrete.

The study was carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia, grant No. 075-15-2021-671).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

Исследование выполнено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научной аппаратурой ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, грант № 075-15-2021-671).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

REFERENCES

1. **Lotov V.A., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Zubkov O.A.** Processes of heat release during hydration and hardening of cement in the presence of microsilica and superplasticizer. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 62. N 2. P. 79-87 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.2022502.6490.
2. **Teptereva G.A., Pakhomov S.I., Chetvertnev I.A.** Renewable natural raw materials, structure, properties, application prospects. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 9. P. 4-121 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465.
3. GOST 2409-95. Refractories. Method for determining apparent density, open and total porosity, water absorption. М.: ИПК Стандартов. 2004. 8 p. (in Russian).
4. TU 14-194-280-07 with amendment 1. Alumina reactive finely dispersed GDT. Borovich: JSC "BKO". 2016. 4 p. (in Russian).
5. **Margishvili A.P., Rusakova G.V., Gvozdeva I.A., Alekseev P.A., Kuznetsova O.S.** New low- and ultra-low-cement refractory concretes produced by JSC "Borovich Refractory Plant" for metallurgy and glass industry. *Novye Ogneupory*. 2008. N 3. P. 121-126 (in Russian).

6. ГОСТ 30558-98. Глинозем металлургический. Технические условия. М.: Стандартиформ. 2011. 7 с.
7. **Мигаль В.П., Скурихин В.В., Булин В.В.** Неформованные огнеупоры, выпускаемые боровичским комбинатом огнеупоров. *Новые огнеупоры*. 2011. Вып. 10. С. 11 – 14.
8. ТТИ 194-11-08-15. Обжиг огнеупорного брикета в туннельной печи ЦЗЛ. Боровичи: АО «БКО». 2015. 10 с.
9. Справочник мастера огнеупорного производства АО «БКО». Боровичи: АО «БКО». 2011. 201 с.
10. **Taikabutsu G.K.** Refractories Handbook. Tokyo: Technical Associations of Refractories Japan. 1998. 520 p.
11. **Carniglia S.C., Barna G.L.** Handbook of Industrial Refractories Technology. Principles, Types, Properties and Applications. Park Ridge. USA: Noyer Publications. 1992. 627 p.
12. **Аксельрод Л.М.** Конкуренция на металлургическом рынке — двигатель конкуренции на рынке огнеупоров. *Новые огнеупоры*. 2016. Вып.7. С. 3-17.
13. **Гриншпун Е.М., Гороховский Е.М., Беклемышев Е.В., Карпец Л.А.** Огнеупорные изделия и массы ОАО "Динур". *Новые огнеупоры*. 2011. Вып.8. С. 16-23.
14. **Семченко Г.Д.** Неформованные огнеупоры. Х.: НТУ "ХПИ". 2007. 304 с.
15. **Аксельрод Л.М.** Развитие огнеупорной промышленности — отклик на запросы потребителей. *Новые огнеупоры*. 2013. № 3. С. 107-122.
16. **Пивинский Ю.Е.** Керамические и огнеупорные материалы. Т. 2. СПб.: Стройиздат СПб. 2003. 668 с.
17. **Пивинский Ю.Е.** Реология дисперсных систем, ВКВС и керамобетоны. Элементы нанотехнологий в силикатном материаловедении. Т. 3 СПб.: Политехника. 2012. 682 с.
18. **Пивинский Ю.Е., Добродон Д.А.** Получение и свойства вяжущих высокоглиноземистых суспензий в системе боксит – кварцевое стекло. *Новые огнеупоры*. 2002. Вып. 5. С. 19-26.
19. **Пивинский Ю.Е., Дякин П.В., Вичман С.В., Дякин П.В.** Литые под давлением высокоглиноземистые керамические отливки 1. Уплотнение и свойства матричных систем на основе смешанных ВКВС Состав: Боксит, кварцевое стекло и технический глинозем. *Огнеупоры и промышл. керамика*. 2005. Т. 46. Вып. 3. С. 220-224. DOI: 10.1007/s11148-005-0090-6.
20. **Пивинский Ю. Е., Дякин П.В., Вичман С.В., Дякин П.В.** Литые под давлением высокоглиноземистые керамические отливки. 2. Уплотнение и свойства материалов на основе пластифицированных бокситов ВКВС, реакционноспособного оксида алюминия и их бинарных смесей. *Огнеупоры и промышл. керамика*. 2005. Т. 46. Вып. 6. С. 396-402. DOI: 10.1007/s11148-006-0034-9.
21. **Пивинский Ю.Е.** Новые огнеупорные бетоны и вяжущие системы: основные тенденции разработки, производства и использования огнеупоров в 21 веке. 2. Керамические связующие и отливки. *Огнеупоры и промышл. керамика*. 1998. Т. 39. Вып. 3. С. 91-99. DOI: 10.1007/BF02767985.
22. **Пивинский Ю.Е., Дякин П.В., Перепелицын В.А.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 1. Высокоглиноземистый боксит как базовый сырьевой компонент. *Новые огнеупоры*. 2015. Т. 56. Вып. 4. С. 344-350. DOI: 10.1007/s11148-015-9845-х.
23. **Пивинский Ю.Е., Дякин П.В.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 2. Свойства исходных компонентов и отливок на основе композиционной композиции ВКВС. Исследование начальной
6. GOST 30558-98. Alumina metallurgical. Specifications. M.: Standartinform. 2011. 7 p. (in Russian).
7. **Migal V.P., Skurikhin V.V., Bulkin V.V.** Unformed refractories manufactured by Borovichi Refractories Plant. *Novye Ogneupory*. 2011. N 10. P. 11-14 (in Russian).
8. ТТИ 194-11-08-15. Firing a refractory briquette in a TsZL tunnel kiln. Borovichi: JSC "BKO". 2015. 10 p. (in Russian).
9. Handbook of the master of refractory production of JSC "BKO". Borovichi: JSC "BKO". 2011. 201 p. (in Russian).
10. **Taikabutsu G.K.** Refractories Handbook. Tokyo: Technical Associations of Refractories Japan. 1998. 520 p.
11. **Carniglia S.C., Barna G.L.** Handbook of Industrial Refractories Technology. Principles, Types, Properties and Applications. Park Ridge. USA: Noyer Publications. 1992. 627 p.
12. **Axelrod L.M.** Competition in the metallurgical market is the engine of competition in the refractory market. *Novye Ogneupory*. 2016. N 7. P. 3-17 (in Russian).
13. **Grinshpun E.M., Gorokhovskiy E.M., Beklemyshev E.V., Karpets L.A.** Refractory products and masses of JSC "Dinur". *Novye Ogneupory*. 2011. N 8. P. 16-23 (in Russian).
14. **Semchenko G.D.** Unformed refractories. K.: NTU "KhPI". 2007. 304 p. (in Russian).
15. **Axelrod L.M.** Development of the refractory industry — response to consumer requests. *Novye Ogneupory*. 2013. N 3. P. 107-122 (in Russian).
16. **Pivinsky Yu.E.** Ceramic and refractory materials. V. 2. SPb.: Stroyizdat SPb. 2003. 668 p. (in Russian).
17. **Pivinsky Yu.E.** Rheology of dispersed systems, VKVS and ceramic concrete. Elements of nanotechnologies in silicate materials science. V. 3. SPb.: Politekhnika. 2012. 682 p. (in Russian).
18. **Pivinsky Yu.E., Dobrodon D.A.** Preparation and properties of astringent high-alumina suspensions in the bauxite - quartz glass system. *Novye Ogneupory*. 2002. N 5. P. 19-26 (in Russian). DOI: 10.1007/s11148-005-0090-6.
19. **Pivinsky Yu.E., Dyakin P.V., Vichman S.V., Dyakin P.V.** Pressure-cast high-alumina ceramic castings 1. Compaction and properties of matrix systems based on mixed VKVS Composition: Bauxite, quartz glass and technical alumina. *Ogneupory Promyshl. Keramika*. 2005. V. 46. N 3. P. 220-224 (in Russian). DOI: 10.1007/s11148-005-0090-6.
20. **Pivinsky Yu. E., Dyakin P.V., Vichman S.V., Dyakin P.V.** Pressure-cast high-alumina ceramic castings. 2. Compaction and properties of materials based on plasticized VKVS bauxite, reactive aluminum oxide and their binary mixtures. *Ogneupory Promyshl. Keramika*. 2005. V. 46. N 6. P. 396-402 (in Russian). DOI: 10.1007/s11148-006-0034-9.
21. **Pivinsky Yu.E.** New refractory concretes and binding systems: the main trends in the development, production and use of refractories in the 21st century. 2. Ceramic binders and castings. *Ogneupory Promyshl. Keramika*. 1998. V. 39. N 3. P. 91-99 (in Russian). DOI: 10.1007/BF02767985.
22. **Pivinsky Yu.E., Dyakin P.V., Perepelitsyn V.A.** Research in the field of production of molded and unformed refractories based on high-alumina VKVS. Part 1. High-alumina bauxite as the main raw material component. *Novye Ogneupory*. 2015. V. 56. N 4. P. 344-350 (in Russian). DOI: 10.1007/s11148-015-9845-х.
23. **Pivinsky Yu.E., Dyakin P.V.** Research in the field of production of molded and unformed refractories based on high-alumina VKVS. Part 2. Properties of the initial components and castings based on the VKVS composite composition. Investigation of the initial stage of sintering and mullitization. *Ogneupory Promyshl. Keramika*. 2015. V. 56. N 5. P. 544-550 (in Russian). DOI: 10.1007/s11148-016-9884-у.

- стадии спекания и муллитизации. *Огнеупоры и промышл. керамика*. 2015. Т. 56. Вып. 5. С. 544-550. DOI: 10.1007/s11148-016-9884-у.
24. **Пивинский Ю.Е., Дякин П.В., Остряков Л.В.** Исследования в области производства формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 3. Влияние температуры обжига на спекание и муллитизацию материалов, полученных на основе композиционного ВКС. *Огнеупоры и промышл. керамика*. 2015. Т. 56. Вып. 6. С. 648-655. DOI: 10.1007/s11148-016-9906-9.
 25. **Пивинский Ю.Е., Соловьев Ю.Н., Соловьев А.Н.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 4. Влияние добавки огнеупорных глин на свойства композиционных составов ВКВС, отливок и материалов на их основе. *Новые огнеупоры*. 2016. Т. 57. Вып. 1. С. 70-76. DOI: 10.1007/s11148-016-9930-9.
 26. **Пивинский Ю.Е., Дякин П.В., Остряков Л.В.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 5. Влияние температуры обжига на свойства материалов, полученных из композиционных ВКВС с добавлением огнеупорной глины. *Новые огнеупоры*. 2016. Т. 57. Вып. 2. С. 180-184. DOI: 10.1007/s11148-016-9950-5.
 27. **Пивинский Ю.Е., Колобов Ю.В., Колобов А.Ю.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 6. Муллитизация и термическое расширение материалов на основе компаундной композиции ВКВС. *Новые огнеупоры*. 2016. Т. 57. Вып. 3. С. 297-303. DOI: 10.1007/s11148-016-9972-z.
 28. **Пивинский Ю.Е., Дякин П.В.** Диспергирование (дефлокулирование) алюминия. *Огнеупоры и промышл. керамика*. 2004. Т. 45. Вып. 3. С. 201-209. DOI: 10.1023/B:REFR.0000036730.62623.f7.
 29. **Пивинский Ю.Е., Дякин П.В., Остряков Л.В.** Исследования в области производства формованных и формованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 3. Влияние температуры обжига на спекание и муллитизацию материалов, полученных на основе композиционной композиции. *Новые огнеупоры*. 2015. Вып. 12. С. 25-33.
 24. **Pivinsky Yu.E., Dyakin P.V., Ostryakov L.V.** Research in the field of production of molded and unformed refractories based on high-alumina VKVS. Part 3. The effect of firing temperature on sintering and mullitization of materials obtained on the basis of composite HCB. *Ogneupory Promyshl. Keramika*. 2015. V. 56. N. 6. P. 648-655 (in Russian). DOI: 10.1007/s11148-016-9906-9.
 25. **Pivinsky Yu.E., Solovyov Yu.N., Solovyov A.N.** Research in the field of production of molded and unformed refractories based on high-alumina VKVS. Part 4. The effect of the addition of refractory clays on the properties of composite compositions, castings and materials based on them. *Novye Ogneupory*. 2016. V. 57. N 1. P. 70-76 (in Russian). DOI: 10.1007/s11148-016-9930-9.
 26. **Pivinsky Yu.E., Dyakin P.V., Ostryakov L.V.** Research in the field of obtaining molded and unformed refractories based on high-alumina VKVS. Part 5. The effect of the firing temperature on the properties of materials obtained from composite materials with the addition of refractory clay. *Novye Ogneupory*. 2016. V. 57. N 2. P. 180-184 (in Russian). DOI: 10.1007/s11148-016-9950-5.
 27. **Pivinsky Yu.E., Kolobov Yu.V., Kolobov A.Yu.** Research in the field of obtaining molded and unformed refractories based on high-alumina VKVS. Part 6. Mullitization and thermal expansion of materials based on a compound composition of VKVS. *Novye Ogneupory*. 2016. V. 57. N 3. P. 297-303 (in Russian). DOI: 10.1007/s11148-016-9972-z.
 28. **Pivinsky Yu.E., Dyakin P.V.** Dispersion (deflocculation) of aluminum. *Ogneupory Promyshl. Keramika*. 2004. V. 45. N 3. P. 201-209 (in Russian). DOI: 10.1023/B:REFR.0000036730.62623.f7.
 29. **Pivinsky Yu.E., Dyakin P.V., Ostryakov L.V.** Research in the field of production of molded and unformed refractories based on high-alumina VKVS. Part 3. Influence of firing temperature on sintering and mullitization of materials obtained on the basis of composite composition. *Novye Ogneupory*. 2015. N 12. P. 25-33 (in Russian).

Поступила в редакцию 18.05.2022
Принята к опубликованию 09.06.2022

Received 18.05.2022
Accepted 09.06.2022