

ПЕРЕРАБОТКА ЗЕМЛИ ФОРМОВОЧНОЙ ГОРЕЛОЙ

О. С. ЗАЛЫГИНА¹⁾, В. И. ЧЕПРАСОВА¹⁾, Д. П. НОВИЦКАЯ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет,
ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

В настоящее время металлургическая промышленность занимает одну из ведущих позиций в экономике многих стран. Вместе с тем в металлургическом производстве образуется большое количество твердых отходов. К наиболее крупнотоннажным относится земля формовочная горелая, которая формируется на стадии выбивки отливок из литейных форм. В работе исследованы свойства земли формовочной горелой (влажность, потери при прокаливании, элементный, фазовый и зерновой состав) и подтверждена возможность ее регенерации. Наиболее простым и дешевым является сухой механический способ регенерации, который применяется на большинстве предприятий Республики Беларусь. В работе показано, что при реализации этого способа около 80 % земли формовочной горелой возвращают в технологический процесс на стадию изготовления литейных форм, а около 20 % превращается в мелкодисперсную пылевидную фракцию, которая представляет собой отход производства и в настоящее время вывозится на захоронение.

На основании экспериментальных исследований установлено, что фракция земли формовочной горелой может быть использована при производстве керамического кирпича в качестве отошающей добавки. Были получены образцы керамического кирпича, содержащие 80 масс. % глины месторождения «Лукомль», а также песок и мелкодисперсную фракцию земли формовочной горелой в различных соотношениях. Исследованы свойства полученных образцов, их структура и фазовый состав. Установлено, что при увеличении содержания отхода свойства керамического кирпича изменяются незначительно. Предлагается при производстве керамического кирпича в качестве отошающей добавки использовать 20 масс. % мелкодисперсной фракции земли формовочной горелой: полностью заменить кварцевый песок на отход. На основании экспериментальных исследований выбран обжиг при температуре 1000 °С с изотермической выдержкой в течение 60 мин. Установлено, что полученные образцы керамического кирпича соответствуют ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия», марка 300.

Ключевые слова: отход; земля формовочная горелая; литейное производство; мелкодисперсная фракция; водопоглощение; предел прочности при сжатии.

PROCESSING OF BURNT MOLDING EARTH

V. S. ZALYHINA^a, V. I. CHEPRASOVA^a, D. P. NOVITSKAYA^a

^aBelarusian State Technological University,
13a Sviardlova Street, Minsk 220006, Belarus
Corresponding author: V. S. Zalyhina (zalyhina@mail.ru)

At present, the metallurgical industry occupies one of the leading positions in the economy of many countries. At the same time, a large amount of solid wastes is generated in the metallurgical industry. The most large-tonnage includes

Образец цитирования:

Залыгина ОС, Чепрасова ВИ, Новицкая ДП. Переработка земли формовочной горелой. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;3:89–101. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-3-89-101>

For citation:

Zalyhina VS, Cheprasova VI, Novitskaya DP. Processing of burnt molding earth. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;3:89–101. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-3-89-101>

Авторы:

Ольга Сергеевна Залыгина – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии.

Виктория Игоревна Чепрасова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник центра физико-химических методов исследования.

Дарья Павловна Новицкая – учащаяся УО «Национальный детский технопарк».

Authors:

Volha S. Zalyhina, PhD (engineering); associate professor at the department of industrial ecology.

zalyhina@mail.ru

Victoria I. Cheprasova, PhD (engineering); senior researcher of the center for physical and chemical research methods.

vicacheprasova@gmail.com

Daria P. Novitskaya, student of the educational institution of National children's technopark.

dashanovitskay2007@gmail.com

burnt molding earth, which is formed at the stage of knocking out castings from foundry molds. The properties of burnt molding earth (humidity, loss on ignition, elemental, phase and grain composition) were studied and the possibility of its regeneration was confirmed. The simplest and cheapest is the dry mechanical method of regeneration, which is used in most enterprises of the Republic of Belarus. The paper shows that when this method is implemented, about 80 % of the burnt molding earth is returned to the technological process at the stage of casting molds, and about 20 % is converted into a fine pulverized fraction, which is a waste product and is currently being disposed of for disposal.

On the basis of experimental studies, it has been established that this fraction of burnt molding earth can be used in the production of ceramic bricks as a lean additive. Were obtained samples of ceramic bricks containing 80 wt. % clay field «Lukoml», as well as sand and a fine fraction of the molding burnt earth in various proportions. The properties of the obtained samples, their structure and phase composition have been studied. It has been established that with an increase in the content of waste, the properties of ceramic bricks change insignificantly. Therefore, it is proposed to use 20 wt. % of the finely dispersed fraction of the burnt molding earth, i.e., completely replace the quartz sand with waste. On the basis of experimental studies, firing at a temperature of 1000 °C with isothermal holding for 60 minutes was chosen. It has been established that the obtained samples of ceramic bricks correspond to GOST 530-2012 «Ceramic brick and stone. General Specifications», stamp 300.

Keywords: waste; burnt molding earth; foundry production; fine fraction; water absorption; compressive strength.

Введение

В настоящее время машиностроение является одной из важнейших отраслей экономики многих стран. Наибольшую удельную долю в общем объеме машиностроительного производства составляет автомобильная отрасль – 54 %. На долю электротехнической отрасли приходится 16 %; тяжелого и энергетического машиностроения – 8 %; химического и нефтяного машиностроения – 5 %; дорожного и коммунального машиностроения – 2,5 %; станкостроения и приборостроения – 1,5 %¹. Во всех названных отраслях неотъемлемое место занимает металлургическое производство, которое представляет собою трудоемкий технологический процесс.

В Республике Беларусь металлургическая продукция занимает 6,6 % от общего объема промышленного производства страны (по состоянию на 2020 год). Динамика развития металлургического производства в Республике Беларусь представлена в табл. 1 [1].

Таблица 1

Динамика развития металлургического производства в Республике Беларусь

Table 1

Dynamics of development of metallurgical production in the Republic of Belarus

	2016	2017	2018	2019	2020
Количество организаций, единиц	1874	1861	1814	1757	1777
Удельный вес в общем объеме промышленного производства, %	6,9	6,7	6,6	6,6	6,6

Около 70 % металлургической продукции выпускают предприятия Гомельской и Минской областей [2]. В основе металлургии Республики Беларусь лежит ОАО «Белорусский металлургический завод», который является управляющим предприятием холдинга «Белорусская металлургическая компания» и расположен в городе Жлобине. Литейно-металлургические производства в той или иной степени также присутствуют практически на всех крупных машиностроительных предприятиях Беларуси. Металлургическая промышленность Беларуси имеет отличительную особенность, которая заключается в отсутствии на территории страны заводов, осуществляющих выплавку металлов из природных руд, а также их добычу. Металлургические заводы используют в качестве исходного сырья привозной либо местный лом черных и цветных металлов.

Основными стадиями металлургического литейного производства являются: плавка металла, изготовление литейных форм, литье металла в формы, выбивка заготовок из форм, очистка заготовок.

Технологическая схема литейного производства представлена на рис. 1.

Как следует из схемы, в литейном производстве образуются такие отходы, как земля формовочная горелая, железосодержащая пыль, металлургические шлаки. Наиболее крупнотоннажным отходом является земля формовочная горелая (ЗФГ).

¹Литейное производство как один из неотъемлемых факторов развития отрасли машиностроения и экономики в целом [Электронный ресурс]. URL: <https://ivlit.ru> (дата обращения: 05.07.2022).

Земля формовочная горелая образуется при выбивке отливок из форм. В соответствии с Классификатором отходов, образующихся в Республике Беларусь [3], она относится к 4 классу опасности, код отхода 3126900. По литературным данным земля формовочная горелая на 90–95 % состоит из кварцевого песка [4].

В настоящее время на большинстве предприятий земля формовочная горелая подвергается регенерации с целью ее возврата в технологический процесс на стадию изготовления литейных форм. Обычно используется механическая регенерация как наиболее простой и дешевый способ. Однако при этом образуется мелкодисперсная фракция, которая не может использоваться повторно для изготовления литейных форм и вывозится на захоронение на полигон.

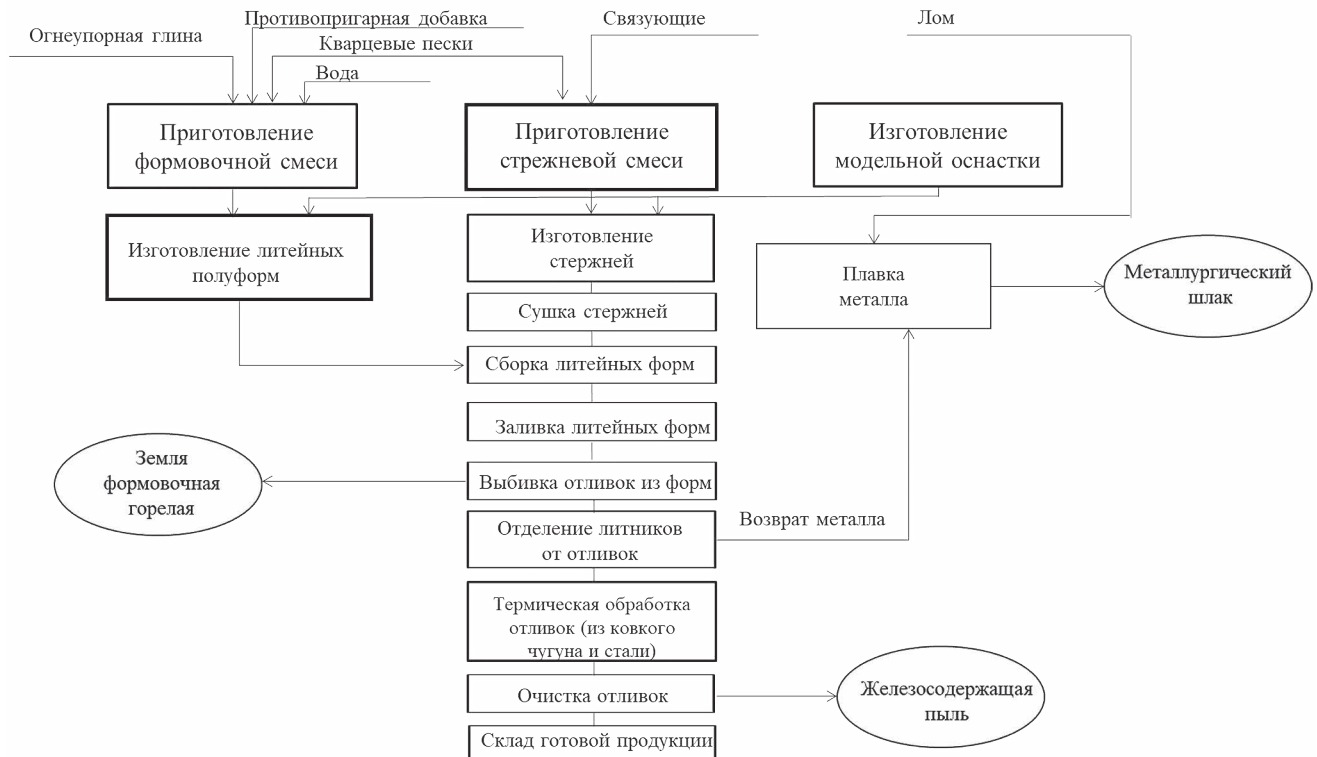


Рис. 1. Технологическая схема литейного производства

Fig. 1. Technological scheme of foundry production

Цель настоящего исследования – разработка наиболее рационального способа переработки земли формовочной горелой.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлась земля формовочная горелая двух белорусских предприятий, а также образцы керамического кирпича, полученные с использованием земли формовочной горелой.

Рентгенофазовый анализ земли формовочной горелой и полученных образцов проводили на рентгеновском дифрактометре *D8 Advance Bruker AXS* (Германия), детектор – сцинтилляционный счетчик. Запись производилась в диапазоне углов 2θ 10–80° с шагом 0,1–0,2° и накоплением импульсов в течение 2 с. Идентификация полученных рентгенограмм проводилась с применением специализированного программного обеспечения *Match1.10.1.446* и базы данных *ICDD PDF-2*.

Элементный состав определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа *JSM-5610 LV* с системой химического анализа *EDX JED-2201* (JEOL, Япония). Диапазон измеряемых концентраций 0,1–100 %.

Влажность отходов определяли в соответствии с ГОСТ 29234.5-91 «Формовочные пески. Метод определения влажности» по уменьшению массы пробы после высушивания в сушильном шкафу при температуре 105–110 °С до постоянной массы. Массовую долю влаги в процентах вычисляли по формуле:

$$X = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m_1},$$

где m_1 – масса навески земли формовочной горелой до высушивания, г;
 m_2 – масса навески земли формовочной горелой после высушивания, г.

Расхождение между результатами параллельных определений не превышало 0,2 %. За результат испытания принимали среднее арифметическое трех параллельных определений.

Потери при прокаливании определяли в соответствии с ГОСТ 29234.13-91 «Пески формовочные. Метод определения потери массы при прокаливании» по уменьшению масс пробы при прокаливании при температуре 1000 °С до постоянной массы. Массовую долю потери массы при прокаливании (X) в процентах вычисляли по формуле:

$$X = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m},$$

где m_1 – масса тигля с навеской до прокаливании, г;
 m_2 – масса тигля с навеской после прокаливании, г;
 m – масса навески, г.

Абсолютные расхождения результатов параллельных определений не превышали 0,05 % при потере массы при прокаливании от 0,1 до 0,3 % включительно и 0,2 % при потере массы при прокаливании более 2 %.

Для исследования зернового состава песка применяли ситовой анализ: рассеивание навески песка через набор сит по ГОСТ 29234.3-91 «Пески формовочные. Метод определения среднего размера зерна и коэффициента однородности». Перед испытанием сита устанавливаются друг на друга в порядке увеличения их номера снизу вверх. Снизу набора сит предусмотрен тазик. Набор сит устанавливается на специальный прибор, который с помощью эксцентрикового механизма встряхивает в горизонтальной плоскости стопку сит с частотой 300 колебаний в мин. После просеивания песка в течение 15 мин сита снимают с прибора и взвешивают остатки песка на каждом сите и в тазике. Совокупность зерен, оставшихся на каждом сите, составляет отдельную фракцию с размерами частиц в пределах отверстий вышестоящего и данного сита.

Расхождение между результатами двух параллельных определений не превышало 10 %. За результат испытания принимали среднее арифметическое трех определений. Зерновой состав песка характеризуется средним размером зерна, коэффициентом однородности и удельной поверхностью зерен.

Средний размер зерна и коэффициент однородности рассчитываются по результатам рассеивания пробы песка и количественного распределения частиц по ситам. Массовую долю остатка на сите X_i вычисляют по следующей формуле, %:

$$X_i = (m_i \cdot 100) / m,$$

где i – порядковый номер сита;
 m_i – масса остатка на сите, г;
 m – масса исходной навески, г.

Далее строят интегральную кривую в логарифмическом масштабе. Для этого по оси абсцисс откладывают в логарифмическом масштабе размер сторон ячеек сетки в свету d_i , а по оси ординат в линейном масштабе – процентную долю массы частиц, имеющих размер меньше d_i .

Средний размер зерна D_{cp} соответствует границе, которая делит распределение частиц на две равные части и характеризует размер воображаемого сита, через которое прошло бы ровно 50 % песчаной основы.

Для определения коэффициента однородности по интегральной кривой находят процентное содержание частиц размером меньше $4/3 D_{cp}$ и $2/3 D_{cp}$. Коэффициент однородности равен разности этих значений.

Определение удельной поверхности проводили расчетным методом по формуле:

$$Sp = 22,64 \frac{\sum_i (\frac{m_i}{\delta_i})}{m},$$

где i – порядковый номер сита;
 m_i – масса отдельных фракций песка, г;
 m – масса навески песка, г;
 δ_i – характерный размер зерен на сите, мм.

Характерный размер зерен каждой фракции вычисляли по формуле:

$$\delta = (d + d_e) / 2,$$

где d – размер ячейки сита, мм; d_e – размер ячейки смежного сита, расположенного выше, мм.

Статистическая обработка результатов проводилась для всех измерений. Результаты расчетов показали, что их относительная погрешность не превышает 3,5–4,5 %.

Результаты исследования и их обсуждение

Для выбора наиболее рационального способа переработки земли формовочной горелой на первом этапе были определены ее свойства: влажность, потери при прокаливании, элементный, фазовый и зерновой состав. Установлено, что влажность ЗФГ предприятия 1 составляет 1 %, предприятия 2 – 0,89 %. Потери при прокаливании для ЗФГ предприятия 1 составили – 0,11 %, предприятия 2 – 0,13 %.

Отметим, что при прокаливании изменяется цвет ЗФГ с серо-черного до красно-коричневого. По-видимому, это связано с содержанием в земле формовочной горелой железа, которое при прокаливании превращается в оксид железа Fe_2O_3 , который характеризуется красно-коричневым цветом.

Элементный состав изучаемых отходов литейного производства представлен в табл. 2.

Таблица 2

Элементный состав земли формовочной горелой

Table 2

Elemental composition of burnt molding earth

Предприятие	Содержание элемента, масс. %							
	Si	O	Al	Fe	Mg	Ca	K	Mn
1	49,5	38,14	4,60	3,65	2,03	0,92	0,86	0,30
2	60,97	30,68	3,26	2,44	1,35	0,98	0,32	–

Как следует из табл. 2, в обоих случаях основными элементами ЗФГ являются Si и O, также в заметном количестве присутствуют Al и Fe.

Исследование фазового состава ЗФГ показало, что в обоих случаях основной фазой является кварцевый песок – SiO_2 (рис. 2, 3). Характеристические пики других фаз на рентгенограммах не обнаружены, поэтому выявить, в какой форме присутствуют остальные элементы, не удалось, что связано с недостаточной чувствительностью рентгенофазового анализа.

При исследовании зернового состава ЗФГ определялись такие параметры, как средний размер зерен, коэффициент однородности и удельная поверхность.

Для определения зернового состава использовались сита с диаметром отверстий 3 мм; 2 мм; 1 мм; 0,5 мм; 0,25 мм; 0,1 мм; 0,63 мм (табл. 3).

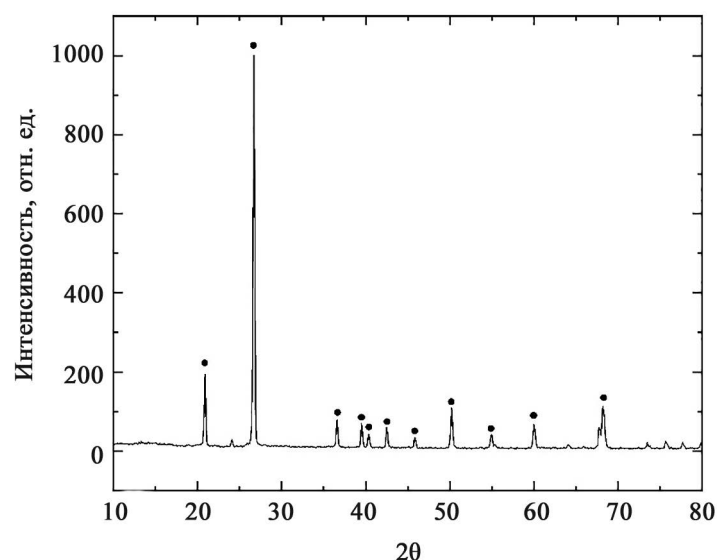


Рис. 2. Рентгенограмма земли формовочной горелой предприятия 1
● – SiO_2

Fig. 2. X-ray picture of burnt molding earth of enterprise 1
● – SiO_2

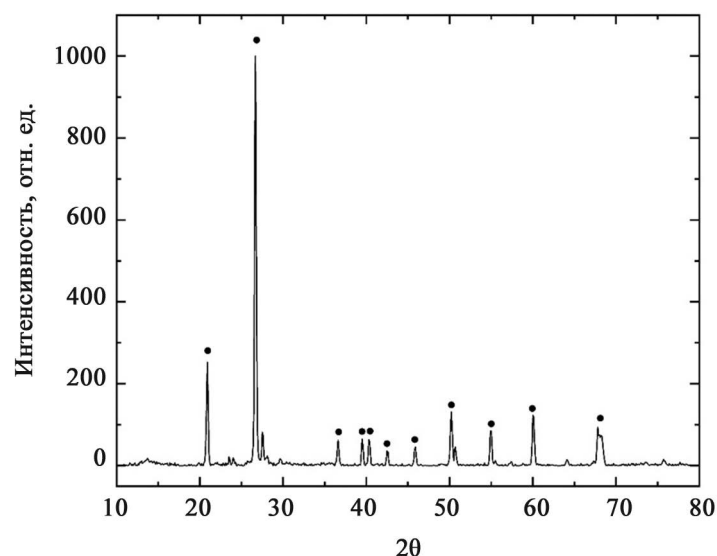


Рис. 3. Рентгенограмма земли формовочной горелой предприятия 2
● – SiO₂

Fig. 3. X-ray picture of burnt molding earth of enterprise 2
● – SiO₂

Таблица 3

Экспериментальные данные для определения среднего размера зерна и коэффициента однородности ЗФГ предприятия 1

Table 3

Experimental data to determine the average grain size and coefficient homogeneity of burnt molding earth of enterprise

Индекс сита	Размер стороны ячейки сита в свету d, мм	Характерный размер фракции δ, мм	Остаток на сите		Доля массы частиц с размером меньше сторон ячейки сита, %
			г	%	
3	3	—	0	0	100
2	2	2,5 (от 2 до 3)	7,89	1,58	98,42
1	1	1,5 (от 1 до 2)	10,68	2,14	96,28
05	0,5	0,75 (от 0,5 до 1)	64,4	12,88	83,4
025	0,25	0,375 (от 0,25 до 0,5)	317,17	63,43	19,97
01	0,1	0,175 (от 0,1 до 0,25)	98,13	19,63	0,34
0063	0,063	0,0825 (от 0,065 до 0,1)	1,30	0,26	0,08
Тазик	—	(меньше 0,063)	0,43	0,08	0
Итого			500	100	—

Далее была построена интегральная кривая в логарифмическом масштабе (рис. 4), по которой был определен средний размер зерна D_{cp} , составивший 0,35 мм.

Для определения коэффициента однородности по интегральной кривой находят процентное содержание частиц размером меньше $4/3 D_{cp}$ ($0,35 \cdot 4/3 = 0,47$) и $2/3 D_{cp}$ ($0,35 \cdot 2/3 = 0,24$). Как следует из рис. 3, доля массы частиц с размером меньше сторон ячейки сита $4/3 D_{cp}$ составляет 77 %, а с размером меньше сторон ячейки сита $2/3 D_{cp}$ – 15 %. Коэффициент однородности равен разности этих значений: $O = 77 - 15 = 62$ %. Удельная поверхность, определенная расчетным методом, составила 68,63 см²/г.

Для предприятия 2 аналогичным образом были получены следующие данные: средний размер зерна $D_{cp} = 0,38$ мм, коэффициент однородности – 59 %, удельная поверхность – 61,7 см²/г.

Данные по зерновому составу также подтверждаются фотографиями, полученными с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV (рис. 5).

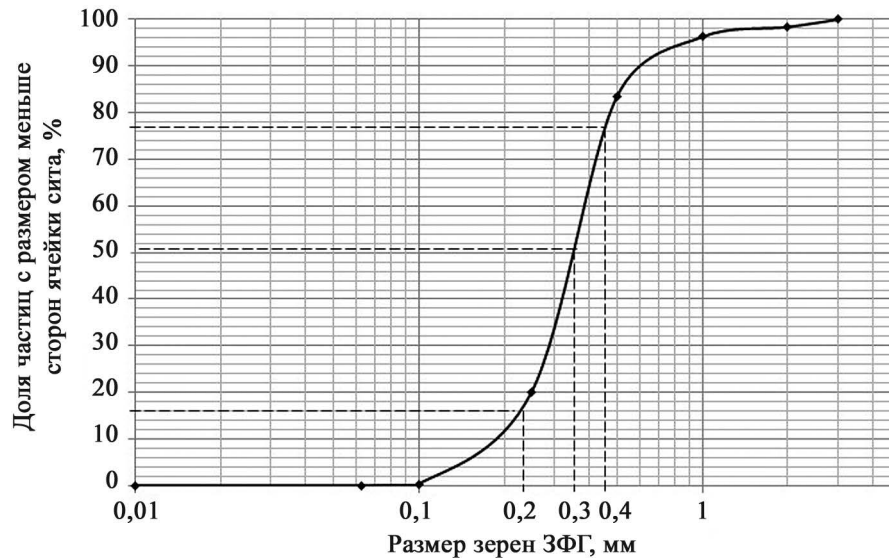


Рис. 4. Интегральная кривая распределения частиц земли формовочной горелой предприятия 1

Fig. 4. Integral particle distribution curve of burnt molding earth of enterprise 1

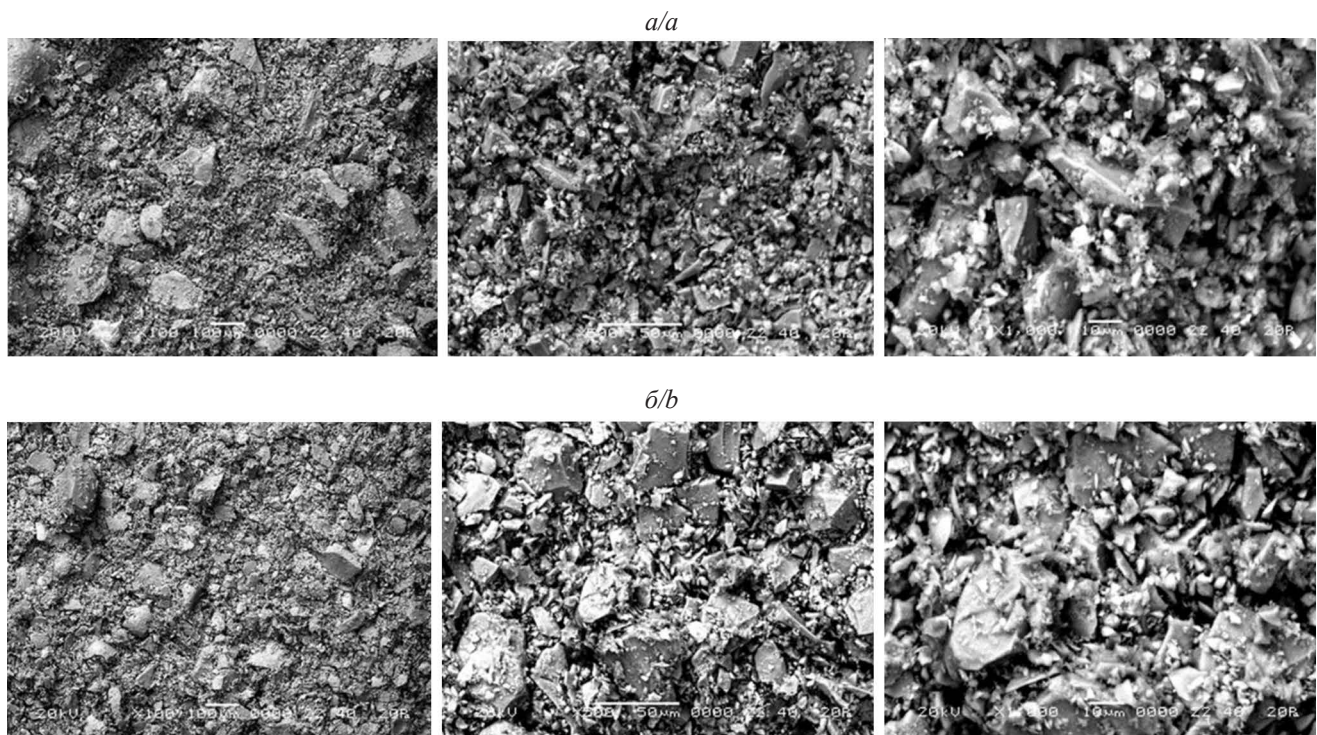


Рис. 5. Микрофотографии образцов земли формовочной горелой:
а – земля формовочная горелая предприятия 1; б – земля формовочная горелая предприятия 2

Fig. 5. Micrographs of samples of burnt molding earth: a – burnt molding earth enterprises 1; b – burnt molding earth of enterprise 2

Таким образом, элементный и фазовый состав земли формовочной горелой подтверждают возможность ее возврата в технологический процесс для приготовления формовочной смеси для литейных форм после удаления примесей железа, что предлагается осуществлять с помощью электромагнитной сепарации. Однако по зерновому составу земля формовочная горелая не соответствует предъявляемым к ней требованиям. В настоящее время на действующих предприятиях для изготовления формовочных смесей используют средние пески группы 02 с размером зерен 190–230 мкм с удельной поверхностью не менее 100 см²/г. Следовательно, для возврата земли формовочной горелой в техпроцесс необходимо ее измельчение. При измельчении также происходит удаление

пленок связующего от кварцевых песчинок за счет механического перетирания смеси. Пленки связующего разрушаются с образованием пыли, удаляемой системами пылеотсоса.

В работе измельчение ЗФГ после ее электромагнитной сепарации осуществлялось на планетарной мельнице PM100-RETSCHE. Было установлено, что при этом образуется около 24 масс. % мелкодисперсной пылевидной фракции, частицы которой характеризуются размером зерен менее 190 мкм, которая не может быть возвращена в технологический процесс для изготовления литейных форм.

На основании аналитического обзора литературы [5–8] предлагается использование мелкодисперсной пылевидной фракции земли формовочной горелой в производстве керамического кирпича. Для изучения возможности его получения с использованием данного вида отхода литейного производства в работе были получены опытные образцы. Для этого использовалась глина месторождения «Лукомль», кварцевый песок и земля формовочная горелая предприятия 2. Месторождение глин «Лукомль» расположено в 3 км от г. Новолукомль Чашникского р-на Витебской обл. Республики Беларусь. Состав глины месторождения «Лукомль» и земли формовочной горелой предприятия 2 (в пересчете на оксиды) представлен в табл. 4.

Таблица 4

Состав глины месторождения «Лукомль» и земли формовочной горелой предприятия 2

Table 4

Composition of clay deposit «Lukoml» and of burnt molding earth of enterprise 2

Оксиды, масс. %	Содержание оксидов, %	
	Глина	Мелкодисперсная фракция ЗФГ
SiO ₂	50,44	88,28
TiO ₂	0,92	–
Al ₂ O ₃	17,69	6,03
Fe ₂ O ₃	7,45	3,41
MgO	2,90	1,10
CaO	5,47	0,67
Na ₂ O	0,68	–
K ₂ O	4,49	0,38
Ппп	9,96	0,13

Опытные образцы керамического кирпича формовались пластическим способом с последующей сушкой при температуре 105 °С и обжигом с изотермической выдержкой при температуре 1000 °С в течение часа. Для полученных образцов определяли линейную усадку, водопоглощение, среднюю плотность, предел прочности при сжатии и предел прочности при изгибе. Составы опытных образцов и их свойства представлены в табл. 5.

Таблица 5

Свойства опытных образцов керамического кирпича

Table 5

Properties of prototypes of ceramic bricks

Состав, масс. %			Усадка, %	Плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа
Глина	Кварцевый песок,	Мелкодисперсная фракция ЗФГ					
80	20	–	7,0	2100	11,85	42,35	13,25
80	15	5	7,5	1990	12,31	39,15	12,52
80	10	10	6,9	2050	11,79	39,96	12,45
80	5	15	6,3	1980	11,17	40,12	13,14
80	–	20	6,6	2020	10,78	39,80	12,67

Структура опытных образцов, содержащих различное количество мелкодисперсной фракции земли формовочной горелой, исследовалась с помощью сканирующей микроскопии (рис. 6).

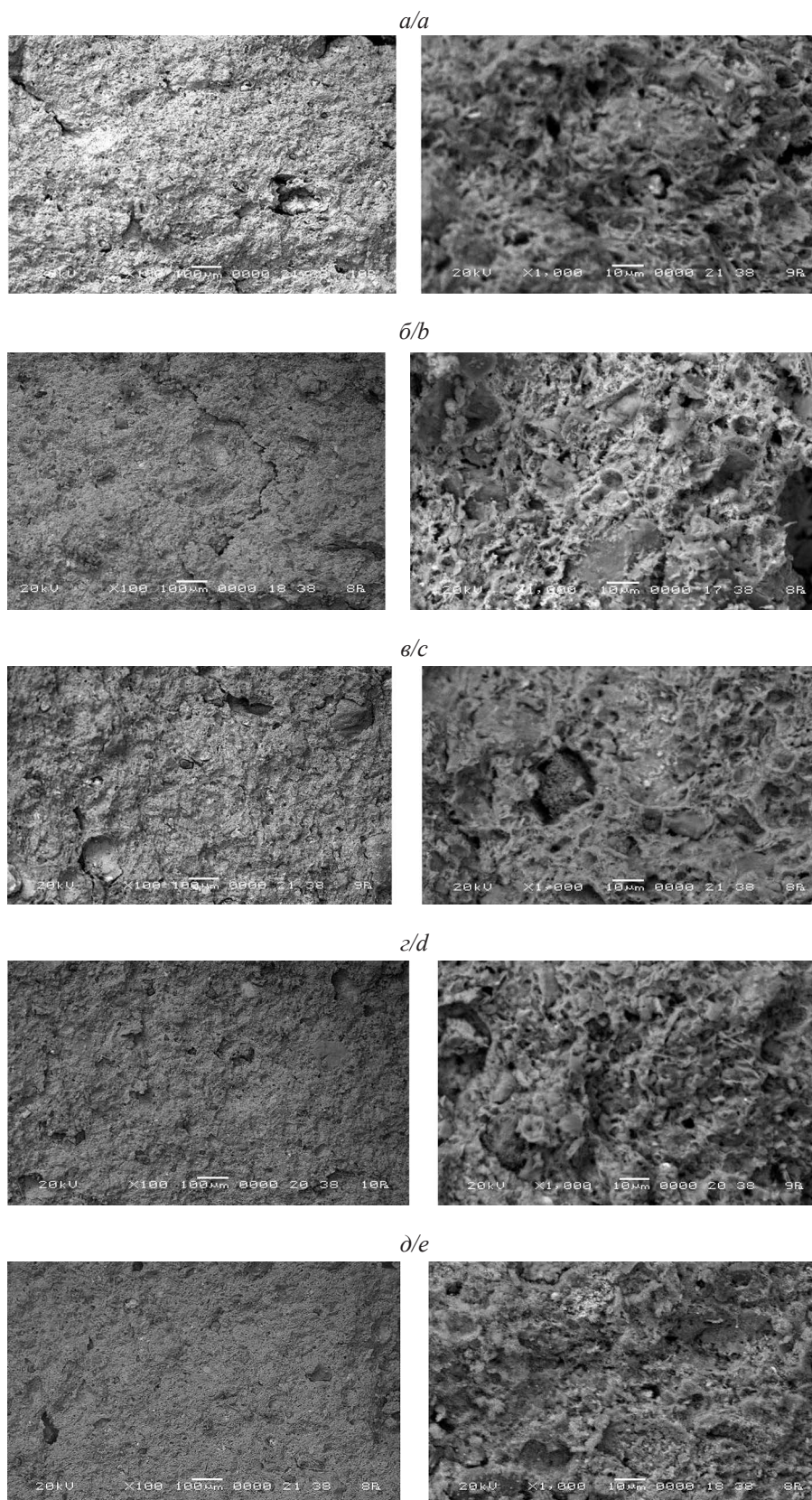


Рис. 6. Структура опытных образцов керамического кирпича: *а* – без добавления мелкодисперсной фракции ЗФГ, *б* – содержащих 5 % мелкодисперсной фракции ЗФГ, *в* – содержащих 10 % мелкодисперсной фракции ЗФГ, *г* – содержащих 15 % мелкодисперсной фракции ЗФГ, *д* – содержащих 20 % мелкодисперсной фракции ЗФГ

Fig. 6. Structure of prototypes of ceramic bricks: *a* – without adding finely dispersed fraction of burnt molding earth, *b* – containing 5 % finely dispersed fraction of burnt molding earth, *c* – containing 10 % finely dispersed fraction of burnt molding earth, *d* – containing 15 % finely dispersed fraction of burnt molding earth, *e* – containing 20 % finely dispersed fraction of burnt molding earth

Как видно из фотографий, представленных на рис. 6, структура всех опытных образцов керамического кирпича характеризуется равномерным распределением пор, что обеспечивает их высокие физико-механические свойства. Кроме этого, образцы, содержащие 20 масс. % мелкодисперсной фракции земли формовочной горелой, имеют более плотную структуру, что подтверждается также их более низким водопоглощением – 10,78 % (см. табл. 5). Из табл. 5 следует, что при увеличении содержания мелкодисперсной фракции земли формовочной горелой свойства керамического кирпича изменяются незначительно.

Таким образом, предлагается при производстве керамического кирпича в качестве отошающей добавки использовать 20 масс. % мелкодисперсной фракции земли формовочной горелой, то есть полностью заменить кварцевый песок на отход. Это позволит переработать наибольшее количество отхода и обеспечить экономию природного сырья.

Завершающим этапом получения керамического кирпича является обжиг, который влияет на качество получаемых изделий. Поэтому далее были проведены исследования по определению режима обжига керамического кирпича, содержащего 80 масс. % глины месторождения «Лукомль» и 20 масс. % мелкодисперсной фракции земли формовочной горелой.

Для выбора максимальной температуры обжига термообработку опытных образцов осуществляли при температуре от 850 °C до 1100 °C с интервалом в 50 градусов при подъеме температуры со скоростью 175 °C/ч и изотермической выдержке при максимальной температуре в течение часа. Для полученных образцов определяли среднюю плотность, водопоглощение и предел прочности при сжатии. Результаты эксперимента представлены в табл. 6.

Таблица 6

Свойства опытных образцов при различной максимальной температуре обжига

Table 6

Properties of prototypes at various maximum firing temperature

Максимальная температура обжига, °C	Средняя плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Прочность при сжатии, МПа	Примечания
850	1810	15,6	17,3	Недожог
900	1850	13,2	24,6	Без дефектов
950	1990	11,9	31,1	Без дефектов
1000	2020	10,8	39,8	Без дефектов
1050	2040	10,7	40,1	Без дефектов
1100	—	—	—	Деформация образцов (пережог)

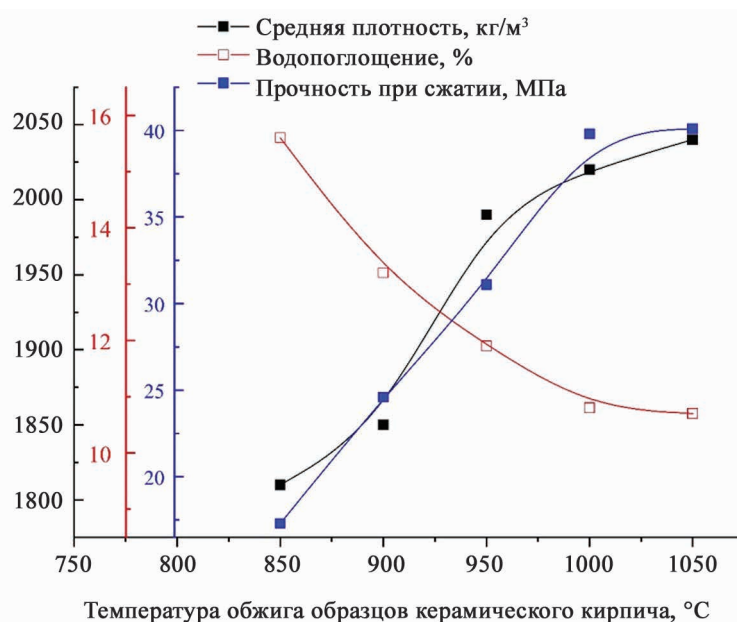


Рис. 7. Зависимость свойств опытных образцов от температуры обжига

Fig. 7. Dependence of properties of prototypes on the firing temperature

При повышении температуры обжига до 1050 °С свойства образцов улучшаются (табл. 6, рис. 7), а при 1100 °С наблюдается деформация образцов (пережог керамики). При повышении температуры от 1000 до 1050 °С свойства образцов изменяются незначительно – менее чем на 1 %. Поэтому в качестве оптимальной была выбрана температура обжига 1000 °С.

Далее обжиг осуществлялся при температуре 1000 °С с изотермической выдержкой в течение 30, 60, 90 и 120 мин (линии 1, 2, 3 и 4 соответственно на рис. 8).



Рис. 8. Графики режимов обжига

Fig. 8. Mode plot of firing

Для полученных образцов также определялись средняя плотность, водопоглощение и предел прочности при сжатии (табл. 7).

Таблица 7

Физико-механические свойства опытных образцов при различной изотермической выдержке при температуре 1000 °С

Table 7

Physical and mechanical properties of prototypes at different isothermal exposure at temperature 1000 °С

Время выдержки, мин	Плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Прочность при сжатии, МПа	Примечание
30	1980	12,4	33,5	Недожог
60	2020	10,8	39,8	Без дефектов
90	2010	10,8	40,2	Без дефектов
120	1990	10,7	40,5	Частичный пережог

Как следует из табл. 7, при изотермической выдержке в течение 120 мин происходит некоторое ухудшение свойств образцов, а также наблюдается их незначительное искривление (частичный пережог). При времени изотермической выдержки 30 мин имеет место недожог, о чем свидетельствуют невысокие значения плотности и прочности при сжатии, а также повышенное значение водопоглощения. Наилучшие свойства опытных образцов наблюдаются при изотермической выдержке в течение 60–90 мин. Поскольку в этом интервале свойства образцов практически не изменяются, с учетом необходимости экономии энергоресурсов предлагается осуществлять обжиг с изотермической выдержкой в течение 60 мин.

Таким образом, для керамического кирпича, содержащего 80 масс. % глины месторождения «Лукомль» и 20 масс. % мелкодисперсной фракции земли формовочной горелой выбран обжиг с изотермической выдержкой при температуре 1000°С в течение 60 мин.

Как свидетельствует рентгенофазовый анализ, состав полученных опытных образцов представлен кварцем SiO₂ и анортитом CaAl₂Si₂O₈ (рис. 9).

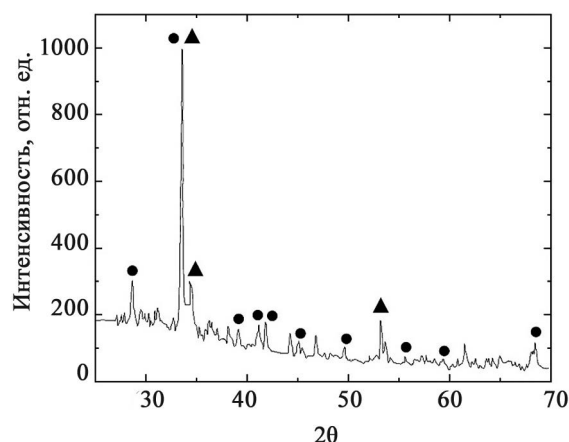


Рис. 9. Рентгенограмма керамического кирпича, содержащего 80 масс. % глины месторождения «Лукомль» и 20 масс. % мелкодисперсной фракции земли формовочной горелой, обожженного при температуре 1000 °С с изотермической выдержкой в течение 60 мин
● – SiO_2 , ▲ – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

Fig. 9. X-ray picture of ceramic brick containing 80 wt. % clay deposit «Lukoml» and 20 wt. % fine fraction of burnt molding earth, fired at temperature 1000 °C with isothermal exposure for 60 minutes
● – SiO_2 , ▲ – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

Полученные образцы керамического кирпича, содержащие 20 масс. % мелкодисперсной фракции земли формовочной горелой, характеризуются следующими свойствами: средняя плотность 2020 кг/м³, водопоглощение 10,8 %, предел прочности при сжатии 39,8 МПа, предел прочности при изгибе 12,67 МПа, что соответствует марке кирпича М300 по ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия».

Заключение

Проведенные исследования подтверждают возможность комплексной переработки земли формовочной горелой, которая является отходом литейного производства. Мелкодисперсную пылевидную фракцию земли формовочной горелой, которая образуется в процессе ее регенерации, предлагается использовать в производстве керамического кирпича в качестве отошающей добавки. Это позволит снизить воздействие литейного производства на окружающую среду за счет предотвращения размещения рассматриваемого отхода на полигонах, расширить сырьевую базу промышленности строительных материалов и получить качественную продукцию – керамический кирпич, соответствующий ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия».

Библиографические ссылки

1. Промышленность Республики Беларусь. Статистический буклет. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь; 2021. 51 с.
2. Витязь ПА, Толстой АВ, Садоха МА. Анализ состояния литейных производств Республики Беларусь. *Литье и металлургия*. 2019;3:35–40.
3. Общегосударственный классификатор Республики Беларусь ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь». Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 9 дек. 2019 г., № 3-Т. *Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь*. 2019;8/34631.
4. Кукуй ДМ, Андрианов НВ. *Теория и технология литейного производства. Формовочные материалы и смеси*. Минск: БНТУ; 2005. 390 с.
5. Дворкин ЛИ, Дворкин ОЛ. *Строительные материалы из отходов промышленности*. Ростов н/Д: Феникс; 2007. 368 с.
6. Жариков ВВ, Езерский ВА, Кузнецова НВ, Стерхов ИИ. Утилизация отходов литейного производства при изготовлении строительных изделий. *Вестник МГСУ*. 2011;3:189–194.
7. Шалевская ИА, Гутько ЮИ. Исследование возможности утилизации отходов формовочных смесей. *ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії*. 2011;4(25):169–173.
8. Залыгина ОС, Предченко МА. Направления переработки земли формовочной горелой. В: *Химическая технология и техника. Материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием)*. Минск: БГТУ; 2022. с. 226–228.

References

1. *Pramyshlennost' Respubliki Belarus. Statisticheskij buklet* [Industry of the Republic of Belarus. Statistical booklet]. Minsk: Natsionalnyy statisticheskiy komitet Respubliki Belarus; 2021. 51 p. Russian.

2. Vityaz PA, Tolstoj AV, Sadoha MA. *Analiz sostojanija litejnyh proizvodstv Respubliki Belarus* [Analysis of the state of foundry production in the Republic of Belarus]. *Lit'e i metallurgija* [Casting and metallurgy]. 2019;3:35–40. Russian.
3. *Obshhegosudarstvennyj klassifikator Respubliki Belarus OKRB 021-2019 «Klassifikator othodov, obrazujushhihsja v Respublike Belarus»*. *Postanovlenie Ministerstva prirodnyh resursov i ohrany okruzhajushhej sredy Resp. Belarus', 9 dek. 2019 g., № 3-T* [National classifier of the Republic of Belarus OKRB 021-2019 «Classifier of waste generated in the Republic of Belarus». Decree of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection Resp. Belarus, Dec 9 2019, No. 3-T]. *Natsionalnyj reestr pravovyh aktov Resp. Belarus* [National register of legal acts Rep. Belarus]. 2019;8/34631. Russian.
4. Kukuy DM, Andrianov NV. *Teorija i tehnologija litejnogo proizvodstva. Formovochnye materialy i smesi* [Theory and technology of foundry production. Molding materials and mixtures]. Minsk: BSTU; 2005. 390 p. Russian.
5. Dvorkin LI, Dvorkin OL. *Stroitelnye materialy iz othodov promyshlennosti: uchebno-spravochnoe posobie* [Building materials from industrial waste: educational and reference manual]. Rostov-na-Donu: Feniks; 2007. 368 p. Russian.
6. Zharikov VV, Yezerky VA, Kuznetsova NV, Sterkhov II. *Utilizacija othodov litejnogo proizvodstva pri izgotovlenii stroitel'nyh izdelij* [Utilization of foundry waste in the manufacture of building products]. *Vestnik MGSU*. 2011;3:189–194. Russian.
7. Shalevskaya IA, Gutko YuI. *Issledovanie vozmozhnosti utilizacii othodov formovochnyh smesej* [Study of the possibility of recycling waste molding mixtures]. *VISNIK Donbas'koï derzhavnoi mashinobudivnoi akademii* [Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy]. 2011;4(25):169–173. Russian.
8. Zalyhina VS, Predchenko MA. *Napraslenija pererabotki zemli formovochnoj goreloj* [Directions for processing burnt molding earth]. In: *Himicheskaja tehnologija i tehnika. Materialy 86-j nauchno-tehnicheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Chemical technology and technology. Materials of the 86th scientific and technical. conf. faculty, researchers and graduate students (with international participation)]. Minsk: BSTU; 2022. p. 226–228. Russian.

Статья поступила в редколлегию 06.07.2022.
Received by editorial board 06.07.2022.