



УДК 669.13

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-66-74>

Научная статья

Research article



Перспективы применения графитсодержащего шлама для изготовления композиционных покрытий

С. А. Худонов

Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

shudonogov@sfu-kras.ru

Аннотация. Современные технологии должны соответствовать критериям устойчивого развития, учитывающим экономические, экологические и социальные показатели. Поэтому в работе исследовали возможность вовлечения графитсодержащего шлама из аспирационной системы очистки газов при производстве скрытокристаллического графита в состав композиционных противопригарных покрытий для чугунного литья. Графитсодержащий шлам представлен углеродом, серой, натрием, алюминием и кремнием, фазовый состав – графитом, кальцитом, пиритом, кварцем, галитом и др. Шлам – дисперсный материал со средним размером частиц 3,64 мкм, общей поверхностью 36 506 см²/см³ и основной фракцией 1–8 мкм. Для частиц шлама характерны различные формы – от неправильных до изометрических. Размеры крупных частиц изометрической формы могут достигать 1 мм и более. На поверхности крупных частиц присутствуют более мелкие дисперсные частицы. Параметры структуры шлама соответствуют параметрам гексагональной формы графита. Анализ состава и свойств графитсодержащего шлама позволяет рекомендовать его применение в составах композиционных противопригарных покрытий. Однако из-за наличия в составе шлама крупных агрегатов графита и примесей игольчатого характера его перед использованием необходимо просеивать. Полная замена природного графита на шлам позволяет повысить плотность покрытия с 1220 до 1750 кг/м³, вязкость – с 34 до 105 с и прочность к истиранию – с 175 до 245 г/мм. Из-за высокой дисперсности покрытие на основе шлама практически полностью проникает в поры формы из песчано-смоляной смеси, не образуя при этом покровного слоя. Это не обеспечивает стабильного снижения пригара на поверхности отливок. Поэтому полная замена графита на графитсодержащий шлам в составах композиционных покрытий не рекомендуется.

Ключевые слова: самовысыхающее покрытие, графитсодержащий шлам, чугун, пригар, плотность, вязкость, толщина покровного слоя, глубина проникающего слоя, прочность к истиранию

Для цитирования: Худонов С.А. Перспективы применения графитсодержащего шлама для изготовления композиционных покрытий. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2024;18(5):66–74.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-66-74>

Prospects for the use of graphite-containing sludge for the production of composite coatings

S. A. Khudonogov

Siberian Federal University
79 Svobodny Prospekt, Krasnoyarsk 660041, Russia

shudonogov@sfu-kras.ru

Abstract. Modern technologies must meet the criteria of sustainable development, taking into account economic, environmental, and social indicators. In this study, the potential use of graphite-containing sludge from the gas purification aspiration system during cryptocrystalline graphite production was investigated for its inclusion in composite anti-burn coatings for cast iron casting. The graphite-containing sludge consists of carbon, sulfur, sodium, aluminum, and silicon, with a phase composition that includes graphite, calcite, pyrite, quartz, halite, and others. The sludge is a dispersed material with an average particle size of 3.64 μm, a total surface area of 36,506 cm²/cm³, and

a main fraction size of 1–8 μm . Sludge particles exhibit various shapes, ranging from irregular to isometric. Larger isometric particles can reach sizes of 1 mm or more. On the surfaces of larger particles, smaller dispersed particles are present. The structural parameters of the sludge correspond to those of hexagonal graphite. The analysis of the composition and properties of graphite-containing sludge suggests its suitability for use in composite anti-burn coating formulations. However, due to the presence of large graphite aggregates and acicular impurities in the sludge, sieving is required before use. Complete replacement of natural graphite with sludge increases the coating density from 1220 to 1750 kg/m^3 , viscosity from 34 to 105 s, and abrasion resistance from 175 to 245 g/mm. Due to its high dispersity, the sludge-based coating nearly completely penetrates the pores of the sand-resin mixture mold without forming a cover layer. This does not ensure consistent reduction of burn-on defects on casting surfaces. Therefore, the full substitution of graphite with graphite-containing sludge in composite coating formulations is not recommended.

Keywords: self-drying coating, graphite-containing sludge, cast iron, burn-on, density, viscosity, thickness of the coating layer, depth of the penetrating layer, abrasion resistance

For citation: Khudonogov S.A. Prospects for the use of graphite-containing sludge for the production of composite coatings. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(5):66–74. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-66-74>

Введение

В последнее десятилетие изменяются критерии качества продукции, так как современные технологии должны соответствовать критериям устойчивого развития, которые учитывают экономические, экологические и социальные показатели [1–4]. Поэтому все большее внимание уделяется возможности вовлечения порошковых отходов производств в различные области промышленности [5–13].

Опыт применения углеродсодержащих шлаков различных производств в составах различных изделий описан в работах [14–16]. Преимущества использования углеродсодержащих отходов позволяют не только повышать качество изделий на их основе, но и уменьшать объемы шламовых полей вокруг предприятий, т.е. способствуют сохранению окружающей среды. Например, переработка графитсодержащей пыли металлургических производств дает возможность получить высококачественное сырье широкого спектра назначения, а также ведет к извлечению дополнительной прибыли за счет снижения себестоимости продукции. С другой стороны, переменный состав отходов, определяющий характер их термической деструкции и недостаточный уровень проработанности технологий, приводит к тому, что большая часть отходов в настоящее время отправляется на полигоны.

На территории Красноярского края находится предприятие по переработке графита Курейского месторождения, основной продукцией которого являются скрытокристаллический графит марки ГЛС, науглероживатель марки НСГК и сорбент марки СГН-30 [17]. После переработки графита остается шлам, который складывается на территории предприятия с последующей его утилизацией и частичным использованием в рециклинге.

Цель работы заключалась в исследовании состава и свойств графитсодержащего шлама и разработке на его основе графитсодержащих покрытий для литейных форм.

Методика исследований

Для исследований был выбран графитсодержащий шлам из аспирационной системы очистки газов при производстве скрытокристаллического графита (рис. 1).

Элементный и фазовый составы шлама оценивали при помощи рентгеновского дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu, Япония) [18]. Также элементный состав частиц шлама определяли методом энергодисперсионного микроанализа с использованием энергодисперсионного спектрометра фирмы «Oxford Instruments» (Великобритания), смонтированного на колонне сканирующего электронного микроскопа JSM-7001F (JEOL, Япония) [19]. Спектры характе-

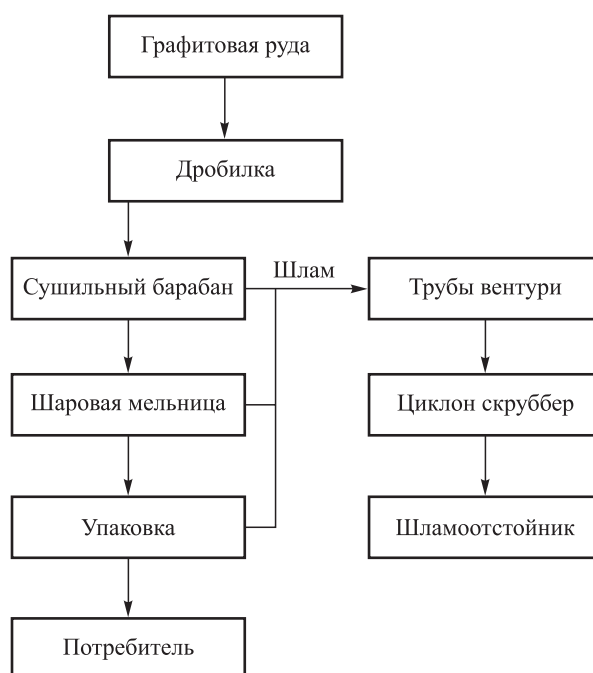


Рис. 1. Схема производства скрытокристаллического графита на предприятии «АО Красноярскграфит»

Fig. 1. Schematic of cryptocrystalline graphite production at JSC “Krasnoyarskgraphit”

ристического рентгеновского излучения химических элементов, входящих в состав порошков, определяли точно.

Размер и общую поверхность частиц шлама, их распределение по фракциям определяли методом светового рассеяния на лазерном анализаторе размеров частиц «Fritsch Analysette 22 MicroTec PLUS» (Германия).

Графитсодержащий шлам опробовали в составе самовысыхающего композиционного покрытия [20; 21].

Свойства покрытий определяли по ГОСТ 17022–78, толщину покровного и глубину проникающего слоев – при помощи микроскопа «Observer.D1m» (Carl Zeiss, Германия), величину пригара – по ступенчатой пробе, описанной в работе [22].

Результаты и их обсуждение

Элементный состав шлама (мас. %), который оценивали при помощи рентгеновского дифрактометра XRD-7000, представлен ниже:

О	26,00	S	1,95
С	45,85	Si	13,10
Н	0,24	Mg	4,51
Na	0,61	Ca	5,10
Cl	0,94	Fe	1,70

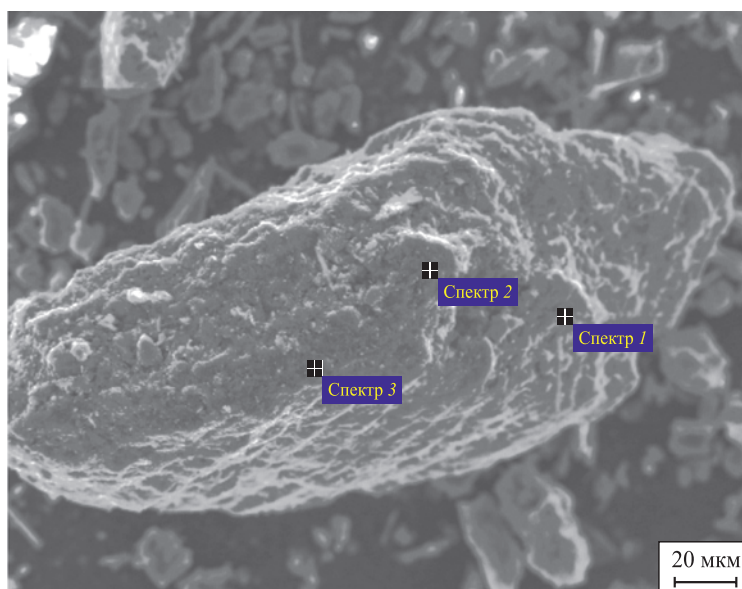
Элементный состав частиц шлама определяли с использованием электронного микроскопа JSM-7001F – результаты приведены на рис. 2.

Полученные данные показывают, что элементный состав шлама представлен в основном углеродом, серой, натрием, алюминием и кремнием.

Фазовый состав шлама (табл. 1) включает графит (до 47 %), кальцит (до 13 %), пирит (до 4 %), кварц (до 21 %), галит (до 2 %), на другие примеси приходится до 17 %.

Пониженное содержание пирита, по сравнению с природным графитом, будет способствовать снижению образования пригара на поверхности отливок, что подробно описано в работе [23]. Кальцит, галит и кварц – материалы, наличие которых повышает огнеупорность покрытия (так как они имеют высокую температуру плавления) и предотвращает процесс взаимодействия расплава и формовочной смеси. Глинистые минералы (каолинит, монтмориллонит и др.), присутствующие в шламе в числе прочих фаз, будут выступать в качестве связующих материалов, обеспечивающих покрытиям более высокую прочность.

Шлам представляет собой дисперсный материал со средним размером частиц 3,64 мкм и общей поверхностью 36 506 см²/см³. Исследование распределения частиц по фракциям показало, что большая часть частиц находится в интервале 1–8 мкм (рис. 3).



Спектр	С	О	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe
1	80,82	8,77	2,27	0,19	0,65	0,84	4,41	0,63	0,96	0,46
2	75,27	15,45	1,21	0,57	1,09	1,72	2,10	0,36	0,56	1,22
3	85,47	6,70	0,72	–	1,92	2,30	1,32	0,25	1,32	–

Рис. 2. Элементный состав (мас. %) частиц шлама

Fig. 2. Elemental composition (wt. %) of sludge particles

Таблица 1. Фазовый состав графита ГЛС-2 и графитсодержащего шлама
Table 1. Phase composition of GLS-2 graphite and graphite-containing sludge

Фаза	Содержание фазы, мас. %	
	Графит ГЛС-2	Графитсодержащий шлам
Графит	67,23	43,0–46,56
Кварц	9,99	20,12–21,05
Кальцит	10,60	11,70–12,70
Пирит	4,72	3,65–3,79
Галит	4,37	1,56–1,57
Прочие включения (каолинит, монтмориллонит и др.)	3,09	17,10–17,20

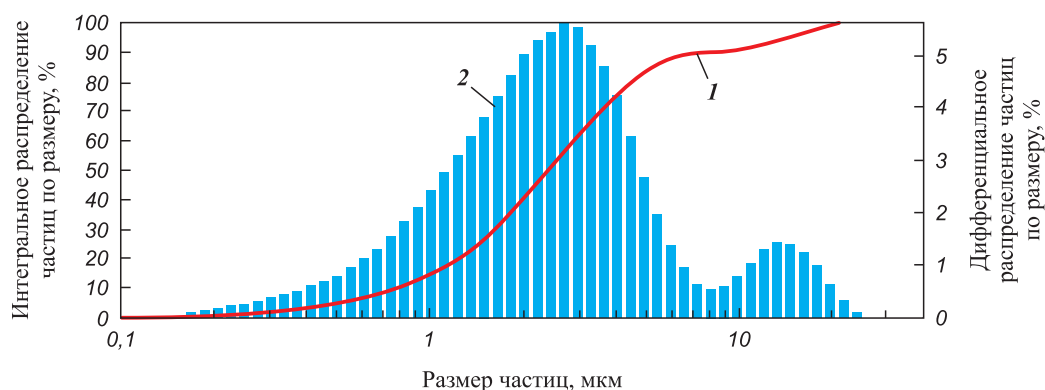


Рис. 3. Фракционный состав шлама

1 – интегральное распределение частиц; 2 – дифференциальное

Fig. 3. Fractional composition of the sludge

1 – integral particle distribution; 2 – differential particle distribution

При анализе морфологии частиц (рис. 4) установлено, что для шлама характерны частицы разнообразных размеров и форм – от неправильной до изометрической.

Большая часть материала равномерная, но присутствуют крупные агрегаты графита и цилиндри-

ческие включения. На поверхности крупных частиц наблюдаются более мелкие дисперсные частицы. Крупные включения могут достигать размера ≥ 1 мм. Цилиндрические включения – примесные фазы.

Анализ структуры шлама показал, что его параметры соответствуют параметрам гексагональной

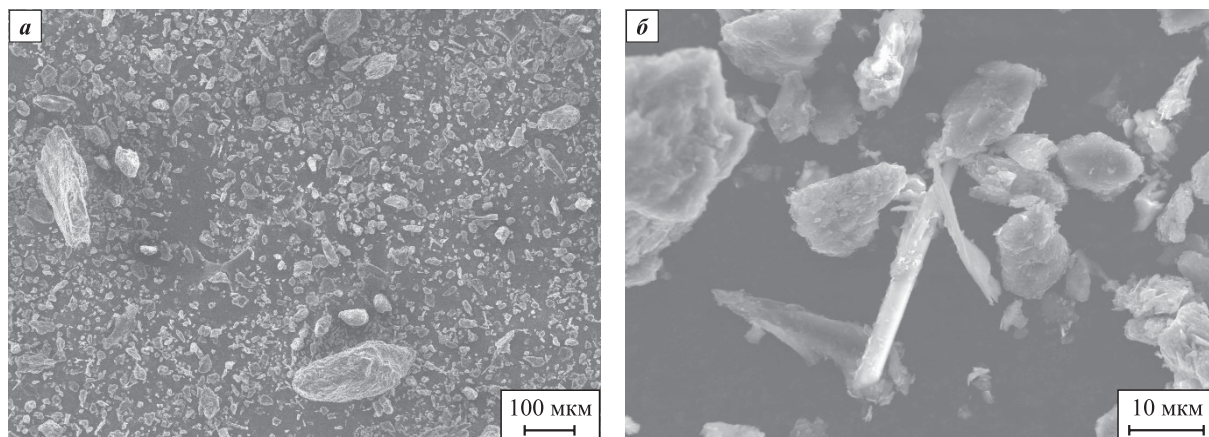


Рис. 4. Съемки шлама на микроскопе JSM-7001F

Fig. 4. Sludge images from the JSM-7001F microscope

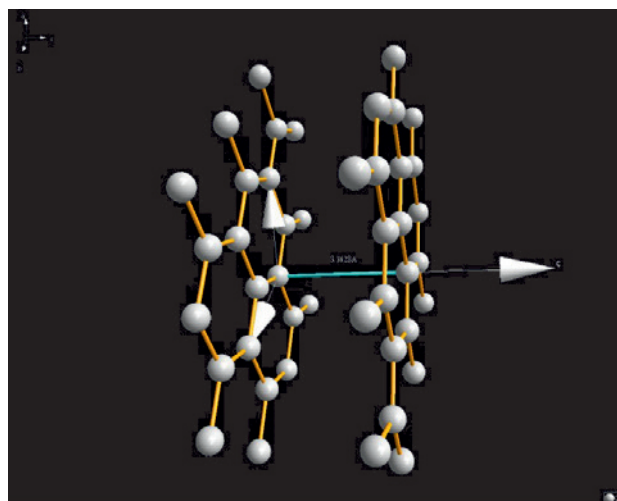


Рис. 5. Смоделированная структура графита в программе TOPAS 3

Fig. 5. Simulated graphite structure in the TOPAS 3 program

формы графита. Это позволяет рекомендовать использование шлама в составе композиционных покрытий при условии удаления из него крупных агрегатов графита и цилиндрических примесей путем просеивания. На рис. 5 представлена 3D-модель структуры графита, смоделированная в программе TOPAS 3.

В работе были проведены исследования возможности применения графитсодержащего шлама в составе композиционного противопопригарного покрытия для чугунного литья.

Для изучения толщины покровного и глубины проникающего слоев покрытия использовали холодно-твердеющую смесь состава, мас. %: 97,2 – кварцевый песок $2K_2O_3$; 2,4 – смола альфабонд; 0,4 – отвердитель Т-01. Живучесть данной смеси составляет 3,2 мин, прочность на разрыв (через 1 ч) – 0,19 МПа.

Свойства композиционных противопопригарных покрытий на основе графитсодержащего шлама приведены на рис. 6.

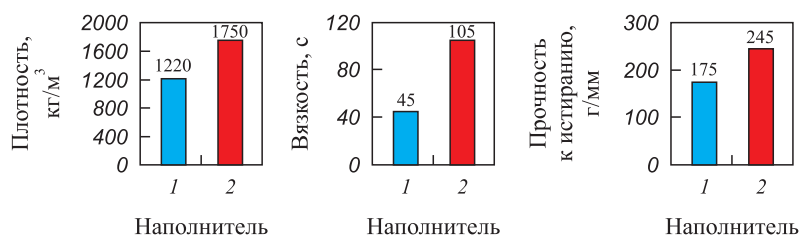


Рис. 6. Свойства противопопригарных покрытий на основе графита ГЛС-2 (1) и графитсодержащего шлама (2)

Fig. 6. Properties of anti-burn coatings based on GLS-2 graphite (1) and graphite-containing sludge (2)

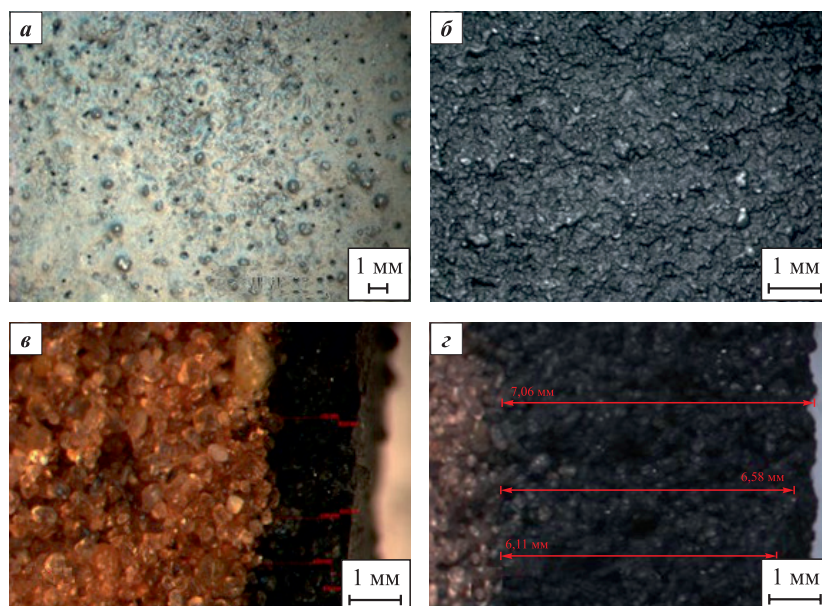


Рис. 7. Покровный (а, б) и проникающий (в, г) слои покрытия
а, в – природный графит ГЛС-2; б, г – графитсодержащий шлам

Fig. 7. Covering (a, б) and penetrating (в, г) layers of the coating
а, в – natural GLS-2graphite; б, г – graphite-containing sludge

Композиционное покрытие на основе графитсодержащего шлама обладает большой плотностью и требует дополнительного разбавления ПВБ-лаком, что может привести к уменьшению содержания шлама.

Толщина покровного и глубина проникающего слоев покрытия показаны на рис. 7, 8.

Композиционное покрытие на основе графитсодержащего шлама не образует покровного слоя, при этом глубина проникающего слоя может достигать 6,0–6,5 мм. Это связано с тем, что частицы шлама по размеру значительно меньше (~3,6 мкм), чем поры формы (~230 мкм, рис. 9).

При изучении величины пригара на поверхности отливок использовали ступенчатую пробу. Для исследований была выбрана холоднотвердеющая смесь.

В ходе испытаний при температуре 1400 °С заливали серый чугун марки СЧ20, состав которого приведен ниже, мас. %:

C	2,90–2,97	Ni	0,084–0,086
Mn	0,92–0,93	Cu	0,12–0,13
P	0,019–0,021	V	0,049–0,052
S	0,042–0,044	Ti	0,021–0,024
Cr	0,10–0,11	Sn	<0,01
Si	2,41–2,60		

Влияние толщины стенки отливки на величину пригара показано в табл. 2, 3.

При замене в покрытии графита на графитсодержащий шлам среднее значение величины пригара на поверхности отливок снижается, что обусловлено изменениями фазового состава и меньшим размером частиц шлама, которые быстрее окисляются в процессе прогрева поверхностных слоев формы с образованием восстановительной атмосферы.

Однако разброс значений пригара в случае графитсодержащего шлама значительно выше. Это связано с тем, что в его составе содержится больше серы в виде пирита, способствующего увеличению толщины пригара.

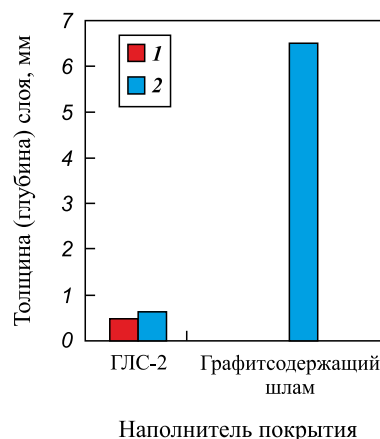


Рис. 8. Толщина покровного (1) и глубина проникающего (2) слоев противопригарного покрытия

Fig. 8. Thickness of the covering (1) and depth of the penetrating (2) layers of anti-burn coating

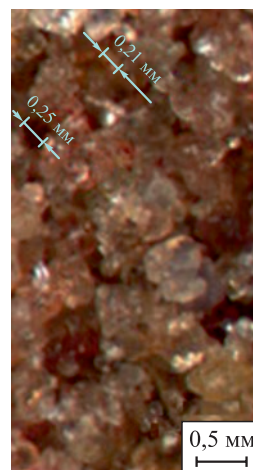


Рис. 9. Поры формы

Fig. 9. Pores of the mold

Таким образом, полученные результаты показали, что полностью заменить природный графит в составе композиционного покрытия на графитсодержащий

Таблица 2. Значение толщины пригара на поверхности отливок, полученных с применением покрытий на основе графита ГЛС-2

Table 2. Burn-on thickness on the surface of castings obtained using coatings based on GLS-2 graphite

Толщина стенки отливки, мм	Сторона отливки	Толщина пригара, мкм			
		минимальная	максимальная	средняя	среднеквадратическое отклонение
25	Боковая	40,77	66,31	53,54	9,09
	Нижняя	39,88	171,71	105,80	42,55
50	Боковая	60,77	170,81	115,79	49,98
	Нижняя	64,71	265,97	165,34	70,04
75	Боковая	78,77	223,83	151,30	55,44
	Нижняя	82,56	276,84	179,70	82,07

Таблица 3. Значение толщины пригара на поверхности отливок, полученных с применением покрытий на основе графитсодержащего шлама

Table 3. Burn-on thickness on the surface of castings obtained using coatings based on graphite-containing sludge

Толщина стенки отливки, мм	Сторона отливки	Толщина пригара, мкм			
		минимальная	максимальная	средняя	среднеквадратическое отклонение
25	Боковая	1,20	69,10	15,98	26,28
	Нижняя	10,37	180,03	66,80	51,85
50	Боковая	4,02	190,72	49,83	66,21
	Нижняя	13,02	270,01	64,97	91,03
75	Боковая	15,46	353,83	95,36	118,63
	Нижняя	32,58	420,25	128,94	132,17

шлам нельзя. Поэтому требуются дополнительные исследования по замене части природного графита на графитсодержащий шлам.

Заключение

В работе доказана перспективность использования графитсодержащего шлама из аспирационной системы очистки газов при производстве скрытокристаллического графита в составе композиционных противопопригарных покрытий. Результаты исследований элементного состава шлама показали, что в него входят углерод, сера, натрий, алюминий и кремний. Фазовый состав шлама представлен графитом (до 47 %), кальцитом (до 13 %), пиритом (до 4 %), кварцем (до 21 %), галитом (до 2 %), на другие примеси приходится до 17 %. Шлам является дисперсным материалом со средним размером частиц 3,64 мкм (общая поверхность – 36 506 см²/см³); основная часть частиц находится в интервале 1–8 мкм. В шламе наблюдаются частицы различных конфигураций: их основная масса имеет размер от 1 до 8 мкм, а формы изменяются от неправильных до изометрических. Размеры крупных частиц изометрической формы могут достигать 1 мм и более. На поверхности крупных частиц присутствуют более мелкие дисперсные частицы. В составе шлама есть примесные фазы игольчатой формы. Исследование параметров шлама позволяет сделать вывод, что его можно использовать в составе композиционных покрытий, предварительно просеивая для удаления крупных агрегатов графита и цилиндрических примесей. В композиционном противопопригарном покрытии с заменой в его составе природного графита на шлам возможно повысить плотность с 1220 до 1750 кг/м³, вязкость – с 34 до 105 с и приведенную прочность – с 175 до 245 г/мм. Однако ввиду высокой дисперсности шлама покрытие полностью проникает в поры

формы из песчано-смоляной смеси, не образуя при этом слоя на ее поверхности. При полной замене графита на графитсодержащий шлам в составе покрытия среднее значение величины пригара на поверхности отливок уменьшается в зависимости от толщины стенки с 53,54–151,30 до 15,98–95,36 мкм (на боковой поверхности отливок) и с 105,80–179,70 до 66,80–128,94 мкм (на нижней поверхности отливок). При этом разброс значений пригара значительно выше, что связано с наличием в составе графитсодержащего шлама большего количества серы, способствующей увеличению толщины пригара. Таким образом, дальнейшие исследования должны быть направлены на частичную замену графита на графитсодержащий шлам, что позволит сократить стоимость самих покрытий и повысить качество чугунных отливок.

Список литературы / References

1. Яковлева Е.А. Возможности и барьеры циклической экономики в государственном регулировании. В сб.: *Механизмы развития социально-экономических систем региона*: Сб. статей 12 междунар. науч.-практ. конференции (18 апреля 2019 г.). Воронеж: Волми, 2019. С. 57–61.
2. Романова О.А., Сиротин Д.В. Методы определения эколого-экономической эффективности переработки техногенных образований Урала. *Экономика региона*. 2021;17(1):59–71.
<https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-1-5>
Romanova O.A., Sirotin D.V. Environmental and economic efficiency of recycling industrial waste in the Urals. *Economy of Regions*. 2021;17(1):59–71. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-1-5>
3. Гильманшина Т.Р., Ковалева А.А., Худогов С.А., Крицкий Д.Ю. Использование графитсодержащего шлама в составе противопопригарных покрытий. *Черные металлы*. 2022;(4):23–26.
<https://doi.org/10.17580/chm.2022.04.04>

- Gilmanshina T.R., Kovaleva A.A., Khudonogov S.A., Kritsky D.Yu. Use of graphite-containing sludge in the composition of non-stick coatings. *Chernye Metally*. 2022;(4):23–26. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/chm.2022.04.04>
4. Федеральный закон от 21.07.2014 г. № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изм. и доп. от 26 июля 2019 г.).
5. Власова В.В., Фомина Е.Ю. Технология переработки золошлаковых отходов ТЭС с получением железосодержащего сырья для черной металлургии. *Черные металлы*. 2019;(7):67–72.
Vlasova V.V., Fomina E.Yu. The technology of the processing CHP-plant ash and slag wastes with obtaining ferrous raw materials for iron and steel industry. *Chernye Metally*. 2019;(7):67–72. (In Russ.).
6. Lee W.-H., Wu Y.-F., Ding Y.-C., Cheng T.-W. Fabrication of ceramic moulds using recycled shell powder and sand with geopolymer technology in investment casting. *Applied Sciences*. 2020;10(13):4577.
<https://doi.org/10.3390/app10134577>
7. Moiz Khan M., Jadhav G.N., Mahajani S.M., Singh M. Comparative study of waste foundry sand reclamation techniques. In: *Proceedings of 73rd World Foundry Congress WFC 2018* (Poland, Krakow, 23–27 September 2018). Poland, Krakow, 2018. P. 119–120.
8. Drożyński D., Bobrowski A., Holtzer M. Influence of the reclaim addition on properties of moulding sands with the geopol binder. *Archives of Foundry Engineering*. 2015;15(1):138–142.
<https://doi.org/10.1515/afe-2015-0025>
9. Kvashevaya E., Ushakova E., Ushakov A. Carbon-containing waste of coal enterprises in magnetic sorbents technology. *E3S Web of Conferences*. 2017;21:01003.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172101003>
10. Kuz'min M.P., Larionov L.M., Kondratiev V.V., Kuz'mina M.Yu., Grigoriev V.G., Kuz'mina A.S. Use of the burnt rock of coal deposits slag heaps in the concrete products manufacturing. *Construction and Building Materials*. 2018;179:117–124.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.222>
11. Taha Y., Benzaazoua M., Hakkou R., Mansori M. Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production. *Minerals Engineering*. 2017;107:123–138.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.001>
12. Agrawal A., Sahu K.K., Pandey B.D. Solid waste management in non-ferrous industries in India. *Resources, Conservation and Recycling*. 2004;42(2):99–120.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2003.10.004>
13. Yildiz T.D., Tombal T.D. Challenges and recovery opportunities in waste management during the mining and enrichment processes of ores containing uranium and thorium – A review. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*. 2024;40(1):25–62.
<https://doi.org/10.24425/gsm.2024.149305>
14. Багрянцев В.И., Казимиров С.А., Куценко А.И., Подольский А.П., Рыбушкин А.А., Темлянец М.В. Практика и перспективы использования твердых углеродсодержащих отходов в качестве топлива для теплоэнергетических агрегатов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2013;3(5):33–37.
Bagryantsev V.I., Kazimirov S.A., Kutsenko A.I., Podolskiy A.P., Rybushkin A.A., Temlyancev M.V. The practice and prospects of using solid carbon-containing waste as fuel for thermal power units. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2013;3(5):33–37. (In Russ.).
15. Фадеева Н.В., Орехова Н.Н., Горлова О.Е. Опыт переработки графитсодержащей пыли металлургического производства. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019;75(5):632–640.
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-5-632-639>
Fadeeva N.V., Orekhova N.N., Gorlova O.E. Experience of graphite-containing dust of metallurgical plants processing. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific*. 2019;75(5):632–640. (In Russ.).
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-5-632-639>
16. Мулявко В.И., Олейник Т.А., Ляшенко В.И., Олейник М.О. Повышение эффективности утилизации графитсодержащей пыли металлургического производства. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2015;(11):67–76.
Mulyavko V.I., Oleinik T.A., Lyashenko V.I., Oleinik M.O. The improvement in the efficiency of the utilization of the graphite containing dust formed in the metallurgical production. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific*. 2015;(11):67–76. (In Russ.).
17. АО «Красноярскграфит». URL: <https://www.graphite-ore.com/ru> (дата обращения: 08.04.2024).
18. Shimadzu. Excellence in Science. URL: <https://www.shimadzu.ru> (accessed: 08.04.2024).
19. Оборудование Jeol. URL: <https://ru.jeol.com> (дата обращения: 08.04.2024).
20. Amelchenko V.N., Illarionov I.E., Gilmanshina T.R., Borisyuk V.A. Graphite as a prospective material for metallurgical application. *CIS Iron and Steel Review*. 2018;16:29–32.
<https://doi.org/10.17580/cisr.2018.02.06>
21. Illarionov I.E., Gilmanshina T.R., Kovaleva A.A., Bratukhina N.A. Understanding the effect of structural defects in graphite on the properties of foundry coatings. *CIS Iron and Steel Review*. 2018;16:63–66.
<https://doi.org/10.17580/cisr.2018.02.13>
22. Илларионов И.Е., Кафтаников А.С., Нуралиев Ф.А., Гильманшина Т.Р. Оценка величины пригара на поверхности чугунных отливок. *Черные металлы*. 2018;(8):23–28.
Illarionov I.E., Kaftannikov A.S., Nuraliev F.A., Gilmanshina T.R. Evaluation of burn value on surface of iron castings. *Chernye Metally*. 2018;(8):23–28.
23. Gilmanshina T.R., Dubova I.V., Vasyunina N.V., Kovaleva A.A. Analysis of physical-chemical processes occurring on the boundary between the melt and non-stick coating. *CIS Iron and Steel Review*. 2021;21:38–42.
<https://doi.org/10.17580/cisr.2021.01.06>

Сведения об авторе



Information about the Author

Сергей Александрович Худонов – ст. преподаватель кафедры прикладной механики Политехнического института Сибирского федерального университета

 **ORCID:** 0009-0007-1740-2021

 **E-mail:** shudonogov@sfu-kras.ru

Sergei A. Khudonogov – Senior Lecturer, Department of applied mechanics, Polytechnic Institute, Siberian Federal University

 **ORCID:** 0009-0007-1740-2021

 **E-mail:** shudonogov@sfu-kras.ru

Статья поступила 08.04.2024 г.

Доработана 04.07.2024 г.

Принята к публикации 09.07.2024 г.

Received 08.04.2024

Revised 04.07.2024

Accepted 09.07.2024