

Д. т. н. **А. З. Исагулов**², д. т. н. **И. Д. Кашеев**¹, **Е. А. Сидорина**² (✉),
К. т. н. **К. Г. Земляной**¹

¹ ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет»,
Екатеринбург, Россия

² Карагандинский технический университет,
г. Караганда, Республика Казахстан

УДК 666.762.1:669.183.576

ПОВЕДЕНИЕ ШАМОТНОЙ ФУТЕРОВКИ КОКСОГАЗОВОЙ ВАГРАНКИ ПРИ ПЛАВКЕ ЧУГУНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОМА АНОДОВ ЭЛЕКТРОЛИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА. Часть 1

Исследованы образцы шамотного огнеупора после службы в шахте и горне коксогазовой вагранки при плавке чугуна со сфероидальным графитом с использованием в качестве восстановителя углеродистых отходов электролизного производства алюминия. Установлено, что в процессе службы изделия приобретают четко выраженный зональный характер. Изделия после службы в шахте имеют сложный характер уплотнения, связанный с глубиной проникновения летучих компонентов шихты. Огнеупоры после службы в горне коксогазовой вагранки содержат оплавленную корочку рабочей зоны, образовавшуюся на контакте с расплавом чугуна; рабочую зону, образовавшуюся вследствие пропитки расплавом чугуна и/или шлака; наименее измененную переходную и пропитанную (малоизмененную) зоны, структура которых мало отличается от структуры исходного огнеупора.

Ключевые слова: вагранка, чугун с шаровидным графитом (ЧШГ), шамот, углеродный лом электролизного производства, структура огнеупора.

Важными аспектами повышения конкурентоспособности металлургии и машиностроения являются увеличение стойкости тепловых агрегатов и вовлечение в производство нетрадиционных более дешевых энергоресурсов, хотя эти факторы зачастую противоречат друг другу. Один из примеров производства, на котором наиболее ярко проявляются противоречия между технологическими (срок кампании теплового агрегата) и экономическими (стоимость исходных материалов и энергоресурсов) факторами, — производство высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ). В последние годы установилось мнение, что высокопрочный ЧШГ, который можно подвергать пластической деформации, будет конкурентным не только со сталью, но и с легкими, менее технологичными и значительно более дорогими сплавами на основе алюминия, магния и титана [1–10].

Доля ЧШГ в общем объеме производства литых заготовок в развитых странах от 35 до 47 %. Основным плавильным агрегатом чугу-

нолитейного производства в настоящее время является коксовая или коксогазовая вагранка, с помощью которой выплавляется до 40 % всего жидкого чугуна. Ее отличают [11–13]: простота конструкции, возможность обеспечения относительно простыми способами заданной удельной производительности по жидкому металлу — до 100–150 т/(м²·сут), высокая степень использования тепла (до 60–70 %), относительная простота управления тепловым и газодинамическим режимами, низкий уровень эксплуатационных затрат, слабая зависимость технико-экономических показателей от вида исходного сырья, сниженный суммарный объем вредных выбросов.

Схема футеровки коксогазовой вагранки показана на рис. 1. В водоохлаждаемой зоне, за исключением горна, футеровка отсутствует, не охлаждаемая водой зона цилиндрической шахты вагранки имеет футеровку толщиной 180–350 мм. Техническая характеристика коксогазовой вагранки приведена ниже:

Номинальная производительность, т/ч.....	10
Объем шахты, загружаемой шихтой, м ³	9
Расход, м ³ /ч:	
природного газа (макс.).....	250–400
воздуха.....	10000
Количество газовых горелок.....	6
Производительность одной горелки (макс.), м ³ /ч....	150
Давление природного газа, кгс/см ²	0,4



Е. А. Сидорина
E-mail: elena.sidorina.78@mail.ru

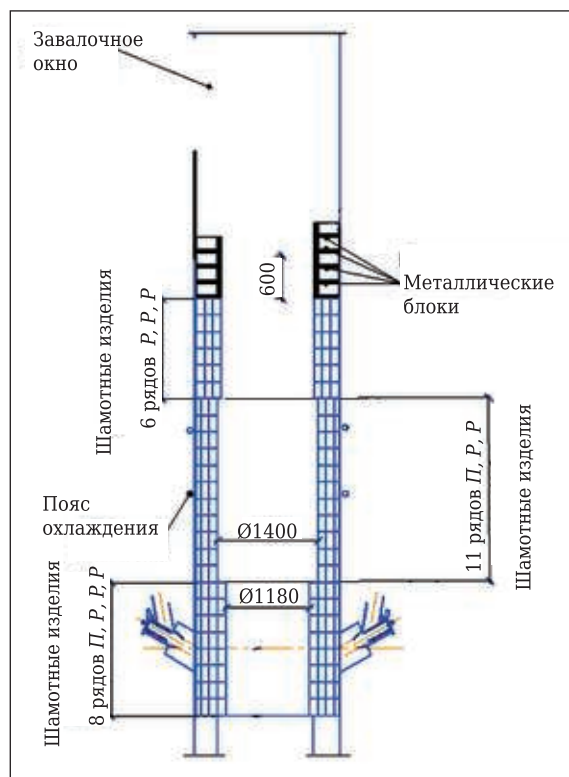


Рис. 1. Схема футеровки коксогововой вагранки: П — изделия прямые шамотные ваграночные № 3 марки ШБ; Р — клин ребровой ваграночный шамотный № 2 марки ШБ

Длительность кампании вагранки и, следовательно, экономика ее работы, а также качество выплавляемого металла определяются стойкостью футеровки. Футеровка вагранки подвергается одновременному воздействию высоких температур (до 1600 °С), химической коррозии и эрозии металлургическими шлаками, флюсами и печной атмосферой, а также истиранию и ударам загружаемой шихты. Поэтому футеровка вагранки должна обладать высокими огнеупорностью, химической и термической стойкостью, механической прочностью и плотностью при относительно низкой стоимости. С учетом такого набора требований, в условиях ваграночной плавки наибольшее распространение получила футеровка из шамотных изделий, являющихся наиболее дешевым и химически нейтральным материалом.

Плавка чугуна происходит за счет энергии сгорания газа и углеродсодержащего компонента шихты, который одновременно формирует условия для дренажа и сбора получаемых расплавов, обеспечивает равномерное газораспределение по сечению агрегата, создает восстановительную среду в шахте и участвует в образовании чугуна. Традиционно в качестве углеродсодержащего компонента выступают кокс (металлургический, доменный, нефтяной, синтетический), антрацит (термоантрацит, ли-

тейный, обычный) [11]. При этом в настоящее время на станции отгрузки стоимость кокса составляет 177–179 \$/т [14], а стоимость антрацита 33–37 \$/т [15]. Замена кокса более дешевым топливом позволит улучшить технико-экономические показатели работы вагранок.

Расширение использования вторичного сырья, в том числе углеродсодержащего, является важным фактором эффективности всего металлургического производства [16–20]. Ежегодно образуется до 1500 т отходов углеродистой футеровки и до 25 тыс. т огарков обожженных анодов [21] с минимальным содержанием углерода от 85 мас. %, загрязненных вредными веществами криолит-глиноземного расплава. Присутствие в отходах щелочных катионов (Na^+ , K^+) и фтора не позволяет складировать их на шламовых полях из-за негативного влияния на окружающую среду. Наиболее простой и эффективный способ утилизации таких отходов — использование их в качестве топлива взамен дорогого и дефицитного кокса в металлургической промышленности; фтористые и щелочные соли отходов обеспечат также разжижение металлургического шлака, с экономией при этом на флюоритовых модификаторах шлака [22–27].

Присутствие в составе плавильной шихты щелочных катионов и аниона фтора может существенно осложнить условия службы футеровки коксогововой чугунолитейной вагранки. Оценке разрушающих факторов, действующих на футеровку коксогововой вагранки при производстве ЧШГ с использованием в качестве топлива углеродсодержащих отходов алюминиевой промышленности, а также разработке огнеупоров для повышения стойкости футеровки вагранки посвящена настоящая работа.

Для получения жидкого чугуна на предприятии используется чугунный лом с повышенным (до 30 %) содержанием доменного шлака и других неметаллических включений, что снижает выход металла и повышает выход ваграночного шлака. Исходный металл поступает от Нижнетагильского металлургического комбината, который производит чугун с повышенным содержанием титана и ванадия. Эти компоненты в условиях ваграночной плавки способны образовывать карбиды, оксикарбиды, нитриды и оксинитриды, резко повышающие вязкость шлакового расплава.

Для офлюсования ваграночной шихты используют известняк удовлетворительного качества как по химическому, так и по гранулометрическому составу. Дозирование компонентов шихты осуществляется объемным методом. Для отопления чугунолитейной вагранки используют электродный лом электролизных ванн алюминиевой промышленности. Эти компоненты имеют нестабильный гранулометриче-

ский состав, который формируется в результате дробления. Расход твердого топлива около 200 кг/т чугуна. Усредненный химический состав электродного лома электролизных ванн, мас. %: С 62,0, NaF 12,0, Al_2O_3 3,0, Na_3AlF_6 13,0, Na_2CO_3 3,5, CaF_2 3,0, SiO_2 3,0. Значительное количество фтористых соединений, солей натрия и оксидов алюминия и кремния может приводить к формированию при относительно высоких температурах в шахте вагранки легкоплавких соединений из компонентов шихты и футеровки. Кроме того, соединения фтора являются очень сильными окислителями компонентов ваграночной шихты (углерод, железо, ферросплавы, оксиды некоторых металлов, входящих в состав футеровки). Таким образом, использование в качестве углеродсодержащего компонента отходов электролизного производства алюминия увеличивает расход твердого топлива на получение чугуна, выбрасывая избыток углерода в виде монооксида углерода в отходящие газы. На существующей вагранке это выражается в образовании потока газов с высоким содержанием СО и воспламенением его в надслоевом пространстве.

Присутствие соединений натрия способствует образованию легкоплавких соединений с компонентами футеровки. При этом их температура плавления резко снижается до 800–1000 °С и даже ниже. Происходит оплавление футеровки с увеличением выхода шлака. Это хорошо видно по количеству шлаковой фазы на желобе и его химическому составу. При этом в вагранке наблюдается увеличение толщины зоны оплавления футеровки от уровня высоких температур и футерной зоны на 1,2–1,5 м.

Присутствие фтористых соединений в углеродистом компоненте шихты сопровождается интенсификацией процессов окисления углерода и металла. Углерод превращается в монооксид углерода с увеличением удельного расхода топлива, а железо — в шлаковую компоненту. При этом содержание оксидов железа резко повышается. Если при нормальном ходе ваграночной плавки содержание оксидов железа составляет в худшем случае 0,5–1,0 %, то в реальных условиях их содержание повышается до 17–20 %. Кампания футеровки вагранки составляет 5–7 сут, из которых на 2–3 сут включается водяное охлаждение, и вагранка работает фактически в гарнисажном режиме.

В настоящей работе исследовали шамотный огнеупор марки ШБ производства ООО «Огнеупор» (г. Магнитогорск) из зон шахты (над фурмами) и горна до и после службы в течение одной кампании в коксогоазовой вагранке при производстве ЧШГ.

Химический состав материалов определяли на рентгенофлуоресцентном энергодисперсионном спектрометре ARL QUANT'X (Thermo Scientific, США) с применением программы UniQUANT

(Rh K_α -излучение, мощность трубки 50 Вт, диапазон напряжения 4–50 кВ с шагом 1 кВ, диапазон тока 0–1,98 мА с шагом 0,02 мА, детектор Si(Li), энергетическое разрешение 150 эВ).

Изменения фазового состава и массы при нагревании и температуру плавления определяли термобариметрическим методом с помощью дифференциального сканирующего калориметра STA 449 F3 Jupiter (Netzsch-Gerätebau GmbH) с использованием программного пакета Proteus Analysis 5,2 по DIN 51004:1994. Погрешность метода при определении температуры плавления ± 3 %.

Фазовый состав определяли методом РФА на дифрактометре с вращающимся анодом MiniFlex 600 (Cu K_α -излучение, $\lambda = 1,541862$ Å, интервал съемки 3,00–60,00 град, шаг сканирования 0,02 град) фирмы Rigaku – Carl Zeiss (Япония) с программами управления и сбора данных MiniFlex Guidance и пакетом обработки данных PDXL Basic. Дифракционные максимумы идентифицировали с использованием банка данных JSPDS. Полуколичественную оценку содержания фаз проводили с использованием корундового числа RIR (Reference Intensity Ratio) по методу Чанга (Chung) [28].

Кажущуюся плотность, открытую пористость и водопоглощение (по керосину) определяли согласно ГОСТ 2409–2014 «Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения».

Петрографические исследования и исследование химического состава отдельных элементов структуры проводили на растровом электронном микроскопе JSM 6390LA (JEOL, Япония) с вольфрамовым катодом и системой регистрации характеристического рентгеновского излучения. Условия съемки: 20 кВ, SEI, BES, рабочее состояние 11 мм.

Петрографические исследования огнеупорных изделий проведены в отраженном свете на микроскопах МИМ-8 и МИН-8. Из каждой зоны изделий (рис. 2) были вырезаны образцы, поверхность которых была отполирована с помощью алмазного микропорошка на этиловом спирте для устранения окисления их бескислородной части.

Изделие после службы в шахте (рис. 3, а) науглерожено на всю глубину, на его рабочей поверхности имеется оплавленная кромка. Геометрия изделия на нерабочих гранях практически сохранилась, рабочая кромка изношена равномерно. Расплав присутствует также на боковых поверхностях изделия, что указывает на проникновение компонентов расплава или газовой фазы в швы между изделиями. Механического разрушения образца не наблюдается.

Изделие после службы в горне (рис. 3, б) имеет неправильную геометрию, особенно с рабочей поверхности, на которой присутствует

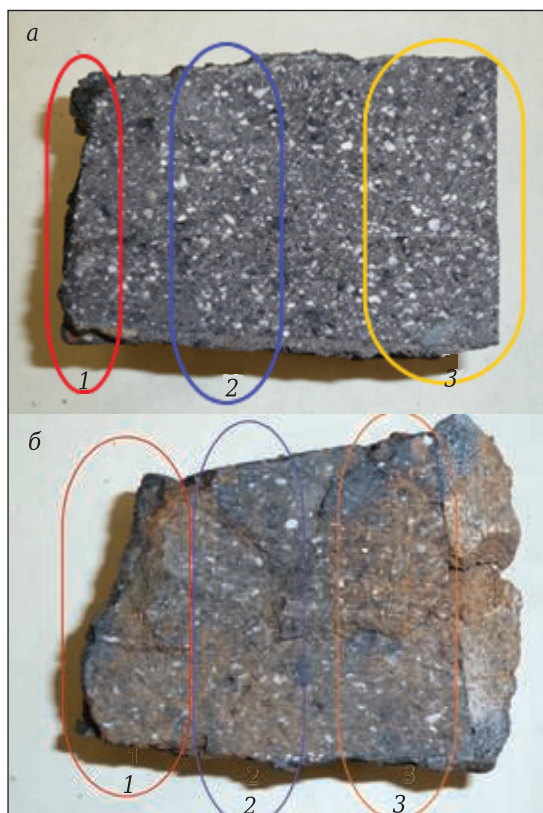


Рис. 2. Зоны, образовавшиеся в изделиях после службы: а — в шахте вагранки; б — в горне вагранки; 1 — рабочая зона; 2 — пропитанная (измененная зона); 3 — наименее измененная зона

оплавленная корочка толщиной до 5 мм. Изделие рассечено внутренними трещинами, образовавшимися вследствие механического воздействия. Внутри изделия и по швам с соседними изделиями наблюдаются выплавки и уплотненные зоны. Физико-химические свойства шамотных образцов после службы по зонам изделия приведены в таблице.

Из таблицы видно, что:

- исходные изделия по физико-химическим свойствам соответствуют требованиям сертификата и ГОСТ 3272–2002;
- структура изделий после службы в вагранке приобретает зональный характер. При этом

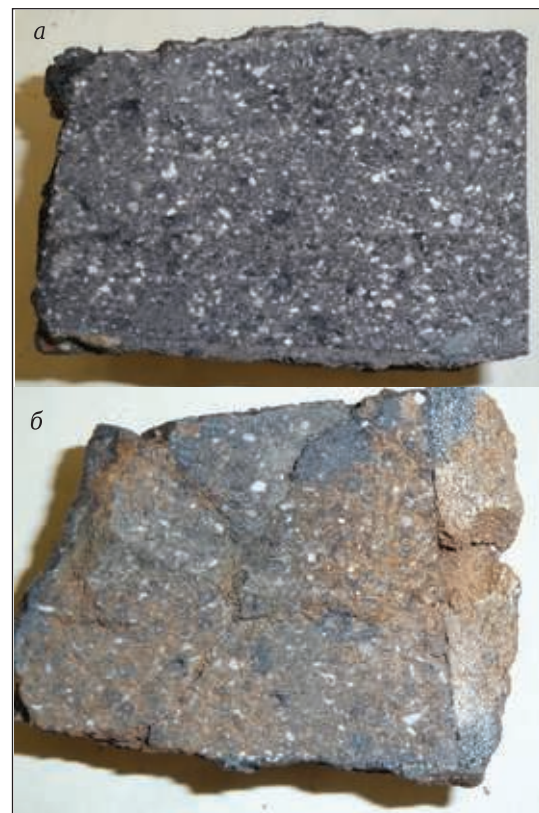


Рис. 3. Шамотный огнеупор (в разрезе) после службы в шахте (а) и горне (б) вагранки

рабочая зона уплотняется в большей степени, переходная в несколько меньшей, а наименее измененная зона имеет более плотную структуру, чем переходная, по толщине футеровки (градиенту температур) и по концентрации летучих составляющих в «холодной» части футеровки вследствие снижения температуры из-за отбора тепла водяным наружным охлаждением;

- изделия после службы в шахте вагранки имеют более плотное строение, чем после службы в горне, из-за присутствия в составе плавильной шихты летучих компонентов, являющихся более сильными активаторами спекания для алюмо-силикатных огнеупоров, чем оксиды железа и

Физико-химические свойства шамотных образцов после службы

Образец	Открытая пористость, %	Водопоглощение, %	Кажущаяся плотность, г/см ³
До службы (образцы № 1)	22,0	10,2	2,23
После службы в шахте (образцы № 3):			
корочка рабочей зоны	11,0	4,6	2,43
рабочая зона	13,5	6,0	2,25
переходная зона	16,0	8,1	2,23
пропитанная зона	11,0	7,0	2,29
После службы в горне (образцы № 2):			
корочка рабочей зоны	14,5	6,2	2,35
рабочая зона	16,5	7,6	2,34
переходная зона	19,8	10,0	2,25
пропитанная зона	17,0	8,6	2,26

металлическое железо, которые являются основными компонентами рабочего пространства горна. Следует отметить также более равномерную структуру изделий, расположенную за оплавленной корочкой рабочей зоны. Это указывает на равномерность воздействия спекающих факторов на огнеупор по всей толщине футеровки;

– изделия после службы в горне вагранки имеют четко выраженную оплавленную корочку

ку рабочей зоны, образовавшуюся на контакте с расплавом чугуна; рабочую зону, образовавшуюся вследствие проникновения расплава чугуна и/или шлака в огнеупор; наименее измененную переходную и пропитанную зоны, структура которых мало отличается от структуры исходного огнеупора, хотя спекающий фактор в шахте печи влияет на плотность огнеупора и в футеровке горна.

Библиографический список

1. Григорьев, В. М. Чугун остается перспективным сплавом для тормозных колодок / В. М. Григорьев, Я. В. Жатченко // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. — 2016. — № 1 (6). — С. 12–15.
2. Kolokoltsev, V. M. Structure feature and properties of high-alloy white irons / V. M. Kolokoltsev, E. V. Petrochenko // Vestnik of Novosibirsk State Technical University. — 2013. — № 5 (45). — P. 5–8.
3. Sain, P. K. Microstructure aspects of a newly developed, low cost, corrosion-resistant white cast iron / P. K. Sain, C. P. Sharma, A. K. Bhargava // Journal Metallurgical and Materials Transactions A. — 2013. — Vol. 44F. — P. 1665–1671.
4. Yoganandh, J. Wear behavior of nickel-based high alloy white cast iron under mining conditions using orthogonal array / J. Yoganandh, S. Natarajan, S. P. Kumaresh Babu // Erosive. Journal of Materials Engineering and Performance. — 2013. — Vol. 22, № 9. — P. 2534–2540.
5. Abbasi-Khazaei, B. A novel process in semi-solid metal casting / B. Abbasi-Khazaei, S. Ghaderi // J. Mater. Technol. — 2012. — Vol. 28, № 10. — P. 946–950.
6. Кобозев, М. А. Показатели относительной износостойкости основных пар трения серийных и модернизированных вакуумных насосов пластинчатого типа / М. А. Кобозев, Н. А. Марин, Р. В. Павлюк [и др.] // Научное обозрение. — 2016. — № 22. — С. 95–99.
7. Костылева, Л. В. Повышение износостойкости почвообрабатывающих рабочих органов за счет структурирования высокоуглеродистых сплавов / Л. В. Костылева, Д. С. Гапич, В. А. Моторин [и др.] // Изв. Нижневолж. агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. — 2018. — № 3 (51). — С. 283–291.
8. Афанасьев, В. К. Некоторые итоги и перспективы развития нелегированного высокопрочного чугуна / В. К. Афанасьев, М. В. Попова, А. П. Черныш [и др.] // Металлургия машиностроения. — 2020. — № 4. — С. 11–16.
9. Афанасьев, В. К. Доменный чугун — металл будущего / В. К. Афанасьев, С. А. Гладышев, Л. А. Годик [и др.]; под науч. ред. В. К. Афанасьева. — Кемерово : Кузбассвузиздат, 2005. — 343 с.
10. Трухов, А. П. Технология литейного производства: литье в песчаные формы : учебник для вузов / А. П. Трухов, Ю. А. Сорокин, М. Ю. Ершов [и др.]; под ред. А. П. Трухова. — М. : ИЦ «Академия», 2005. — 528 с.
11. Матюхин, В. И. Расчет и проектирование ваграночного комплекса плавки чугуна / В. И. Матюхин, А. В. Матюхина. — Екатеринбург : ФГАОУ ВО УрФУ, 2015. — 364 с.
12. Черный, А. А. Газовые вагранки и энергосберегающие процессы плавки в них чугуна : уч. пособие / А. А. Черный. — Пенза : Пензен. гос. ун-т, 2009. — 40 с.
13. Сухарчук, Ю. С. Плавка чугуна в вагранках / Ю. С. Сухарчук, А. Л. Юдин. — М. : Машиностроение, 1989. — 143 с.
14. Металлургический бюллетень. Электронный ресурс. Режим доступа : https://www.metaltorg.ru/metal_catalog/metallurgicheskoye_syrye_i_polufabrikaty/koks/coke/. Дата посещения 01.03.2021.
15. Металлургический бюллетень. Электронный ресурс. Режим доступа : https://www.metaltorg.ru/metal_catalog/metallurgicheskoye_syrye_i_polufabrikaty/koksuyushchiysya_ugol/koksuyushchiysya_ugol/. Дата посещения 01.03.2021.
16. Ибраева, О. Т. Повышение экологической чистоты и снижение ресурсоемкости металлургического производства / О. Т. Ибраева, И. К. Ибраев // Science Time. — 2014. — № 10. — С. 146–159.
17. Ибраев, И. К. Об изучении влияния различных углеродосодержащих видов топлива на агломерационный процесс / И. К. Ибраев, О. Артыбеков, А. А. Артыбекова // Технологии производства металлов и вторичных материалов. — 2011. — Т. 19, № 1. — С. 45–52.
18. Ибраев, И. К. Основные направления использования отходов флотации каменного угля в металлургическом производстве / И. К. Ибраев, О. Т. Ибраева, А. З. Исагулов // Тр. инновационного евразийского ун-та. — 2006. — Т. 24, № 2/3. — С. 48–54.
19. Ибраев, И. К. Исследование и разработка технологии утилизации углеродосодержащих шламов в металлургическом производстве / И. К. Ибраев, О. Т. Ибраева // Международный научный журнал SCIENCE TIME. — 2014. — Вып. № 5. — С. 72–90.
20. Ибраев, И. К. Использование отходов обогащения углей в металлургическом производстве / И. К. Ибраев, О. Т. Ибраева // Тр. конгресса с международным участием и элементами школы молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (Техноген-2014), Екатеринбург, 2–6 июня 2014 г. — С. 359–362.
21. Бажин, В. Ю. Утилизация техногенных отходов электролизного производства алюминия / В. Ю. Бажин, А. А. Власов, Р. К. Патрин // Безопасность жизнедеятельности. — 2010. — № 9. — С. 18–21.
22. Патрин, Р. К. Перспективы пирометаллургической переработки техногенных отходов алюминиевого производства / Р. К. Патрин, В. М. Сизяков, В. Ю. Бажин // Изв. вузов. Цветная металлургия. — 2013. — № 6. — С. 61–63.

23. **Иванков, С. И.** Запатентованные технологические решения переработки и утилизации многотоннажных отходов алюминиевого производства / С. И. Иванков, А. В. Троицкий // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. — 2020. — № 3. — С. 38–102.

24. **Головных, Н. В.** Упрочнение технологических материалов и рециклинг отходов футеровки электролизеров алюминиевого производства / Н. В. Головных // Экология промышленного производства. — 2010. — № 4. — С. 47–52.

25. **Ермиенко, А. В.** Проблемы отходов производства и потребления на Казахстанском электролизном заводе (г. Павлодар) / А. В. Ермиенко // Аграрный вестник Урала. — 2009. — № 3 (57). — С. 95–97.

26. **Баранов, А. Н.** Рециклинг и утилизация фтор-углеродсодержащих отходов алюминиевого производства / А. Н. Баранов, Н. В. Немчинова, В. В. Аникин [и др.] // Вестник ИрГТУ. — 2012. — Т. 61, № 2. — С. 63–70.

27. **Терентьев, В. Г.** Производство алюминия / В. Г. Терентьев, Р. М. Школьников, И. С. Гринберг [и др.]. — СПб. : МАНЭБ, 2001. — 348 с.

28. **Hubbard, C. R.** The reference intensity ratio for computer simulated powder patterns / C. R. Hubbard, E. H. Evans, D. K. Smith // J. Appl. Cryst. — 1976. — Vol. 169, № 9. — P. 169–174. ■

Получено 27.04.21

© А. З. Исагулов, И. Д. Кащеев,
Е. А. Сидорина, К. Г. Земляной, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

IV международная научно-практическая конференция «ГРАФЕН И РОДСТВЕННЫЕ СТРУКТУРЫ: СИНТЕЗ, ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ»

6–8 октября 2021 г.

г. Тамбов, Россия

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- углеродные нанотрубки и нановолокна
- графен, нанографит
- наноматериалы функционального и конструкционного назначения
- метрология, стандартизация и контроль продуктов углеродной nanoиндустрии

Конференция пройдет в Тамбовском государственном техническом университете. Рабочие языки конференции — русский и английский. Форма участия в конференции — очная, заочная, дистанционная. Типы сообщений — пленарные, секционные и стендовые доклады.

www.graphene-tambov.ru