

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT,
TECHNOLOGIES AND MATERIALS

УДК 621.793:621.783.24

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-383-394



Оригинальная статья

Original article

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ РУДНО-УГОЛЬНЫХ БРИКЕТОВ
В КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ, ОТАПЛИВАЕМОЙ ГЕНЕРАТОРНЫМ ГАЗОМБ. П. Куликов, Ю. И. Сторожев[✉], А. С. Потапенко

■ Сибирский федеральный университет (Россия, 660041, Красноярск, Свободный пр., 79)

✉ albin1941@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности процесса получения гранулированного чугуна с применением кольцевой печи с вращающимся подом при реализации технологии ITmk3 (*Ironmaking Technology Mark Three*). Авторы показывают конструкцию угольного газификатора с системой очистки синтезируемого газа и поперечное сечение кольцевой печи. Статья кратко описывает процесс промышленного получения гранулированного высококачественного чугуна. Проведена оценка перспективы использования рассматриваемой технологии на территории Российской Федерации. На первом этапе исследований металлизации железорудного концентрата (ЖРК) углем применен термогравиметрический метод полного факторного эксперимента по определению оптимальных условий металлизации. В экспериментах варьировали соотношение ЖРК: уголь, крупность угля, добавки извести в процентах от суммы (ЖРК + уголь). В результате термогравиметрического анализа авторы получили кривые изменения массы образцов, состава и количества выделившегося газа при изменении температуры нагрева в процессе спекания ЖРК с углем и известью. На втором этапе для отработки технологии ITmk3 разработана лабораторная камерная печь с выдвижным подом, отапливаемая генераторным газом из каменного угля. Рудно-угольные брикеты были изготовлены с соотношением ЖРК, уголь, бентонит 80:20:5 и термообработаны в камерной печи с отоплением генераторным газом из угольного газификатора. В качестве опытного сырья были использованы железорудный концентрат Коршуновского горно-обогатительного комбината и Касьяновский каменный уголь Черемховского месторождения. На основе лабораторных исследований был определен температурно-временной режим обжига рудно-угольных брикетов, обеспечивающий высокую степень металлизации железорудных материалов (80 – 87 %) при обжиге брикетов в диапазоне температур 1080 – 1424 °С в течение 40 мин. Выход брикетов после сушки и обжига составил 66,45 %. Авторы изучили механизмы твердофазного восстановления железорудных материалов в кольцевых печах с вращающимся подом и жидкофазного разделения продуктов восстановления, а также определили состав выделившихся газов при прокаливании рудно-угольных брикетов.

Ключевые слова: металлизация, брикеты, кольцевая печь, гранулированный чугун, генераторный газ, вращающийся под, теплообмен, угольный газификатор

Для цитирования: Куликов Б.П., Сторожев Ю.И., Потапенко А.С. Металлизация рудно-угольных брикетов в кольцевой печи, отапливаемой генераторным газом. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):383–394. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-383-394>

METALLIZATION OF ORE-COAL BRIQUETTES
IN AN ANNULAR FURNACE HEATED BY GENERATOR GASB. P. Kulikov, Yu. I. Storozhev[✉], A. S. Potapenko

■ Siberian Federal University (79 Svobodnyi Ave., Krasnoyarsk 660041, Russian Federation)

✉ albin1941@mail.ru

Abstract. The paper considers the features of producing granular pig iron using an annular furnace with a rotating hearth during implementation of ITmk3 technology (*Ironmaking Technology Mark Three*). The design of a coal gasifier with a synthesized gas purification system and the cross-section of an annular furnace are shown. The article briefly describes the process of industrial production of granular high-quality pig iron. The prospects of using the technology in question on the territory of the Russian Federation were assessed. At the first stage of research on the metallization of iron-ore concentrate (IOC) with coal, the thermogravimetric method of a complete factor experiment was used to determine the optimal metallization conditions. In the experiments, the ratio of IOC was varied: coal, size of coal, lime additives as a percentage of the amount (IOC + coal). As a result of thermogravimetric analysis, the authors obtained the curves of changes in mass of the samples, composition and amount of released gas when the heating temperature changed during sintering of IOC with coal and lime. At the second stage, a laboratory chamber furnace with a portable hearth, heated by generator gas from coal, was developed to test the ITmk3 technology. Ore-coal briquettes were made with a ratio

of IOC, coal, bentonite 80:20:5 and heat-treated in a chamber furnace with heating by generator gas from a coal gasifier. Iron-ore concentrate from the Korshunovsky MPP and Kasyanovsky coal from the Cheremkhovsky deposit were used as experimental raw materials. Based on laboratory studies, the authors determined the temperature-time firing mode of ore-coal briquettes, which ensures a high degree of metallization of iron-ore materials of 80 – 87 % when firing briquettes in the temperature range of 1080 – 1424 °C for 40 min. The yield of briquettes after drying and firing was determined to be 66.45 %. The mechanism of solid-phase reduction of iron-ore materials in annular furnaces with a rotating hearth and liquid-phase separation of reduction products is considered. The composition of the gases released during calcination of ore and coal briquettes was determined.

Keywords: metallization, briquettes, annular furnace, granular pig iron, generator gas, rotating hearth, heat exchange, gasifier

For citation: Kulikov B.P., Storozhev Yu.I., Potapenko A.S. Metallization of ore-coal briquettes in an annular furnace heated by generator gas. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):383–394. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-383-394>

ВВЕДЕНИЕ

Производство железа прямого восстановления за последние 10 лет выросло в мире на 18 %, а в России на 66 %, что свидетельствует о быстром развитии этого направления [1]. Широкое распространение процесса прямого восстановления железа отмечено в 1980-х годах, когда в горно-металлургическом комплексе началось широкое применение в качестве восстановителя природного газа. Помимо природного газа в процессе прямого восстановления железа оказалось также возможным использование продуктов газификации углей. В обоих вариантах не требуется применения дорогостоящего кокса [2].

Наиболее предпочтительным, по мнению металлургов-теплотехников, является получение частично металлизированных железорудных материалов со степенью металлизации 30 – 50 %, применяемых в доменном производстве. Высоко металлизированные железорудные продукты со степенью металлизации 85 – 95 % используют для переплавки в сталеплавильных агрегатах с получением высококачественной стали [2]. Способ прямого восстановления железорудных материалов оказался особенно приемлемым для территорий, не имеющих запасов природного газа, но обладающих богатыми месторождениями углей.

В двухтысячных годах в России появилось более десятка изобретений по технологии получения гранулированного чугуна с применением кольцевых печей с вращающимся подом, включающих элементы известных процессов FASTMET, ITmk3. В одном из изобретений [3] представлен способ получения гранулированного чугуна путем дозирования компонентов железорудной шихты с обеспечением соотношений CaO/MgO , $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в пределах 2 – 5 и 4 – 6 соответственно, чтобы температура плавления первичного шлака не превысила 1400 °C. Ряд других патентов [4 – 6] посвящен конструктивным элементам кольцевых печей, позволяющим оптимизировать процессы теплообмена. В частности, в изобретении [6] в зонах загрузки и выгрузки брикетов предусмотрены воздушно-охлаждаемые подвесные экраны с возможностью вертикального перемещения, а зона загрузки дополнительно снабжена устройством для подачи на под защитного материала.

Для условий Сибири наиболее привлекательны разработки, использующие угольные газификаторы [7; 8] и позволяющие кольцевым печам при отсутствии природного газа работать на газифицированном топливе. На основе этих изобретений доработана технологическая линия для производства металлизированного продукта в кольцевой печи с подвижным подом, позволяющая максимально полезно утилизировать тепло отходящих газов [9; 10].

Одним из примеров организации такого производства является строительство в г. Черемхово Иркутской области завода по получению гранулированного чугуна по технологии ITmk3. На выбор данного места повлияли следующие факторы:

- непосредственная близость месторождения одного из основных сырьевых источников – угля (Черемховский угольный бассейн);
- достаточно близкое расположение другого основного источника сырья – железорудного концентрата (Коршуновский ГОК, г. Железногорск, Иркутская обл.);
- развитая транспортная структура района, как в отношении железнодорожного (Транссиб), так и автомобильного транспорта (федеральная трасса).

Инвестором проекта выступила ООО «НПО «Химико-металлургическая компания». Проектная мощность завода составляет 100 тыс. т/год гранулированного передельного чугуна. Уникальный для России способ производства основан на восстановительном обжиге брикетированного сырья (железорудный концентрат (ЖРК) + уголь + доломит) при температуре 1350 – 1450 °C в кольцевой подовой печи, обогреваемой генераторным газом, синтезированным из каменного угля. Производство включает следующие основные объекты:

- участок разгрузки ЖРК с сырьевыми силосами;
- открытый склад угля и участок подготовки угля;
- участок приготовления газообразного топлива газификацией угля;
- линии приготовления смеси (ЖРК + уголь + доломит), ее брикетирования и сушки брикетов;
- установка металлизации рудно-угольных брикетов;
- участок переработки и разделения продуктов металлизации;
- линия оборотного водоснабжения;
- участок газоочистки.

Основные технологические единицы строящегося производства:

– два угольных газификатора SM89 производства КНР с внутренним диаметром 3,6 м, площадью поперечного сечения 10,17 м², высотой 12,5 м с системой очистки генераторного газа (рис. 1);

– кольцевая печь с вращающимся подом (рис. 2). Наружный диаметр печи 20,99 м, внутренний 15,6 м, ширина пода 2,69 м. Во внутренней и наружной стене печи установлены 14 пар газовых горелок MS568, направленных строго навстречу друг другу таким образом, чтобы факелы от противоположных горелок встречались и взаимно рассеивались в центре печи. Скорость

вращения пода переменная: время одного оборота подины может изменяться от 27 до 45 мин.

Ниже приведено краткое описание технологической схемы производства гранулированного передельного чугуна строящегося завода. Доставка сырья на рудный двор осуществляется железнодорожным и автомобильным транспортом. Уголь и доломит доставляются автотранспортом, железорудный концентрат – в полувагонах.

Уголь после дробления рассеивают на инерционном грохоте с ячейкой 12 мм, где выделяются две фракции: надситовая фракция с размерами частиц угля более 12 мм поступает на стадию получения топлив-

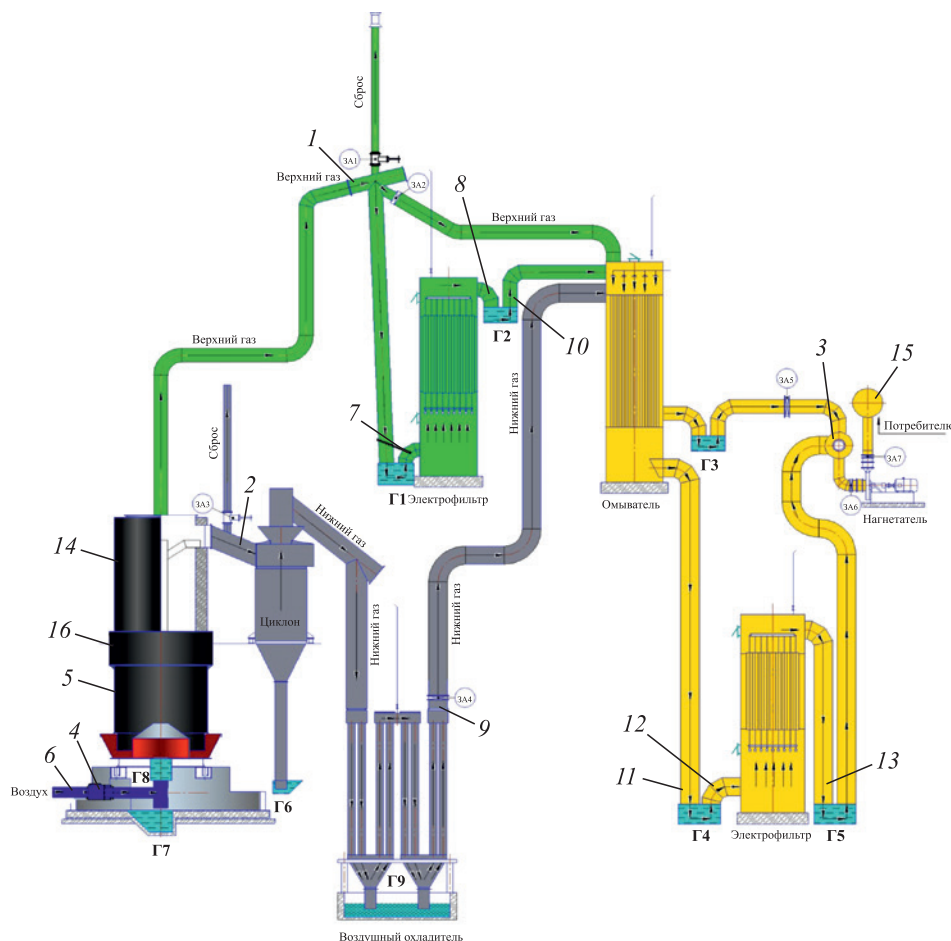


Рис. 1. Газификатор с системой очистки генераторного синтез газа:

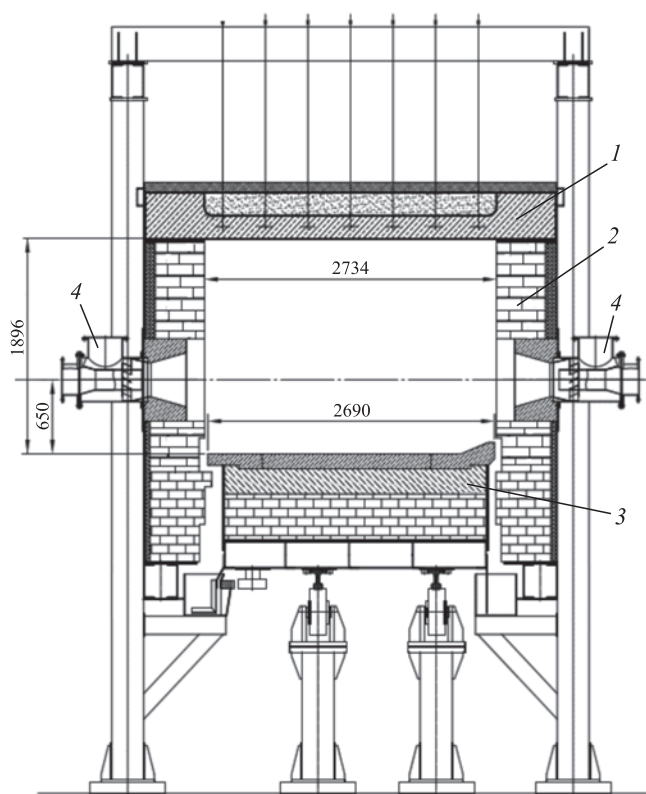
- 1 – газоход верхнего газа; 2 – газоход нижнего газа; 3 – коллектор низкого давления газа; 4 – коробка смешивания (получение агента газификации); 5 – кессон газификатора; 6 – воздуховод; 7 – ввод верхнего газа в электрофильтр 1 из гидрозатвора Г1; 8 – выход очищенного верхнего газа из электрофильтра 1 в гидрозатвор Г2; 9 – газоход нижнего газа из воздушного охладителя в омыватель; 10 – газоход верхнего газа из гидрозатвора Г2 в омыватель; 11 – газоход смешанного верхнего и нижнего газов; 12 – ввод смешанного газа из гидрозатвора Г4 в электрофильтр 2; 13 – газоход смешанного очищенного газа к кольцевой печи металлizations; 14 – задвижки регулировки нижнего газа; 15 – коллектор повышенного давления газа; 16 – шуровочные отверстия газификатора; Г1 – Г9 – гидрозатворы

Fig. 1. Gasifier with generator synthesis gas purification system:

- 1 – upper gas duct; 2 – lower gas duct; 3 – low-pressure gas collector; 4 – mixing box (gasification agent production); 5 – gasifier caisson; 6 – air duct; 7 – upper gas inlet into electrostatic precipitator No. 1 from hydraulic seal Г1; 8 – purified upper gas outlet from electrostatic precipitator No. 1 into hydraulic seal Г2; 9 – lower gas duct from the air cooler to the washer; 10 – upper gas duct from hydraulic seal Г2 to the washer; 11 – mixed upper and lower gas duct; 12 – mixed gas inlet from hydraulic seal Г4 to electrostatic precipitator No. 2; 13 – mixed purified gas duct to the annular metallization furnace; 14 – valves adjustment of lower gas; 15 – collector of increased gas pressure; 16 – sizing holes of gasifier; Г1 – Г9 – hydraulic seals



a



б

Рис. 2. Кольцевая печь для производства гранулированного чугуна:

a – внешний вид строящейся печи;

б – поперечный разрез; 1 – подвесной свод; 2 – футеровка стен;

3 – вращающийся под; 4 – горелочные устройства

Fig. 2. Annular furnace for production of granular pig iron:

a – appearance of the furnace under construction;

б – cross section; 1 – suspended arch; 2 – wall lining;

3 – rotating hearth; 4 – tuyers

ного синтез газа в газификатор. Подситовую фракцию с размерами частиц менее 12 мм направляют в мельницу для измельчения, требуемого по технологии производства рудно-угольных брикетов. Брикеты состава 80 % ЖРК + 20 % уголь + 5 % доломит изготавливают на валковом прессе. Максимальная производительность пресса составляет $14 \pm 0,5$ т/ч по рудно-угольным брикетам. Для удаления избыточной влаги и предвари-

тельного нагрева рудно-угольные брикеты поступают в сушилку, куда в качестве сушильного агента направляют воздух, нагретый в рекуператоре до $350 - 400$ °С отходящими из кольцевой печи газами.

Металлизацию железорудного сырья в составе рудно-угольных брикетов проводят в кольцевой печи с вращающимся подом. Печь разделена на четыре технологических сектора:

- сектор загрузки «угольной постели», выполняющей роль защиты огнеупорного материала пода и основания для укладки брикетов на под;
- сектор укладки брикетов на под;
- сектор восстановительного обжига брикетов;
- сектор разгрузки металлizedованного продукта с пода печи.

В первую очередь на под печи пластинчатым питателем загружают «постель», которую равномерно распределяют по поду печи слоем 3 – 5 см. Вслед за «постелью» на под укладывают подсушенные и нагретые на конвейерной решетке до ~ 250 °С рудно-угольные брикеты, которые также равномерно распределяют по поду печи поверх «постели» в 1 – 2 слоя.

По мере вращения пода «пирог» брикетов с «постелью» поступает в сектор восстановительного обжига брикетов. Синтезированный в газификаторе топливный газ с температурой $200 - 250$ °С по системе теплоизолированных газоходов распределяют по горелкам печи в автоматическом режиме, обеспечивая требуемый температурный режим в зоне металлизации. Для более эффективного сжигания топливного газа и экономии энергетических ресурсов подаваемый в горелки воздух предварительно нагревают до $400 - 450$ °С в рекуператорах.

Из зоны восстановительного обжига печи металлizedованный продукт поступает в зону охлаждения и разгрузки, где водоохлаждаемыми шнеками снимается с пода и по водоохлаждаемой течке направляется в скребковый холодильник. Охлажденный металлizedованный продукт из холодильника подают в сито-бурат, где сначала отделяется «постель», а затем проходит механическое воздействие на агломерированный продукт металлизации. В результате агломерат распадается на шлак и гранулированный чугун. Далее механическая смесь шлака и чугуна по конвейеру поступает в магнитный сепаратор, где выделяется магнитная составляющая – целевой продукт технологического процесса – железо прямого восстановления в виде гранул передельного чугуна.

Реализация представленного выше инновационного проекта началась с приобретения и монтажа основного и вспомогательного оборудования, строительства инфраструктурных объектов. Параллельно с монтажом кольцевой печи, угольных газификаторов и другого оборудования проведены исследования по металлизации рудно-угольных брикетов в лабораторных условиях. Цель исследований – оптимизация состава брикетов

и отработка технологии получения гранулированного чугуна по технологии ITmk3. Результаты этих исследований представлены в настоящей статье.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одним из преимуществ металлизации рудно-угольных материалов в кольцевой печи по технологии ITmk3 является получение гранул чугуна в оболочке из шлака. Это обстоятельство облегчает отделение гранул чугуна от основной массы шлака [11 – 14], снижает затраты на последующую переработку чугуна. Важным требованием технологии ITmk3 является использование железорудных концентратов с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ более 60 % и обеспечение содержания углерода в сплаве в диапазоне 2,5 – 4,5 % после полного восстановления железа. Если концентрация остаточного углерода в сплаве менее 1,5 %, температура плавления железа существенно не снизится, и температура в печи в этом случае должна быть максимальной, около 1450 – 1550 °C. Технологией определены гарантируемые показатели готовой продукции (чугун гранулированный), мас. %: >96 Fe; 2,0 – 4,0 C; 0,2 Si; 0,05 P; 0,04 – 0,08 S [15 – 20]. Однако рассматриваемая в этих публикациях технология рассчитана на высококалорийные виды топлива, в частности, на природный газ.

Первый этап работы по определению оптимальных условий металлизации ЖРК углем выполнен с использованием термогравиметрии методом полного факторного эксперимента на приборе синхронного термического анализа STA 449 Jupiter. Образцы для исследований готовили в соответствии с матрицей планирования полного трехфакторного эксперимента (табл. 1), где в качестве факторов управления выбраны:

– X_1 – соотношение ЖРК: уголь (–1 → (70:30) % = 2,333; +1 → (80:20) % = 4).

– X_2 – крупность угля, мкм (–1 → –50; +1 → –315).

– X_3 – добавки извести, % от суммы (ЖРК + уголь) –1 → 0; +1 → 5.

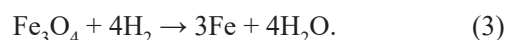
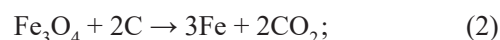
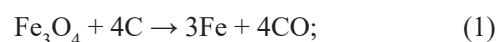
Параметром оптимизации служило извлечение железа в сплав.

В экспериментах использовали агломерационный железорудный концентрат Коршуновского ГОК с содержанием, % сух.: 62,6 Fe_2O_3 ; 24,0 FeO; 3,95 SiO_2 ;

2,654 Al_2O_3 ; 1,9 CaO; 4,0 MgO; 0,13 MnO; 0,255 TiO_2 ; 0,04 SO_2 ; 0,37 P_2O_5 ; 5,8 H_2O ; 1,65 п.п.п. В качестве восстановителя применен Касьяновский каменный уголь Черемховского месторождения с содержанием, %: 77,3 C^r; 1,2 S^r; 16,5 A^c; 11,5 H_2O^p ; 13,7 O^r; 5,6 H^r; 1,1 N^r; 45,6 V^r. Низшая теплота сгорания угля составляет 23 028,5 кДж/кг. Температура плавления золы равна 1310 – 1390 °C. Химический состав золы, мас. %: 67,1 SiO_2 ; 19,2 Al_2O_3 ; 2,5 Fe_2O_3 ; 2,2 CaO; 1,6 MgO; 0,7 K_2O ; 0,1 TiO_2 ; 0,1 Na_2O ; 4,4 SO_3 ; 0,01 MnO_2 .

Готовые смеси прессовали на лабораторном прессе с усилием 80 – 100 кг/см² с получением таблеток диаметром 8 мм и высотой ~5 мм. Образцы нагревали от 40 до 1400 °C со скоростью 30 °C/мин в токе аргона. Масса навесок составляла 513 – 593 мг. Исследование проводили в корундовом тигле в виде плоской тарелочки. В ходе экспериментов контролировали качественный и количественный состав газовых продуктов термолитиза с помощью квадрупольного масс-спектрометра Aelos. Энергия электронного удара 70 эВ. По анализу выделившихся газов рассчитывали степень металлизации железа.

По матрице планирования полного трехфакторного эксперимента проведено восемь опытов. Дериватограммы спекания ЖРК, угля и извести с анализом выделяющихся газов получены на 24 рисунках, по три рисунка на каждый образец. Учитывая идентичный характер дериватограмм, на рис. 3 в качестве примера показаны результаты анализа газовой выделений из образца в опыте б: $X_1 = +1$; $X_2 = -1$; $X_3 = +1$, содержащего 80 % ЖРК + 20 % уголь + 5 % известь (сверх 100 %). Количество CO, CO_2 , H_2O определяли из дериватограмм по площади эффектов выделения этих газов сравнением с эффектами, полученными для реперных образцов. Расчет степени металлизации ЖРК производили по реакциям



Температурный интервал от начала записи до ~550 – 600 °C (первый скачок интенсивной потери веса)

Таблица 1. Уровни факторов управления и интервалы варьирования

Table 1. Levels of control factors and variation intervals

Фактор	Уровень факторов			Интервал варьирования
	– 1	0	+ 1	
X_1 – отношение ЖРК: уголь	2,333	3,167	4,000	0,833
X_2 – крупность угля, мкм	–50,0	–132,5	–315,0	82,5
X_3 – добавки извести, % от суммы (ЖРК + уголь)	0	2,5	5,0	2,5

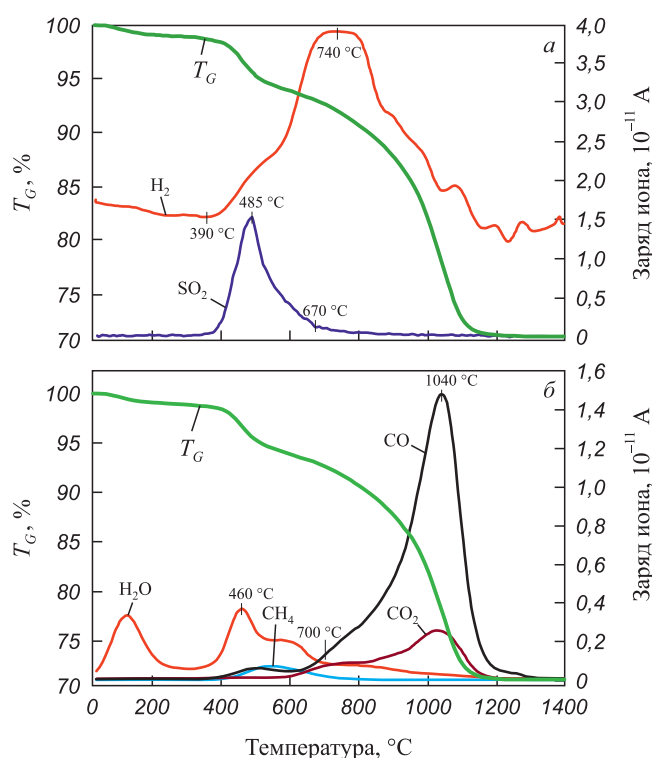


Рис. 3. Дериватограмма восстановления ЖРК углем с составом газовых продуктов термоллиза и взаимодействия (на примере образца б); T_G – кривая потери массы образцом

Fig. 3. Derivatogram of IOC reduction by coal with composition of gas products of thermolysis and interaction (using the example of sample б); T_G – curve of mass loss by the sample

в расчетах не учитывали, поскольку этот процесс связан с разложением угля без взаимодействия с ЖРК. Данный факт подтверждается дериватограммой разложения индивидуального Черемховского угля (в статье не представлена). При нагреве образцов выделяются газы CO , CO_2 , H_2O и метан. Соотношение выделившихся газов CO и CO_2 характеризует степень метаморфизма угля. В расчете учитывали количество воды, образовавшейся по реакции (3) в интервале 800 – 1000 °C.

Термогравиметрический анализ при обжиге восьми смесей (ЖРК + уголь + известь) показал, что газовыделения из образцов можно разбить на три температурных интервала, °C: 40 – 210; 210 – 685; 685 – 1400. Для первой зоны (40 – 210 °C) характерно выделение гигроскопической влаги с потерей массы от 0,61 до 1,29 %.

Во второй температурной зоне (210 – 685 °C) идентифицировано выделение летучих соединений. В этом температурном интервале выделяется вся сера в виде SO_2 , основное количество CH_4 , H_2 , H_2O . Потеря массы составила от 5,46 до 8,6 %.

В третьей температурной зоне (685 – 1400 °C) происходят взаимодействия с образованием преимущественно CO и CO_2 . Потеря массы варьируется от 21,22 до 29,7 %. Масса твердых остатков после обжига таблеток составила 60,64 – 72,48 %.

В табл. 2 приведен компонентный и количественный состав газовой фазы, вычисленный по результатам термогравиметрии и принятый к расчету степени металлизации по матрице планирования.

Результаты расчета степени металлизации железа по реакциям (1) – (3) представлены в табл. 3.

На основании полученных данных рассчитаны коэффициенты и составлено линейное уравнение зависимости извлечения железа из ЖРК (Y_1) от соотношения ЖРК:уголь (X_1), крупности угля (X_2), добавки извести (X_3) в кодированных координатах.

$$Y_1 = 66,83 - 8,82X_1 - 4,16X_2 + 3,78X_3 + 1,77X_1X_2 + 0,84X_1X_3 + 0,0037X_2X_3 + 1,29X_1X_2X_3. \quad (4)$$

Проверка значимости коэффициентов полученного уравнения показала, что с надежностью 95 % значимыми являются коэффициенты при X_1 , X_2 , X_3 и X_1X_2 . В итоге уравнение (4) запишется в сокращенном виде

$$Y_1 = 66,83 - 8,82X_1 - 4,16X_2 + 3,78X_3 + 1,77X_1X_2. \quad (5)$$

В физических величинах уравнение (5) имеет вид

$$Y_1 = 6,83 - 8,82 \frac{X_1 - 3,167}{0,833} - 4,16 \frac{X_2 - 132,5}{82,5} + 3,73 \frac{X_3 - 2,5}{2,5} + 1,77 \frac{X_1 - 3,167}{0,833} \frac{X_2 - 132,5}{82,5}, \quad (6)$$

где слагаемые числителя – нулевые значения уровней факторов, знаменатели – интервалы варьирования соответствующих факторов табл. 1.

Таблица 2. Состав газовой фазы, выделившейся при спекании ЖРК с углем и известью

Table 2. Composition of the gas phase released during sintering of IOC with coal and lime

Компонент, мг	Номер образца (опыта)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
CO	105,78	59,72	66,12	66,61	74,30	67,89	64,45	55,40
CO_2	2,60	26,86	28,89	35,89	35,78	31,70	35,69	26,00
$\text{H}_2\text{O}_{(800-1000\text{ }^\circ\text{C})}$	0,61	1,75	2,38	1,28	1,91	0,39	1,44	1,40

Таблица 3. Результаты расчета степени металлизации образцов по реакциям (1) – (3) восстановления магнетита

Table 3. Results of calculating the degree of samples metallization by reactions (1) – (3) of magnetite reduction

Наименование позиций	Номер образца (опыта)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Fe (1), мг	201,95	89,58	99,18	99,92	111,46	101,84	96,67	83,10
Fe (2), мг	4,97	51,28	55,15	68,52	68,31	60,52	68,14	49,64
Fe (3), мг	1,42	4,08	5,55	2,99	4,46	0,91	3,36	3,27
Общее Fe в образце, мг	242,79	253,97	234,90	278,50	238,17	256,17	235,65	273,62
Извлечение Fe, %	85,81	57,07	68,06	61,55	77,35	63,73	71,36	49,70
Примечание: Fe (1) – количество восстановленного железа, с образованием CO; Fe (2) – количество восстановленного железа, с образованием CO ₂ ; Fe (3) – количество восстановленного железа, с образованием H ₂ O. Среднее содержание железа в ЖРК Коршуновского ГОКА 62,6 %.								

На основании проведенных термогравиметрических исследований образцов сделаны следующие выводы.

- Наиболее значимый фактор, влияющий на степень металлизации ЖРК, это соотношение ЖРК:уголь, следующим по значимости является крупность угля.

- Увеличение крупности угля (с –50 мкм до –315 мкм) повышает температуру окончания процесса восстановления железа с 1255 до 1367 °С.

- Добавление извести интенсифицирует восстановление железа и переводит его в низкотемпературную область (1367 → 1300 °С).

- Полученные результаты дают основание полагать, что реакция металлизации проходит в два этапа. Как минимум два скачка изменения скорости потери веса (DTG) и соответствующее им выделение CO. Данный факт можно интерпретировать как непосредственно восстановление (основной этап). Второй этап – агрегация капель чугуна, выдавливание газа из капилляров и межкапельного пространства. Первый этап начинается с 640 °С по нарастающей скорости потери веса до 990 °С. Далее скорость потери веса стабилизируется и начинает падать до 1180 – 1250 °С. Затем начинается второй этап восстановления, который заканчивается при 1250 – 1360 °С.

- Относительно низкую степень металлизации железа (50 – 85 %), полученную на данном этапе исследований, можно объяснить тем, что:

- анализ и расчет производили только по газу;
- процесс металлизации происходил в печи в атмосфере аргона;

- используемый в исследованиях Черемховский уголь был с высокой степенью метаморфизма;

- возможно, в интервале от начала записи дериватограммы до ~550 – 600 °С (первый скачек интенсивной потери веса) наряду с разложением угля проходила частичная металлизация железа, которую не учитывали в расчетах;

- Для эффективного восстановления оксидов железа в состав брикетов целесообразно вводить уголь с мини-

мальным количеством летучих и максимальным количеством углерода.

С целью определения режимов работы строящегося завода по производству передельного чугуна выполнен следующий этап исследований, который заключался в изготовлении и обжиге брикетов ЖРК с углем и известью в лабораторных условиях. Для исследований изготовлена лабораторная печь с выдвижным подом (рис. 4), отапливаемая газифицированным топливом из каменного угля. Размер внутреннего пространства печи: сечение 500×500 мм, длина 650 мм. Печь оснащена водоохлаждаемым газоходом с принудительным отводом газообразных продуктов. Для измерения температуры в печи установлена платина-платинородиевая термопара. Перед загрузкой брикетов печь разогревали 1,5 ч до температуры ~1100 °С.

Для изготовления брикетов использован агломерационный железорудный концентрат Коршуновского ГОКа и Касьяновский каменный уголь Черемховского месторождения. Для отопления печи использован паровоздушный генераторный газ следующего состава, мас. %: 5,0 CO₂; 0,2 O₂; 27,0 CO; 13,0 H₂; 2,7 CH₄; 0,3 C₂H₄; 51,8 N₂. Теплота горения генераторного газа 5976 кДж/м³.

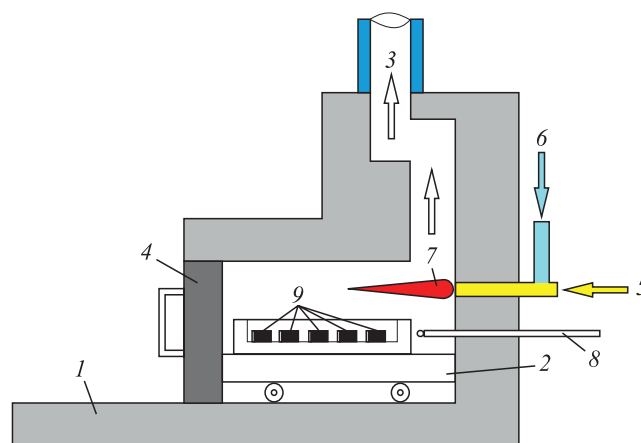
Сформированные на прессе брикеты высотой и диаметром ~22 мм загружали в керамические поддоны с коксовой «постелью» и обжигали на выдвижном поду печи (рис. 5). Состав, вес брикетов до и после обжига, условия обжига приведены в табл. 4.

Брикеты нагревали до 1424 °С (рис. 6). Снижение температуры в печи до 1078 °С на начальном этапе термообработки связано с индукционным периодом нагрева холодных брикетов после внесения их в печь. На втором участке происходил интенсивный нагрев брикетов до температуры 1249 °С со скоростью 21,4 °С/мин в течение 8 мин. Средняя температура газов в печи на этом участке составила 1163 °С.

На третьем участке температурной кривой в интервале 1249 – 1277 °С скорость роста температуры сни-



а



б

Рис. 4. Лабораторная печь с выдвижным подом на генераторном газе:

а – общий вид; б – схема; 1 – печь; 2 – выдвижной под; 3 – водоохлаждаемый газоход; 4 – дверь; 5 – подвод генераторного газа; 6 – воздух; 7 – факел; 8 – платина-платинородиевая термопара; 9 – рудно-угольные брикеты

Fig. 4. Laboratory furnace with portable hearth on generator gas:

а – general view; б – scheme; 1 – furnace; 2 – portable hearth; 3 – water-cooled duct; 4 – door; 5 – generator gas supply; 6 – air; 7 – torch; 8 – platinum-platinum-rhodium thermocouple; 9 – ore-coal briquettes

зилась до ~ 2 °С/мин. Практически это была горизонтальная площадка, обусловленная эндотермическим эффектом восстановления оксидов железа. Средняя температура газов в печи на этом участке составила 1263 °С.

Дальнейший нагрев до 1424 °С связан с обеспечением температурных условий для жидкостного разделения металлической и шлаковой фаз [21]. Средняя скорость нагрева в течение 16 мин составила 9,2 °С/мин. Средняя температура газов в печи на этом температурном участке – 1350 °С. После сушки и обжига брикетов

тов в течение 40 мин выход готового продукта составил в среднем $69,3 \pm 2,01$ % (табл. 4).

На рис. 7 показаны образцы брикетов после завершения металлизации. Внутренняя часть брикетов представлена гранулами чугуна. Снаружи они покрыты золошлаковой оболочкой, которая частично защищает чугун от окисления.

Металлизация брикетов осуществляется по механизму, описанному в работах [22; 23]. В железорудном концентрате Коршуновского ГОК содержатся оксиды Fe_2O_3 и FeO . Процесс восстановления железа из оксидов происходит ступенчато по схеме: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$.



Рис. 5. Рудно-угольные брикеты в процессе металлизации в керамических поддонах

Fig. 5. Ore-coal briquettes during metallization in ceramic pallets

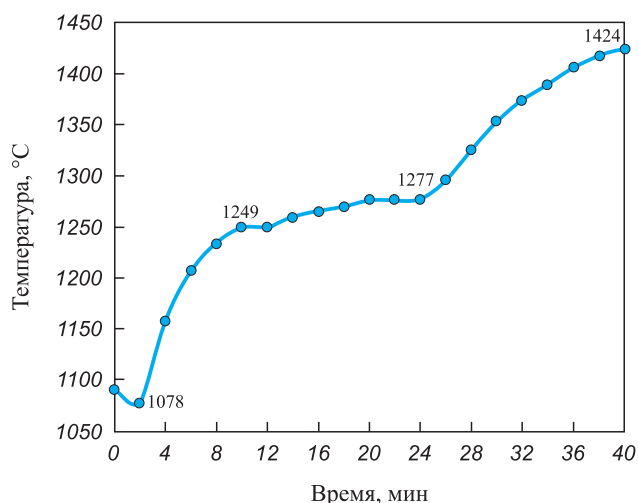


Рис. 6. Температурно-временной график металлизации рудно-угольных брикетов

Fig. 6. Temperature-time graph of metallization of ore-coal briquettes

**Таблица 4. Характеристика брикетов
ЖРК + уголь + известь до и после обжига**

**Table 4. Characteristics of
IOC briquettes + coal + lime before and after firing**

Показатель, размерность	Партия 1	Партия 2	Партия 3
Состав брикетов	80 % ЖРК + 20 % уголь + + 5 % известь (сверх 100 %)		
Давление прессования, атм.	100		
Вес брикета, г:			
1	21,8	22,8	22,2
2	22,8	25,4	20,8
3	23,6	24,0	22,0
4	23,8	23,6	21,0
5	24,0	21,4	21,0
6	21,4	21,4	22,4
7	22,6	22,8	21,8
8	23,2	22,8	21,0
9	21,0	–	22,0
10	25,4	–	21,2
Средний вес брикета, г	22,960	23,025	21,540
Средний вес после сушки, г	21,77	21,95	21,00
Содержание влаги, %	5,17	4,67	2,51
Общий вес после обжига, г	150,6	117,7	151,0
Средний вес после обжига, г	15,06	14,71	15,10
Температура обжига, °C	1090 – 1425		
Время обжига, мин	40		

В качестве восстановителя выступает преимущественно оксид углерода, который синтезируется в результате взаимодействия углерода угля с двуокисью углерода:



Часть железа науглероживается с образованием карбида железа:



При содержании углерода в восстановленном металле 2 – 4 % температура плавления сплава снижается с 1539 до 1170 – 1380 °C. В результате снижения температуры плавления науглероженное железо переходит в жидкое состояние. Вследствие когезионных сил мелкие частицы расплавленного железа объединяются в более крупные капли. При этом шлаковые компоненты шихты находятся в твердом состоянии. По мере повышения температуры шихты до температуры плавления золы угля 1310 – 1390 °C происходит плавление шлаковых составляющих. В расплавленном состоянии шлак и металл не смешиваются вследствие разности

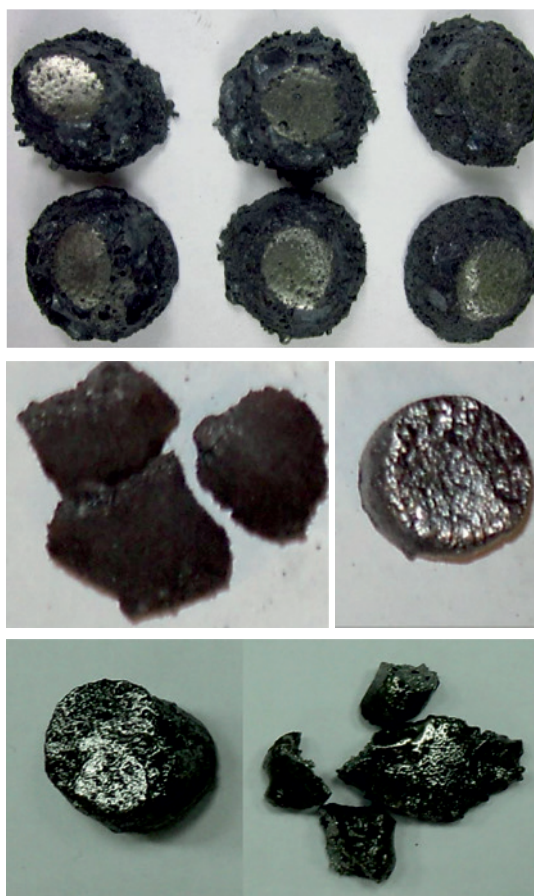


Рис. 7. Рудно-угольные брикеты после металлизации с разделением металла и шлака

Fig. 7. Ore-coal briquettes after metallization with separation of metal and slag

плотностей и образуют самостоятельные фазы. При охлаждении расплав кристаллизуется с образованием чугуна и шлака.

В итоге процесс металлизации и получения гранулированного чугуна происходит следующим образом: окомкованная шихта в виде брикетов → восстановление железа из оксидов при температурах 300 – 1200 °C → расплавление железа при температурах 1200 – 1300 °C с выходом расплавленного Fe₃C на поверхность пористых брикетов → плавление шлака при температурах 1310 – 1390 °C с формированием металлической и шлаковой фаз → разделение металлической и шлаковой фаз при температуре 1400 °C → охлаждение и разделение чугуна и шлака.

В табл. 5 приведен усредненный состав продуктов металлизации трех партий брикетов состава: 80 % ЖРК + 20 % уголь + 5 % известь (сверх 100 %), характеристика которых дана в табл. 4.

Следует отметить, что генераторный газ, очищенный от смолистых веществ, обладает низкой степенью черноты, порядка 0,2 – 0,3 ед. При малых значениях степени черноты факела теплообмен при нагреве рудно-угольных брикетов недостаточно интенсивный.

Таблица 5. Состав продуктов, полученных в результате металлизации ЖРК Коршунковского ГОК

Table 5. Composition of the products obtained as a result of metallization of IOC from Korshunovsky MPP

Номер партии	Содержание железосодержащего сплава в корольке, %	Степень металлизации, %	Содержание примесей, мас. %		
			углерод	фосфор	сера
1	77,9 ± 1,22	81,6 ± 1,46	1,73 ± 0,14	0,090 ± 0,02	0,117 ± 0,025
2	76,1 ± 1,65	79,9 ± 1,60	1,78 ± 0,18	0,135 ± 0,02	0,182 ± 0,033
3	86,0 ± 2,11	87,8 ± 1,89	2,59 ± 0,26	0,099 ± 0,02	0,144 ± 0,030

Тепловой поток, падающий от факела горелки на слой нагреваемого материала, можно существенно увеличить (на 20 – 25 %) за счет повышения степени черноты газового потока путем его карбюризации [24]. Карбюризацию факела можно осуществить вдуванием в него в зоне восстановления небольшого количества мелко-измельченного сухого малозольного угля или некондиционного прокаленного нефтяного кокса. При этом примерно в 1,5 – 2,0 раза возрастет степень черноты газового потока, соответственно возрастет светимость факела, увеличится количество тепла, передаваемого от факела нагреваемым брикетам, уменьшится длительность их нагрева до заданной температуры.

Выводы

Термогравиметрические исследования и лабораторные эксперименты по металлизации рудно-угольных брикетов в камерной печи показали возможность получения гранулированного чугуна в промышленном масштабе в кольцевой печи с вращающимся подом при использовании в качестве топлива генераторного газа, полученного при газификации каменного угля.

Необходимые температуры металлизации (1450 – 1550 °С) обеспечиваются сжиганием генераторного газа, подогревом воздуха, газа и брикетов отходящими из печи дымовыми газами [9]. При необходимости интенсификации теплообмена в печи возможно осуществление карбюризации топливного факела измельченным сухим углем или прокаленным нефтяным коксом.

На основании проведенных термогравиметрических исследований сделаны следующие выводы.

- На степень металлизации ЖРК наиболее сильно влияет соотношение ЖРК : уголь.
- Крупность угля повышает температуру окончания процесса восстановления железа с 1255 до 1367 °С.
- Добавление извести интенсифицирует восстановление железа и переводит его в низкотемпературную область (1367 → 1300 °С).
- Для эффективного восстановления оксидов железа в состав брикетов необходимо вводить уголь с минимальным количеством летучих и с максимальным содержанием углерода.

На основе лабораторных исследований определен температурно-временной режим обжига рудно-уголь-

ных брикетов, обеспечивающий высокую степень металлизации железорудных материалов (80 – 87 %) при обжиге брикетов в диапазоне температур 1080 – 1424 °С в течение 40 мин. Выход металлизированных брикетов составил 66,45 %.

Годовой выпуск гранулированного чугуна в соответствии с проектным материальным балансом для рассматриваемой печи составит 100 000 т.

Бескоксовый способ получения гранулированного чугуна в небольших масштабах наиболее востребован, когда металлургическое и угольное производства находятся на одном территориальном экономическом пространстве, что позволяет избегать сложных логистических проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование технологических режимов эффективной металлизации оксиджелезосодержащих отходов металлургического производства. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(5):335–343.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-335-343>
Anikin A.E., Galevskii G.V., Rudneva V.V. Technological modes of efficient metallization of iron-oxide-containing waste from metallurgical production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(5):335–343. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-335-343>
2. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Эффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: Учебное пособие. Екатеринбург: ООО «УИПЦ»; 2012:670.
3. Пат. 2490332 RU. Способ металлизации железорудного сырья с получением гранулированного чугуна / Рашников В.Ф., Дубровский Б.А., Галкин В.В. и др.; заявл. 12.05.2011; опубл. 20.08.2013. Бюллетень № 23.
4. Пат. 92522 RU. Печь для получения восстановленного металла / Григорьев В.Г., Паткин П.Г., Тепикин С.В.; заявл. 12.01.2009; опубл. 20.03.2010. Бюллетень № 8.
5. Пат. 94680 RU. Печь для получения восстановленного металла / Григорьев В.Г., Паткин П.Г., Тепикин С.В.; заявл. 02.02.2010; опубл. 27.05.2010. Бюллетень № 15.
6. Пат. 134532 RU. Кольцевая печь с вращающимся подом / Гринберг И.С., Гринберг А.И.; заявл. 27.06.2013; опубл. 20.11.2013. Бюллетень № 32.
7. Пат. 87166 RU. Технологическая линия для производства металлизированного продукта / Черных В.Е.,

- Григорьев В.Г., Тепикин С.В. и др.; заявл. 21.05.2009; опубл. 27.09.2009. Бюллетень № 27.
8. Пат. 93802 RU. Технологическая линия для производства металлизированного продукта / Григорьев В.Г., Паткин П.Г., Тепикин С.В. и др.; заявл. 11.01.2010; опубл. 05.10.2010. Бюллетень № 13.
 9. Сторожев Ю.И., Подборский Л.Н., Худяков И.А. Металлизация формованных рудно-угольных материалов в кольцевой печи. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015;58(4):235–240.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-4-235-240>
Storozhev Yu.I., Podborskii L.N., Khudyakov I.A. Metallization of molded ore-coal materials in circular furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015;58(4):235–240. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-4-235-240>
 10. Сторожев Ю.И., Подборский Л.Н., Худяков И.А. Охлаждение продуктов металлизации в кольцевой печи. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2015;1382(2):33–36.
Storozhev Yu.I., Podborskii L.N., Khudyakov I.A. Cooling of metallization products in annular furnace. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2015;1382(2):33–36. (In Russ.).
 11. Горбачев В.А., Евстюгин С.Н., Копоть Н.Н., Рыбкин В.С., Шаврин С.В. Принципы выбора технологии прямого получения железа. *Сталь*. 2006;12(6):42–46.
Gorbachev V.A., Evstyugin S.N., Kopot' N.N., Rybkin V.S., Shavrin S.V. Selecting technology for direct iron production. *Stal'*. 2006;12(6):42–46. (In Russ.).
 12. Юнес Р., Опришко И.А., Лобода П.И. Анализ технологий прямого восстановления оксидов металлов с применением печей с вращающимся подом. *Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*. 2011;61:184–192.
Yunes R., Opryshko I.A., Loboda P.I. Analysis of technologies of direct metal oxides reduction in circular furnaces. *Vestnik NTUU "KPI"*. 2011;61:184–192. (In Russ.).
 13. Дубровский Б.А., Шиялев П.В., Редин Е.В. и др. Металлизация шпатовых железняков Бакальского месторождения с получением гранулированного чугуна. В кн.: *Сборник трудов VI Международной конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности, печные агрегаты, экология»*. Москва: НИТУ «МИСиС»; 2012: 178–182.
 14. Kikuchi S., Ito S., Kobayashi I., Tsuge O., Tokuda K. ITmk3 process. *KOBELCO Technology Review*. 2010;29:77–84.
 15. Tanaka N., Miyagawa K., Harada T. FASTMET, FAST-MELT, and ITmk3. Development of new coal-based iron-making processes. *Direct from Midrex, RHF Technologies*. 2007/2008:8–13.
 16. Kobayashi I., Tanigaki Y., Liagami A. A new process to produce iron directly from fine ore and coal. *Iron and Steel-maker*. 2001;28(9):19–22.
 17. Sohn I., Fruehan R.J. The reduction of iron oxides by volatiles in a rotary hearth furnace process: Part I. The role and kinetics of volatile reduction. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2005;36:605–612.
<https://doi.org/10.1007/s11663-005-0051-y>
 18. Gordon Y., Els J. ITmk3 technology and its application for mining and steel industry in Ukraine and Russia. In: *Int. Conf. on Ironmaking Technology (Kyiv, 21 March 2007)*. Kyiv; 2007:128–131.
 19. Ishikawa H., Kopfle J., McClelland J., Ripke J. Rotary hearth furnace technologies for iron ore and recycling applications. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2008;53(2):541–545.
 20. Rutherford S.D., Kopfle J.T. Mesabi Nugget: World's first commercial ITmk3 Plant. *Iron and steel Technology*. 2010;7:38–43.
 21. Асанов А.В., Рощин А.В., Рощин В.Е. Жидкофазное разделение продуктов твердофазного восстановления железо-ванадиевых концентратов. *Вестник ЮУрГУ. Металлургия*. 2010;(13(189)):37–40.
Asanov A.V., Roshchin A.V., Roshchin V.E. Liquid-phase separation of products of solid-phase reduction of ferrovanadium concentrates. *Vestnik YuUrGU. Metallurgiya*. 2010;(13(189)):37–40. (In Russ.).
 22. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н. и др. Металлургия чугуна. Учебник для вузов. Москва: Академ-книга; 2004:774.
 23. Патрушов А.Е. Разработка пирометаллургической технологии извлечения железа и цинка из пылей электросталеплавленного производства: Автореферат диссертации ... кандидата технических наук. Иркутск; 2021:19.
 24. Гуцин С.Н., Казяев М.Д., Крюченков Ю.В. и др. Теория и практика теплогенерации. Учебник. Изд. 2-е. Екатеринбург: УГТУ-УПИ; 2005:379.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Борис Петрович Куликов, д.х.н., ведущий научный сотрудник кафедры «Общая металлургия», Сибирский федеральный университет
ORCID: 0009-0004-5881-8515
E-mail: Kulikov-Boris@Yandex.ru

Юрий Иванович Сторожев, к.т.н., доцент, Сибирский федеральный университет
ORCID: 0009-0004-6083-8777
E-mail: albin1941@mail.ru

Александр Сергеевич Потапенко, к.т.н., доцент кафедры техносферной и экологической безопасности, Сибирский федеральный университет
ORCID: 0009-0004-5881-8515
E-mail: komvzvodt-81@mail.ru

Boris P. Kulikov, Dr. Sci. (Chem.), Leading Researcher of the Chair "General Metallurgy", Siberian Federal University
ORCID: 0009-0004-5881-8515
E-mail: Kulikov-Boris@Yandex.ru

Yurii I. Storozhev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Siberian Federal University
ORCID: 0009-0004-6083-8777
E-mail: albin1941@mail.ru

Aleksandr S. Potapenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Technosphere and Environmental Safety, Siberian Federal University
ORCID: 0009-0004-5881-8515
E-mail: komvzvodt-81@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Б. П. Куликов – разработка плана исследований, организация лабораторных и производственных испытаний, анализ литературных источников.

Ю. И. Сторожев – участие в лабораторных испытаниях, обобщение результатов лабораторных и производственных испытаний, подготовка основного текста статьи.

А. С. Потапенко – обзор информации по металлизации рудно-угольных материалов, компьютерная обработка материалов статьи.

B. P. Kulikov – development of a research plan, organization of laboratory and production tests, analysis of literary sources.

Yu. I. Storozhev – participation in laboratory tests, generalization of the results of laboratory and production tests, text preparation.

A. S. Potapenko – review of information on metallization of ore-coal materials, computer processing of the article materials.

Поступила в редакцию 27.03.2025

После доработки 17.04.2025

Принята к публикации 10.06.2025

Received 27.03.2025

Revised 17.04.2025

Accepted 10.06.2025