



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-34-39>
УДК 658.567.1

Поступила 09.05.2022
Received 09.05.2022

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА ПЫЛИ ДРОБЕОЧИСТКИ

С. Л. РОВИН, В. А. ШЕЙНЕРТ, С. В. ГРИГОРЬЕВ, Е. В. ТЕЛЕШОВА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: rovin@bntu.by

Дисперсные железосодержащие отходы составляют львиную долю твердых технологических отходов машиностроительных предприятий. Большая часть этих отходов по-прежнему вывозится и захоранивается на промышленных полигонах, при этом не только теряется значительное количество металла, но и наносится серьезный ущерб окружающей среде. В то же время современный уровень техники и технологий, в частности, разработанные белорусскими учеными технологии рециклинга дисперсных металлоотходов, позволяют эффективно и рентабельно извлекать металлы из большей части образующихся отходов. В данной статье представлены результаты исследования пыли дробеочистки отливок, образующейся в стале- и чугунолитейных цехах, и предложения по ее переработке и рециклингу содержащегося в ней металла.

Ключевые слова. Дисперсные железосодержащие отходы, машиностроительные предприятия, рециклинг, пыль дробеочистки отливок, защита окружающей среды.

Для цитирования. Ровин, С. Л. Исследование и переработка пыли дробеочистки / С. Л. Ровин, В. А. Шейнерт, С. В. Григорьев, Е. В. Телешова // *Литье и металлургия*. 2022. № 2. С. 34–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-34-39>.

RESEARCH AND PROCESSING OF SHOT BLASTING DUST

S. L. ROVIN, V. A. SHEINERT, S. V. GRIGORIEV, E. V. TELESHOVA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: rovin@bntu.by

Dispersed iron-containing waste makes up the lion's share of solid technological waste of machine-building enterprises. Most of this waste is still exported and buried in industrial landfills, while not only losing a significant amount of metal, but also causing serious damage to the environment. At the same time, the modern state of technology and technologies, in particular, technologies developed by Belarusian scientists for recycling dispersed metal waste, make it possible to efficiently and cost-effectively extract metals from most of the generated waste. This article presents the results of a study of the dust of shot-blasting cleaning of castings formed in steel and iron foundries, and proposals for its processing and recycling of the metal contained in it.

Keywords. Dispersed iron-containing waste, machine-building enterprises, recycling, dust of shot-blasting cleaning of castings, environmental protection.

For citation. Rovin S. L., Sheinert V. A., Grigoriev S. V., Teleshova E. V. Research and processing of shot blasting dust. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 34–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-34-39>.

Введение

Металлосодержащие отходы – шлаки, скрап, аспирационные пыли процессов дробеочистки и абразивной зачистки отливок, окалина термообработки отливок, шламы и стружка участков механической обработки наряду с отходами формовочных смесей являются самыми крупнотоннажными твердыми отходами литейных цехов машиностроительных предприятий. Их количество достигает 10–15% от объема производства отливок в чугунолитейных и 15–25% в сталелитейных цехах. Эти отходы представляют собой весьма разнородные материалы как по составу, так и по относительному количеству и состоянию содержащегося в них металла. Так, в скрапе магнитной сепарации формовочных смесей содержание металла составляет около 70–85%, причем на 90–95% – это металлические включения размером от 2–3 до 50–100 мм. В шлаке плавильных печей содержится от 10–15 до 25–30% металла как в виде металлических включений (60–70%), так и в виде соединений (до 30–40% железа в виде оксидов, ферритов, фаялитов и т. п.). В окалине нагревательных печей, где осуществляется термообработка отливок, железо находится в виде оксидов (в основном FeO и Fe₂O₃) и его содержание составляет около 70% [1–3].

Рециклинг этих дисперсных железосодержащих отходов в отличие от брака отливок, литниково-питающих систем, крупнокускового скрапа и сливов является весьма трудоемкой задачей, решение которой традиционными методами на имеющемся в большинстве литейных цехов оборудовании практически невозможно. Основные причины такой ситуации – разнородность образующихся отходов, большое количество примесей и нестабильность их состава, и главное непригодность традиционных плавильных агрегатов к работе на высокодисперсной шихте, тем более содержащей оксиды металла. Поэтому фактически из перечисленных отходов в производство возвращается лишь стружка и мелкий скрап и то лишь частично (около 50–60% от объемов их образования [4]), остальные отходы практически в полном объеме уходят в отвалы и вывозятся на полигоны промышленных отходов. При этом не только безвозвратно теряется от 50 до 100 кг металла на каждую тонну произведенных отливок, но и усугубляется неблагоприятная экологическая обстановка вокруг машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий. В то же время современный уровень технологий и последние разработки белорусских ученых в области малотоннажного рециклинга позволяют эффективно и рентабельно извлекать металл практически из всех перечисленных выше материалов.

Предлагаемые технологии основаны на применении ротационных наклоняющихся печей (РНП) нового поколения с управляемым составом печной атмосферы, которые позволяют вести эффективную обработку (безокислительный нагрев, твердофазное восстановление, расплавление и т. п.) дисперсных материалов с размерами частиц вплоть до 10–20 мкм практически без их предварительной подготовки (без удаления влаги, масел и других загрязнений) и брикетирования, что обеспечивает рентабельность процесса даже при небольших объемах образования металлоотходов и их значительной разнородности [5].

Это однако не означает, что все перечисленные отходы могут перерабатываться одновременно, совместно и при одинаковых режимах. Рациональный подход к их рециклингу предполагает тщательное исследование их характеристик (химического и гранулометрического состава, структуры, реологических свойств и др.), при необходимости – удаление балласта (обогащение) и выбор оптимальных режимов обработки.

В настоящей статье представлены результаты исследования и варианты организации рентабельного рециклинга металла, содержащегося в пыли дробебетной очистки чугуновых и стальных отливок. Образцы пыли отбирали в чугунолитейных и сталелитейных цехах ОАО «МТЗ», где основным процессом изготовления отливок является литье в разовые формы из единых песчано-глинистых смесей. Исследования проводили с использованием лабораторной базы, аналитического и испытательного оборудования механико-технологического факультета БНТУ.

Методы исследования и использованное аналитическое оборудование

Пробы пыли дробеочистки усредняли, затем определяли их насыпную массу. Методом сушки до постоянной массы при температуре 110 ± 5 °С определяли их влажность. Потери при прокаливании находили по потере массы навески после ее нагрева и выдержки течение 30 мин при температуре 900 °С в печи SNOL 6,7/1300. Для определения гранулометрического состава проводили сухой рассев материала на виброситах с размером ячеек от 0,05 до 2,5 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 23409.24-78 «Пески и смеси формовочные. Методы определения гранулометрического состава, модуля мелкости и среднего размера зерна песчаной основы». Разделение на магнитную и немагнитную части осуществляли с использованием постоянного магнита.

Определение элементного состава металлоотходов проводили при помощи энергодисперсионного спектрометра INCA-350. Структуру изучали на сканирующем электронном микроскопе Vega Tescan. Фазовый состав исследовали с помощью дифрактометра ДРОН-3. Металлургический выход из исследуемой пыли определяли безокислительным переплавом в графитовом тигле в лабораторной высокочастотной индукционной установке ИМ 30-8-50 (рис. 1). Плавку проводили на частотах 10 000–12 000 Гц, для предотвращения окисления на поверхность материала подавали дробленый уголь (до 3% от массы шихты), для снижения вязкости шлака использовали плавиковый шпат (до 2% от массы шихты).

Результаты исследований

Пыль дробебетной очистки отливок представляет собой смесь остатков формовочных материалов и металлической пыли, образующейся в результате разрушения дроби и абразивно-ударного воздействия на поверхность отливок (рис. 2, а).

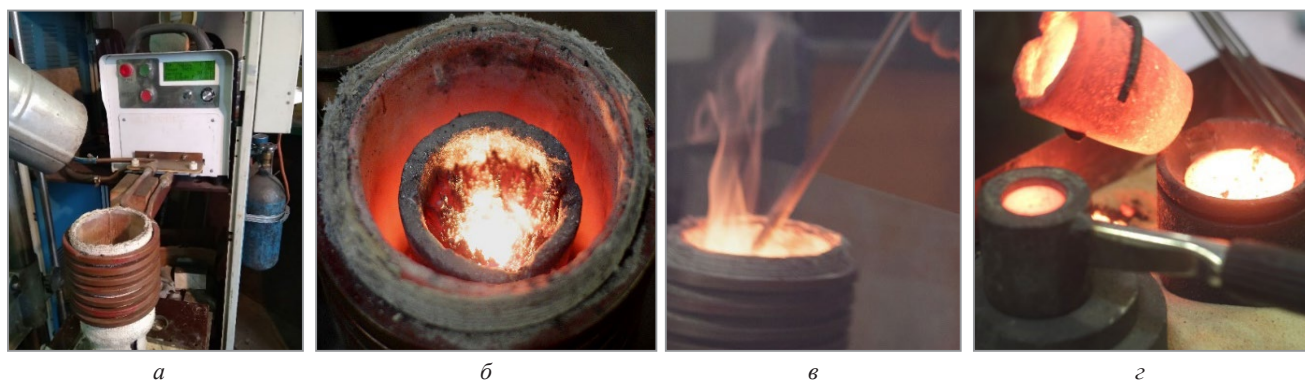


Рис. 1. Лабораторная высокочастотная индукционная установка ИМ 30-8-50:

a – общий вид установки; *б* – расплавление шихты; *в* – перемешивание расплава; *г* – разливка полученного расплава

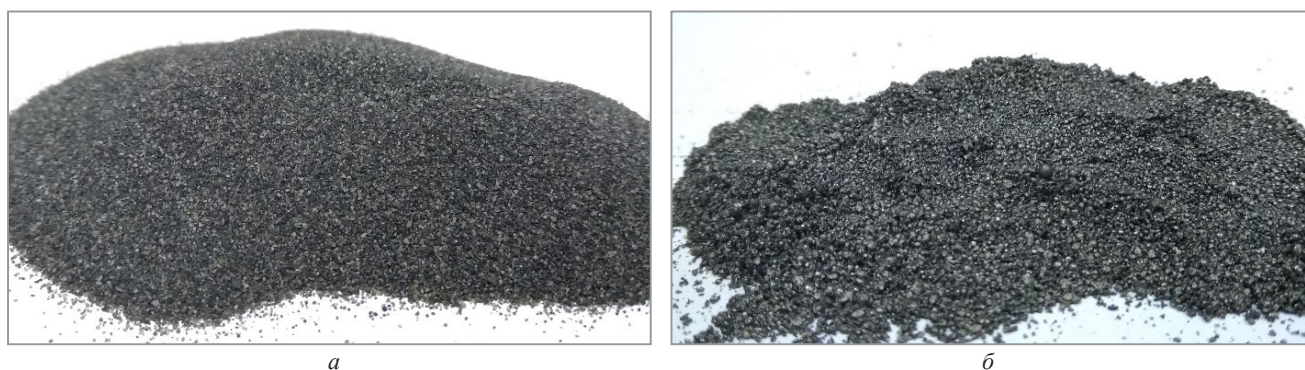


Рис. 2. Пыль дробеочистки отливок: *a* – исходная; *б* – после отделения немагнитной части

Как показали исследования фазового состава, выполненные на дифрактометре ДРОН-3, основную долю пыли дробеочистки составляют диоксид кремния (SiO_2) – около 73% и металлосодержащая пыль ($\text{Fe}_{\text{мет}}$) ~ 22%, количество прочих компонентов не превышает 5%, в том числе глинозем (Al_2O_3) ~ 3%, сажа и угольная пыль ~ 1,0–1,5%. Средняя влажность пыли составила 0,05%, потери при прокаливании – до 1%.

Ситовый анализ показал, что более 60 мас.% пыли дробеочистки составляют частицы с размерами от 0,2 до 1,0 мм. Результаты исследования гранулометрического состава пыли дробеочистки представлены на рис. 3.

Разделение пыли дробеочистки на магнитную (железосодержащую) и немагнитную части позволило отмагнитить около 50–53% материала (см. рис. 2, б). При этом насыпная плотность исходной пыли составила ~ 2050 кг/м^3 , омагниченной части – ~ 3750 кг/м^3 , а немагнитного отсева – около 1475 кг/м^3 .

Результаты структурного и элементного анализа магнитной и немагнитной частей пыли дробеочистки, выполненного с помощью электронного микроскопа Vega Tescan и энергодисперсионного спектрометра INCA-350, представлены на рис. 4, 5.

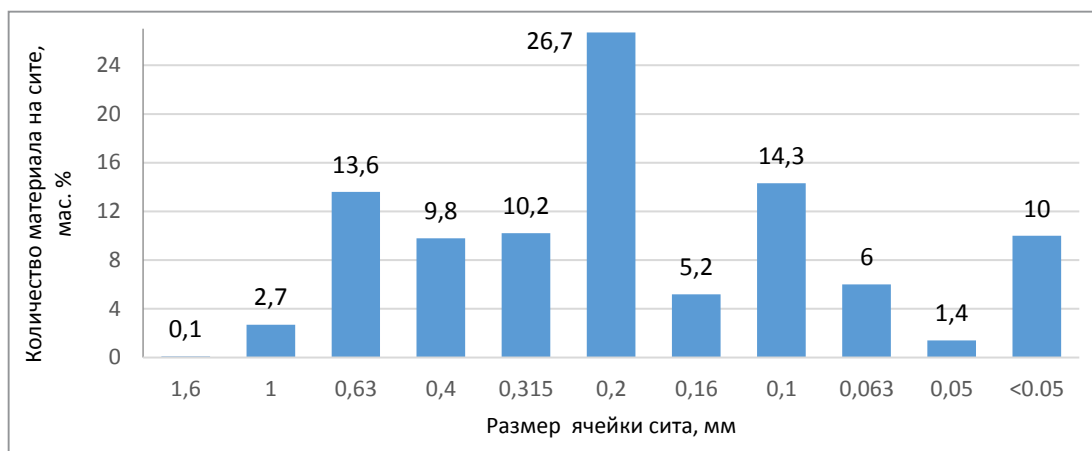


Рис. 3. Гранулометрический состав пыли дробеочистки

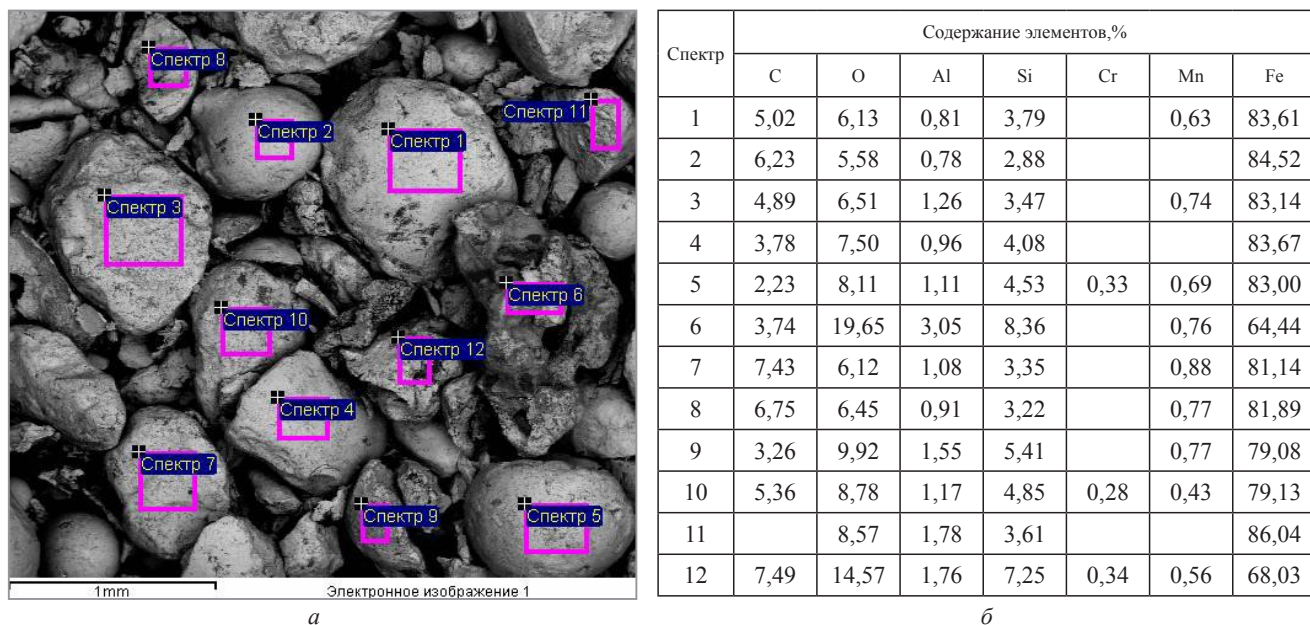


Рис. 4. Структура (а) и элементный состав частиц (б) омагниченной пыли дробеочистки

Анализ омагниченной части пыли дробеочистки показал, что наряду с частицами, которые в основном состоят из металла (частицы 1, 2, 3, 4, 5, 11, содержащие более 83 % железа), присутствуют частицы, где содержание железа ниже 70 % (частицы 6, 12), это может говорить о том, что железо в них присутствует в основном в виде оксидов. Причем следует отметить, что частиц с низким содержанием железа больше среди элементов с размерами меньше 0,2 мм. Такой вывод подтвердили и дальнейшие исследования фазового состава пыли, разделенной на магнитную и немагнитную части, и определение металлургического выхода, проведенное на различных фракциях омагниченного материала. Усредненный элементный состав пыли дробеочистки после омагничивания приведен ниже.

Наименование	Содержание элементов, %										
	O	Si	Fe	Mn	Al	S	P	C	Cr	Cu	Прочее
Пыль дробеочистки (магнитная часть)	7,72	4,4	80,8	0,75	1,62	0,12	0,09	3,6	0,3	0,1	≤ 0,5

Размеры частиц немагнитной части пыли дробеочистки заметно меньше частиц, составляющих магнитную часть материала, при этом частицы с высоким содержанием железа среди них встречаются крайне редко (около 5–6%), в тех же частицах, где железо обнаруживается, его содержание не превышает 20–30% (рис. 5).

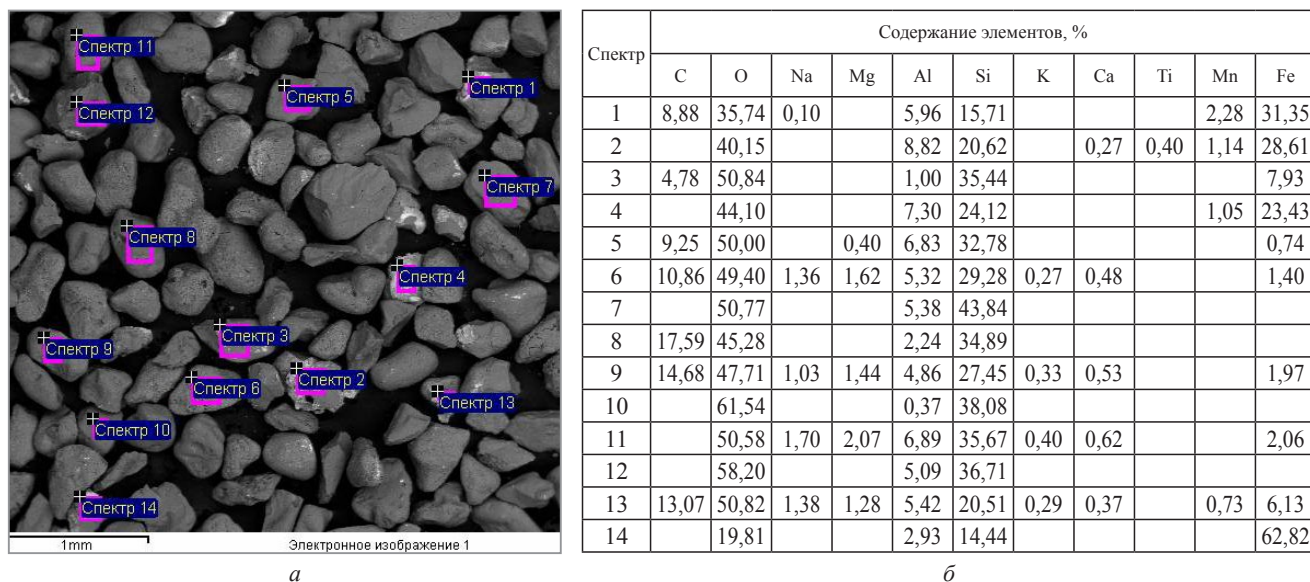


Рис. 5. Структура (а) и элементный состав частиц (б) немагнитной части пыли дробеочистки

Для оценки распределения железосодержащей части пыли по фракциям было выполнено ее омагничивание на наиболее характерных ситах: 0,315+; 0,2; 0,2- (рис. 6.). Из полученных данных следует, что самое большое количество магнитных частиц имеет размеры $\geq 0,315$ мм: почти 93% материала этой фракции хорошо магнитится, что составляет около 67% от общего количества омагничиваемой пыли дробеочистки.

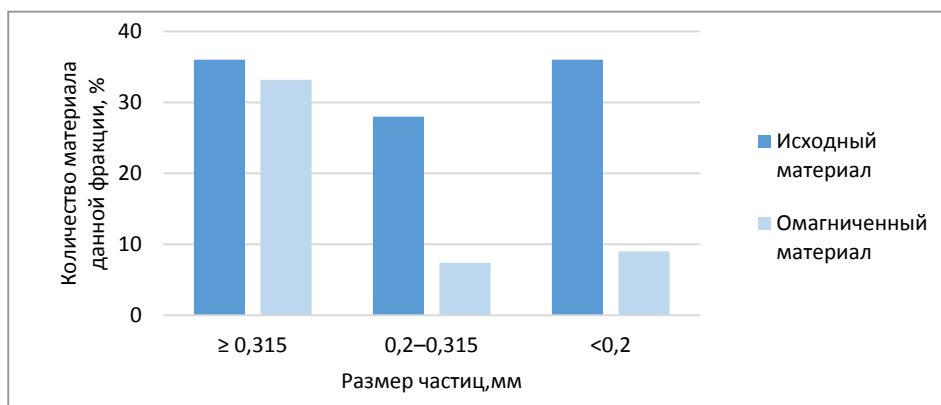


Рис. 6. Распределение омагничиваемой части пыли дробеочистки по фракциям

Как показал фазовый анализ, основной составляющей немагнитной части пыли дробеочистки является SiO_2 (до 90–93%). В омагниченной части пыли железа ($\text{Fe}_{\text{общ}}$) составляет 75% и более, при этом его состояние сильно отличается в зависимости от фракции: в материале с размером частиц $\geq 0,315$ мм – это в основном металл, в зависимости от материала применяемой дробы либо чугун, либо сталь; в материале с размером частиц менее 0,2 мм – в основном оксиды железа (FeO и Fe_2O_3). Это соответствует данным спектрального анализа отдельных частиц материала (см. рис. 4).

При переплаве омагниченной части пыли с размером частиц $\geq 0,315$ мм в лабораторной высокочастотной установке металлургический выход составил около 92%, при переплаве омагниченного материала с размером частиц менее 0,315 мм – около 32%. Полученные результаты хорошо коррелируются с данными фазового анализа.

Выводы

Исследования показали, что наиболее рациональной схемой рециклинга пыли дробеочистки отливок является следующая: сбор пыли (желательно отдельный, в зависимости от используемой дробы); отсев фракции с размером частиц $\geq 0,315$ мм; омагничивание этой фракции; переплав полученной омагниченной части пыли в РНП; доводка полученного в РНП расплава в имеющихся электроплавильных печах (наиболее рациональным вариантом является использование индукционных тигельных или канальных миксеров) – дуплекс-процесс.

Процесс плавки дисперсных металлических отходов в РНП включает в себя загрузку исходных материалов – металлотов, восстановителя (кокшик, отсев угля, антрацита и т. п.) до 4–6% и флюсов (известняк, доломит) – около 5–6% от массы металлотов; безокислительный нагрев (при сжигании топлива с недостатком окислителя в присутствии твердого восстановителя) до температуры 1100–1200 °С; расплавление шихты путем повышения температуры за счет обогащения дутья кислородом (до 27–28%); выдержку расплава до прекращения кипа, скачивание шлака и слив расплава в передаточный ковш. Весь процесс плавки дисперсных металлических отходов занимает в РНП не более 40–45 мин, при этом угар металла не превышает 1,5–2,5%, включая потери с шлаком [6].

Реализация представленной выше схемы рециклинга пыли дробеочистки чугуна и стального литья на Минском тракторном заводе, где ежегодно образуется около 3000 т таких отходов, позволит предприятию получить дополнительно около 500 т металла при снижении его себестоимости не менее чем в 4 раза.

Внедрение технологий малотоннажного рециклинга дисперсных металлоотходов с применением ротационных наклоняющихся печей позволит значительно глубже перерабатывать отходы такого рода, дополнительно возвращая в производство до 100 кг металла на каждую тонну произведенных отливок, и на 20–30% снизить общее количество вывозимых из литейных цехов твердых отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кабанов, Ю. А.** Извлечение и подготовка к использованию скрапа из отвальных сталеплавильных шлаков / Ю. А. Кабанов, О. А. Столярский, Е. Н. Агапеев // *Металлург*. 2006. № 1. С. 80–81.
2. **Сафронов, Н. Н.** Основы теории и технологии утилизации дисперсных отходов машиностроения в производстве фасонных отливок из черных металлов: Автореф. дис. ... д-р техн. наук. М., 2000. 32 с.
3. **Урбанович, Н. И.** Анализ состава и технологий переработки дисперсных железосодержащих отходов / Н. И. Урбанович, С. В. Корнеев, В. И. Волосатиков, Д. О. Комаров // *Литье и металлургия*. 2021. № 4. С. 66–69.
4. **Дьяконов, О. М.** Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов / О. М. Дьяконов. Минск: Технология, 2012. 262 с.
5. **Ровин, С. Л.** Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С. Л. Ровин. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
6. **Ровин, С. Л.** Применение ротационных печей для плавки черных сплавов / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, И. С. Насевич // *Литье и металлургия*. 2020. № 1. С. 9–13.

REFERENCES

1. **Kabanov Y.A., Stolyarskij O.A., Agapeev E.N.** Izvlechenie i podgotovka k ispol'zovaniyu skrapa iz otval'ny'x staleplavil'ny'x shlakov [Extraction and preparation for use of scrap from dump steelmaking slags] *Metallurg = Metallurgist*, 2006, no. 1, pp. 80–81.
2. **Safronov N.N.** *Osnovy teorii i tekhnologii utilizacii dispersnyh othodov mashinostroeniya v proizvodstve fasonnyh otlivok iz chernyh metallov. Diss. dokt. tehn. nauk* [Fundamentals of the theory and technology of utilization of dispersed mechanical engineering waste in the production of shaped castings from ferrous metals. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2000, 32 p.
3. **Urbanovich N.I., Korneev S.V., Volosatikov V.I., Komarov D.O.** Analiz sostava i texnologij pererabotki dispersny'x zhelezosoderzhashhix othodov [Analysis of the composition and processing technologies of dispersed iron-containing waste] *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 66–69.
4. **D'yakonov O.M.** *Kompleksnaya pererabotka struzhki i metallosoderzhashhix shlamov* [Complex processing of chips and metal-containing slurries]. Minsk, Tekhnologiya Publ., 2012, 262 p.
5. **Rovin S.L.** *Recikling metallootxodov v rotacionnyh pechah* [Recycling of metal waste in rotary kilns]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 382 p.
6. **Rovin S.L., Rovin L.E., Nasevich I.S.** Primenenye rotacionnyh pechej dlja plavki chernyh splavov [Analysis of the composition and processing technologies of dispersed iron-containing waste] *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 9–13.