

УДК 669.054.82

Айкашев А.В., Панишев Н.В., Махоткина Е.С.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы):** в статье описана существующая технология переработки металлургических шлаков в условиях металлургического комбината полного цикла. Представлены характерные особенности технологии. Оценена эффективность переработки металлургических шлаков. **Цель работы:** повышение эффективности переработки металлургических шлаков в условиях интегрированного металлургического комбината. **Используемые методы:** метод оценки эффективности переработки металлургических шлаков, основанный на данных об объемах полученных магнитных фракций и экономии исходного сырья за счет возврата магнитных фракций в металлургический цикл. **Новизна:** к элементам новизны относится метод оценки эффективности переработки металлургических шлаков, выраженный в экономии сырья для производства чугуна и стали за счет полученных металлосодержащих фракций из шлака. **Результат:** в анализе представлены данные по экономии сырья в агломерационном, доменном, кислородно-конвертерном и электросталеплавильном производствах за счет возврата металлосодержащих фракций. Предложенный метод оценки эффективности переработки металлургических шлаков позволил оценить эффект от переработки шлаков без учета изменяющейся стоимости сырья. **Практическая значимость:** получены исходные данные для оценки экономической эффективности и путей её повышения при переработке металлургических шлаков.

**Ключевые слова:** доменный шлак, шлак кислородно-конвертерного производства, электросталеплавильный шлак, грануляция шлака, вторичная переработка, шлаковый отвал, рекультивация.

## Введение

В условиях дефицита местного железорудного сырья, а также решения экологических проблем [1-16], связанных с размещением отходов металлургического производства, весь объем шлаков текущего производства и часть отвальных шлаков подвергаются переработке (табл. 1).

Таблица 1

Вид и объемы перерабатываемых шлаков

Вид шлака	Масса переработанных шлаков, тыс. т	
	2018	2019
Доменный текущий шлак	3267	3531
Конвертерный текущий шлак	1782	1792
Текущий шлак двухвального сталеплавильного агрегата (ДСА)	165	182
Электросталеплавильный (ДСП) текущий шлак	333	293
Отвальный шлак 1-й очереди	1600	1000
Отвальный шлак 2-й очереди (доменный)	3978	4081
Отвальный шлак 3-й очереди (мартеновский)	1800	1114

Эффективность переработки металлургических шлаков можно оценить по объемам переработанных шлаков, указанных в табл. 1. При этом данный метод не позволяет оценить экономическую эффективность процесса переработки шлаков.

В данном случае переработка металлургических шлаков заключается в следующем. Огненно-жидкий

доменный шлак подвергается грануляции, а твердые остатки вместе с отвальными шлаками после дробления перерабатываются в шлаковый щебень различных фракций. Сталеплавильные шлаки вместе с отвальными мартеновскими шлаками после дробления и грохочения подвергаются магнитной сепарации на установках переработки металлургических шлаков фирм ROXON и АМСОМ. Магнитные фракции возвращаются в металлургическое производство. Пустая порода и нереализованный гранулированный шлак и шлаковый щебень отправляются на рекультивацию отработанных карьеров.

Производство товарной продукции из шлаков представлено в табл. 2.

Таблица 2

Выход товарной продукции из шлаков

Вид продукции	Масса, тыс. т		Содержание железа, %	
	2018	2019	2018	2019
Магнитная фракция 0-10 мм	430	358	47,4	46,23
Магнитная фракция 10-50 мм	151	136	67,5	66,4
Магнитная фракция 50-350 мм	161	120	50-60	50-60
Магнитная фракция +350 мм	115	159	50-60	50-60
Гранулированный шлак	1300	1323	-	-
Шлаковый щебень	948	943	-	-

Магнитная фракция размером 0-10 мм направляется в агломерационное производство, где заменяет часть аглоруды. Магнитная фракция 10-50 мм используется в доменном производстве в качестве доменно-

го присада. Магнитную фракцию 50-350 мм применяют в кислородно-конвертерном производстве, а фракцию +350 – в электросталеплавильном производстве. Здесь магнитные фракции заменяют часть металлорома при выплавке стали.

### Оценка эффективности переработки металлургических шлаков

Процент извлечения железа оценивался как отношение массы железа в полученной фракции к массе железа в исходном сырье.

Эффективность извлечения Fe в магнитные фракции оценивалась по формуле Ханкокка—Луйксна [1]:

$$\eta = \frac{\varepsilon - \gamma_k}{100 - \alpha} 100, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – процент извлечения Fe из исходного сырья;  
 $\gamma_k$  – доля полученной фракции из исходного сырья;  
 $\alpha$  – содержание Fe в исходном сырье.

Эффективность извлечения железа, рассчитанная по формуле и усредненная по всем фракциям, невысока и составила 19,4 %.

Для оценки эффективности переработки металлургических шлаков необходимо знать объемы произведенных магнитных фракций из шлаков и процент содержания железа в них (табл. 2), а также процент содержания железа в исходном сырье для агломерационного, доменного, кислородно-конвертерного и электросталеплавильного производств соответственно. Это необходимо для того, чтобы по балансу железа оценить экономию исходного сырья за счет возврата металлосодержащих фракций в эти производства.

Используя среднее содержание железа (64%) в концентрате, который используется в агломерационном производстве, и данные по фракции 0–10 мм, которая возвращается в это же производство, по балансу железа производится расчет экономии типичного железорудного концентрата за счет магнитной фракции 0–10 мм. Так, например, в 2018 году утилизация магнитной фракции 0-10 мм в агломерационном производстве позволила снизить закупку концентрата на  $430 \cdot 0,474 / 0,64 = 318,5$  тыс. т. Аналогичным образом оценивается экономия окатышей (содержание железа 63%) для доменного производства за счет фракции 10-50 мм и экономия металлорома для кислородно-конвертерного и электросталеплавильного производств (принимая содержание железа в металлороме 95%) за счет фракций 50–350 и +350 мм соответственно.

Таким образом, извлечение магнитной фракции из металлургических шлаков и возврат ее в производство чугуна и стали в 2018 году оценивается следующим образом. Утилизация магнитной фракции 0–10 мм в агломерационном производстве позволила снизить закупку железорудного концентрата на 318,5 тыс. т, а использование магнитной фракции 10–50 мм

в доменной шихте снизило потребление окатышей на 162 тыс. т. Использование магнитных фракций 50–350 мм в металлосихте кислородно-конвертерного производства позволило снизить расход металлорома на 93,2 тыс. т, а фракции +350 мм в электросталеплавильном производстве – на 66,6 тыс. т. В 2019 году утилизация магнитной фракции 0–10 мм в агломерационном производстве позволила снизить закупку железорудного концентрата на 258,4 тыс. т, а использование магнитной фракции 10–50 мм в доменной шихте снизило потребление окатышей на 143,3 тыс. т. Использование магнитных фракций 50–350 мм в металлосихте кислородно-конвертерного производства позволило снизить расход металлорома на 69,5 тыс. т, а фракции +350 мм в электросталеплавильном производстве – на 92 тыс. т.

### Возможное повышение эффективности переработки шлаков

Качественными показателями работы установок по переработке металлургических шлаков является содержание железа в металлосодержащих фракциях 0-10 и 10–50 мм. Причем общее содержание железа складывается из содержания как его металлической фазы (корольки, дисперсное железо и т. д.), так и оксидной (шлаковые включения). Фактическая доля шлаковых включений в металлосодержащих фракциях 0–10 мм и 10–50 мм высока и составляет 30–50%.

Среднее содержание общего железа в данных фракциях за 2018 и 2019 годы представлено соответственно в табл. 3.

Таблица 3

Среднее содержание железа в металлосодержащих фракциях

Размер фракции, мм	Содержание Fe в фракциях по установкам, %	
	2018	2019
0-10	47,2	46,8
10-50	67,5	67,1

Содержание железа в фракциях 0–10 и 10–50 мм в 2018 и 2019 годах соответствовали плановым значениям, что подтверждает эффективность работы установок по переработке металлургических шлаков по данным показателям.

Однако, в немагнитных фракциях 0–10 и 10–50 мм остаётся значительное количество железа – 21–24% (в основном в оксидной форме). Из-за этого извлечение железа в магнитную фракцию не превышает 25%, поэтому целесообразным является дополнительная обработка немагнитных фракций с целью доизвлечения железа.

Следует отметить, что магнитная фракция 50–350 мм перерабатывается в сталеплавильном производстве с серьезными проблемами. В конвертерном производстве замена лома на этот материал серьезно

и труднопредсказуемо изменяет тепловой продукт плавки, а при заливке чугуна бывают выбросы из конвертера. В дуговой сталеплавильной печи применение такого сильнозашлакованного материала затрудняет поддержание устойчивых электрических дуг и регулирование электрического режима. Ввиду этого возникает предложение по дополнительному дроблению, переводу этого материала во фракцию 10–50 мм и использованию его в доменном производстве.

### Заключение

1. Результаты расчетов эффективности переработки металлургических шлаков на металлургическом комбинате полного цикла позволили:

– оценить объемы сэкономленного железосодержащего сырья для агломерационного, доменного, кислородно-конвертерного и электросталеплавильного производств;

– сделать оценку экономической эффективности от реализации готовой продукции в виде гранулированного шлака и шлакового щебня, полученных при переработке металлургических шлаков.

2. С целью повышения извлечения железа при переработке шлаков предложено увеличить производство магнитной фракции 10–50 мм, содержащей не менее 64% Fe, исключив выход фракции 50–350 мм.

3. Выявлено, что общее извлечение железа по действующей технологии в среднем не достигает 20%. При этом в немагнитных фракциях 10–50 и 0–10 мм высокое содержание железа – 21–24%, поэтому необходимо подвергнуть эти материалы повторной магнитной сепарации.

### Список литературы

1. Утилизация отходов металлургического производства: монография / Н.В. Панишев, В.А. Бигеев, М.В. Потапова, И.В. Макарова, Т.О. Гаврилова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 69 с.
2. Калабин Г.В. Исследование техногенного воздействия железорудных карьеров европейской части России на окружающую среду // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. № 12. С. 8–13.
3. Цыганков Д.А. Экологические проблемы утилизации отходов разработки и обогащения железной руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 5. С. 160–164.
4. Analysis of the accumulation and influence of metallurgical slag to the environment / V. Bondarenko, O. Filonenko, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine PJSC «Ilyich Iron and Steel Works» Coll.res.pap.nat.min.univ. 2020, 1:78. 93 p.
5. Славиковская Ю.О. Техногенные пустоты недр как источник негативного воздействия на окружающую среду предприятий горнопромышленного комплекса // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: труды VIII Международной конференции. Екатеринбург, 2020. С. 275–279.
6. Систематизация методов переработки отходов горно-металлургического комплекса / С.И. Иванков, Л.Я. Шубов, К.Д. Скобелев // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2020. № 6. С. 2–93.
7. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Химическая переработка отходов обогащения титаномагнетитовых руд Кусинского месторождения // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2018. Т. 9. № 2. С. 71–73.
8. Разработка технологии переработки хвостов Кусинских титаномагнетитовых руд с извлечением титана и ванадия / В.А. Бигеев, И.А. Гришин, М.В. Потапова, Е.В. Соколова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. С. 93.
9. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Industrial, Ecological And Resource-Efficient Aspects Of Vanadium Production And Use Of Technogenic Vanadium Sources // SolidStatePhenomena. 2017. Т. 265. С. 994–998.
10. Возможность получения силикомарганца из уральских марганцевых руд / В.А. Бигеев, М.В. Потапова, А.А. Фахрисламов, У.Д. Лунев // Современные достижения университетских научных школ: сборник докладов национальной научной школы-конференции (19–20 ноября 2020 г., г. Магнитогорск). Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. С. 16–19.
11. Исследование технологии переработки титаномагнетитовых руд Суоямского месторождения / М.В. Потапова, В.А. Бигеев, А.С. Харченко, М.Г. Потапов, Е.В. Соколова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 3–4. С. 225–230.
12. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Рециклинг ванадийсодержащих отходов // Теория и технология металлургического производства. 2016. № 2 (19). С. 71–74.
13. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Извлечение ванадия из рудного и техногенного сырья Кусинского месторождения титаномагнетитов // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 3 (22). С. 22–25.
14. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Экологические и ресурсосберегающие аспекты использования техногенного ванадийсодержащего сырья // Черная металлургия. 2018. №3 (1419). С. 81–86.
15. Сравнительный анализ результатов химического извлечения ванадия из хвостов и концентрата титаномагнетитовых руд Урала / М.В. Шубина, Е.С. Махоткина // Черная металлургия. Бюлле-

ть научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 5. С. 496-502.

16. Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Nekrasov I.V., Egizaryan D.K., Metelkin A.A., Shevchenko O.I. Issues of utilization of refining slags of

steelmaking production: A monograph. Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Eltsin, Nizhny Tagil Institute of Technology (branch), 2017. 208 p.

#### Сведения об авторах

**Айкашев Алексей Вячеславович** – аспирант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: alekseyaikashev@mail.ru

**Панишев Николай Васильевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Махоткина Елена Станиславовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: lena.makhotkina@yandex.ru

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### EFFICIENCY OF PROCESSING METALLURGICAL SLAGS

**Aikashev Alexey V.** – Postgraduate Student of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: alekseyaikashev@mail.ru

**Panishv Nikolay V.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

**Makhotkina Elena S.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lena.makhotkina@yandex.ru

**Annotation. Problem statement (relevance of the work):** the article describes the existing technology of processing metallurgical slags in the production conditions. The characteristic features of the technology are presented. The efficiency of metallurgical slag processing is evaluated. **The purpose of the work:** to evaluate the efficiency of processing metallurgical slags in 2018 and 2019. **Methods used:** a method for evaluating the efficiency of metallurgical slag processing through the volumes of obtained magnetic fractions at metallurgical slag processing plants and saving raw materials for the production to the return of magnetic fractions to the metallurgical cycle. **Novelty:** the novelty elements include a method for evaluating the efficiency of metallurgical slag processing, expressed in saving raw materials for the production of cast iron and steel to the metal-containing fractions obtained from slag. **Result:** the article provides an assessment of the efficiency of metallurgical slag processing in 2018 and 2019. The analysis presents the savings of raw materials for agglomeration, blast furnace, oxygen converter and electric steelmaking productions to the return of metal-containing fractions obtained from slag to these productions. The proposed method for evaluating the efficiency of metallurgical slag processing allowed us to evaluate the effect of slag processing without taking into account the changing cost of raw materials. **Practical significance:** initial data have been obtained to assess the economic efficiency of metallurgical slag processing.

**Keywords:** blast furnace slag, oxygen converter production slag, electric steelmaking slag, slag granulation, recycling, slag dump, reclamation.

---

Ссылка на статью:

Айкашев А.В., Панишев Н.В., Махоткина Е.С. Эффективность переработки металлургических шлаков // Теория и технология металлургического производства. 2021. №4(39). С. 9-12.

Aikashev A.V., Panishev N.V., Makhotkina E.S. Efficiency of processing metallurgical slags. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 39, no. 4, pp. 9-12.