



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-28-34>
УДК 658.567.1

Поступила 22.08.2025
Received 22.08.2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ МЕДЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ

С.Л. РОВИН, Алмалыкский филиал МИСиС, г. Алмалык, Узбекистан, пр. А. Тимура, 56.

E-mail: rovinsl@mail.ru

Ш.А. САЙДУЛЛАЕВ, АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат»,
г. Алмалык, Узбекистан, пр. А. Тимура, 53А

В статье представлены результаты лабораторных исследований железосодержащих отвалов, образующихся и накапливающихся в результате флотационного обогащения медеплавильных шлаков на Алмалыкском горно-металлургическом комбинате. Помимо элементного, фазового и гранулометрического состава материала исследовали возможность его твердофазного восстановления углеродом, определяли скорость восстановления при разных температурах и необходимое соотношение восстановителя и шлака, обеспечивающее полную металлизацию содержащегося в шлаке железа. Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что медеплавильные шлаки вполне можно рассматривать как перспективный источник железосодержащего сырья для производства metallизированных железных окатышей или брикетов для электрометаллургических предприятий, особенно в тех регионах, где нет собственных месторождений железной руды или запасы ее недостаточны.

Ключевые слова. Медеплавильные шлаки, твердофазное восстановление, фаялит, оксиды железа, графит, metallизация, восстановленное железо.

Для цитирования. Ровин, С.Л. Исследование твердофазного восстановления железа из медеплавильных шлаков / С.Л. Ровин, Ш.А. Сайдуллаев // Литье и металлургия. 2025. № 4. С. 28–34. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-28-34>.

STUDY OF SOLID-STATE REDUCTION OF IRON FROM COPPER SMELTING SLAGS

S. L. ROVIN, Almalyk branch of MISiS, Almalyk, Uzbekistan. Almalyk, Uzbekistan, 56, Amur Temur ave.

E-mail: rovinsl@mail.ru

Sh. A. SAYDULLAEV, JSC “Almalyk MMC”, Almalyk, Uzbekistan, 53A, Amur Temur ave.

This article presents the results of laboratory studies on iron-containing waste generated and accumulated as a result of flotation processing of copper smelting slags at the Almalyk Mining and Metallurgical Complex. In addition to analyzing the elemental, phase, and particle size composition of the material, the study explored the possibility of its solid-state reduction using carbon. The reduction rate at different temperatures and the required ratio of reductant to slag to achieve complete metallization of the iron contained in the slag were determined. The results of the study suggest that copper smelting slags can be considered a promising source of iron-containing raw material for the production of metallized iron pellets or briquettes for electric steel-making plants, especially in regions lacking their own iron ore deposits or where such resources are insufficient.

Keywords. Copper smelting slags, solid-state reduction, fayalite, iron oxides, graphite, metallization, reduced iron.

For citation. Rovin S. L., Saydullaev Sh. A. Study of solid-state reduction of iron from copper smelting slags. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 4, pp. 28–34. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-28-34>.

Введение

По данным Всемирной ассоциации стали (World Steel Association), мировой объем производства стали в 2024 г. составил 1,885 млрд. т, и хотя это несколько ниже рекордного 2021 г., когда было получено 1,963 млрд. т стали, но значительно (на 16%) больше, чем производилось 10 лет назад (в 2015 г. выплавлено 1,626 млрд. т) [1]. В целом же за последние 50 лет производство стали в мире увеличилось в 3 раза и, по оценкам экспертов, в ближайшее десятилетие заметного сокращения этих объемов не предвидится. При этом в отрасли ощущается нарастающий дефицит железосодержащего сырья и постоянно растет его стоимость. Особенно остро этот вопрос стоит перед электрометаллургическими комбинатами, которые из-за хронической нехватки металлолома вынуждены наращивать в металлизавалке долю первичных

шихтовых материалов, таких, как металлизированные окатыши, горячебрикетированное железо и доменный чугун. Эта ситуация, а также ужесточение экологических требований и глобальная задача по построению безотходной циркулярной (замкнутой) мировой экономики заставляют все более пристально обращать внимание на переработку и использование железосодержащих техногенных отходов.

С этой точки зрения, помимо собственных отходов, образующихся в черной металлургии (стальеплавильном и сталепрокатном производстве), большой интерес представляют шлаки медеплавильных комбинатов. По оценке специалистов с учетом нынешних объемов мирового производства меди (по данным Международной исследовательской группы по меди – International Copper Study Group, в 2023 г. произведено 26,5 млн. т рафинированной меди), ежегодно образуется около 100 млн. т медеплавильных шлаков [2]. В их составе в основном в виде фаялита и оксидов находится около 30–40% железа, а также 0,5–1,5% меди, 1,5–2,5% цинка и другие ценные компоненты, что, безусловно, делает их не только отходами, но и потенциально ценным сырьевым материалом [3–5]. В то же время их захоронение в отвалах предприятий и на промышленных полигонах оказывает чрезвычайно негативное влияние на окружающую среду: приводит к изъятию из хозяйственного оборота больших площадей, нарушению почвенного слоя, деградации природных ландшафтов, загрязнению подземных водоносных горизонтов и поверхностных водотоков тяжелыми металлами и солями [3, 6]. Сегодня медные шлаки уже частично используются в качестве добавок при производстве цементного клинкера, в качестве наполнителей и балласта, при производстве абразивных материалов, стекла, кровельных материалов, в дорожном строительстве и др. [3, 5]. Однако такое применение не может полностью решить проблему утилизации медных шлаков и приводит к потере входящих в их состав металлов, в первую очередь железа.

Методика и результаты лабораторных исследований

В представленной работе ставилась задача исследовать материалы, образующиеся в результате флотационного обогащения медеплавильных шлаков на Алмалыкском горно-металлургическом комбинате (АГМК), и оценить возможность извлечения железа из этих материалов в результате твердофазного восстановления углеродом.

Сегодня объемы образования таких шлаков на АГМК составляют около 700 тыс. т в год и, по оценкам специалистов, в отвалах комбината их скопилось уже более 13 млн. т [7]. В настоящее время на АГМК реализуется крупнейший в центральной Азии инвестиционный проект, предусматривающий строительство и ввод в эксплуатацию трех новых меднообогатительных фабрик и увеличение в 2,5 раза медеплавильных мощностей, что позволит к 2030 г. выйти на выпуск 400 тыс. т катодной меди в год. Соответственно более чем в 2 раза – до 1,5 млн. т в год увеличится образование железосодержащих флотационно обогащенных медеплавильных шлаков. Такое количество при условии эффективного извлечения из них железа позволяет рассматривать образующиеся отходы как альтернативный источник, способный внести существенный вклад в обеспечение сырьем быстро растущих объемов производства стали в Узбекистане.

Внешне исследованный материал представляет собой однородный тонкодисперсный порошок серого цвета (рис. 1). Он легко и практически полностью магнитится. Влажность материала находится в пределах 3,0–4,0%, потери при прокаливании составляют не более 0,1–0,2%, размер частиц лежит в диапазоне от 3–5 мкм до 0,1 мм, при этом остаток на сите с ячейками 0,063 мм составляет не более 10%.



Рис. 1. Образец материала из отвалов флотационного обогащения медеплавильных шлаков

Усредненное содержание основных элементов в представительной пробе материала, определенное с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра, приведено в табл. 1. Из результатов анализа видно, что основными элементами в составе медного шлака являются железо и кремний, кроме них заметное количество алюминия, кальция, магния и цинка. Значительное содержание кислорода говорит о том, что практически все элементы находятся в форме оксидов и других кислородсодержащих соединений, что подтвердил и фазовый анализ.

Таблица 1. Усредненный элементный состав медеплавильных шлаков АГМК

Содержание, мас. %												
Cu	Mo	S	Si	Al	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe _{общ}	P	Прочие	O*
0,48	0,10	0,68	20,53	4,82	1,53	1,02	0,31	0,96	32,53	0,04	< 0,2	36,80

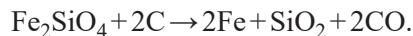
* Содержание кислорода определяли по разности.

Фазовый анализ выполняли с помощью рентгеновского дифрактометра. Он показал, что железо в медеплавильном шлаке находится в основном в виде фаялита Fe_2SiO_4 – до 80 % от общего содержания, около 15–16 % – в виде гематита Fe_2O_3 , остальное – в виде оксидов FeO , Fe_3O_4 и более сложных соединений (например, в виде пироксена $CaO \cdot FeO \cdot 2SiO_2$). Кремний, помимо того, что входит в состав фаялита, содержится также в виде SiO_2 (вторая по относительному количеству после фаялита фаза в шлаке), а также в виде силикатов кальция ($CaSiO_3$), магния (Mg_2SiO_4) и др. Кроме кислородсодержащих соединений, в составе шлака присутствуют также соединения серы, в основном сульфиды FeS , Cu_2S , CaS и некоторые другие (например, $CuFeS_2$). Относительное количество основных фаз в составе шлака приведено в табл. 2.

Таблица 2. Фазовый состав исследованной пробы медеплавильного шлака

Содержание, мас. %												
Fe_2SiO_4	SiO_2	Fe_2O_3	Fe_3O_4	$CaFeSi_2O_6$	$CaSiO_3$	$CuFeS_2$	FeS	$CaAl_2Si_2O_8$	Al_2O_3	CaO	MgO	Прочие
47,4	25,8	7,4	1,3	1,7	1,6	0,5	0,3	2,1	3,7	0,7	0,5	7,0

Исследования твердофазного восстановления медеплавильного шлака углеродом осуществляли в лабораторных условиях путем нагрева смеси шлака с графитом в алюндовых тиглях, помещенных в муфельную печь Nabertherm с регулируемым нагревом до 1600 °C. Перед восстановлением шлак просушивали до постоянной массы при температуре 110 ± 5 °C. В процессе исследования определяли скорость восстановления при различных температурах (от 800 до 1200 °C), а также оптимальное соотношение восстановителя и шлака – минимально достаточное для обеспечения полной металлизации содержащегося в шлаке железа. Навеску шлака массой ~65 г смешивали с графитом из расчета, чтобы количество углерода соответствовало стехиометрически необходимому +10 и +30 %. Для фаялита требуемое для восстановления железа количество углерода может быть определено по атомарным массам слагаемых из следующей химической реакции:



При определении требуемого количества графита учитывали также необходимость компенсации потерь углерода на газификацию и восстановление оксидов, которые могут восстанавливаться параллельно оксидам железа при тех же температурах (например, оксидов меди и цинка). Кроме того, учитывали истинное содержание углерода в графите (оно составляло 92,7 %). Исходя из составов использовавшихся материалов, количество графита, добавляемого к навескам шлака, составляло 7,3 и 8,7 % соответственно. Усредненные результаты проведенных исследований приведены в табл. 3.

Процесс восстановления контролировали по убыли массы, взвешивание образцов осуществляли на аналитических весах с пределом взвешивания до 500 г и точностью определения массы ± 1 мг. Для снижения потерь на газификацию тигли во время выдержки в печи закрывали асбокартоном. На каждый режим восстановления устанавливали по две параллельные пробы. Если потери массы на двух параллельных пробах отличались более чем на 5 %, эксперимент повторяли еще на двух образцах.

Таблица 3. Усредненные результаты восстановления железа из образцов медеплавильных шлаков АГМК

Номер эксперимента	Температура, °C	Избыток углерода, %	Время, мин	Масса образца, г		Потеря массы образца		Металлизация, % (расчетное значение)
				до восстановления	после восстановления	г	%	
1	800	10	20	70,235	69,485	0,750	1,068	7,3
2	800	10	40	70,130	69,135	0,995	1,419	9,7
3	800	10	60	72,790	71,650	1,140	1,566	10,8
4	800	30	20	70,740	70,170	0,570	0,806	5,7
5	800	30	40	70,045	69,105	0,940	1,342	9,4
6	800	30	60	71,445	70,255	1,190	1,666	11,7
7	900	10	20	71,210	70,670	0,540	0,758	5,2
8	900	10	40	72,325	71,290	1,035	1,431	9,8
9	900	10	60	72,585	71,435	1,150	1,584	10,9
10	900	30	20	70,155	69,645	0,510	0,727	5,1
11	900	30	40	71,860	70,775	1,085	1,510	10,6
12	900	30	60	70,400	68,835	1,565	2,223	15,6
13	1000	10	20	71,135	69,870	1,265	1,778	12,2
14	1000	10	40	71,680	69,965	1,715	2,393	16,4
15	1000	10	60	71,065	69,270	1,795	2,526	17,4
16	1000	30	20	62,645	61,235	1,410	2,251	15,8
17.	1000	30	40	71,990	70,005	1,985	2,757	19,4
18	1000	30	60	65,785	63,835	1,950	2,964	20,8
19	1100	10	20	69,955	66,955	3,000	4,288	29,5
20	1100	10	40	70,045	65,590	4,455	6,360	43,7
21	1100	10	60	69,260	64,235	5,025	7,255	49,8
22	1100	30	20	72,935	68,625	4,310	5,909	41,5
23	1100	30	40	69,720	64,635	5,085	7,293	51,2
24	1100	30	60	69,285	63,755	5,530	7,982	56,0
25	1200	10	20	70,320	63,380	6,940	9,869	67,8
26	1200	10	40	70,360	61,650	8,710	12,379	85,0
27	1200	10	60	70,690	60,645	10,045	14,210	97,6
28	1200	20	10	74,259	69,635	4,624	6,227	43,7
29	1200	20	20	75,654	68,115	7,539	9,965	69,9
30	1200	20	40	72,462	63,464	8,998	12,418	87,1
31	1200	20	60	76,023	65,318	10,705	14,081	98,8
32	1200	30	10	74,523	69,634	4,889	6,560	46,0
33	1200	30	20	70,455	63,145	7,310	10,375	72,8
34	1200	30	40	70,375	61,400	8,975	12,753	89,5
35	1200	30	60	72,665	62,335	10,330	14,216	99,8

Исследования показали, что в отличие от окалины и шламов металлообработки, где железо присутствует в основном в виде оксидов и начинает восстанавливаться уже при температуре 700–800 °C [8], железо из медеплавильных шлаков начинает заметно восстанавливаться лишь при температурах выше 1000 °C. Это объясняется тем, что большая часть железа в них находится в составе фаялита. При температурах 800–1000 °C потери массы навесок были связаны с восстановлением оксидов цинка и меди, а также постепенным (ступенчатым) восстановлением оксидов железа: в образцах, которые восстанавливались при 900 °C через 60 мин, а при 1000 °C через 40 мин выдержки в составе почти отсутствовали оксиды меди, железа и цинка, но количество фаялита практически не изменилось. Степень металлизации при этом достигла уровня 15–20 % и далее почти не менялась. Следует отметить, что цинк в образцах, прошедших восстановление при 1000 °C, вообще отсутствовал, что связано с мгновенным испарением цинка после восстановления (температура кипения цинка ~906 °C).

Резкое ускорение процесса восстановления железа наблюдалось при температурах 1100 °C и выше: при 1100 °C металлизация достигла 30–40 % уже через 20 мин после начала процесса, через 40 мин – 43–51 % (в зависимости от избытка углерода), а при 1200 °C уже в первые 10 мин успевает восстановиться до 46 % содержащегося в материале железа (эксперимент № 32). «Средневзвешенная» скорость восстановления в течение 60 мин с момента начала процесса при температуре 800 °C составила всего 0,195 %/мин

(причем достигнув 11–12 %, металлизация практически останавливается). При 900 и 1000 °C скорость восстановления мало изменяется и составляет 0,26 и 0,347 %/мин соответственно. При 1100 °C скорость восстановления увеличивается почти в 3 раза и достигает 0,93 %/мин, а при 1200 °C – 1,66 %/мин. Графики зависимости металлизации от времени и температуры процесса, а также от относительного количества восстановителя представлены на рис. 2.

С увеличением продолжительности процесса степень металлизации очевидно возрастает, при этом в соответствии с принципом протекания концентрационных процессов (химических и диффузионных), чем меньше остается в материале невосстановленного железа, тем медленнее идет процесс восстановления, что становится особенно заметно, когда степень металлизации достигает 80–90 % и более: при 1200 °C в первые 10 мин восстановления скорость металлизации составляет в среднем 4,6 %/мин, в следующие 10 мин – ~2,7 %/мин (при этом металлизация доходит до 72,8 %), далее процесс резко замедляется и за следующие 20 мин восстанавливается около 17 % железа (металлизация достигает 89,5 %), а скорость металлизации снижается до 0,8–0,9 %/мин, в интервале от 40 до 60 мин скорость восстановления падает до 0,5 %/мин.

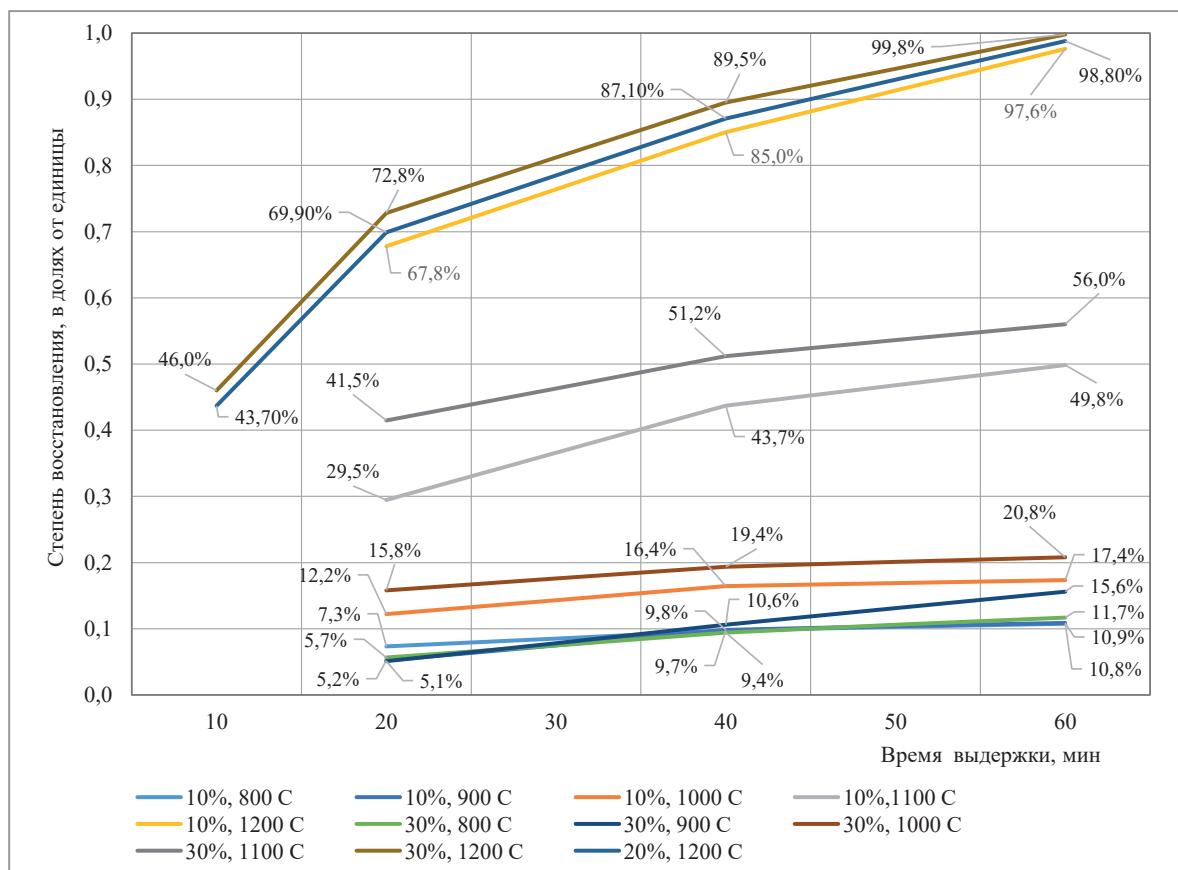


Рис. 2. Зависимость степени восстановления медеплавильных шлаков от температуры, продолжительности процесса и избытка углерода

Увеличение количества восстановителя в смеси повышает скорость восстановления, хотя и незначительно (при 1200 °C металлизация достигает 70 % за 16 мин, в случае если количество углерода превышает стехиометрическое соотношение на 30 %, и за 24 мин – при превышении на 10 %), при этом влияние данного фактора на конечную степень металлизации является малозаметным: при 30 % превышении металлизация достигает 99,8 %, при 10 % – 97,6 %.

По окончании процесса восстановления состав образцов с наибольшей потерей массы (по результатам экспериментов № 31 и 35) исследован с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра, методов классической химии и рентгенодифрактометрического метода. Полученный усредненный результат представлен в табл. 4. В целом результаты анализа подтвердили расчетные значения, приведенные в табл. 3. Некоторые отклонения по степени металлизации (исходя из данных анализа $Fe_{\text{мет}}/Fe_{\text{общ}} \approx 0,943$), вероятно, связаны с окислением восстановленного железа в процессе охлаждения и подготовки пробы к анализу.

Таблица 4. Состав образцов медеплавильного шлака после восстановления

Содержание, мас. %													
Fe _{общ} ¹	Fe _{мет}	FeO	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	CaSiO ₃	S ²	P ²	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Cu	Прочие ²
36,8	34,7	1,4	44,8	0,3	4,4	0,8	0,6	1,8	0,42	0,03	2,4	0,2	~8,0

¹ Складывается из Fe_{мет} и железа, входящего в состав оксидов и других соединений.

² В соединениях.

Выводы

1. Исследования подтвердили возможность твердофазного восстановления железа, содержащегося в медеплавильных шлаках, с использованием порошкообразных углеродсодержащих материалов, в частности графита. При этом оптимальным режимом восстановления является температурный интервал от 1100 до 1200 °C. При более высоких температурах материал начинает спекаться, при температурах ниже 1100 °C скорость восстановления резко снижается. Необходимое количество восстановителя зависит от условий восстановления, в частности контакта материала с воздухом и его влажности. При восстановлении в непрорудуемом слое это количество может быть рассчитано исходя из стехиометрического соотношения углерода, требуемого для восстановления содержащегося в шлаке железа, с увеличением его относительно расчетного на 20–30 %. Для исследованной пробы это количество составило 8–9 % от массы шлака.

2. Для реализации высокотемпературных процессов с получением металлизированного продукта или твердожидкофазных процессов с получением металла целесообразно провести предварительное обогащение имеющихся медеплавильных шлаков (например, гидрометаллургическими методами, путем гравитационного обогащения, методами флотации и др.) с отделением балласта в виде диоксида кремния, глинозема, силикатов и алюминатов и доведением общего железосодержания до 54–56 % [9, 10].

3. Далее после предварительного окомкования (изготовления окатышей) могут быть использованы как известные методы твердофазного восстановления (получения) железа – Midrex, Corex, ITmk-3, SL/RN и др., так и метод твердожидкофазного восстановления в ротационных наклоняющихся печах (в этом случае вместо окатышей лучше использовать гранулы диаметром 5–7 мм) [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. The World Steel Association [Electronic resource]. – Access mode: <https://worldsteel.org/about-steel/facts/steelfacts>.
2. «Доктор медь» дает надежду: дорожающий металл предрекает рост мировой экономики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.forbes.ru/biznes/513223-doktor-med-daet-nadezdu-dorozausij-metall-predrekaet-rost-mirovoj-ekonomiki>.
3. Извлечение железа из отвального шлака медеплавильного производства / А. А. Лыкасов, Г. М. Рысс, Д. Г. Шарафутдинов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 9. – С. 597–602.
4. Медеплавильные шлаки и вопросы утилизации минеральных отходов / Г. Г. Кориневская, В. А. Муфтахов, А. Л. Котельникова [и др.] // Минералогия техногенеза. – 2014. – № 15. – С. 244–250.
5. Быховский, Л. З. Техногенные отходы как резерв пополнения минерально-сырьевой базы: состояние и проблемы освоения / Л. З. Быховский, Л. В. Спорыхина // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2011. – № 4. – С. 15–20.
6. Макаров, А. Б. Техногенно-минеральные месторождения и их экологическая роль / А. Б. Макаров, А. Г. Талалай // Литосфера. – 2012. – № 1. – С. 172–176.
7. Возможности комплексной переработки медных шлаков / Т. И. Шакаров, А. Х. Хасанов, В. З. Исмаилов [и др.] // Central Asian Research Journal For Interdisciplinary Studies (CARJS). – 2022. – Vol. 2, № 12, – P. 9–12.
8. Ровин, С. Л. Исследование и утилизация аспирационной пыли сталеплавильных дуговых печей / С. Л. Ровин, Д. И. Куряч, С. В. Григорьев // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 73–78.
9. Адилов, Г. Разработка основ технологий полной переработки медеплавильных шлаков с получением востребованных металлических и керамических изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. Адилов. – Челябинск, 2024.
10. Санакулов, К. С. Переработка шлаков медного производства / К. С. Санакулов, А. С. Хасанов. – Ташкент: Фан, 2007. – 238 с.
11. Ровин, С. Л. Использование ротационных печей для рециклинга железосодержащих отходов / С. Л. Ровин // Литье и металлургия. – 2014. – № 1. – С. 56–61.

REFERENCES

1. The World Steel Association [Electronic resource]. Access mode: <https://worldsteel.org/about-steel/facts/steelfacts>.
2. “Doktor med” daet nadezdu: dorozhayushchij metall predrekaet rost mirovoj ekonomiki [“Doctor Copper” offers hope: rising metal prices predict global economic growth] [Electronic resource]. Access mode: <https://www.forbes.ru/biznes/513223-doktor-med-daet-nadezdu-dorozausij-metall-predrekaet-rost-mirovoj-ekonomiki>.
3. Lykasov A. A., Ryss G. M., Sharafutdinov D. G. [et al.] Izvlechenie zheleza iz otval'nogo shlaka medeplavil'nogo proizvodstva [Iron Extraction from Copper Smelter Waste Slag]. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija = News of Higher Education Institutions. Ferrous Metallurgy, 2016, vol. 59, no. 9, pp. 597–602.

4. **Korinevskaja G. G., Muftahov V. A., Kotel'nikova A. L.** [et al.] Medeplavil'nye shlaki i voprosy utilizacii mineral'nyh othodov [Copper smelting slags and mineral waste disposal issues]. *Mineralogija tehnogeneza = Mineralogy of technogenesis*, 2014, no. 15, pp. 244–250.
5. **Byhovskij L. Z., Sporyhina L. V.** Tehnogennye othody kak rezerv popolnenija mineral'no-syr'evoj bazy: sostojanie i problemy osvoenija [Man-made waste as a reserve for replenishing the mineral resource base: status and development challenges]. *Mineral'nye resursy Rossii. Jekonomika i upravlenie = Mineral Resources of Russia. Economics and Management*, 2011, no. 4, pp. 15–20.
6. **Makarov A. B., Talalaj A. G.** Tehnogenno-mineral'nye mestorozhdenija i ih jekologicheskaja rol' [Technogenic mineral deposits and their ecological role]. *Litosfera = Lithosphere*, 2012, no. 1, pp. 172–176.
7. **Shakarov T. I., Hasanov A. H., Ismailov V. Z.** [et al.] Vozmozhnosti kompleksnoj pererabotki mednyh shlakov [Possibilities of complex processing of copper slags]. *Central Asian Research Journal For Interdisciplinary Studies (CARJIS)*, 2022, vol. 2, no. 12, pp. 9–12.
8. **Rovin S. L., Kurach D. I., Grigoriev S. V.** Issledovanie i utilizacija aspiracionnoj pyli staleplavil'nyh dugovyh pechej [Research and processing of shot blasting dust.]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 73–78.
9. **Adilov G.** *Razrabotka osnov tehnologii polnoj pererabotki medeplavil'nyh shlakov s polucheniem vostrebovannyh metallicheskikh i keramicheskikh izdelij: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of the fundamentals of technology for the complete processing of copper smelting slags to produce sought-after metal and ceramic products: abstract dis. ...cand. tech. sciences]. Chelabinsk, 2024.
10. **Sanakulov K. S., Hasanov A. S.** *Pererabotka shlakov mednogo proizvodstva* [Copper Slag Recycling]. Tashkent, Fan Publ., 2007, 238 p.
11. **Rovin S. L.** Ispol'zovanie rotacionnyh pechej dlja reciklinga zhelezosoderzhashhih othodov [Use of rotational furnaces for recycling of iron-containing waste]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 1, pp. 56–61.