

Eshov Bakhtier Badalovich	–	Doctor of Technical Sciences, Director of the Center for Innovative Technology Research, National Academy of Sciences of Tajikistan E-mail: ishov1967@mail.ru
Mirzajanova Saodat Bakidjanovna	–	Associate Professor, Department of Metallurgy, Tashkent State Technical University. E-mail: sabi30302@gmail.com , ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0375-6415
Badalov Abdulkhayr Badalovich	–	Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of General and Inorganic Chemistry, M. Osimi Tajik Technical University, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Tajikistan. E-mail: badalovab@mail.ru , ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0659-0529
Osimi Okil	–	Candidate of Technical Sciences, Head of the Academic Process Department, Tajik Mining and Metallurgical Institute. E-mail: osimiokil@mail.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ КОНЦЕНТРАТОВ ИЗ ПЕРЕРАБОТАННЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ МЕТОДОМ МОКРОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

С.Р. Худояров, У.М. Халикулов, Ш.А. Мухаметджанова, С.Н. Файзуллаев, В.Б. Хамроев

Филиал НИТУ МИСИС в г.Алматы

Doi: 10.5281/zenodo.18092806

АННОТАЦИЯ

В работе исследовано мокрое электромагнитное обогащение переработанных сталеплавильных шлаков. Установлено, что оптимальная напряжённость магнитного поля составляет 20 кА/м, обеспечивая селективное извлечение металлического железа и магнетита. Магнитный концентрат содержит 46,9 % Fe, что делает его перспективным железосодержащим компонентом шихты. Повторная сепарация хвостов при 60 кА/м показала низкую эффективность и не приводит к дополнительному извлечению металлического железа. Определена целесообразность одностадийного мокрого электромагнитного обогащения при оптимизированных параметрах поля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

сталеплавильные шлаки, магнитная сепарация, электромагнитное обогащение, железный концентрат.

ВВЕДЕНИЕ

Рост объемов выпуска стали сопровождается увеличением количества сталеплавильных шлаков, представляющих собой техногенное сырьё со значительной долей металлосодержащих компонентов. Эффективная переработка и вовлечение этих отходов в хозяйственный оборот является актуальной задачей современной металлургии, обусловленной необходимостью снижения ресурсной нагрузки, повышения экономической эффективности производства и уменьшения экологического воздействия [1].

Сталеплавильные шлаки после первичной переработки содержат заметные количества металлического железа, железистых соединений и неметаллических минералов, различающихся по магнитным свойствам. Так переработанные сталеплавильные шлаки представляют собой конгломераты (рис.1), в которых в тесной ассоциации находятся все компоненты шлаков:

$\text{Fe}_{\text{мет}}$, FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Al_2O_3 , MgO , MnO , CaO , SiO_2 . Это делает их перспективным объектом для технологий магнитного обогащения. Среди таких технологий мокрое электромагнитное обогащение занимает особое место благодаря способности эффективно разделять частицы с близкими физико-механическими характеристиками и работать с мелкодисперсными фракциями, не поддающимися сухому разделению [2].

Объекты и методика исследования. В качестве объектов исследования были выбраны переработанные сталеплавильные шлаки электросталеплавильного производства, содержащие железосодержащие включения различной природы, как металлические частицы, оксидные соединения типа, а также немагнитную минеральную матрицу сложного состава. Материал характеризуется значительной неоднородностью фаз, различиями в магнитных свойствах и присутствием устойчивых

минеральных ассоциаций, затрудняющих эффективное разделение компонентов.

Поскольку разделение компонентов шлака с использованием методов мокрой электромагнитной сепарации возможно только при достаточной степени раскрытия минеральных агрегатов, переработанные шлаки предварительно подвергались механическому измельчению [3]. С

этой целью переработанные сталеплавильные шлаки измельчались с определением гранулометрического состава и содержания магнитной фазы в каждой фракции. Результаты исследования гранулометрического состава исходных переработанных шлаков и шлаков после измельчения приведены в табл.1 и 2.



Рис. 1. Переработанные сталеплавильные шлаки в шлакоотвале АО «Узметкомбинат»

Таблица 1

Гранулометрический состав сталеплавильных шлаков

Фракция, мм	Выход по фракциям, %
+3	22,43
-3+2,5	9,20
-2,5+2,0	8,60
-2,0+1,5	11,40
-1,5+1,2	6,20
-1,2	42,17
Всего	100

Предварительно измельчённые переработанные сталеплавильные шлаки, содержащие железосодержащий скрап и другие магнитные компоненты, подвергались мокрой электромагнитной сепарации с использованием лабораторного сепаратора марки ПБМ-32/20.

Указанный сепаратор предназначен для мокрого магнитного обогащения сильномагнитных руд и техногенных материалов крупностью 0,1–3 мм [4], что соответствует гранулометрическим характеристикам подготовленных шлаков.

Таблица 2

Гранулометрический состав измельчённых сталеплавильных шлаков с содержанием магнитной фазы в каждой фракции

Класс, мм	Выход, %	Содержание магнитной фракции, %
+2	0,35	34,80
-2+0,5	0,43	68,89
-0,5+0,25	1,82	40,25
-0,25+0,1	44,14	48,76
-0,1	53,26	1,63
Всего	100	20,96

Подготовленные шлаки подавались в зону разделения в виде пульпы с гидромодулем Ж:Т=2:1. Пульпа равномерным слоем поступала в ванну сепаратора, движущуюся в направлении,

совпадающем с вращением магнитного барабана. Из ванны поток материала самотёком переходил в область действия магнитной системы. Под воздействием магнитного поля полюсов барабана

магнитные частицы, присутствующие в измельчённом шлаке, притягивались к его поверхности и транспортировались в разгрузочную зону.

Разгрузка немагнитной фракции осуществлялась через специальное отверстие вкладыша, установленного в насадке ванны. Мелкодисперсные немагнитные частицы, не взаимодействующие с полем, удалялись через переливную трубу в слив [5].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты изучения гранулометрического состава, приведённые в табл. 2, позволили установить, что основное содержание магнитной фазы сосредоточено в классе $-0,25+0,1$ мм. В связи с этим, переработанные сталеплавильные шлаки перед мокрой электромагнитной сепарацией необходимо подвергать измельчению до класса $-0,25+0,1$ мм.

При загрузке пульпы измельчённых переработанных сталеплавильных шлаков в ванну магнитного сепаратора, частицы транспортируются в зону распределения, которая ограничена областью действия магнитной системы. Немагнитные частицы не притягиваются, создающимся магнитным полем и движутся под барабаном не меняя траекторию движения. Частицы, обладающие магнитными свойствами ($\text{Fe}_{\text{мет}}$, Fe_3O_4), притягиваются неоднородным магнитным полем к вращающемуся барабану, транспортируются до края магнитной системы и попадают в свой

приёмник. Применение в магнитных сепараторах неоднородных магнитных полей, позволяет магнитным частицам испытывать кроме силовых линий поля ещё и магнитные силы притяжения, что является причиной втягивания частиц в более интенсивные участки поля.

Для определения необходимой напряжённости магнитного поля, позволяющего добиться селективного разделения магнитных частиц, измельчённых переработанных сталеплавильных шлаков от немагнитных составляющих и максимального извлечения в магнитный концентрат железосодержащего скрапа, содержащегося в переработанных шлаках, были изучены удельные магнитные восприимчивости компонентов шлака. По величине магнитной восприимчивости, компоненты переработанных сталеплавильных шлаков можно разделить на сильномагнитные или ферромагнетики ($\chi > 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$), слабомагнитные или парамагнетики (антиферромагнетики) ($7,5 \cdot 10^{-6} > \chi > 1,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$), немагнитные ($\chi < 1,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$) и диамагнитные ($\chi < 0$) [6].

Железосодержащий скрап, содержащийся в переработанных сталеплавильных шлаках, находится в металлической форме и обладает высоким значением удельной магнитной восприимчивости, превышающим показатель удельной магнитной восприимчивости ферромагнетиков. Показатели удельной магнитной восприимчивости компонентов переработанных сталеплавильных шлаков приведены в табл. 3.

Таблица.3

Удельная магнитная восприимчивость компонентов переработанных сталеплавильных шлаков

Компоненты шлака	Удельная магнитная восприимчивость, $\text{м}^3/\text{кг}$	Примечание
FeO	$8,8 \cdot 10^{-7} - 22,0 \cdot 10^{-7}$	Антиферромагнетик, обладает очень малой магнитной восприимчивостью и ведёт себя как слабый парамагнетик
Fe ₂ O ₃		Антиферромагнетик (слабый ферромагнетик)
Fe ₃ O ₄	$5,0 \cdot 10^{-4} - 11,72 \cdot 10^{-4}$	Ферромагнетик
Al ₂ O ₃	$-0,34 \cdot 10^{-6}$	Диамагнетик
MgO	$1,0 \cdot 10^{-7} - 5,0 \cdot 10^{-7}$	Немагнитный
MnO	$3,0 \cdot 10^{-7} - 15,3 \cdot 10^{-7}$	Немагнитный
CaO	$0,05 \cdot 10^{-7} - 0,38 \cdot 10^{-7}$	Немагнитный
SiO ₂	$-0,02 \cdot 10^{-7} - 0,1 \cdot 10^{-7}$	Немагнитный

Железосодержащий скрап и сильномагнитные компоненты переработанных сталеплавильных шлаков, можно отделить от слабомагнитных и немагнитных компонентов при слабом магнитном поле с напряжённостью от 20 до 160 кА/м, например при указанной напряжённости магнитного поля, магнитная восприимчивость магнетита составляет $8,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$.

С целью получения магнитного концентрата с минимальным содержанием слабомагнитных компонентов и максимальным содержанием железного скрапа и магнетита, магнитную сепарацию проводили при показателе напряжённости магнитного поля 20 кА/м. Повышение напряжённости магнитного поля, приводит к образованию флокул и прядей из тонких частиц сильномагнитных материалов,

которые ориентируются вдоль магнитных силовых линий. Образование магнитных флюков и прядей оказывает положительное влияние на извлечение тонких частиц, однако при этом снижается качество магнитного концентрата, так как в прядях «запутываются» немагнитные мелкие частицы, трудно удаляемые при сепарации. По этой причине было принято решение о нецелесообразности повышения напряжённости магнитного.

Для определения содержания железа, выделенный магнитный концентрат подвергался спектральному рентгенофлуоресцентному анализу (рис. 2). Содержание железа в магнитном концентрате составило 46,9 %, при содержании $Fe_{общ}$ в исходных переработанных шлаках 20 % и $Fe_{мет}$ 4%. Результаты распределения компонентов переработанных сталеплавильных шлаков по продуктам магнитной сепарации приведены в табл.4.

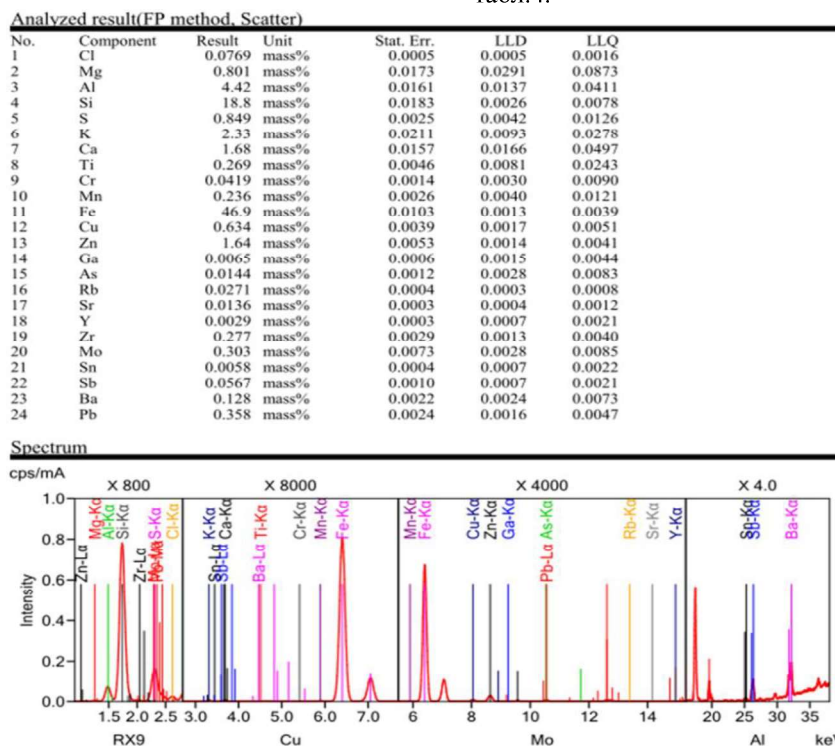


Рис. 2. Результаты спектрального рентгенофлуоресцентного анализа магнитного концентрата

Таблица 4

Распределение компонентов сталеплавильного шлака по продуктам электромагнитного обогащения, при напряжённости магнитного поля 20 кА/м

Наименование продуктов	Количество продукта, г	Выход продукта, %	Содержание $Fe_{общ}$ (% / г)	Содержание $Fe_{мет}$, (% / г)
Исходный переработанный сталеплавильный шлак	2200	100	20,0 / 440,0	4,0 / 88,0
Магнитный концентрат	195	8,86	46,9 / 91,46	43,85 / 85,5
Хвосты электромагнитного обогащения	2005	91,14	17,38 / 348,5	0,12 / 2,5

Магнитный концентрат с содержанием железа 46,9%, в котором сконцентрированы $Fe_{мет}$ и магнитная форма оксида железа Fe_3O_4 , будут использованы в качестве железосодержащего компонента шихты железугольных окатышей, являющимися основным источником сырья для процесса высокотемпературного твёрдофазного восстановления с получением цинкосодержащих возгонов и металлизированных продуктов.

Учитывая высокое содержание железа в хвостах, хвосты повторно подвергались электромагнитному обогащению при напряжённости магнитного поля 60 кА/м (табл.5). Элементный состав магнитного концентрата повторного электромагнитного обогащения приведён на рис.3.

Результаты анализа показали, что содержание железа в магнитном концентрате поднялось на

незначительный показатель и составило 23,8% при исходном содержании 17,38%. При этом в полученном магнитном концентрате, практически отсутствует $Fe_{мет.}$. В магнитный концентрат

перешли сильномагнитные формы железа в виде Fe_3O_4 , а остальные формы железа, обладающие слабомагнитными свойствами (FeO , Fe_2O_3), сконцентрировались в хвостах.

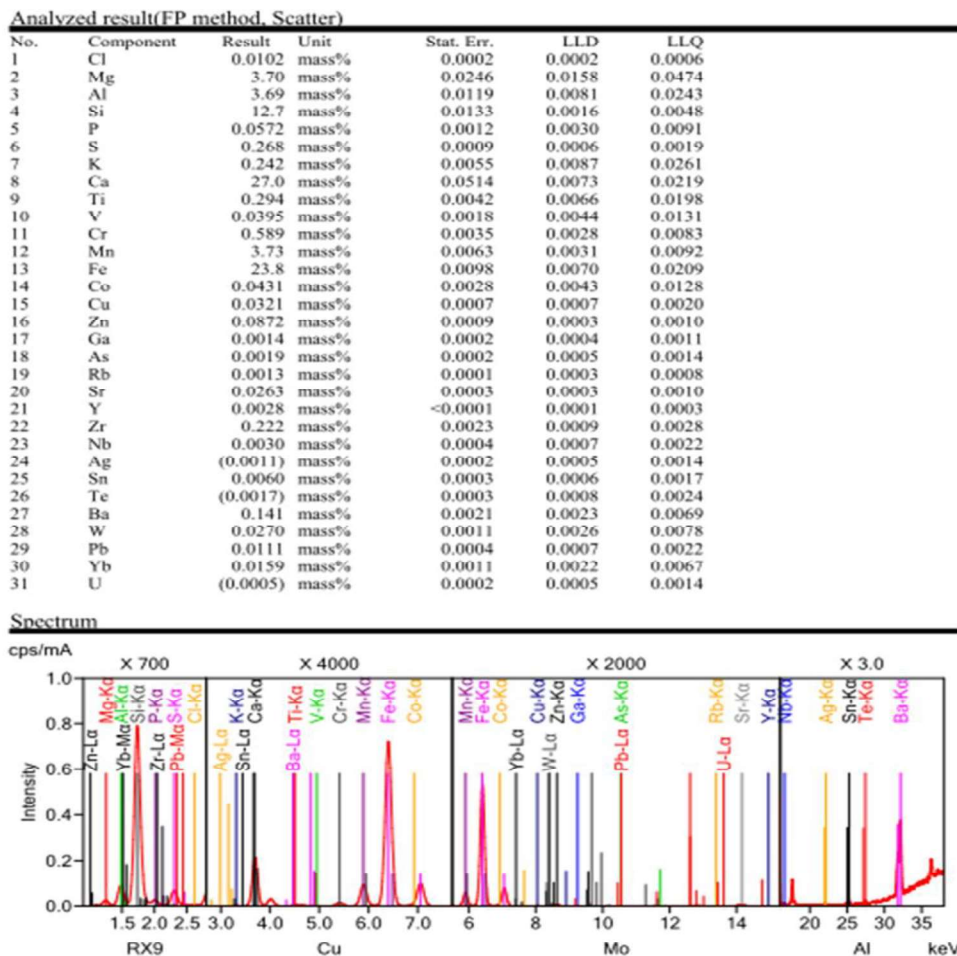


Рис. 3. Результаты спектрального рентгенофлуоресцентного анализа магнитного концентрата, выделенного из хвостов первой магнитной сепарации

Учитывая вышесказанное и основываясь на результатах распределения компонентов, был сделан вывод о том, что повторное

электромагнитное обогащение хвостов электромагнитного обогащения переработанных сталеплавильных шлаков нецелесообразно.

Таблица 5

Распределение компонентов сталеплавильного шлака по продуктам электромагнитного обогащения, при напряжённости магнитного поля 60 кА/м

Наименование продуктов	Количество продукта, г	Выход продукта, %	Содержание $Fe_{общ}$ (% / г)	Содержание $Fe_{мет.}$ (% / г)
Хвосты первого электромагнитного обогащения	2005	100	17,38 / 348,5	0,12 / 2,5
Второй магнитный концентрат	574,4	28,65	23,8/136,7	0,4 / 2,28
Хвосты второго электромагнитного обогащения	1430,6	71,35	14,8/211,8	0,015/0,22

Для отделения из хвостов электромагнитного обогащения оксидов железа, которые будут использованы в качестве твёрдых окислителей при

выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи, хвосты предложено подвергались

гравитационному обогащению на
концентрационном столе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проведённые исследования мокрого электромагнитного обогащения переработанных сталеплавильных шлаков позволили сформулировать следующие выводы:

1. Наиболее значимые магнитные свойства проявляют металлическое железо и магнетит, концентрация которых максимальна в гранулометрической фракции $-0,25 + 0,1$ мм. Это подтверждает необходимость предварительного измельчения шлаков перед магнитной сепарацией.

2. Оптимальная напряжённость магнитного поля для первичной мокрой электромагнитной сепарации составляет 20 кА/м, обеспечивая селективное извлечение $Fe_{мет}$ и Fe_3O_4 при минимальном переходе слабомагнитных примесей.

3. Полученный магнитный концентрат содержит 46,9 % Fe, что позволяет использовать его в качестве железосодержащего компонента шихты при производстве железоугольных окатышей и других металлургических полуфабрикатов.

4. Повторная электромагнитная сепарация при 60 кА/м нецелесообразна, поскольку приводит к незначительному увеличению содержания железа и практически не извлекает металлические формы Fe.

Полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность мокрой магнитной сепарации при переработке сталеплавильных шлаков, что обеспечивает рациональное извлечение ценных компонентов и расширяет возможности их повторного использования в металлургическом производстве.

QAYTA ISHLANGAN PO‘LAT ERITISH SHLAKLARIDAN NAM ELEKTROMAGNIT AJRATISH ORQALI TEMIRGA BOY KONTSENTRATLAR OLISH

S.R. Xudoyarov, U.M. Xalikulov, Sh.A. Muxametdjanova, S.N. Fayzullaev, V.B. Xamroev

MISIS Olmaliq filiali, Olmaliq, O‘zbekiston

ANNOTATSIYA Tadqiqotda qayta ishlangan po‘lat shlaklarining nam elektromagnit boyitilishi o‘rganildi. Optimal magnit maydon kuchi 20 kA/m bo‘lib, metall temir va magnetitning tanlab ajralishini ta‘minladi. Olingan magnit kontsentrats tarkibida 46,9 % Fe mavjud. Qoldiqlarni 60 kA/m da qayta boyitish samarasiz bo‘ldi. Natijalar optimallashtirilgan sharoitlarda bir bosqichli nam elektromagnit boyitishning maqsadga muvofiqligini ko‘rsatdi.

KALIT SO‘ZLAR po‘lat shlagi, magnit boyitish, elektromagnit ajratish, temir kontsentrats.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Yusupkhodjayev A.A., Matkarimov S.T., Khudoyarov S.R., Valiyev X.R., Nuraliyev O.U. Use of secondary technogenic formations of ferrous Metallurgy for production of steel // International journal of advanced research in science, engineering and technology. – Vol. 6, Issue 1, January 2019. – pp.7751 – 7754.
2. Худояров С.Р., Якубов М.М., Валиев Х.Р., Холикулов Д.Б., Ёкубов О.М., Мухаметджанова Ш.А. Современное состояние формирования, размещения и переработки техногенных отходов черной металлургии. // Журнал «Композиционные материалы», №2, 2021. - С.119-123.
3. Моршинин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. - М.: Недра, 1983. - С 84-104.
4. Сепаратор ПБМ-32/20. Руководство по эксплуатации. 120СЭ-Д.00.000РЭ. – Санкт-Петербург. – 12 с.
5. Анализаторы вибрационные лабораторные АСВ -120, АСВ -200, АСВ-300. Руководство по эксплуатации. – Санкт-Петербург, 2023. -12 с.
6. Пелевин А.Е. Магнитные и электрические методы обогащения. – Екатеринбург: УГТУ, 2015. – 159 с.

Information about authors:

Khudoyarov Suleyman Rashidovich	- Deputy Director, Almalyk Branch of NUST MISIS (National University of Science and Technology “MISIS”), 56 Amir Temur Avenue, Almalyk, Uzbekistan. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1022-9947 e-mail: suleyman0677@yandex.ru
Khalikulov Utkir Mirzakamalovich	Acting Rector of Almalyk State Technical Institute, 45 Mirzo Ulugbek Street, Almalyk, Uzbekistan. e-mail: utkirhm@mail.ru

Muxametjanova Shoira Abdusamatovna	- PhD, Associate professor of the department of Metallurgy; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6184-6443 e-mail: shoira.muhamet@gmail.com
Faizullaev Sulton Narzullaevich	- Senior Lecturer, Department of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals Metallurgy, Almalyk Branch of NUST MISIS (National University of Science and Technology "MISIS"), 56 Amir Temur Avenue, Almalyk, Uzbekistan.
Khamroev Vokhid Bafoevich	- Senior Lecturer, Department of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals Metallurgy, Almalyk Branch of NUST MISIS (National University of Science and Technology "MISIS"), 56 Amir Temur Avenue, Almalyk, Uzbekistan. e-mail: Vokhid.xamroev@bk.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА ЦИНКА В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ПРАКТИКЕ

С.Т. Маткаримов¹, С.Б. Мирзажонов¹, М.И. Сайдирахимова², М.С. Саидова¹,
Г.Б. Бекназарова¹

¹Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

²Учебный центр АГМК

Doi: 10.5281/zenodo.18092828

АННОТАЦИЯ

В статье приведён сравнительный анализ технологических параметров электролиза цинка. Описаны характеристики процесса, при котором электролиз в количестве 480 штук укомплектованы в две серии, по 240 ванн в каждой с плотностью тока 560–610 А/м² и выходом цинка по току 88–91 %. Концентрация цинка в нейтральном электролите составляет 100–135 г/л, а в отработанном 40 – 55 г/л. Применение поверхностно-активных веществ, таких как костный клей, и добавок сурьмы (0,1–0,3 мг/л) обеспечивает получение плотного катодного осадка без дендритов. Использование экстракта солодкового корня способствует снижению выделения сернистого тумана и повышает экологическую безопасность процесса. Сравнение с зарубежными методами показало, что отечественная технология отличается большей энергоэффективностью и стабильностью работы электролитных ванн.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

электролиза цинка, сравнительный анализ, поверхностно – активных вещества, катод, анод, энергоэффективность, дендриты, плотность тока

ВВЕДЕНИЕ

Цинк является одним из наиболее востребованных цветных металлов современной промышленности. Благодаря высокой коррозионной стойкости, хорошей электропроводности и технологичности, он широко применяется в металлургии, машиностроении, электронике и строительстве. Основная доля цинка расходуется на горячеоцинкование стали, что обеспечивает долговечность и защиту металлических конструкций от коррозии, цинк используется при производстве сплавов. Рост мирового потребления цинка обусловлен развитием автомобильной, строительной и электрохимической отраслей, что требует совершенствования технологий его извлечения и повышения эффективности электролиза.

Цинковый завод введён в эксплуатацию в 1970 году с мощностью до 120 тыс. т цинка в год. Первоначально перерабатывал руды

месторождений Кургашикан и Алтынтапкан, позднее — привозные концентраты. После запуска ГОК «Хандиза» в 2010 году предприятие вновь использует собственное сырьё. Завод производит металлический цинк, кадмий, серную кислоту и цинковые сплавы [1].

Производство цинка — одно из основных направлений цветной металлургии страны. В 90-ых годах резко увеличилась конкуренция на рынке цинка. Для сохранения своих позиций перед заводами возникла проблема увеличения производства цинка с улучшением его качества и уменьшением затрат на производство, особенно электроэнергию. Это определило необходимость реконструкции заводов с ориентацией на внедрение современных информационных технологий [2].

Процесс электролиза цинка остаётся одним из ключевых этапов гидрометаллургического производства и постоянно совершенствуется с целью повышения выхода металла и снижения энергозатрат. В ряде работ [3–5] исследовано