

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛОВМІСНИХ ВІДХОДІВ ЯК СИРОВИНИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ

V. Soroka¹, <https://orcid.org/0009-0008-1344-3923>

V. Shutov¹ <https://orcid.org/0000-0002-9318-2434>

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF METAL-CONTAINING WASTE AS RAW MATERIAL FOR COMPLEX PROCESSING

Мета. Визначити технологічні властивості окалини та обґрунтування можливості її використання як вторинної сировини для комплексної переробки з поверненням у виробничий цикл.

Методика досліджень. Для дослідження відібрано 10 зразків окалини, що відрізняються за терміном та умовами зберігання. Визначено вологість досліджуваних зразків. Дослідження гранулометричного складу окалини проводилось із застосуванням стандартного набору сит, відповідно до вимог міжнародному стандарту ISO 3310-1. Магнітна сепарація зразків окалини проводилася на барабанному NdFeB сепараторі з магнітним полем 0,35 Тсл та лабораторному валковому сепараторі 138Т.

Результати досліджень. Встановлено, що вторинний матеріальний ресурс такий як окалина потребує попередньої підготовки шляхом просушування для подальшої обробки та характеризуються неоднорідним гранулометричним складом із переважанням фракцій дрібної та середньої крупності, це є показником сприятливим для подальшої переробки. Встановлено, що магнітним полем від 0.1-0.2Тл можна вилучити до 50% магнітних частинок з вихідної окалини, магнітним полем від 0.2-0.4Тл до 45%. Найбільший вихід магнітного продукту спостерігається на крупних фракціях. Розроблена технологічна схема використання окалини для подальшої комплексної переробки з метою вилучення корисних компонентів, повернення в виробничий цикл.

Наукова новизна. Встановлено закономірності впливу терміну зберігання, вологості та гранулометричного складу окалини на ефективність вилучення магнітних компонентів магнітним полем різної інтенсивності.

Практичне значення. Отримані дані можуть бути використані при розробці комплексної технології переробки металовмісних відходів сталепрокатних підприємств, що в свою чергу збільшить рівень утилізації відходів.

Ключові слова: *Окалина, вторинний матеріальний ресурс, вологість, комплексна переробка, магнітна сепарація, технології переробки.*

Вступ. З розвитком металургійної промисловості, значно зростають обсяги утворення металовмісних відходів, що обумовлює потребу пошуку ефективних шляхів утилізації або ж повторного використання вторинних матеріальних ресурсів. Недостатнє застосування технологічних рішень з мінімізації обсягів накопичення металовмісних відходів, призводить до погіршення екологічного стану

навколишнього середовища та втрати потенційних ресурсів. Більшість відходів сталепрокатної промисловості містять цінні металеві компоненти, які потенційно можна повернути до виробничого циклу.

За даними World Steel Association, Україна у 2024 році посіла 22 місце серед лідерів виробництва сталі та виробила близько 7,6 млн тон сталі [1]. В свою чергу металургійні заводи при виробництві сталі утворюють від 200 до 400 кг/т побічних продуктів виробництва. Це означає що потрібно використовувати раціональні підходи щодо переробки вторинних мінеральних ресурсів (ВМР) які відповідають принципам сталого розвитку.

Для забезпечення комплексної переробки металовмісних відходів необхідно знати їх технологічні властивості, зокрема вологість, гранулометричний склад, магнітність та інші фізичні характеристики, що впливають на вибір і результативність впровадженої технології переробки. Без дослідження цих властивостей неможливе розроблення раціональних технологічних схем їх переробки.

Відповідно до міжнародних стандартів ISO/TC 323 з циркуляційної економіки та сталого використання ресурсів, існують певні завдання: ефективно утилізувати матеріали, стало та повторно їх використовувати. Дослідження ВМР таких як металургійна окалина та впровадження процесів щодо їх підготовки до переробки відповідають R-стратегіям циркуляційної економіки [2]. Досліди та запропоновані процеси підготовки допоможуть прозоро використовувати данні про склад, властивості, походження та життєвий цикл ВМР, а також інтегрувати результати в Digital Product Passport (DPP) [2].

Після утворення побічних продуктів виробництва таких як окалина виникає питання щодо її зберігання, утилізації або ж переробки. Під час зберігання окалини на полігонах або відкритих складах вміст вологи може бути значним після вилучення з відстійників або з контактом з атмосферними опадами. Під час опадів вода, просочуючись через шари окалини, вимиває різні компоненти та домішки (важкі метали, нафтопродукти) що містяться в окаліні. Ці забруднюючі компоненти можуть потрапляти в ґрунт, підземні води тощо. Також підвищений рівень вологості впливає на певні процеси з окалиною такі як: транспортування відходів, попереднє розділення та сортування, збагачення, окиснення та посилена корозія обладнання для зберігання та транспортування. Надлишкова волога призводить до збільшення маси вторинних матеріальних ресурсів та некоректної оцінки сумарного обсягу утворення окалини на сталепрокатному виробництві [3].

Саме тому, метою роботи є визначення технологічних властивостей металовмісних відходів як сировини для комплексної переробки та обґрунтування можливості їх повторного використання та зменшення негативного впливу на довкілля.

Основні результати. Для досліджень були відібрані зразки металургійної окалини на діючому підприємстві (рис. 1). Відбір зразків здійснювався в місцях утворення, накопичення та відлежування, згідно нормативних документів та регламентів щодо підготовки промислових відходів для лабораторних досліджень.

Відібрано десять зразків прокатної окалини методом точкових проб:

Зразок №1 – відібраний на відвалі де зберігається окалина пів року.

Зразок №2 – відібраний на відвалі де зберігається окалина рік та більше.

- Зразок №3 – відібраний на відвалі де зберігається окалина 5 днів.
- Зразок №4 – відібраний на відвалі де зберігається окалина 3 місяці.
- Зразок №5 – відібраний в тунелі гідрозмиву окалини.
- Зразок №6 – відібраний одразу після виходу заготовки з печі.
- Зразок №7 – відібраний на відвалі первинного відстійника.
- Зразок №8 – відібраний на відвалі первинного відстійника (змішана проба).
- Зразок №9 – відібраний на відвалі первинного відстійника (точкова проба).
- Зразок №10 – відібраний на відвалі вторинного відстійника.



Рис. 1. Місця відбору зразків окалини

Отримані зразки зважували до просушування, а потім шляхом просушування в сушильній шафі при температурі 105 ± 5 °С довели до сухого стану (рис. 2). Для подальших досліджень та оцінки ресурсного потенціалу переробки металургійної окалини визначали її вологість (табл. 1).



Рис. 2. Лабораторні дослідження вологості зразків окалини

Результати дослідження вологості зразків

Зразок	Вага до просушування, г	Вага після просушування, г	Вологість, %
1	50	35,50	29,0
2	50	43,50	13,0
3	50	30,50	39,0
4	50	33,00	34,0
5	50	49,65	0,7
6	50	49,95	0,1
7	50	49,95	0,1
8	50	49,15	1,7
9	50	49,80	0,4
10	50	43,50	13,0

Після просушування матеріалу маса зразка зменшилася, вологість зразків окалини варіюється від 0,1% до 39%, тому рециклінг окалини не можливий без попереднього просушування.

Гранулометричний аналіз проводився методом сухого розсіву за допомогою розсіювача лабораторного РЛУ-3 з наступними характеристиками: частота коливань ситового пакету 1\хв, (120\200±10%); амплітуда коливань 25 мм; встановлена потужність 0,015 кВт. Час просіювання складав 3 хв на кожному з сит. Кількість сит 6 та один піддон. Дослідження гранулометричного складу окалини проводилось із застосуванням стандартного набору сит, відповідно вимогам та міжнародному стандарту ISO 3310-1 [4]. Діаметр сит 200 мм, висота 38 мм, розміри комірок: 0,8 мм; 0,63 мм; 0,5 мм; 0,2 мм; 0,1 мм; 0,06 мм; 0 мм.

Набір сит встановлювався на прилад РЛУ-3 (рис. 4), просушена проба окалини, що була відібрана та попередньо просіяна на окремому ситі з розміром комірки 0,8 мм, засипалась у верхнє сито (0,8 мм) закривалась кришкою встановлювався комплект сит на прилад, та закріплювався, інтервал часу просіювання становив 3 хв., після чого окалина розподілялась між ситами та піддоном відповідно до фракції та пересипалась в пусту ємність і була визначена вага кожної фракції.

Вимірювання маси фракцій проводилось на лабораторних аналітичних вагах AS 220.R2 Radwag, (дискретність 0,0001 г), відповідно стандартів ДСТУ EN 45501 [5].

Після просіювання зразків окалини на наборі сит та подальшим зважуванням маси кожної фракції було визначено їх відсотковий вміст у загальній масі проби. На основі отриманих даних приведених в табл. 2 зроблено висновок щодо характеру розподілу частинок за крупністю, виявлено домінуючі фракції та оцінено ступінь однорідності фракції.



Рис. 4. Лабораторні дослідження гранулометричного складу

Таблиця 2

Гранулометричний склад окалини

Розмір фракції, мм	Зразок №8		Зразок №4		Зразок №3	
	Г	%	Г	%	Г	%
0,8–0,63	15,285	30,57	7,220	14,44	6,830	13,66
0,63–0,5	5,430	10,86	7,895	15,79	5,970	11,94
0,5–0,2	5,665	11,33	15,985	31,97	17,015	34,03
0,2–0,1	3,455	6,91	9,845	19,69	16,395	32,79
0,1–0,06	5,010	10,02	7,920	15,84	3,620	7,24
0,06–0	15,155	30,31	1,135	2,27	0,170	0,34
Сумарна вага	50,00	100	50,00	100	50,00	100

Характеристика зразків:

Зразок 8. Однорідність – низька (поліфракційний та пилюватий склад); неоднорідна структура, розміри частинок від найбільших до найменших, близько 30% матеріалу містять частки менше 0,06 мм.

Зразок 3. Однорідність – дуже висока; основна маса зерен, понад 65% знаходиться в діапазоні 0,5-0,1 мм. Вміст частинок менше 0,06 мм лише 0,34%.

Зразок 4. Однорідність – висока; проміжна, має більш ширший діапазон розподілу ніж зразок №3, вміст пилу (близько 2,27% фракції <0,06 мм).

Отримані зразки мають неоднорідний гранулометричний склад, що є типовим для таких процесів з окалиною при прокатці сталі: механічному руйнуванню оксидів металу, транспортуванню та накопиченні.

Неоднорідний склад окалини свідчить про необхідність фракціювання перед наступними технологічними операціями, такими як магнітна сепарація, в залежності від розмірів фракції може бути використане різне магнітне поле. Переважання в зразках 3 та 4 дрібних та середніх фракцій доводить доцільність використання методу сухої магнітної сепарації, так як дані фракції забезпечують ефективний контакт з поверхнею магнітного інструменту, в свою чергу дрібні та середні фракції не будуть містити немагнітних речовин.

Найкращою технологією збагачення (відділення металевих частин від неметалевих) є суха магнітна сепарація, яка масово використовується заводами для збереження навколишнього середовища, порівняно із звичайним мокрим магнітним розділенням, велика перевага цього методу є збереження водного середовища, так як це призводить до економії води при цьому методі, штабелюванні та зберіганні відходів [6–9]. Реалізуючи цей процес можна ефективно відокремлювати феромагнітні частки від немагнітних, це підвищує якість сировини для подальшої переробки.

Для проведення магнітної сепарації було відібрано зразки, які пройшли попереднє просіювання на ситі з розміром отворів 0,8 мм. Дослідження проводились на двох лабораторних приладах (рис. 5) барабанному NdFeB сепараторі з магнітним полем 0,35 Тсл. та лабораторному валковому сепараторі 138Т шляхом пропускання фракції через магнітне поле сепаратора, що дозволило відділити магнітні частки від немагнітних. Для регулювання струму був використаний прилад «Джерело постійного струму Б5-47» струм використання: 0.1А; 0.15А; 0.25А; та 1А; це дозволило вилучити дрібні феромагнітні частки. Наймагнітнішими частками оксидів заліза вважають магнетит (Fe_3O_4), більш слабкішими є гематит/вюстит, тому для їх вилучення використовують більш сильніше магнітне поле [3, 7–9].

Для сухої сепарації вологість більше 3–5% є критичним показником, тому окалина спочатку була просушена. Перший раз пробу пропускали через слабке магнітне поле 0.1-0.16Тл, а другий раз через більш сильніше 0.2-0.35 Тл. Вся сировина, що не ввійшла в діапазон магнітного поля 0.1-0.4 Тл вважається не магнітним продуктом і не може бути повернена в виробничі цикли металургії.

В результаті дослідження встановлено, що можна забезпечити вилучення 50% магнітних частинок з вихідної окалини магнітним полем від 0.1-0.2Тл, та 45% з магнітним полем від 0.2-0.4Тл, і лише 5% від досліджуваних зразків є немагнітною сировиною. Вихід магнітного продукту найбільше спостерігається в крупних фракціях, так як дрібні частинки потребують більшої потужності, а отже містять менше феромагнітного компоненту.

Після обробки окалини на магнітному сепараторі 138Т можна виділити 2 окремих продукти перший це магнітний продукт, що можна без додаткової обробки відразу направити на повторне використання в металургії, а інший продукт немагнітний можна відправити на використання як сировину для будівельних матеріалів. Використання методу магнітної сепарації є ключовим фактором для подальших досліджень з комплексної переробки металовмісних відходів сталепрокатного виробництва.

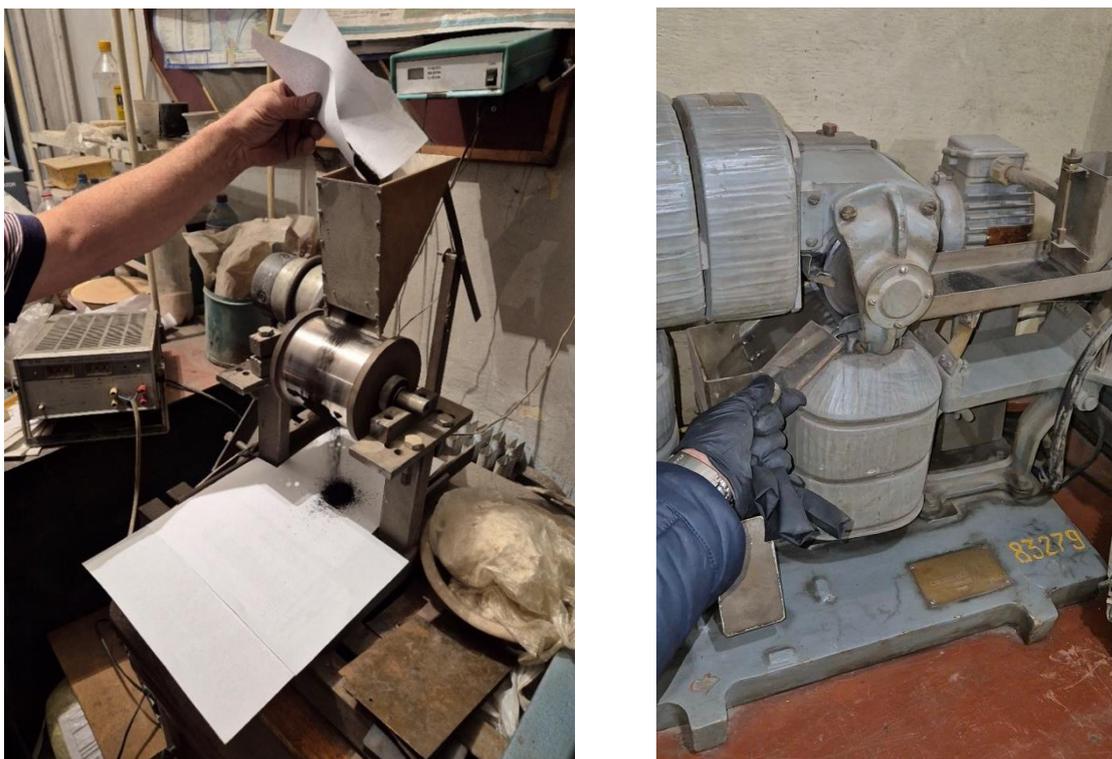


Рис. 5. Проведення лабораторного дослідження методом магнітної сепарації на барабанному NdFeB та валковому сепараторі 138Т

На основі проведених досліджень пропонується алгоритм процесів підготовки металургійної окалини до переробки (рис. 6).

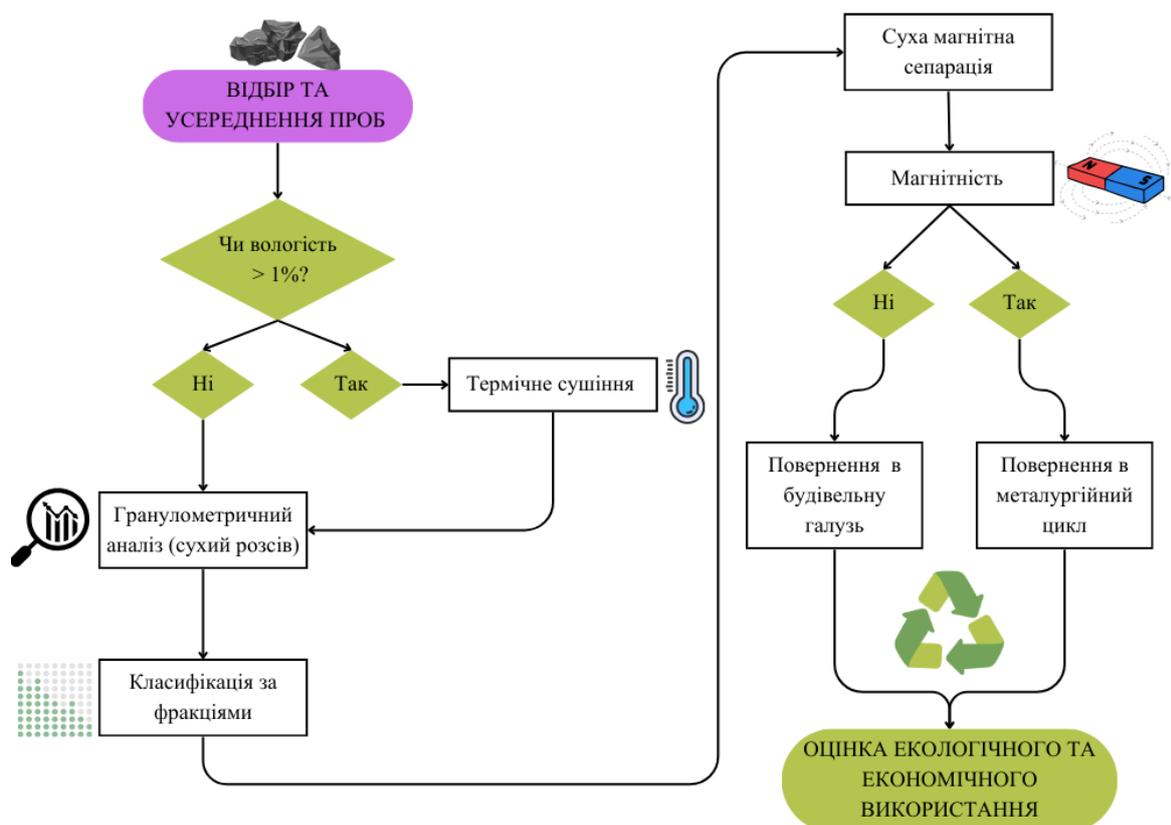


Рис. 7. Алгоритм процесів підготовки металургійної окалини до переробки

Ця технологічна схема рекомендується до застосування для забезпечення комплексної переробки металовмісних відходів сталепрокатних підприємств.

Висновки та рекомендації. В результаті проведених досліджень виявлено що вологість зразків окалини коливається в діапазоні від 0,1% до 39% і її одразу можна класифікувати на суху та вологу, вологу окалину потрібно попередньо просушувати. Гранулометричний аналіз показав, що окалина не однорідна в зразках в яких переважає фракція менше 0,06 мм потребують брикетування, повернення в чистому вигляді в виробничий цикл.

Метод технологічного збагачення шляхом магнітної сепарації підтвердив свою ефективність. Процес магнітної сепарації на лабораторному валковому сепараторі показав що вилучення з окалини магнітних частинок на слабому електромагнітному полі від 0.1-0.2Тл дозволяє вилучити до 50% матеріалу, та 45% з більш сильним магнітним полем від 0.2-0.4Тл, і лише 5% від досліджуваних зразків є немагнітною сировиною. Тобто окалина є дуже цінною вторинною сировиною яка містить 95% магнітних частинок, і може бути повернена в виробничий цикл.

Запропонований якісний алгоритм процесів підготовки металургійної окалини до переробки та розділення окалини. Для подальшого використання вторинних матеріальних ресурсів, як повернення в виробничий цикл, так і для виготовлення будівельних матеріалів. Також необхідно провести дослідження для виявлення нафтових продуктів в окалині. Задля безпечного екологічного використання. Запропонований алгоритм відповідає принципам сталого розвитку та концепції циркулярної економіки. Реалізація даних процесів забезпечує зменшення площ зберігання, витрат на водні ресурси та зменшення екологічних ризиків.

Перелік посилань

1. World Steel Association (2025). World Steel in Figures 2025. World Steel Association, Brussels. PDF: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf>
2. ISO/TC 323 – ISO – Jerome Petry. ISO 59040 — Circular economy: Product Circularity Data Sheet. UNECE / Digital Product Passport Kick-off Meeting materials, 25 Feb 2025. (Online). Available at: <https://unece.org/sites/default/files/2025-02/ISO%20TC323%20-%20ISO%20-%20Jerome%20Petry.pdf>
3. Xie, S., Hu, Z., Lu, D., & Zhao, Y. (2022). Dry Permanent Magnetic Separator: Present Status and Future Prospects. *Minerals*, 12(10), 1251. <https://doi.org/10.3390/min12101251>
4. ISO 3310-1:2016. Test sieves — Technical requirements and testing — Part 1: Test sieves of metal wire cloth. International Organization for Standardization, Geneva.
5. ДСТУ EN 45501:2017. Метрологічні аспекти неавтоматичних зважувальних приладів. Національний стандарт України. (EN 45501:2015, IDT).
6. Павличенко, А., & Палєхова, Л. (2024). Драйвери та бар'єри переходу металургії України до циркулярної економіки. *Стале споживання та виробництво у глобальних ланцюгах створення вартості: монографія*, 105–120. https://mk.nmu.org.ua/ua/source/Monograph_Complete_2024%20with%20ISBN.pdf
7. Zong, Q. X., Fu, L. Z., & Bo, L. (2018). Variables and Applications on Dry Magnetic Separator. *E3S Web of Conferences*, 53, 02019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185302019>
8. Pluțiu-Varvara, D.-A., Tintelecan, M., Aciu, C., & Sas-Boca, I.-M. (2020). Reuse of the Steel Mill Scale for Sustainable Industrial Applications. *Proceedings*, 63(1), 14. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020063014>

9. Baawuah, E., Kelsey, C., Addai-Mensah, J., & Skinner, W. (2020). Assessing the performance of a novel pneumatic magnetic separator for the beneficiation of magnetite ore. *Minerals Engineering*, 156, 106483. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106483>

ABSTRACT

Purpose. Determine the technological properties of sludge and justify its use as secondary raw material for complex processing with return to the production cycle.

Research methodology. Ten samples of sludge were selected for the study, differing in terms of storage time and conditions. The moisture content of the samples was determined. The granulometric composition of the sludge was studied using a standard set of sieves in accordance with the requirements of the international standard ISO 3310-1. Magnetic separation of sludge samples was carried out on a drum NdFeB separator with a magnetic field of 0.35 T and a laboratory roller separator 138T.

Research results. It has been established that secondary material resources such as scale require preliminary preparation by drying for further processing and are characterized by a heterogeneous granulometric composition with a predominance of fine and medium-sized fractions, which is a favorable indicator for further processing. It was established that a magnetic field of 0.1-0.2 T can remove up to 50% of magnetic particles from the initial sludge, and a magnetic field of 0.2-0.4 T can remove up to 45%. The highest yield of magnetic product is observed in large fractions. A technological scheme has been developed for the use of sludge for further complex processing with the aim of extracting useful components and returning them to the production cycle.

Scientific novelty. The patterns of influence of storage time, moisture content, and granulometric composition of sludge on the efficiency of magnetic component extraction by magnetic fields of varying intensity have been established.

Practical significance. The data obtained can be used in the development of a comprehensive technology for processing metal-containing waste from steel rolling mills, which in turn will increase the level of waste utilization.

Keywords: *sludge, secondary material resource, moisture content, comprehensive processing, magnetic separation, processing technologies.*

дата першого надходження статті до видання	01.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	02.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025