

**УДК 669.15-198'162.1:358.953****О. С. Воденнікова**, канд. техн. наук, доцент;e-mail: [oksana\\_vodennikova@ukr.net](mailto:oksana_vodennikova@ukr.net),ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4404-3454>**О. Б. Матяшева\***, методист; e-mail: [hladskaya@gmail.com](mailto:hladskaya@gmail.com),ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9604-4128>**Л. В. Воденнікова\*\***, асистент; e-mail: [larisa.vodennikova@gmail.com](mailto:larisa.vodennikova@gmail.com),ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1602-8257>

Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)

\*Науково-методичний центр професійно-технічної освіти у Запорізькій області (Запоріжжя, Україна)

\*\*Запорізький державний медичний університет (Запоріжжя, Україна)

## **ВИБІР СКЛАДУ ШИХТИ З МІНІМАЛЬНИМ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯМ ДЛЯ ВИПЛАВКИ МАЛОФОСФОРИСТОГО ШЛАКУ**

Важливе значення для підвищення ефективності виробництва марганцевих сплавів, зниження матеріаломісткості продукції та економії сировинних ресурсів є застосування сучасних енерго- та ресурсозберігаючих технологій в феросплавній промисловості. Зокрема особливо актуальним у зв'язку зі зростанням вимог до екологічної безпеки виробництва та охорони навколишнього середовища виступає питання підвищення рівня використання вторинних матеріалів. У роботі запропоновано новий підхід до оптимізації складу компонентів шихти при виплавці малофосфористого шлаку за рахунок вибору шихтових матеріалів, які володіють низькою питомою теплоємністю, та розглянуто можливості повернення у виробництво вторинних металовмісних матеріалів як заміників дорогих та дефіцитних компонентів шихти. Зокрема при виплавці МФШ запропоновано застосування у шихті замість кварциту та частини коксу відходів вуглезабагачення коксохімічного виробництва та відходів виробництва вторинного алюмінію. Досліджено залежність теплофізичних властивостей (тепловміщення, питомої теплоємності та теплопровідності) компонентів шихти для виплавки МФШ в інтервалі температури 100–1100 °C на установці ДТВМ-1, в якій використано комплексний нестационарний метод балансу теплоти в зразку. Аналіз цих залежностей дає змогу пошуку оптимального складу шихти з мінімальною теплоємністю (з метою енергозбереження) та з максимальним коефіцієнтом теплопровідності (з метою поліпшення технологічних характеристик шихти). В лабораторних умовах проведено серію плавок МФШ з додаванням у шихту відходів вуглезабагачення коксохімічного виробництва у кількості 9,2–10,3 % та відходів виробництва вторинного алюмінію у кількості 3,5–3,8 %. Металографічні дослідження зразків малофосфористого шлаку з зовнішньої частини гарнісажу (без футеровки) показали, що МФШ складається з округлих зерен манганозиту з силікатними складовими.

**Ключові слова:** малофосфористий шлак, марганцеві сплави, теплофізичні властивості, питома теплоємність, теплопровідність, теплоспоживання.

На сьогодні застосування сучасних енерго-та ресурсозберігаючих технологій, розширення асортименту феросплавів та лігатур, технічне переоснащення виробництва, підвищення якості металопродукції та обсягів випуску є першочерговими завданнями для підвищення конкурентоспроможності феросплавної галузі [1, 2].

Так висока конкуренція металопродукції на світових ринках вимагає від сталеплавильної промисловості України використання якісних матеріалів, в тому числі марганцевих сплавів. Виснаження запасів високосортних марганцевих руд

призвело до збільшення залучення в їх виробництво низькосортних оксидних та карбонатних марганцевих концентратів з низьким вмістом марганцю і високим вмістом фосфору. Виплавити феросплави з необхідним вмістом фосфору можливо тільки при забезпеченні виробництва марганцевою сировиною з низьким вмістом фосфору. У зв'язку з цим отримання стандартних за вмістом фосфору феросплавів вимагає попередньої дефосфорації концентратів [3].

Відомо, що на відміну від закордонних марганцевих руд (наприклад, руди Австралії, Індії та ПАР містять 0,0013, 0,012 та 0,08 % фосфору відповідно), руди України мають високий вміст фосфору. Так в рудах Нікопольського родовища міститься 0,15–0,3 % фосфору в оксидних рудах та до 0,6 % фосфору в карбонатних рудах [4]. Цей факт істотно впливає на технологію отримання малофосфористого шлаку (МФШ) і товарного феромарганцю та визначає можливість виробництва марганцевих сплавів з регламентованим вмістом фосфору [5, 6].

Так виплавка силікомарганцю із зниженням вмістом фосфору потребує значної витрати малофосфористого шлаку, що призводить до підвищення його собівартості не тільки за рахунок використання більш дорогої вихідної сировини, але і за рахунок різкого зниження показників виробництва сплаву [7]. Головними проблемами при виплавці МФШ є підвищена питома витрата електроенергії та необхідність використання у шихті кремнійвмісних компонентів (наприклад, відсіву кварциту) для досягнення низької в'язкості розплаву МФШ [8].

Відомо, що теплофізичні властивості матеріалів та виробів характеризують відношення до дії на них теплової енергії. Вони включають в себе здатність проводити (теплопровідність, температуропровідність) та поглинати тепло (теплоємність), зберігати або змінювати властивості при зміні температур (тепло- та термостійкість, вогнестійкість) [9]. Основні теплофізичні властивості матеріалів металургійного призначення наведено у роботах [10, 11], а перспективні методи їх визначення – у роботі [12].

Тому дана робота присвячена дослідженню теплофізичних властивостей компонентів шихти для виплавки МФШ з метою пошуку складу шихти з мінімальним теплоспоживанням.

У лабораторних умовах для виплавки МФШ в якості вихідних компонентів шихти використовували оксидний марганцевий концентрат сорту 1Б Нікопольського родовища, кварцит, відвальний шлак силікомарганцю, кокс, відходи вуглезбагачення коксохімічного виробництва (ВВКВ) та відходи виробництва вторинного алюмінію (ВВВА) (табл. 1).

Використовували оксидний марганцевий концентрат фракції до 50 мм, який піддавали попередньому окусуванню методом агломерації. Метод агломерації обрано через недостатню газопроникненість шихти з причини наявності великої кількості дрібної фракції.

Додавка кварциту в шихту призводить до зниження вмісту марганцю в шихті та підвищення кратності шлаку. Використовували кварцит фракції 25–80 мм. Підготовка кварциту до плавки полягала у подрібненні його на щоківних дробарках.

Відомо, що недоліками коксу є невеликий електричний опір та реакційні властивості, відносно великий вміст золи, сірки і фосфору та значний нестабільний вміст води (згідно з ГОСТ 32248-2013 [13]). Використовували кокс фракції 25–40 мм та 40–60 мм. Мікроструктура зразків коксу представлена оксидом кальцію, сульфатом заліза, сульфідом кальцію золи, які потрапляють в кокс при виробництві з вихідного вугілля (рис. 1). Основна маса пір (~ 90 %) має розміри понад 10 мкм.

Необхідність пошуку заміників дефіцитного коксу, який при виплавці МФШ виконує функцію відновника [14], зумовила застосування відходів вуглезбагачення коксохімічного виробництва. Вибір вуглецевотермічного способу виробництва обґрунтований відносно невеликою вартістю відновника порівнянно з силікотермічним та алюмотермічним способами.

Дослідження теплофізичних властивостей даних компонентів шихти проводили

Таблиця 1

Хімічний склад вихідних компонентів шихти для виплавки МФШ

| Хімічний склад компонентів шихти, % | Компоненти шихти                |         |                                 |      |        |      |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------|---------------------------------|------|--------|------|
|                                     | оксидний марганцевий концентрат | кварцит | відвальний шлак силіко-марганцю | кокс | ВВКВ   | ВВВА |
| Mn                                  | 42,7                            | –       | 8,6                             | –    | –      | –    |
| MnO                                 | –                               | 0,2     | –                               | –    | –      | –    |
| SiO <sub>2</sub>                    | 14,4                            | 98,2    | 46,8                            | –    | 46,4   | 0,24 |
| CaO                                 | 3,2                             | 0,2     | 18,8                            | –    | 2,2    | 0,79 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | 1,6                             | 0,5     | 9,9                             | –    | 17,1   | 18,5 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | 2,5                             | 0,45    | –                               | –    | –      | –    |
| FeO                                 | –                               | –       | –                               | –    | 6,0    | –    |
| Fe                                  | 2,2                             | –       | –                               | –    | –      | –    |
| MgO                                 | 1,3                             | –       | 10,0                            | 1,8  | 1,2    | 0,32 |
| S                                   | –                               | –       | 1,7                             | –    | 2,2    | –    |
| P                                   | 0,2                             | –       | 0,002                           | 78,3 | 0,1    | –    |
| C                                   | –                               | –       | –                               | 15,0 | 13,9   | –    |
| Na <sub>2</sub> O                   | –                               | –       | –                               | –    | –      | 23,0 |
| н.п.п.                              | –                               | –       | –                               | –    | до 5,0 | 25,0 |

на установці ДТВМ-1 в інтервалі температури 100–1100 °С, в якій використано комплексний нестаціонарний метод балансу теплоти в зразку, що дозволяє визначати теплофізичні властивості як функцію температури за одну спробу [15, 16]. Отримані експериментальні залежності теплофізичних властивостей компонентів шихти від температури представлено на рис. 2–4 [17].

Встановлено досить лінійний характер залежності тепловміщення від температури, при чому до 400 °С тепловміщення усіх дослідних зразків суттєво не відрізняється, а при 1100 °С тепловміщення зразків № 3 та № 4 відрізняється лише на 288 кДж/моль (рис. 2, крива 3 та 4).

Експериментально доведено, що в інтервалі температури 600–1100 °С питома теплоємність зразків № 3 та № 2 відрізняється на 0,145–0,662 кДж/кг·К (рис. 3). Це дозволяє стверджувати, що застосування ВВКМ, як складового компонента шихти при виплавці МФШ, призведе до зниження собівартості готового продукту.

Встановлено, що теплопровідність зразків компонентів шихти залежить як від хімічного складу компонента, так і від температурного інтервалу досліджень. При чому марганець збільшує (рис. 4, крива 1), а алюміній та кремній знижують (рис. 4, крива 3 та 2) значення теплопровідності шихти, що цілком узгоджується з даними роботи [18].

Виплавку МФШ здійснювали в руднотермічній печі типу РКО-7 з попередньою

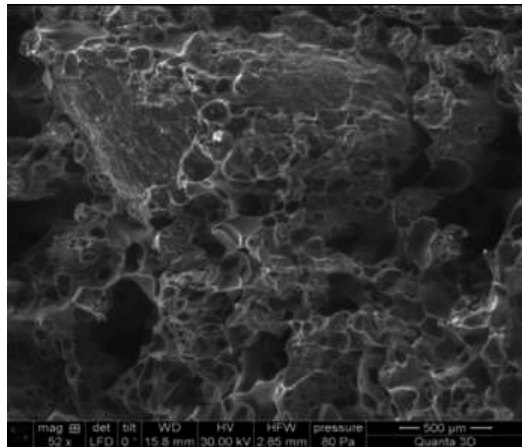


Рис. 1. Мікроструктура зразка коксу без нагрівання; x 52

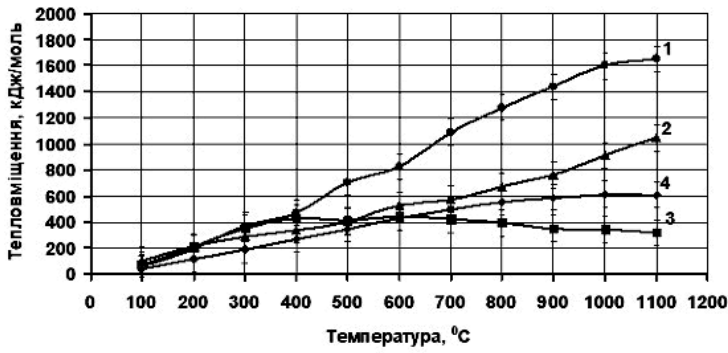


Рис. 2. Залежності тепловміщення компонентів шихти для виплавки МФШ від температури: 1 – оксидний марганцевий концентрат; 2 – ВВКВ; 3 – кокс; 4 – ВВВА

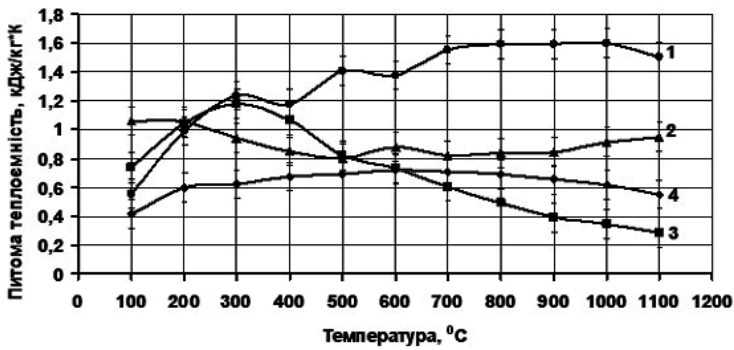


Рис. 3. Залежність питомої теплоємності компонентів шихти для виплавки МФШ від температури: 1 – оксидний марганцевий концентрат; 2 – ВВКВ; 3 – кокс; 4 – ВВВА

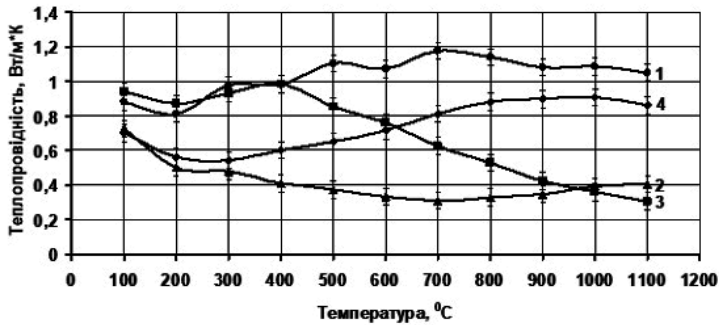


Рис. 4. Залежність теплопровідності компонентів шихти для виплавки МФШ від температури: 1 – оксидний марганцевий концентрат; 2 – ВВКВ; 3 – кокс; 4 – ВВВА

підготовкою шихти до плавки. Проведено три серії плавок (табл. 2): перша – цехова технологія, друга та третя – дослідні плавки з доданням у шихту ВВКВ та ВВВА замість кварциту та частини коксу.

Аналіз експериментальних даних питомої теплоємності різних складів шихти для виплавки МФШ показав, що:

- шихта з доданням ВВКВ у кількості від 9,2 до 9,9 % (рис. 5, крива 2) має мінімальне значення питомої теплоємності (в інтервалі 0,588–0,895 кДж/кг·K) та можна рекомендувати у виробництво при виплавці МФШ замість шихти з коксом.

Таблиця 2

Вихідний склад шихти для виплавки малофосфористого шлаку

| Номер плавки | Вміст компонентів шихти, %      |         |                                 |      |       |      |
|--------------|---------------------------------|---------|---------------------------------|------|-------|------|
|              | оксидний марганцевий концентрат | кварцит | відвальний шлак силіко-марганцю | кокс | ВВКВ  | ВВВА |
| 1            | 79,60                           | 7,90    | 6,60                            | 5,90 | –     | –    |
| 2            | 79,70                           | –       | 6,70                            | 4,40 | 9,20  | –    |
|              | 79,30                           | –       | 6,70                            | 4,30 | 9,70  | –    |
|              | 78,90                           | –       | 6,70                            | 4,50 | 9,90  | –    |
| 3            | 80,23                           | –       | 2,57                            | 3,10 | 10,30 | 3,80 |
|              | 80,68                           | –       | 2,62                            | 3,10 | 9,90  | 3,70 |
|              | 80,98                           | –       | 2,62                            | 3,10 | 9,80  | 3,50 |

– введення в шихту компонентів, що містять лужні і лужноземельні метали (рис. 5, крива 3), дозволяє понизити вміст кремнезему в шлаку і тим самим підвищити техніко-економічні показники виплавки МФШ: понизити в 1,5–2,0 рази в'язкість шлаку та на 50–70 °С температуру його плавлення.

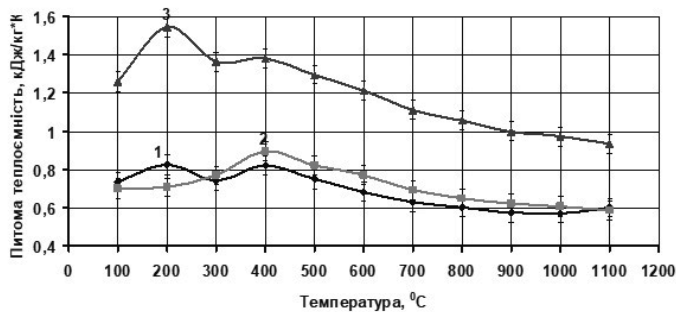


Рис. 5. Залежність питомої теплоємності шихти для виплавки МФШ від температури: 1 – цехова технологія; 2, 3 – дослідні плавки

Виплавлений МФШ мав наступний хімічний склад: 45 % Mn, 26 % SiO<sub>2</sub>, 0,2 % FeO, 5,3 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4,2 % CaO, 3,8 % MgO, 0,45 %, 0,012 % P та інші домішки. Мікроструктура МФШ з зовнішньої частини гарнісажу (без футеровки) складається з округлих зерен манганозиту з силікатними складовими (рис. 6).

Таким чином, запропонований склад шихти для виплавки малофосфористого шлаку надає можливості повернення у феросплавне виробництво вторинних металовмісних матеріалів шляхом заміни частини коксу та кварциту відходами вуглезбагачення коксохімічного виробництва та відходами виробництва



Рис. 6. Мікроструктура малофосфористого шлаку з зовнішньої частини гарнісажу (світло відбите); x 200

вторинного алюмінію. Такий склад можна рекомендувати для умов промислового виробництва з подальшим використанням МФШ на стадії виплавки металевого марганцю.

### Список літератури

1. Мельник Я.В. Энергозберігаючі технології як основа для підвищення конкурентоспроможності гірничо-металургійної продукції. *Інвестиції: практика та досвід*. 2011. №14. С. 72–76. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ipd\\_2011\\_14\\_18](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ipd_2011_14_18)
2. Грищенко С. Г. Будущее мировой ферросплавной промышленности: оптимизация сортамента, высокое качество продукции, энергоэффективность и экологичность. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 1. С. 6–12. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP\\_2015\\_1\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2015_1_4)
3. Юньшен Ду. Розробка та дослідження технології виробництва рафінованих сплавів марганцю в конвертері з донною продувкою: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.16.02/ Юньшен Ду. Дніпро, 2020. 21 с.
4. Мироненко П.Ф., Дедов Ю.Б., Гладких В.А., Филиппов И.Ю., Кучер И.И. Методика металлургической оценки качества марганцевого сырья по его химическому составу. *Сталь*. 2000. № 8. С. 29–31.
5. Грищенко С.Г. Мировой рынок марганцевой руды и ферросплавов в IV кв. 2013 г. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 2. С. 8–14.
6. Нохрина О.И., Рожихина И.Д. Важен комплексный подход: пути рационального использования марганцевых руд. *Металлы Евразии*. 2006. № 1. С. 34–36.
7. Овчарук А. Н., Рогачёв И. П., Коваль А. В., Люборец И. И., Ганцеровский О. Г., Кучер И. Г. Количественные закономерности изменения технико-экономических показателей производства силикомарганца с различной концентрацией фосфора. Актуальные проблемы и перспективы электрометаллургического производства: теория и технология, эффективность использования минерально-сырьевых ресурсов, экология, экономические аспекты развития внутреннего и внешнего рынков: материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию ГметАУ и 75-летию кафедры электрометаллургии (г. Днепропетровск, 30.06–02.07.1999 г.). Днепропетровск: Системные технологии, 1999. С. 161–163.
8. Гаврилов В.А., Матюшенко В.Н., Гасик М.И. Влияние основности и окисленного потенциала печной атмосферы на полезное использование марганца и кремния при выплавке металлургического марганца силикотермическим процессом. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1997. № 4. С. 23–27.
9. Теплофизические свойства [Электронный ресурс]. Режим доступу: [https://studref.com/347257/tovarovedenie/teplofizicheskie\\_svoystva](https://studref.com/347257/tovarovedenie/teplofizicheskie_svoystva)
10. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: справочник. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. – 356 с.
11. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: справочник. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
12. Юрьев Б.П., Гольцев В.А., Матюхин В.И., Матюхин О.В., Шешуков О.Ю. Определение теплофизических свойств материалов металлургического производства: монография. Екатеринбург: Уральский издательский полиграфический центр, 2014. 180 с.
13. ГОСТ 32248-2013. Кокс литейный каменноугольный. Кокс каменноугольный с размером кусков 20 мм и более. Определение прочности после реакции с двуокисью углерода [Действительный от 2015-01-01]. М.: Стандартинформ, 2014. 9 с.
14. Мизин В.Г., Серов Г.В. Углеродистые восстановители для ферросплавов. М.: *Металлургия*, 1976. 272 с.
15. Морозенко О.П. Фізико-хімічний аналіз процесів відновлення та теплоспоживання компонентів і шихт при виробництві марганцевих феросплавів з метою енергозбереження: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.16.02 / О. П. Морозенко. Дніпропетровськ, 2009. 21 с.
16. Ильченко К.Д., Морозенко Е.П. Планирование эксперимента при исследовании теплофизических свойств шихтовых материалов в металлургии. Днепропетровск: Січ, 2004. 176 с.
17. Воденнікова О.С., Матяшева О. Б., Воденнікова Л. В., Бобошко Д. Ю. Дослідження теплофізичних властивостей компонентів шихти для виплавки малофосфористого шлаку.

Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. 2020. Вип. 50. С. 36–40. Doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-36-41.

18. Рогачёв И. П., Лазнев В. К. *Теплопроводность сплавов систем Mn–Fe–Si–C и Mn–Fe–Si–Al–C*. Актуальные проблемы и перспективы электрометаллургического производства: теория и технология, эффективность использования минерально-сырьевых ресурсов, экология, экономические аспекты развития внутреннего и внешнего рынков: материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию ГметАУ и 75-летию кафедры электрометаллургии (г. Днепропетровск, 30.06–02.07.1999 г.). Днепропетровск: Системные технологии, 1999. С. 181–183.

Надійшла 28.08.2021

## References

1. Melnyk Ya.V. (2011). *Investytsii: praktyka ta dosvid*. No 14, pp. 72–76 [in Ukrainian].
2. Grishhenko S.G. (2015). *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*. No 1, pp. 6–12 [in Russian].
3. Yun'shen Du. (2020). *Rozrobka ta doslidzhennia tekhnolohii vyrobnytstva rafinovanykh splaviv marhantsiu v konverteri z donnoi uroduvkoju* (Development and advancement of technology for the development of refined alloys of manganese in a converter with a bottom blowing), Kand. tekhn. nauk. Dnipro: NMAU, 21 p. [in Ukrainian].
4. Mironenko P. F., Dedov Ju. B., Gladkih V. A., Filippov I. Ju., Kucher I. I. (2000). *Stal'*, no 8, pp. 29–31 [in Russian].
5. Grishhenko S. G. (2014). *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*. No 2, pp. 8–14. [in Russian]
6. Nohrina O. I., Rozhihina I. D. (2006). *Metally Evrazii*. No 1, pp. 34–36 [in Russian].
7. Ovcharuk A. N., Rogachjov I. P., Koval A. V., Ljuborec I. I., Ganceroskij O. G., Kucher I. G. (1999). *Aktual'nye problemy i perspektivy jelektrometallurgicheskogo proizvodstva: teorija i tehnologija, jeffektivnost' ispol'zovanija mineral'no-syr'evykh resursov, jekologija, jekonomicheskie aspekty razvitiya vnutrennego i vneshnego rynkov: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashhjonnoj 100-letiju GmetAU i 75-letiju kafedry jelektrometallurgii* (Actual problems and prospects of electrometallurgical production: theory and technology, the efficiency of using mineral resources, ecology, economic aspects of the development of domestic and foreign markets: materials of the international scientific and practical conference, dedicated to the 100th anniversary of GmetAU and the 75th anniversary of the Department of Electrometallurgy), Dnepropetrovsk: Sistemnye tehnologii. Pp. 161–163 [in Russian].
8. Gavrilov V. A., Matjushenko V. N., Gasik M. I. (1997). *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*. No 4, pp. 23–27 [in Russian].
9. Teplofizicheskie svoystva. Retrieved from: [https://studref.com/347257/tovarovedenie/teplofizicheskie\\_svoystva](https://studref.com/347257/tovarovedenie/teplofizicheskie_svoystva) [in Russian].
10. Chirkin V. S. (1959) *Teplofizicheskie svoystva materialov: spravochnik* (Thermophysical properties of materials: a reference book). Moskva: FIZMATGIZ. 356 p. [in Russian].
11. Novickij L. A., Kozhevnikov I. G. (1975). *Teplofizicheskie svoystva materialov pri nizkikh temperaturah: cpravochnik* (Thermophysical properties of materials at low temperatures: a handbook). Moscow: Mashinostroenie. 216 p. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2020-1-50-36-41>
12. Jur'ev B. P., Gol'cev V. A., Matjuhin V. I., Matjuhin O. V., Sheshukov O. J. u. (2014). *Opredelenie teplofizicheskikh svoystv materialov metallurgicheskogo proizvodstva: monografija* (Determination of thermophysical properties of materials of metallurgical production: monograph). Ekaterinburg: Ural'skij izdatel'skij poligraficheskij centr. 180 p. [in Russian].
13. GOST 32248-2013. (2014). *Koks litejnyj kamennougol'nyj. Koks kamennougol'nyj s razmerom kuskov 20 mm i bolee. Opredelenie prochnosti posle reakcii s dvoukis'ju ugljeroda* (Foundry coal coke. Coal coke with a lump size of 20 mm and more. Determination of strength after reaction with carbon dioxide). Moscow: Standartinform. 9 p. [in Russian].
14. Mizin V. G., Serov G. V. (1976). *Uglerodistyje vosstanoviteli dlja ferrosplavov*, Moscow: Metallurgija. 272 p. [in Russian].
15. Morozenko O. P. (2009). *Fizyko-khimichnyj analiz protsesiv vidnovlennia ta teplospozhyvannia komponentiv i shykht pry vyrobnytstvi marhantsevykh ferosplaviv z metoiu enerhozbezhezhennia* (Physical and chemical analysis of reduction and heat consumption processes of components and charges in the production of manganese ferrous alloys in order to save energy), Kand. tekhn. nauk, Dnipropetrovsk: NMAU. 21 p. [in Ukrainian].

16. Il'chenko K. D., Morozenko E. P. *Planirovanie jeksperimenta pri issledovanii teplofizicheskikh svoystv shihtovykh materialov v metallurgii* (In metallurgy experiment planning of the thermophysical property of charge materials is studied), Dnepropetrovsk: Sich, 2004. 176 p. [in Russian].
17. Vodennikova O. S., Matiasheva O. B., Vodennikova L. V., Boboshko D. Yu., (2020). *Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu* : zb. nauk. prats'. Iss. 5, pp. 36–40 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2020-1-50-36-41>.
18. Rogachjov I. P., Laznev V. K. (1999). *Aktual'nye problemy i perspektivy jelektrometallurgicheskogo proizvodstva: teorija i tehnologija, jeffektivnost' ispol'zovanija mineral'no-syr'evyh resursov, jekologija, jekonomicheskie aspekty razvitija vnutrennego i vneshnego rynkov: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashhionnoj 100-letiju GmetAU i 75-letiju kafedry jelektrometallurgii* (Actual problems and prospects of electrometallurgical production: theory and technology, the efficiency of using mineral resources, ecology, economic aspects of the development of domestic and foreign markets: materials of the international scientific and practical conference, dedicated to the 100th anniversary of GmetAU and the 75th anniversary of the Department of Electrometallurgy), Dnepropetrovsk: Sistemnye tehnologii. pp. 181–183. [in Russian].

Received 28.08.2021

**O. S. Vodennikova, PhD (Engin.);** e-mail: [oksana\\_vodennikova@ukr.net](mailto:oksana_vodennikova@ukr.net),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4404-3454>

**O. B. Matyasheva, Methodist,** e-mail: [hladskaya@gmail.com](mailto:hladskaya@gmail.com),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9604-4128>

**L. V. Vodennikova, Assistant,** e-mail: [larisa.vodennikova@gmail.com](mailto:larisa.vodennikova@gmail.com),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1602-825>

## SELECTION FOR THE COMPOSITION OF THE CHARGE WITH MINIMAL HEAT CONSUMPTION FOR SMELTING LOW-PHOSPHORUS SLAG

*The use of modern energy and resource-saving technologies in the ferrous alloy industry is important for increasing the efficiency of manganese alloys production, reducing the material consumption of products and saving raw materials. The work proposes a new approach to optimizing the composition of charge components in the smelting of low-phosphorus slag (LPS) due to the choice of charge materials with low specific heat, and considers the possibility of returning to the production of secondary metal-containing materials as substitutes for expensive and scarce charge components. In particular, the issue of increasing the level of use of secondary materials is especially relevant in connection with the growing requirements for environmental safety of production and environmental protection. In particular, in the smelting of LPS it is proposed to use wastes of coal beneficiation in coke production (CBCP) and wastes of secondary aluminium production (WSAP) instead of quartzite and part of coke in the charge. The dependence of thermophysical properties, such as heat transfer, specific heat capacity and thermal conductivity of charge components for LPS smelting in the temperature range 100–1100 °C on the DTVM-1 unit, in which a complex non-stationary method of heat balance in the sample is used, is investigated. The analysis of these dependences makes it possible to find the optimal composition of the charge with minimum heat capacity in order to save energy and with the maximum thermal conductivity in order to improve the technological characteristics of the charge. In the laboratory, a series of LPS melts was carried out to add 9.2–10.3 % of coke-chemical production wastes to the charge and 3.5–3.8 % of wastes from secondary aluminium production. Metallographic studies of samples of low-phosphorus slag from the outer part of the garnish (without lining) showed that LPS consists of rounded grains of manganosite with silicate components.*

**Keywords:** low-phosphorus slag, manganese alloys, thermophysical properties, specific heat capacity, thermal conductivity, heat consumption.