

17. Qi L. Study of speed-sensorless weighted vector control of parallel connected induction motors drive / L. Qi, C. Weng, X. You // International Power Electronics and Application Conference and Exposition. – 2014. – P. 553-559.
18. Веселов Г.Е. Синергетическая система управления тяговым электроприводом / Г.Е. Веселов, И.А. Радионов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. – №5 (130). – С. 42-47.
19. Nakajima A. Vector control of two induction motor drives fed by matrix converter / A. Nakajima, K. Sakaki, K. Sankashita, H. Kubota // IECON 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2014. – P. 4873-4878.
20. Кручек В.А. Коэффициент использования сцепной массы локомотива с групповым тяговым приводом колесных пар / В.А. Кручек, А.В. Грищенко, Т.С. Титова // Известия Петербургского университета путей и сообщения. – 2017. – Том 14, № 2. – С. 267 – 279.

Рукопис подано до редакції 26.02.2020

УДК 669.15-198:538.953

О.С. ВОДЕННИКОВА, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний університет
 О.Б. МАТЯШЕВА, викл., Запорізький металургійний коледж Запорізького національного університету
 Л.В. ВОДЕННИКОВА, асист., Запорізький державний медичний університет
 Д.Ю. БОБОШКО, канд. техн. наук, Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОНЕНТІВ ШИХТИ ДЛЯ ВИПЛАВКИ МАЛОФОСФОРИСТОГО ШЛАКУ

Мета. Метою роботи є дослідження теплофізичних властивостей компонентів шихти для виплавки малофосфористого шлаку для пошуку складів шихт з мінімальним теплоспоживанням.

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями:
 експериментально визначити теплофізичні властивості (тепловміщення, питому теплоємність, коефіцієнт теплопровідності) компонентів шихти для виплавки МФШ;

проаналізувати аналітичні залежності теплофізичних характеристик шихтових матеріалів від температури та визначити оптимальний склад шихти з мінімальним теплоспоживанням.

Методи досліджень. При узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з напрямку удосконалення технології виробництва передільного малофосфористого шлаку використовувався комплексний підхід. Дослідження хімічного складу шихти для виплавки МФШ проводили за допомогою хімічного аналізу, а гранулометричний склад шихти визначали за допомогою ситового аналізу. Виконано обробку та аналіз експериментальних даних залежності теплофізичних характеристик компонентів шихти від температури.

Наукова новизна. Запропоновано підхід к оптимізації складу компонентів шихти при виплавці МФШ за рахунок вибору шихтових матеріалів, які володіють низькою питомою теплоємністю, що дозволяє удосконалювати технологічний режим виплавки МФШ, знизити витрати електроенергії на 15-20% та знизити собівартість готового продукту.

Практичне значення. Використання МФШ, отриманого з застосування низькотеплоємних шихт (з використанням у шихті замість кварциту та частини дефіцитного коксу відходів вуглезбагачення коксохімічного виробництва та відходів виробництва вторинного алюмінію), на стадії виплавки металевого марганцю дасть змогу знизити кратність шлаку, що в свою чергу призводить до підвищення витягу марганцю в шлак на 2%.

Результати. Дослідженнями теплофізичних властивостей компонентів шихти для виплавки МФШ встановлено вплив питомої теплоємності шихти на енергозбереження та запропоновано низькотеплоємний склад шихти, використання якого дозволить знизити витрату коксу на відновлення в 1,3-1,9 рази, зекономити до 20% електроенергії та відповідно знизити собівартості МФШ.

Ключові слова: малофосфористий шлак, склад шихти, теплофізичні властивості, питома теплоємність, теплопровідність, теплоспоживання.

doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-36-41

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Відомо, що трьохстадійна технологія виробництва металевого марганцю заснована на виплавці передільного малофосфористого шлаку (МФШ) селективним відновленням заліза і фосфору з марганцеворудної сировини періодичним процесом; отримання передільного низьковуглецевого висококремністого силікомарганцю безперервним вуглетермічним процесом та саме виробництво металевого марганцю силікотермічним процесом [1].

Виплавка силікомарганцю з зниженим вмістом фосфору потребує значної витрати малофосфористого шлаку, що призводить до підвищення його собівартості не тільки за рахунок використання більш дорогої сировини, але і за рахунок різкого зниження показників виробни-

цтва сплаву [2]. Так 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 [3].

При виплавці малофосфористого шлаку фосфор переважно переходить у супутрий метал, але деяка його частка залишається у шлаку у вигляді P_2O_5 . Тому проблема зменшення вмісту фосфору в шлаку шляхом пошуку нових складів шихт є актуальною та гостро стоїть перед феросплавною галуззю.

При запропонованні нового складу шихти або поліпшенні існуючого (базового) складу при виплавці МФШ одним із завдань є вивчення залежностей теплофізичних властивостей вихідних матеріалів від хімічного складу та температури. Аналіз цих залежностей дасть змогу пошуку оптимального складу шихт з мінімальною теплоємністю (з метою енергозбереження) та з максимальним коефіцієнтом теплопровідності (з метою поліпшення технологічних характеристик шихт).

Аналіз досліджень і публікацій. На сьогоднішній день «класична» технологія виплавки марганцевого МФШ (43-45% Mn, 25-27% SiO_2 , 0,2-0,3% FeO, 5-6% Al_2O_3 , 4-4,6% CaO, 3,5-4,4% MgO, 0,4-0,7% S та 0,012-0,015% P) в печах потужністю 16,5 МВА передбачає застосування шихти, що складається з марганцевого агломерату або суміші агломерату і концентрату (кількість концентрату може доходити до 30%), у якості відновника застосовують кокс-горішок в кількості 4-5% від маси рудної частини шихти. Для поглинання відновленого фосфору в шихту додають близько 4% залізної або чавунної стружки [4].

Питання підвищення якості марганцевого малофосфористого шлаку пов'язано з раціональним вибором складу шихти та способу його виплавки [5–12], які забезпечують зменшення вмісту фосфору в шлаку та збільшують витяг марганцю в шлак.

У роботі [13] запропоновано технологію отримання марганцевого МФШ з використанням у якості марганецьвмісної сировини дослідного агломерату АМНВ-2Г, отриманого з використанням окисно-зернистого концентрату 2-го сорту фракції < 1 мм виробництва ПАТ «Орджонікідзевський гірничо-збагачувальний комбінат».

Данні роботи [14] показують на застосування сумісної одностадійної технології виробництва МФШ та ФМн78Б, яка дозволяє повністю виключити утворення попутного сплаву, використання кварцвмісних компонентів шихти, отримати МФШ зі стабільно низьким вмістом фосфору (<0,010%) та ФМн78Б з низьким вмістом кремнію.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження теплофізичних властивостей компонентів шихти для виплавки малофосфористого шлаку для пошуку складів шихт з мінімальним теплоспоживанням.

Викладення матеріалу та результати. При дослідженні можливості покращення теплофізичних властивостей МФШ слід приділити увагу вибору складу шихт з мінімальним теплоспоживанням. Дослідженню теплофізичних властивостей підлягали наступні шихтові матеріали:

окисний марганцевий концентрат сорту 1Б Нікопольського родовища (42,7% Mn, 14,4% SiO_2 , 3,2% CaO, 2,2% Fe, 1,3% MgO та 0,2% P);

кокс (78,3% C та 20% золи коксу (38% SiO_2 , 11,7% Al_2O_3 , 12,8% FeO, 9,9% MnO, 3,8% CaO, 2,3% MgO, 1,5% S, 0,6% TiO_2 та 0,18% P);

відходи вуглезбагачення коксохімічного виробництва (46,4% SiO_2 , 17,1% Al_2O_3 , 13,9% C, 6% FeO, 2,2 CaO, 2,2% S, 1,2% MgO, 0,1% P та інше – н.п.п.);

відходи виробництва вторинного алюмінію (18,5% Al_2O_3 , 0,24% SiO_2 , 0,79% CaO, 23% Na_2O , 0,32% MgO, 25% н.п.п. та інші домішки).

Необхідність пошуку заміників дефіцитного коксу, який при виплавці МФШ виконує функцію відновника, зумовила застосування відходів вуглезбагачення коксохімічного виробництва. З метою повернення до технологічного процесу вторинних матеріалів можна замінити кварцит ($\approx 98,2\%$ SiO_2) відходами виробництва вторинного алюмінію.

Експериментальне дослідження теплофізичних властивостей шихтових компонентів в інтервалі зміни температур 100-1100 °С проводили на установці ДТВМ-1, в якій використано комплексний нестаціонарним метод балансу теплоти в зразку, згідно методики, описаній в роботах [15, 16].

Аналіз експериментальних даних залежності тепловміщення шихтових матеріалів від температури (рис. 1) показав на лінійний характер тепловміщення дослідних зразків, при чому до

400 °С тепловміщення усіх дослідних зразків суттєво не різняться. При збільшенні температури до 1100 °С тепловміщення зразків №3 та №4 відрізняється лише на 288 кДж/моль.

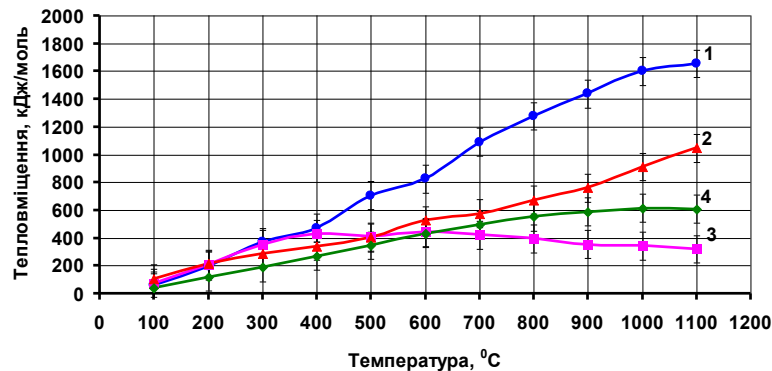


Рис. 1. Залежності тепловміщення шихтових матеріалів від температури: 1 – марганцевий концентрат сорту 1Б; 2 – відходи вуглезабагачення коксохімічного виробництва; 3 – кокс; 4 – відходи виробництва вторинного алюмінію

Дослідження залежності питомої теплоємності шихтових матеріалів від температури (рис. 2) показали на доцільність заміни у шихті частини коксу на відходи вуглезабагачення коксохімічного виробництва: при температурі 600-1100 °С питома теплоємність зразків №3 та №2 відрізняється на 0,145-0,662 кДж/кг·К. Це в свою чергу дасть змогу стверджувати, що застосування відходів вуглезабагачення коксохімічного виробництва, як складового компоненту шихти при виплавці МФШ, призведе до зниження собівартості готового продукту.

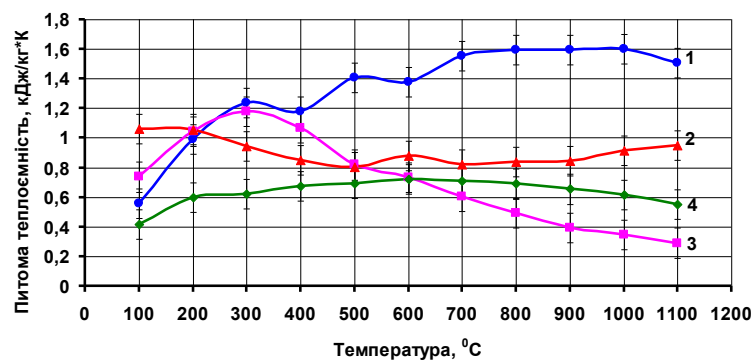


Рис. 2. Залежність питомої теплоємності шихтових матеріалів від температури: 1 – марганцевий концентрат сорту 1Б; 2 – відходи вуглезабагачення коксохімічного виробництва; 3 – кокс; 4 – відходи виробництва вторинного алюмінію

Аналіз експериментальних даних теплопровідності дослідних зразків (рис. 3) показав, що теплопровідність залежить як від хімічного складу матеріалів, так і від температури, при чому марганець збільшує (рис. 3, крива 1), а алюміній та кремній знижують (рис. 3, крива 3 та 2) теплопровідність, що цілком узгоджується з даними роботи [17].

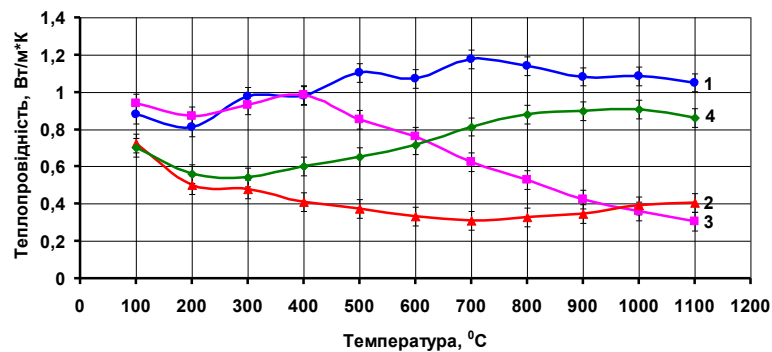


Рис. 3. Залежність теплопровідності шихтових матеріалів від температури: 1 – марганцевий концентрат сорту 1Б; 2 – відходи вуглезабагачення коксохімічного виробництва; 3 – кокс; 4 – відходи виробництва вторинного алюмінію

Для пошуку складу шихт з мінімальним теплоспоживанням були проведені порівняння питомої теплоємності МФШ, отриманого за цеховою технологією та дослідними плавками з

використанням у шихті замість кварциту та частини коксу відходів вуглезабагачення коксохімічного виробництва (табл. 1, плавка 2) та відходів виробництва вторинного алюмінію (табл. 1, плавка 3).

Таблиця 1

Склад шихти для виплавки малофосфористого шлаку

№ дослідної плавки	Вміст компоненту шихти, %					
	марганцевий концентрат сорту 1Б	кварцит	відвальний шлак силікомарганцю	кокс	відходи вуглезабагачення коксохімічного виробництва	відходи виробництва вторинного алюмінію
1	79,6	7,9	6,6	5,9	-	-
2	79,3	-	6,7	4,4	9,6	-
3	80,6	-	2,6	3,1	10	3,7

Виплавку МФШ проводили в руднотермічній печі типу РКО-7 з використанням у складі шихти окисного марганцевого концентрату сорту 1Б у кількості від 79,3 до 80,6 %. Усі компоненти шихти ретельно усереднювалися, зважувалися та перемішувалися. Шихту завантажували при увімкненій печі.

Експериментальні дослідження питомої теплоємності різних видів шихт показали, що шихта з доданням відходів вуглезабагачення коксохімічного виробництва (рис. 4, крива 2) має мінімальне значення питомої теплоємності (в межах 0,588-0,895 кДж/кг·К) та може бути рекомендована у виробництво при виплавці МФШ замість шихти з коксом.

Введення в шихту компонентів, що містять лужні і лужноземельні метали (рис. 4, 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.

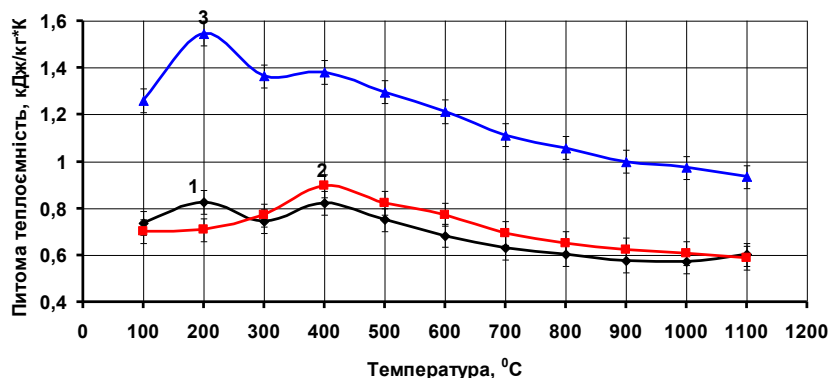


Рис. 4. Залежність питомої теплоємності шихти для виплавки МФШ від температури: 1 – цехова технологія; 2, 3 – дослідні плавки

Таким чином, вибір складу шихт для виплавки МФШ обумовлений не тільки їх теплоспоживанням, але і можливостями рівноважного розподілу компонентів між фазами у виплавленому МФШ. Використання дослідного МФШ на стадії виплавки металевого марганцю дало змогу знизити кратність шлаку, що в свою чергу призвело до підвищення витягу марганцю в шлак на 2%.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Дослідженнями теплофізичних властивостей компонентів шихти для виплавки МФШ встановлено вплив питомої теплоємності шихти на енергозбереження та запропоновано низькотеплоємний склад шихти, використання якого дозволить знизити витрату коксу на відновлення в 1,3-1,9 рази, зекономити до 20% електроенергії та відповідно знизити собівартості МФШ.

У подальших дослідженнях доцільно розглянути питання раціональності застосування при виплавці МФШ різних видів відходів металургійного виробництва з метою їх повернення до технологічного процесу або заміни дефіцитних матеріалів (зокрема, коксу), а також енергозбереження та покращення охорони довкілля.

Список літератури

1. **Гасик М.И.** Марганец : монография / М.И. Гасик. – Москва : Металлургия, 1992. – 607 с.
2. Количественные закономерности изменения технико-экономических показателей производства силикомарганца с различной концентрацией фосфора / **А.Н. Овчарук, И.П. Рогачёв, А.В. Коваль и др.**// 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.
3. **Гаврилов В.А.** Влияние основности и окисленного потенциала печной атмосферы на полезное использование марганца и кремния при выплавке металлического марганца силикотермическим процессом / В.А. Гаврилов, В.Н. Матюшенко, М.И. Гасик// *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1997. – № 4. – С. 23–27.
4. *Металлургия марганца Украины*/ **Б. Ф. Величко, В.А. Гаврилов, М.И. Гасик и др.**; под общей и науч. ред. акад. НАН Украины М.И. Гасика. – Київ: Техніка, 1996. – С. 472. – ISBN 5-335-01327-3
5. Пат. СССР №1747503. МПК: C21C5/54. Шихта для выплавки малофосфористого марганцевого шлака / **В.М. Катунин, И.В. Лискович, И.И. Любонец и др.**// Украинский научно-исследовательский институт специальных сталей, сплавов и ферросплавов; заявл. 24.05.90; опубл. 15.07.92. Бюл. 26. 6 с.
6. Пат. СССР №1611968. МПК: C22C23/04. Шихта для выплавки малофосфористого марганцевого шлака / **М.И. Гасик, И.И. Водин, А.И. Погребняк и др.** // Днепропетровский металлургический институт; заявл. 20.09.88; опубл. 07.12.90. Бюл. 45. 6 с.
7. Пат. СССР №1765225. МПК: [C22B47/00](#). Способ извлечения марганца из марганецсодержащих шлаков / **К.Д. Ивченко, Н.И. Голярчук, С.А. Учитель и др.**// Научно-исследовательский и проектный институт по обогащению и агломерации руд чёрных металлов “Механочермет”; заявл. 22.06.90; опубл. 30.09.92. Бюл. 36. 2 с.
8. Пат. СССР №1744137. МПК: [C22C33/04](#). Способ выплавки передельного марганцевого шлака / **В.Е. Ермолов, М.Г. Миракова** // Центральный научно-исследовательский институт чёрной металлургии им. И.П. Бардина; заявл. 27.11.89; опубл. 30.06.92. Бюл. 24. 2 с.
9. Пат. СССР №1666549. МПК: [C21C5/54](#). Способ производства малофосфористого марганцевого шлака / **Г.Д. Ткач, А.В. Коваль, И.Г. Кучер и др.**// Украинский научно-исследовательский институт специальных сталей, сплавов и ферросплавов; заявл. 20.01.89; опубл. 30.07.91. Бюл. 28. 2 с.
10. Пат. СССР №1504264. МПК: [C21C5/54](#). Способ получения малофосфористого марганцевого шлака / **И.В. Лискович, В.М. Катунин, М.Ю. Богуцкий**// Украинский научно-исследовательский институт специальных сталей, сплавов и ферросплавов; заявл. 04.08.87; опубл. 30.08.89. Бюл. 32. 6 с.
11. **Грищенко С.Г.** Выплавка малофосфористого шлака и металлического марганца с применением обжиг-гравитационных концентраторов/ **С.Г. Грищенко, С.М. Мазмишвили, И.Б. Качаловский, З.П. Каргина**// 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. 229–231.
12. **Куцин В.С.** Разработка и освоение технологии производства малофосфористого марганцевого шлака из мелкодисперсного концентрата / В. С. Куцин, В. И. Ольшанский, И. Ю. Филиппов, С. П. Шуваев, Ю. С. Пройдак // *Металлургическая и горно-рудная промышленность*. – 2016. – № 1. – С. 45–47.
13. **Надточій А.А.** Фізико-хімічний аналіз розподілу марганцю і фосфору при отриманні високовуглецевого ферромарганцю і передельного шлаку з метою вдосконалення процесу: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / А.А. Надточій; Національна металургійна академія України. – Дніпропетровськ, 2011. – 23 с.
14. **Гаврилов В.А.** Анализ материальных балансов производства передельного малофосфористого марганцевого шлака и ферромарганца по совмещенной одностадийной технологии/ В.А. Гаврилов// 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. 226–228.
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; Національна металургійна академія України. – Дніпропетровськ, 2009. – 21 с.
16. **Ильченко К.Д.** Планирование эксперимента при исследовании теплофизических свойств шихтовых материалов в металлургии/ К.Д. Ильченко, Е.П. Морозенко. – Днепропетровск: Січ. – 2004. – 176 с.
17. **Рогачёв И.П.** Теплопроводность сплавов систем Mn-Fe-Si-C и Mn-Fe-Si-Al-C / И.П. Рогачёв, В.К. Лазнев// 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.

Рукопис подано до редакції 04.03.2020