

ОПТИМІЗАЦІЯ ВОГНЕТРИВКОЇ ФУТЕРОВКИ ПЕЧІ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ФЕРОМАРГАНЦЮ

М.М. Гасик

Аалто Університет. 00076, м. Аалто, Еспоо, Фінляндія. E-mail: michael.gasik@aalto.fi

Проаналізовано методи зниження швидкості корозії футеровки шляхом контролю температурного режиму. Показано, що вибір правильної комбінації прошарків вогнетривких матеріалів дозволяє суттєво знизити швидкість корозії футеровки при взаємодії з рідким металом, але одночасно збільшує втрати енергії тепла через конвекційний і радіаційний теплообмін. Запропоновано відповідний алгоритм для досягнення кращого рішення шляхом оптимізації висоти і складу шарів футеровки. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 1.

Ключові слова: піч, футеровка, тепловий режим, розподіл температури, феромарганець, корозія

Вступ. Середньо- і низьковуглецевий феромарганець виробляють силікотермічним процесом у рудовідновлювальних електропечах шляхом відновлення марганцю з низькофосфористих шлаків феросилікомарганцем за трьохстадійною схемою: дефосфорація марганцевого концентрату; виплавка переробного силікомарганцю; виплавка феромарганцю або металевого марганцю [1–3]. Згідно стандарту України (ДСТУ 3547–97), феромарганець залежно від марки має у складі 85...95 % Mn, <0,2 або <2,0 % C, <1,8 або <3,0 % Si, <0,07 або <0,40 % P. Електропечі для виплавки такого феромарганцю (рисунок) мають магнезитову футеровку, від якої очікується достатньо довготривала стійкість проти корозії розтопленим феросплавом Mn–Si–Fe і шлаком MnO–SiO₂–CaO [1–4]. Корозія і руйнування магнезитової футеровки можуть бути вельми значними, якщо у шлаку є підвищений вміст лужних металів (Na₂O + K₂O). Ці додатки застосовуються у процесі з метою зниження в'язкості шлаку, особливо при низьких температурах, але їх негативний ефект на стійкість футеровки може бути значно більший, ніж очікувана перевага за рахунок регулювання в'язкості шлаку [5].

Підвищення стійкості футеровки може бути вирішено шляхом зміни її складу (заміна вогнетривких матеріалів іншими), що змінює загальний тепловий опір теплоізолюючого шару залежно від комбінації теплопровідності та геометрії прошарків.

В роботі [6] була розрахована температура вздовж центральної осі печі та показана потенційна можливість зменшення швидкості корозії футеровки розтопленим металом. Розподіл температури було оцінено для щільної магнезитової футеровки і при заміні частки нижнього шару на магнезійно-вуглецеву цеглу з більш високою те-

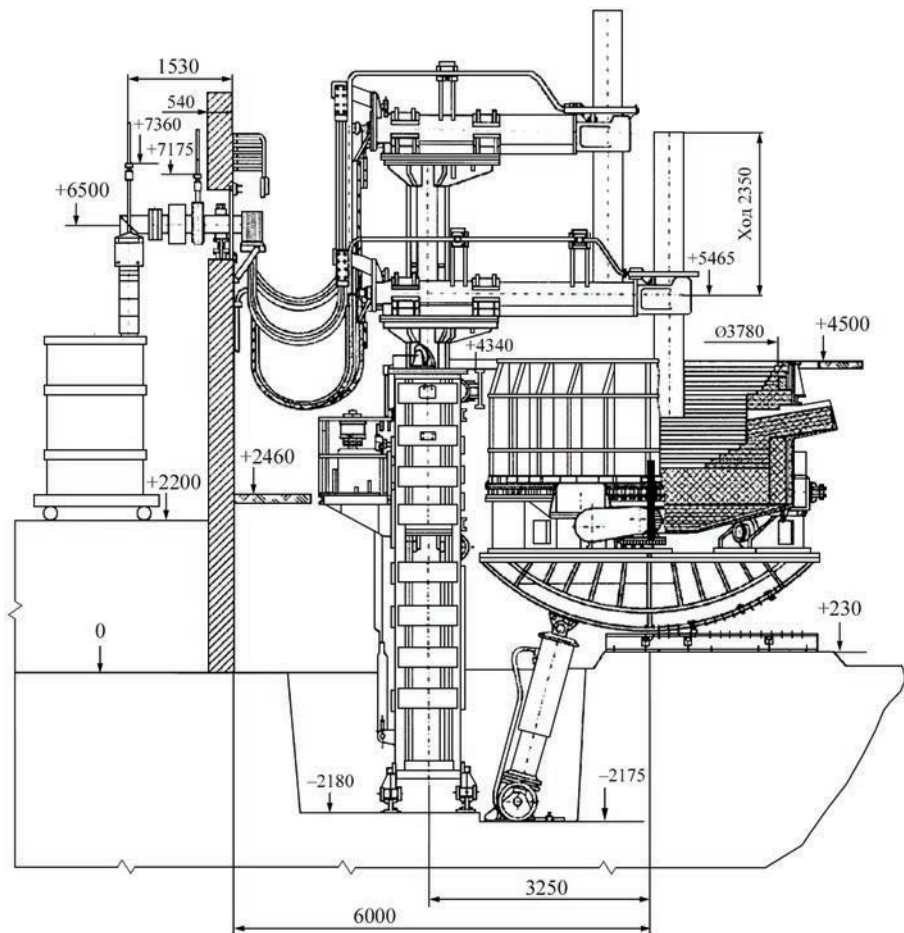
плопровідністю. Ідея полягала в зменшенні температури верхнього шару до її рівня близько температури ліквідусу феросплаву відомого складу і відповідно до уповільнення кінетики реакції компонентів металу з магнезитом. Наведені у роботі [6] кінцеві результати стверджують потенційну можливість підвищення стійкості футеровки майже у 5 разів, але за рахунок більших втрат тепла. Істотним недоліком цих розрахунків є неузгодженість параметрів. Там не було наведено конкретних даних стосовно теплового потоку, а значення параметрів різняться між текстом і рисунками. Наші спроби відтворити ці результати, використовуючи такі ж самі склад і геометрію футеровки для таких граничних умов, не були успішними. З метою перевірки цих розрахунків і розробки обґрунтованої концепції футеровки печі в цьому дослідженні проаналізовано недоліки методу [6] і запропоновано алгоритм оцінки теплових параметрів футеровки печі для виплавки середньо- і низьковуглецевого феромарганцю.

Модель печі і відповідність параметрів. Перша модель електропечі для виплавки середньовуглецевого феромарганцю була взята з роботи [6] з параметрами (табл. 1), до яких додано основні значення властивостей вогнетривких матеріалів [3, 7, 8]. Інші параметри були такими ж, як і в роботі [6], крім тих (одних і тих же матеріалів або температур), які відрізнялись між собою. Деякі з наведених значень були оптимізовані у роботі [6], але без пояснень, яким саме чином це було зроблено, що не дозволяє перевірити розрахунки належним чином.

Для обґрунтування головних змінних параметрів теплового режиму печі було проведено додатковий аналіз. Коефіцієнт теплопередачі кожух–повітря α_k враховано як функцію температури кожуха $\alpha_k = 7,7743 + 0,0061 \cdot t_k$, включаючи натуральний конвекційний і радіаційний теплообмін [8]. Загальне рівняння теплопередачі Фур'є від

М.М. Гасик — <https://orcid.org/0000-0002-5782-7987>

© М.М. Гасик, 2024



Типова піч для виплавки феромарганцю силікотермічним процесом [1, 3, 4]

металу до навколишнього середовища (повітря) має вигляд:

$$q = \frac{t_M - t_0}{\frac{1}{\alpha_M} + R_{th} + \frac{1}{\alpha_K}}; \quad R_{th} = \sum \frac{H_i}{\lambda_i}, \quad (1)$$

де q — загальний тепловий потік через футеровку вздовж центральної осі; t_M і t_0 температури металу і навколишнього повітря (~30 °C) відпо-

відно; α_M і α_K — коефіцієнти теплопередачі від металу до футеровки і від кожуха до повітря відповідно; R_{th} — загальний тепловий опір футеровки; H_i — висота кожного прошарку футеровки; λ_i — теплопровідність матеріалу прошарку. Для перевірки результатів [6] можна оцінити загальний тепловий потік (1) за даними табл. 1: $q = (t_M - t_N) \cdot \alpha_M = (1350 - 1262) \cdot 18 = 1584 \text{ Вт/м}^2$, який є константою при стаціонарній роботі печі.

Таблиця 1. Параметри печі і футеровки

Показник	Робота [6]*	Дані [3, 7, 8] і цієї роботи
Теплопровідність матеріалів, Вт/м·К:		
магнезит-вуглецева цегла	25	25
спечений магнезит	5 (рис. 4), 10, 11 (текст)	10
спечений доломіт	—	5,8
шамотна цегла	—	1,2
Температура по центральній осі печі, °C:		
зовнішній кожух (t_K)	196 (рис. 3), 150 (текст)	Змінна
футеровка у контакті з металом (t_N)	1262 (рис. 3)	—»—
розплав металу (t_M)	1350	1350
ліквідус металу (80 % Mn, 0,80 % Si)	1180	1180
Інші параметри, Вт/м²·К:		
теплопередача метал–футеровка (α_M)	18	Залежить від числа Нуссельта
теплопередача кожух–повітря (α_K)	—	Залежить від температури

*У роботі [6] для одних і тих же параметрів наведені різні дані на рисунках і у тексті.

Однак за даними роботи [6] для висоти магнезиту $H = 0,585$ м при його теплопровідності $\lambda = 10$ Вт/м·К тепловий потік (1) має дорівнювати $q = (t_N - t_K)/(H/\lambda) = (1262 - 196)/(0,585/10) = 18220$ Вт/м², тобто майже у 10 разів вище, ніж величина, яка базується на $\alpha_M = 18$ Вт/м²·К. Якщо значення $q = 18220$ Вт/м² вважати вірним, тоді коефіцієнт теплопередачі між металом і футеровкою α_M має дорівнювати ~ 207 , а не 18 Вт/м²·К. При такому високому тепловому потоці та температурі кожуха $t_K = 196$ °С коефіцієнт теплопередачі α_K має дорівнювати ~ 103 Вт/м²·К, що неможливо у випадку натуральної конвекції і радіації [8]. Для меншого теплового потоку 1584 Вт/м² тепловий опір магнезиту має становити $(1262 \dots 196)/1584 = 0,673$ м²·К/Вт, що при висоті шару магнезиту $H = 0,585$ м [6] відповідає його ефективній теплопровідності $\lambda = 0,585/0,673 = 0,87$ Вт/м·К. Це значно менше, ніж наведені в роботі [6] значення 5 і 10...11 Вт/м·К, і менше, ніж дані довідника [8] у 4...5 Вт/м·К. Приймаючи теплопровідність магнезиту $\lambda \sim 5$ Вт/м·К, це призводить до нефізичних значень коефіцієнтів теплообміну і набагато вищої температури кожуха для такої ж геометрії футеровки. Таким чином, дані роботи [6] є неузгодженими та унеможливають коректну оцінку теплового режиму футеровки печі.

Розрахунок температурного режиму. Для отримання коректних значень теплового режиму печі в даній роботі були насамперед взяті параметри, значення яких не викликають сумнівів: температура металу, геометрія футеровки та теплопровідність вогнетривких матеріалів (табл. 1). Тепловий потік має бути самоузгодженим із відомими коефіцієнтами теплопередачі, тому при тепловому потоці ~ 1584 Вт/м², показаному вище, коефіцієнт теплопередачі від кожуха печі до навколишнього середовища α_K складатиме $\sim 9,54$ Вт/м²·К, що ближче до 8,97 Вт/м²·К (при $t_K = 196$ °С) для натуральної конвекції з радіаційною складовою за даними роботи [8]. У цьому випадку коефіцієнт теплопередачі від металу до футеровки α_M дійсно ближче до 18 ніж до 207 Вт/м²·К. Однак при $\alpha_K \sim 10$ Вт/м²·К і $\alpha_M \sim 18$ Вт/м²·К неможливо отримати такі ж самі температури, які наведені у роботі [6], якщо частку футеровки магнезиту ($\lambda = 5$ Вт/м·К) замінити на магнезійно-вуглецеву ($\lambda = 25$ Вт/м·К). Це призводить або до нефізичних значень теплового потоку і коефіцієнтів теплопередачі, або температур.

Таким чином, коректний метод розрахунку властивостей і структури футеровки має базуватися на самоузгоджених початкових умовах (температури металу і кожуха, теплопровідність вогнетривких матеріалів, коректні коефіцієнти теплопередачі). Ко-

ефіцієнти теплопередачі можуть бути змінені, якщо вільна поверхня кожуха піддається примусовій конвекції стислим повітрям або водою.

Оцінка корозійної стійкості футеровки. Відомо, що стійкість щільної футеровки в контакті з розтопленим металом можна оцінити через її хімічну деградацію, оскільки вклад інфільтраційної складової набагато менший. Для пористої футеровки ситуація може бути оберненою, де інфільтрація рідким металом досягає нижчих горизонтів [3, 6, 9]. Використовуючи метод, аналогічний прийнятому в роботі [6], швидкість хімічної деградації футеровки (v , см/год) при її контакті з середньовуглецевим феромарганцем може бути оцінена наступним чином:

$$v = 0,332 \text{Re}^{1/2} \text{Sc}^{1/3} \left(\frac{D_i}{L} \right) \frac{\rho_{\text{Me}}}{\rho_{\text{MgO}}} \left(\frac{100}{\% x} \right), \quad (2)$$

де Re — число Рейнольдса [6, 8] для руху (конвекції) металу біля подини; Sc — число Шмідта [6, 8]; D_i — коефіцієнт дифузії активних компонентів металу (у цьому випадку здебільшого для кремнію); L — характеристична довжина печі; ρ_{Me} — густина металу при температурі t_M ; ρ_{MgO} — густина футеровки (магнезиту); $\% x$ — фракція магнезиту, яка може розчинитися металом (прийнято у 5 %). Вибравши значення параметрів, можна оцінити, що очікувана швидкість корозії магнезиту (2) при $t_N = 1262$ °С (температура в нижній точці подини у контакті з металом) складе $\sim 0,275$ см/год при 0,80 % Si у феромарганці. Істотне зменшення корозії може бути досягнуто зниженням контактної температури металу до лінії ліквідус (~ 1180 °С для феромарганцю 85 % Mn, 1 % C, 0,80 % Si), коли дифузійні процеси і кінетика реакцій сповільнюються.

Задача полягає у знаходженні такої комбінації прошарків вогнетривких матеріалів, яка забезпечила б температуру найвищого шару магнезиту 1180 °С, коли корозія футеровки за розрахунком складатиме $\sim 0,20$ см/год (приблизно на 30 % менше) при інших ідентичних умовах. Це можна досягнути двома зонами футеровки із шамоту і магнезиту/доломіту (табл. 2). При температурі футеровки 1180 °С і металу 1350 °С очікуваний тепловий потік складатиме $(1350 - 1180) \cdot 18 = 3060$ Вт/м², що у ~ 2 рази вище, ніж у початковому випадку для температури $t_N = 1262$ °С (табл. 1), але у ~ 5 разів менше, ніж з футеровкою із магнезійно-вуглецевого матеріалу згідно з даними роботи [6]. Результати розрахунків показано у табл. 2 (потрібно зауважити, що для печі (рисунок) загальна висота футеровки більша, ніж у роботі [6]).

Таблиця 2. Параметри футеровки за різними варіантами

Показник	Робота [6]		Дані цієї роботи	
Висота прошарків матеріалів, м:				
спечений магнезит	0,585	0,285	0,983	–
спечений доломіт	–	–	–	0,906
магнезійно-вуглецева цегла	–	0,30	–	–
шамотна цегла	–	–	0,067	0,144
Температура по центральній осі печі, °C:				
зовнішній кожух (t_K)	196	950*	340	
футеровка у контакті з металом (t_N)	1262	1180	1180	
*Розраховано через рівняння теплопередачі (1); в роботі [6] показано 150 °C.				

Таким чином, можна констатувати, що результати роботи [6] незбалансовані і мають відмінності між даними на рисунках і у тексті. Заміна вогнетривкого матеріалу на інший з більш високою теплопровідністю (у 3...5 разів) ніяк не може призвести до більш низької температури кожуха при підвищеному тепловому потоці. Можливо, що у експериментах роботи [6] для печі використовували інтенсивне примусове охолодження кожуха, але цього не було показано явним чином.

Загальний алгоритм оптимізації футеровки може бути використано досить простим чином: температура верхнього шару футеровки має підтримуватися близькою до температури ліквідус металу, що дозволить сповільнити швидкість корозійних процесів, незалежно від їх механізмів [6, 9]. Виходячи з відомих температури металу, його температури ліквідус і коефіцієнтів теплопередачі, спочатку оцінюється загальний тепловий потік через футеровку і відповідні йому тепловий опір і температура кожуха, далі підраховується комбінація прошарків вогнетривких матеріалів, яка буде оптимальна для цих умов. Якщо температура кожуха буде вище оптимальної, можна залучити примусове охолодження і оцінити можливість ефективної утилізації теплових втрат.

Висновки

1. Тепловий режим печі для виробництва феромарганцю є важливим не тільки для процесу плавки, а і для стабільності футеровки. Корозія магнезитової футеровки залежить від вмісту кремнію у феромарганці, температури і конвекції металу, геометрії і складу футеровки.

2. Аналіз показав, що дані роботи [6] щодо теплового режиму роботи футеровки мають неузгодженість між величинами теплового потоку, коефіцієнтами теплопередачі і граничними температурами. Нові розрахунки в даній роботі показу-

ли, що заміна шарів футеровки на інші з більшою теплопровідністю має бути виваженою, щоб запобігти високій температурі кожуха і можливому замерзанню металу.

3. Запропоновано зручний алгоритм оптимізації висоти прошарків і складу вогнетривких матеріалів футеровки з метою зменшення швидкості корозії шляхом підтримування температури верхнього шару футеровки близькою до температури ліквідус металу конкретного складу.

Список літератури

1. Гасик М.И. (1992) *Марганец*. Москва, Металлургия.

2. Гаврилов В.А., Гасик М.И. (2001) *Силикотермия марганца*. Днепропетровск, Системные технологии.

3. Гладких В.А., Гасик М.И., Овчарук А.М., Пройдак Ю.С. (2007) *Ферросплавные электропечи*. Днепропетровск, Системные технологии.

4. Гасик М.И., Лякішев М.П., Гасик М.М. (2009) *Фізико-хімія і технологія електроферосплавів*. Дніпропетровськ, Системні технології.

5. Gasik M.M., Gasik M.I., Shuvaev S.P. (2018) Effect of high alkali content in ferrosilicomanganese smelting slags on slag properties and on the destruction of furnace lining. *Proc. of Congress INFACON XV, Cape Town, South Africa*. Vol. 2. Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 307–313.

6. Parra R., Mochon J., Martin D.R. et al. (2009) Bottom design optimization of electric arc furnace for ferromanganese production using nodal wear model. *Ironmaking and Steelmaking*, **36**, 529–536.

7. Lindstad L.H., Aursjo S. (2018) Monolithic furnace linings for production of ferro-alloys. *Proc. of Congress INFACON XV, Cape Town, South Africa*. Vol. 2. Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 259–268.

8. (1980) *Электротермическое оборудование*: Справочник. Альтгаузен А.П. (ред.). Москва, Энергия.

9. Wang S., Jin Y., Li G. (2004) Theory and application of magnetite ramming material in ferroalloy refining furnaces. *Proc. of Congress INFACON X, Cape Town, South Africa*. Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 735–740.

References

1. Gasik, M.I. (1992) *Manganese*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

2. Gavrilov, V.A., Gasik, M.I. (2001) *Silicothermy of manganese*. Dnepropetrovsk, Sistemnye Tekhnologii [in Russian].

3. Gladkikh, V.A., Gasik, M.I., Ovcharuk, A.M., Projdak, Yu.S. (2007) *Ferroalloys furnaces*. Dnipropetrovsk, Sistemnye Tekhnologii [in Russian].
4. Gasik, M.I., Lyakishev, M.P., Gasik, M.M. (2009) *Physical chemistry and technologies of electric ferroalloys*. Dnipropetrovsk, Sistemni Tekhnologii [in Ukrainian].
5. Gasik, M.M., Gasik, M.I., Shuvaev, S.P. (2018) Effect of high alkali content in ferrosilicomanganese smelting slags on slag properties and on the destruction of furnace lining. In: *Proc. of Congress INFACON XV, Cape Town, South Africa*. Vol. 2. Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 307–313.
6. Parra, R., Mochon, J., Martin, D.R. et al. (2009) Bottom design optimization of electric arc furnace for ferromanganese production using nodal wear model. *Ironmaking and Steel-making*, **36**, 529–536.
7. Lindstad, L.H., Aursjo, S. (2018) Monolithic furnace linings for production of ferro-alloys. In: *Proc. of Congress INFACON XV, Cape Town, South Africa*. Vol. 2. Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 259–268.
8. (1980) *Electrothermal equipment: Handbook*. Ed. by A.P. Altgausen. Moscow, Energiya [in Russian].
9. Wang, S., Jin, Y., Li, G. (2004) Theory and application of magnesia ramming material in ferroalloy refining furnaces. In: *Proc. of Congress INFACON X, Cape Town, South Africa*. Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 735–740.

OPTIMIZATION OF THE REFRACTORY LINING FOR FERROMANGANESE PRODUCTION FURNACE

M.M. Gasik

Aalto University, 00076 AALTO, Espoo, Finland. E-mail: michael.gasik@aalto.fi

The methods of decreasing the lining corrosion rate by controlling the temperature regime are analyzed. It is shown that selection of a proper combination of refractory material layers would allow a noticeable decrease of the lining corrosion rate at interaction with liquid metal, but this also would increase heat losses due to convective and radiation heat transfer. A proper algorithm is suggested to reach the optimal solution by optimization of the lining layer thickness and composition. 9 Ref., 2 Tabl., 1 Fig.

Keywords: furnace, refractory lining, ferromanganese, temperature distribution, corrosion

Отримано 18.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 13.03.2024

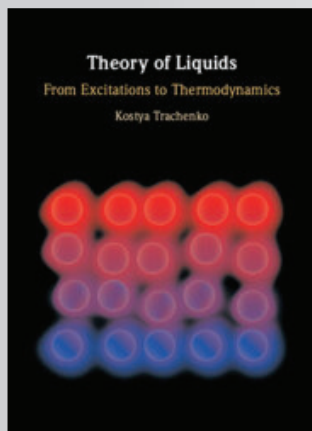
Прийнято 10.05.2024

ПЕРЕДБАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПЛАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Костя Траченко, який здобув ступінь доктора наук у Кембриджському університеті та магістра у Львівському, розробив нову теорію, яка вирішує давню проблему фізики — передбачення температури плавлення матеріалів. Його дослідження, опубліковане в журналі *Physical Review E*, є значущим кроком у розумінні фундаментальних властивостей матерії



і фазових переходів. Протягом десятиліть учені стикалися з проблемою відсутності універсального опису лінії плавлення на фазових діаграмах температура-тиск. Але тепер теорія професора Траченка, заснована на останніх досягненнях у теорії рідин, пропонує просте параболічне рівняння для опису цієї лінії. Це означає, що температуру плавлення можна передбачити з використанням фундаментальних фізичних констант. «Простота й універсальність цього результату особливо цікаві», — пояснює професор Траченко. «Це передбачає, що плавлення, незважаючи на його складність, демонструє фундаментальну єдність різних систем, від благородних газів до металів». Робота Траченка отримала 10 найкращих нагород за прорив у фізиці та премію EPSRC-CCP за «видатний внесок у теорію і моделювання фаз конденсованої речовини, включно з теорією рідкого стану».



Theory of Liquids. From Excitations to Thermodynamics

Kostya Trachenko

Queen Mary University of London

2023, 300 стор., ISBN: 9781009355476