

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 622.341.23

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240571

© Кривенко В.В.¹, Лялюк В.П.², Чупринов Є.В.³,
Трус І.М.⁴, Овчарук А.М.⁵**ОЦІНКА МЕТАЛУРГІЙНОЇ ЦІННОСТІ МАРГАНЦЕВОЇ СИРОВИНИ**

Виконано комплексні дослідження фізико-хімічних властивостей і металургійної цінності марганцевої сировини різних родовищ, що використовуються при виробництві феросплавів в рудовідновних печах підвищеної потужності. Розглянуто питання повернення у виробництво продуктів збагачення сировини і відходів феросплавного виробництва, використання яких в металургійному переділі без підготовки і огрудування неможливо. Зіставлені вимоги до показників якості марганцевих руд і концентратів за нормативними документами різних країн. Досліджено металургійні властивості і кінетичні закономірності відновлення зразків марганцевої сировини різних родовищ.

Ключові слова: марганцевий концентрат, феросплави, дисоціація, відновлення, цінність сировини.

V.V. Krivenko, V.P. Lyalyuk, E.V. Chuprinov, I.M. Trus, A.M. Ovcharuk. Evaluation of metallurgical value of manganese raw materials. Samples of manganese ores of various chemical and fractional compositions, which are widely used nowadays in the production of manganese ferroalloys at domestic enterprises have been investigated. These include samples of manganese ores from the deposits in Georgia, Brazil, Australia and Ghana. Comprehensive studies of the physical and chemical properties and metallurgical value of manganese raw materials from various deposits, used in the production of ferroalloys in ore-reducing furnaces of uprated power, have been carried out. Return to production of concentrate products of raw materials and wastes of ferroalloy production, the use of which in metallurgical processing without preparation and agglomeration is impossible, have been considered. The results of comparative analytical studies of domestic and foreign manganese ore raw materials are presented. The requirements for quality indicators of manganese ores and concentrates according to the regulatory documents of different countries have been compared. Metallurgical properties and kinetic regularities of recovery of the samples of manganese raw materials from various deposits have been investigated. The optimal share of the use of imported raw materials in the charge mixture for the production of manganese ferroalloys in relation to the required phosphorus content in them has been estimated. In accordance with the standard methods in generator gas atmosphere, studies have been carried out to determine the reducibility and temperature of the onset of manganese ores softening. The recoverability has been determined by the weight loss of the sample by the gravimetric method and controlled by chemical analysis.

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

² д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7258-2079, vitalij.lyalyuk@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: 0000-0001-6368-6933, inna.trus.m@gmail.com

⁵ д-р техн. наук, професор, Національна металургійна академія України, м. Дніпро

Keywords: *manganese concentrate, ferroalloys, dissociation, reduction, value of raw materials.*

Постановка проблеми. Вибір раціональної технології переробки і техніко-економічні показники виробництва марганцевих феросплавів в значній мірі визначаються якістю марганцеворудної сировини: хімічним, мінералогічним і гранулометричним складами, фізичними властивостями. Родовища марганцевих руд на земній кулі розподілені вкрай нерівномірно, настільки ж нерівномірний їх речовинний склад, що пов'язано з генезисом руд [1]. Велика частина світових розвіданих запасів марганцевих руд (понад 80%) зосереджена в Південно-Африканській республіці (ПАР), яка є найбільшим їх виробником і експортером. В Україні балансові запаси становлять близько 2 млрд. тонн, при цьому більше 70% вітчизняних марганцевих руд важкозбагачувані та відносяться до карбонатних і окисно-карбонатних різновидів. Відмінною особливістю марганцевих руд вітчизняних родовищ є відносно невисокий вміст марганцю і підвищена концентрація фосфору і кремнезему [2], що не дозволяє, на відміну від більшості зарубіжних руд, використовувати сировину без попереднього збагачення і огрудування.

Труднощі з виробництвом конкурентоспроможних марганцевих сплавів на вітчизняній сировині особливо загострилися в останні роки, коли, з одного боку, вітчизняні підприємства почали нарощувати випуск низькофосфористих марок силікомарганцю і феромарганцю, а, з іншого боку, підвищення вартості енергетичних ресурсів зробило неконкурентоспроможною технологію пірометалургійної технології дефосфорації сировини, котра діяла раніше. Це вимагало використання імпортих марганцевих руд на українських феросплавних заводах.

Таким чином, проблема комплексних досліджень фізико-хімічних властивостей і металургійної цінності зарубіжної марганцевої сировини стала вкрай актуальною для українських металургів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню відновлюваності марганцевих мінералів, руд і концентратів присвячена велика кількість робіт [3-5], при цьому робота [5] присвячена вивченню саме бразильських, африканських і австралійських руд. Однак наявні в літературі дані часто неоднозначні. Відомо, що MnO_2 і $MnCO_3$ дисоціюють при порівняно низьких температурах – 510 і 176°C відповідно.

У роботах [6, 7] розглянуті питання мінералогічного дослідження марганцевих руд осадового генезису, вивчені питання мінералогії та фізико-хімічних властивостей марганцевого компонента залізо-марганцевих конкрецій, а також розроблена методика термохімічного визначення манганіту в марганцевих рудах і дана рекомендація щодо поліпшення якості окисних марганцевих руд Нікопольського басейну. У статті [8] виконано дослідження сучасних тенденцій розвитку марганцевидобувної промисловості світу і України, запропоновано шляхи підвищення конкурентоспроможності вітчизняних підприємств з видобутку марганцевої руди в залежності від сучасної кон'юнктури ринку. Автором роботи [9] зроблено важливий висновок, що джерелами відносно якісних руд на марганець та супутні компоненти є техногенні родовища (шламосховища), розробка котрих може бути одним з найперспективніших напрямків, що також дозволить вирішити актуальні екологічні проблеми. В роботі [10] наведена характеристика мінеральних складових окисних і карбонатних марганцевих руд. Визначено, що характер перетворень при термічній обробці (агломерація, випал окатишів і брикетів, попереднє нагрівання) багато в чому визначається хімічним, мінералогічним і гранулометричним складами, а також іншими властивостями вихідної рудної сировини.

Мета статті – фізико-хімічний аналіз властивостей марганцевої сировини.

Виклад основного матеріалу. Для адекватності оцінки сировини необхідно зіставити показники якості марганцевих концентратів, вироблених в Україні та за кордоном (табл. 1). Були досліджені проби марганцевих руд різного хімічного і фракційного складів (табл. 2-4), які в даний час широко використовуються при виробництві марганцевих феросплавів на вітчизняних підприємствах. До них відносяться проби марганцевих руд родовищ Грузії, Бразилії та Гани [11].

Аналізуючи результати досліджень фізичних властивостей марганцевих руд, наведених в табл. 3, слід зазначити, що руди мають незначну пористість, крім руди з Грузії, і більш високу дійсну густину в порівнянні з вітчизняними марганцевими концентратами. Механічна міцність (по фракції більше 5 мм) кускових марганцевих руд невисока і поступається в міцності марган-

цевому агломерату, виготовленому з вітчизняних концентратів. Для офлюсованих та неофлюсованих марганцевих агломератів вітчизняного виробництва механічна міцність складає 76-80%, а пористість – 8-22%.

Дослідження по визначенню відновлюваності і температури початку розм'якшення марганцевих руд виконували за стандартними методиками по ДСТУ-3202-95 в атмосфері генераторного газу. Відновлюваність визначали по втраті зразком маси ваговим способом і контролювали хімічним аналізом.

Таблиця 1

Технічні вимоги, що пред'являються до якості марганцевих руд і концентратів для виплавки феросплавів

Компонент	Масова частка, %							
	Для феромарганцю*				Для силікомарганцю*			
	Україна I сорт	Західна Європа		США сорт «А»	Україна II сорт	Західна Європа		США сорт «Б»
		I сорт	II сорт			I сорт	II сорт	
Mn, не менше	43,0	48,0	46,0	46,0	34,0	44,0	40,0	40,0
Fe, не більше	-	-	7,5	8,0	-	9,0	12,0	16,0
SiO ₂ , не більше	-	7,0	9,0	12,0	-	10,0	12,0	15,0
P, не більше	-	0,12	0,15	0,18	-	0,15	0,15	0,30

*вказані вимоги до нікопольських окисних концентратів і концентратів та руд зарубіжних виробників.

Таблиця 2

Хімічний склад досліджених зразків марганцевих руд

№	Країна-виробник	Масова частка компонентів, %										
		Mn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	в.п.п.	
1	Грузія	47,20	12,09	1,88	1,92	0,75	1,86	0,47	0,21	0,59	3,29	
2	Бразилія	47,60	9,30	1,20	1,03	1,34	9,30	0,14	0,23	1,15	2,29	
3	Австралія	47,00	13,05	1,63	2,67	0,98	8,94	0,07	0,12	0,03	3,88	
4	Гана-I	30,00	14,05	2,65	4,65	5,08	1,72	0,16	0,28	0,24	31,6	
5	Гана-II	39,79	19,30	4,20	0,40	0,12	7,10	0,32	0,19	0,63	5,02	
6	Гана-III	30,50	13,52	2,20	4,81	4,85	1,05	0,25	0,24	0,21	32,6	

Таблиця 3

Результати досліджень загальних фізичних властивостей марганцевих руд

№	Країна-виробник	Масова частка вологи, %	Густина, кг/м ³			Пористість загальна, %	Міцність (ДСТУ 3200-95) на удар по фракції більше 5 мм, %
			насіпна	уявна	істинна		
1	Грузія	4,0	1740	2400	3880	38,14	31,0
2	Бразилія	8,4	2940	4210	4270	10,92	58,0
3	Австралія	2,8	2110	3850	4020	4,23	75,6
4	Гана-I*	1,6	2300	3240	3270	1,4	71,0
5	Гана-II	7,2	2090	-	3670	-	-
6	Гана-III	1,6	2120	3190	3370	5,3	72,0

*марганцева руда Гана I і III – карбонатна, Гана II – окисна.

Відновлення оксидів і карбонатів марганцю в досліджуваних рудах протікає при більш низьких температурах, ніж їх дисоціація. Криві зміни маси проби в залежності від температури, зображені на рис. 1, наочно підтверджують цей висновок. На швидкість і ступінь відновлення марганцевої сировини істотний вплив здійснюють температура, вид і концентрація відновника, крупність, пористість, фазовий і мінеральний склад. Досліджувані проби марганцевої сировини при

одній і тій же температурі і інших рівних умовах втрачають масу за рахунок дегідратації, декарбонізації і дисоціації марганцевих мінералів з різною швидкістю. Характерною особливістю при відновленні марганцевих руд є поява рідкої фази при порівняно низькій температурі 750-800°C.

Таблиця 4

Мінералогічний склад досліджених зразків марганцевих руд

№	Країна-виробник	Розподіл марганцю по мінеральним фазам,%											
		Рудна фаза		Піролюзит		Мінерали групи псиломелан		Брауніт		Манганіт		Карбонати марганцю (родохрозит, кальцієвий родохрозит)	
		Mn	M	Mn	M	Mn	M	Mn	M	Mn	M	Mn	M
1	Грузія	47,20	76,4	43,7	69,1	-	-	-	-	3,2	6,1	0,3	1,2
2	Бразилія	47,60	78,6	16,3	25,8	14,6	25,3	16,7	27,5	-	-	-	-
3	Австралія	47,00	77,2	2,5	3,9	3,2	5,4	40,5	66,0	-	-	0,8	1,9
4	Гана-I	30,00	78,5	1,1	1,7	-	-	1,2	1,9	-	-	27,7	74,9
5	Гана-II	39,7	66,2	18,3	29,0	17,0	29,4	3,8	6,0	-	-	0,6	1,8
6	Гана-III	30,5	77,8	-	-	-	-	-	-	-	-	30,5	77,8

M – кількість марганцевого мінералу в рудній частині проби, %.

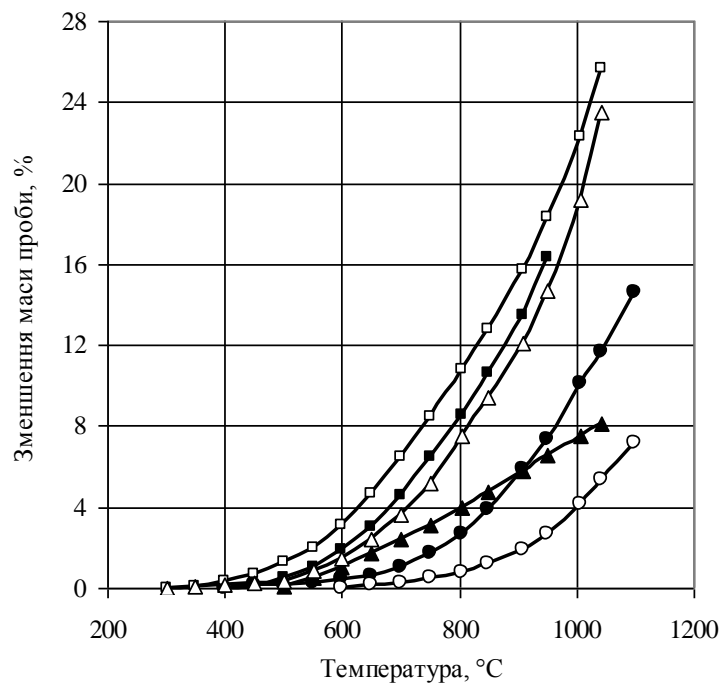


Рис. 1 – Кінетика зміни маси проби в реакційній зоні при нагріванні у відновному середовищі: ● – Грузія; ○ – Бразилія; ■ – Австралія; □ – Гана-I; ▲ – Гана-II; △ – Гана-III

На рис. 2 представлені результати досліджень з визначення газопроникності та зменшення висоти проби та температури початку розм'якшення марганцевих руд при нагріванні у відновному середовищі згідно ДСТУ-3205-95.

Температурою початку розм'якшення вважається температура, при якій зменшення лінійних розмірів випробовуваних проб становить понад 10% під дією на них постійного механічного навантаження. Таким чином, найкращими рудами з точки зору їх використання для виплавки марганцевих феросплавів вважаються ті, у яких зменшення висоти проби на 10% відбувається пізніше. З рис. 2 видно, що такими рудами є бразильські та австралійські.

Дослідженнями встановлено, що спочатку рідка фаза спостерігається в окремих мікро-

об'ємних частинках по периферії мінералів, особливо на зернах польового $K, Na[AlSi_2O_8]$ і кварцу (SiO_2), що межують з манганозитом (MnO). З підвищенням температури понад $800^\circ C$ кількість рідкого розплаву збільшується, і силікатний розплав може насичувати значну частину рудної маси. Низька температура початку появи рідкої фази пояснюється вмістом в різних кількостях у вихідному марганецьвмісному матеріалі оксидів калію, натрію, кальцію, кремнію та інших елементів, які разом з високоактивним манганозитом утворюють складну за хімічним складом легкоплавку систему. Локальний рентгеноспектральний аналіз ділянки оплавлення фіксує підвищений вміст K, Na, Ca і Si .

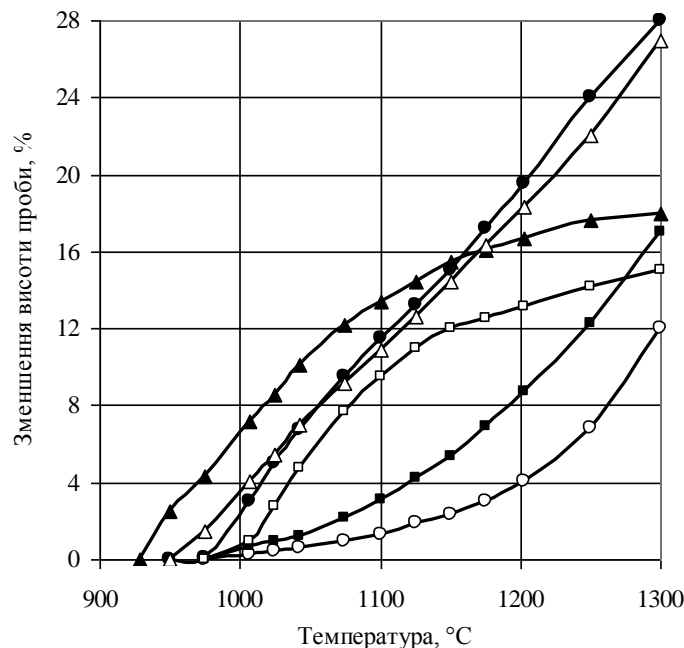


Рис. 2 – Зміна висоти проби в реакційній зоні при нагріванні у відновному середовищі: ● – Грузія; ○ – Бразилія; ■ – Австралія; □ – Гана-I; ▲ – Гана-II; △ – Гана-III

Для технологічних процесів виробництва марганцевих феросплавів сприятливими є марганцеві руди і концентрати, що характеризуються підвищеною температурою розм'якшення, що сприяє більш глибокому відновленню марганцю на початковому етапі процесу відновлення, коли шихта знаходиться в твердофазному стані. Однак, деякі з цих руд вимагають великих енергетичних витрат і відносяться до важковідновних, з огляду на практично повне зв'язування оксиду марганцю в тейфроті ($MnSiO_4$), родоніті ($MnSiO_3$), яkobсиді ($MnFe_3O_4$) та інших термодинамічно стійких з'єднаннях. До того ж, деякі з них, і особливо яkobсид, мають знижений електроопір.

Труднощі залучення карбонатної марганцевої руди в металургійний переділ зумовлюються високим теплоспоживанням карбонатної сировини на розкладання карбонатів. Для цього необхідно витратити електроенергію в кількості близько 240 кВт·год/т матеріалу. У процесі розкладання вуглекислих солей кальцію і марганцю виділяється значна кількість вуглекислого газу, що призводить до підвищення витрат вуглецевого відновника і електроенергії на реалізацію реакції $CO_2 + C = 2CO - 42,45$ кВт·год. В процесі високошвидкісного нагрівання шматків карбонатної руди має місце їх руйнування з утворенням 20-30% дріб'язку (фракції менше 5 мм), що призводить до зменшення газопроникності шихти і, в результаті, до порушення технологічного режиму плавки [3].

Разом з тим, карбонатна сировина має природну основність 0,6-0,7, що частково виключає добавку в шихту вапняку, а температура плавлення карбонатних руд і концентратів приблизно на $100-200^\circ C$ вище, ніж окисних, що покращує термодинамічні і кінетичні умови протікання процесів відновлення [12].

Результати безфлюсової плавки феромарганцю з вмістом фосфору 0,35% за прийнятою на ПАТ «НЗФ» схемою з використанням шлаку малофосфористого передільного (ШМП) добре

узгоджуються з кількісною оцінкою впливу шлаку на основні показники виробництва. Так витрата електроенергії склала 4054 кВт·год/т, а вилучення марганцю – 82,2% (з урахуванням відходів виробництва). Використання в шихті імпоротної руди для отримання аналогічного за якістю сплаву позбавила змоги досягти помітних переваг по вилученню марганцю, а витрата електроенергії навіть збільшилася. Ймовірно, це пов'язано не стільки з якістю сировини, скільки зі зміною електричних параметрів плавки, викликаних підвищеною витратою відновника. Якщо врахувати витрати електроенергії при агломерації (~ 150 кВт·год/т) і виплавці ШМП (850-900 кВт·год/т), то сумарна витрата перевищує 5000 кВт·год/т.

Більш наочно порівняння металургійної цінності різних видів сировини можна провести на прикладі виплавки силікомарганцю з фосфором 0,15-0,25%. Так як для виплавки сплаву такої якості може бути використана сировина з фосфорним модулем (P/Mn) не вище 0,002. Виплавку сплаву здійснюють за двома варіантами: за першим – з використанням в шихті понад 80% малофосфористого шлаку, по другому – на високоякісній австралійській руді.

При використанні зазначеної кількості ШМП наочно проявляється його негативний вплив на виробничі показники. Так, зі зниженням фосфору в сплаві з 0,25 до 0,15% (відповідне зростання частки ШМП в шихті з 82 до 93%) вилучення марганцю знижується з 72 до 60%, а питома витрата електроенергії зростає на 6-7%. Застосування австралійської руди дозволяє помітно підвищити вилучення марганцю (\approx до 82%) і знизити витрату електроенергії на 200-250 кВт·год/т.

Наведені результати показують, що при використанні вітчизняної сировини для виробництва силікомарганцю з фосфором не більше 0,35% кількість малофосфористого шлаку в шихті для досягнення відносно прийнятних показників не повинно перевищувати 900-950 кг/т сплаву. Збільшення частки ШМП при виплавці металу з фосфором 0,15-0,25% призводить до різкого зниження всіх показників процесу. В цьому випадку безумовну перевагу мають високоякісні імпортні руди з фосфорним модулем не вище 0,002.

Висновки

Зіставлені показники якості марганцевих концентратів, вироблених в Україні та за кордоном, досліджені проби марганцевих руд різного хімічного і фракційного складів, які в даний час широко використовуються при виробництві марганцевих феросплавів на вітчизняних підприємствах. Аналіз фізичних властивостей марганцевих руд показав, що механічна міцність (по фракції більше 5 мм) кускових марганцевих руд невисока і поступається в міцності марганцевому агломерату, зробленому з вітчизняних концентратів.

Проведені дослідження з визначення відновлюваності і температури початку розм'якшення марганцевих руд. Основною відмінною особливістю досліджуваної марганцевої сировини зарубіжних виробників є низький модуль фосфору P/Mn < 0,0035 і кремнезему SiO₂/Mn від – 0,5 і нижче, що дозволяє досягати високих техніко-економічних показників виробництва марганцевих феросплавів.

Порівняльним аналізом металургійної цінності вітчизняної та імпоротної сировини встановлено, що при виробництві силікомарганцю, в зв'язку з низькою температурою плавлення ШМП, його частка в шихті не повинна перевищувати 40-45% (сплав з P до 0,35%). Для отримання сплаву з фосфором від 0,15 до 0,20% доцільно використовувати імпортну руду з підшивкою ШМП.

Перелік використаних джерел:

1. Ферросплавы Украины – 2000 / М.И. Гасик, О.Г. Ганцеровский, А.Н. Овчарук, И.П. Рогачев. – Днепропетровск : ГНПП «Системные технологии», 2001. – 143 с.
2. Гасик М.И. Физикохимия и технология электроферросплавов : учебник для ВУЗов / М.И. Гасик, Н.П. Лякишев. – Днепропетровск : ГНПП «Системные технологи», 2005. – 448 с.
3. Кучер А.Г. Исследование физико-химических превращений в карбонатных марганцевых концентратах при их термической обработке / А.Г. Кучер // Актуальные проблемы и перспективы электрометаллургического производства. – Днепропетровск : ГНПП «Системные технологии», 1999. – С. 48-54.
4. Кривенко В.В. Исследование влияния механического и теплового воздействия на марганцевые концентраты и агломераты в окислительных и восстановительных условиях / В.В. Кри-

- венко, А.Н. Овчарук // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 2. – С. 21-23.
5. Sorensen B. Properties of manganese ores and their change in the process of calcinations / B. Sorensen, S. Gaal, M. Tangstad // *Proceeding of The Twelfth International Ferroalloys Congress*. – Vol. 2. – Helsinki, Finland, 2010. – Pp. 439-448. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.01.001>.
 6. Базилевская Е.С. Химико-минералогическое исследование марганцевых руд (Никопольский бассейн и конкреции Тихого океана) / Е.С. Базилевская // *Труды ГИН АН СССР*. – М. : Наука, 1976. – Вып. 287. – 95 с.
 7. Грищенко С.Г. О взаимосвязи химико-минералогического состава и восстановимости марганцеворудных материалов различных месторождений. Сообщение I. Особенности генезиса и состояния исходных марганцеворудных материалов / С.Г. Грищенко, Т.Ф. Райченко, Н.М. Москалева // *Известия АН СССР, Металлы*. – 1991. – № 3. – С. 13.
 8. Прокопенко В.І. Визначення потенціалу марганцеворудного комплексу України стосовно теперішньої кон'юнктури ринку / В.І. Прокопенко, А.Ю. Череп, Д.П. Пілова // *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. – 2018. – № 55. – С. 62-78.
 9. Антаков Є. Сучасний стан світового та українського ринку марганцю: основні проблеми та тенденції / Є. Антаков // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. – 2013. – Вип. 2. – С. 44-48.
 10. Мянновська Я.В. Перетворення мінеральних складових марганцевих руд при температурних умовах формування агломерату / Я.В. Мянновська, Ю.С. Проїдак, Л.В. Камкіна // *Теорія і практика металургії*. – 2019. – № 3. – С. 42-51. – Режим доступу: <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.07>.
 11. The comprehensive analysis of physical and chemical properties and metallurgical value of foreign manganese raw materials used during ferroalloy production / S.G. Grishenko., V.V. Krivenko, A.N. Ovcharuk, V.I. Olshansky, I.Yu. Filippov // *Proceeding of the fourteenth international ferroalloys congress. Infacon XIV Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry (May 31-June 4, 2015; Kiev)*. – Kiev, 2015. – Volume II – Pp. 436-446.
 12. Гасик М.И. Марганец / М.И. Гасик. – М. : *Металлургия*, 1992. – 608 с.

References:

1. Gasik M.I., Gancerovskij O.G., Ovcharuk A.N., Rogachev I.P. *Ferrosplavy Ukrainy – 2000* [Ferroalloys of Ukraine – 2000]. Dnepropetrovsk, GNPP «Sistemnye tekhnologii» Publ., 2001. 143 p. (Rus.)
2. Gasik M.I., Lyakishev N.P. *Fizikohimiya i tekhnologiya elektroferrosplavov: uchebnik dlya vuzov* [Physicochemistry and Technology of Electroferroalloys: Textbook for Universities]. Dnepropetrovsk, GNPP «Sistemnye tekhnologii», 2005. 448 p. (Rus.)
3. Kucher A.G. Issledovanie fiziko-himicheskikh prevrashchenij v karbonatnyh margancevyh koncentratah pri ih termicheskoy obrabotke [Investigation of physicochemical transformations in carbonate manganese concentrates during their heat treatment]. *Aktual'nye problemy i perspektivy elektrometallurgicheskogo proizvodstva – Current problems and prospects of electrometallurgical production*, Dnepropetrovsk, GNPP «Sistemnye tekhnologii» Publ, 1999, pp. 48-54. (Rus.)
4. Krivenko V.V., Ovcharuk A.N. Issledovanie vliyaniya mekhanicheskogo i teplovogo vozdejstviya na margancevye koncentraty i aglomeraty v okislitel'nyh i vosstanovitel'nyh usloviyah [Investigation of the effect of mechanical and thermal effects on manganese concentrates and agglomerates under oxidizing and reducing conditions]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, 2002, no. 2, pp. 21-23. (Rus.)
5. Sorensen B., Gaal S., Tangstad M. Properties of manganese ores and their change in the process of calcinations. *Proceeding of The Twelfth International Ferroalloys Congress*, vol. 2, 2010, Helsinki, Finland, pp. 439-448. doi: 10.1016/j.minpro.2010.01.001.
6. Bazilevskaya E.S. Himiko-mineralogicheskoe issledovanie margancevyh rud (Nikopol'skij bassejn i konkretii Tihogo okeana) [Chemical and mineralogical study of manganese ores (Nikopol basin and nodules of the Pacific Ocean)]. *Trudy GIN AN SSSR – Proceedings of the GIN*

- of the USSR Academy of Sciences, 1976, vol. 287, p. 95. (Rus.)
7. Grishchenko S.G., Rajchenko T.F., Moskaleva N.M. O vzaimosvyazi himiko-mineralogicheskogo sostava i vosstanovimosti margancevorudnykh materialov razlichnykh mestorozhdenij. Soobs-?chenie I. Osobennosti genezisa i sostoyaniya iskhodnykh margancevorudnykh materialov [On the relationship between the chemical and mineralogical composition and the reducibility of manganese ore materials from various deposits. Communication I. Features of the genesis and state of the initial manganese ore materials]. *Izvestiia AN SSSR, Metally – Proceedings of the USSR Academy of Sciences, Metals*, 1991, no. 3, pp. 13. (Rus.)
 8. Prokopenko V.I., Cherep A.Yu., Pilova D.P. Vyznachennya potencialu margancevorudnogo kompleksu Ukraini stosovno teperishn'oi kon'yunkturi rinku [Determining the potential of the manganese ore complex of Ukraine in relation to the current market situation]. *Zbirnik naukovikh prats' Natsional'nogo gornichogo universitetu – Collection of Research Papers of the National Mining University*, 2018, no. 55, pp. 62-78. (Ukr.)
 9. Antakov E. Suchasnij stan svitovogo ta ukraïns'kogo rinku margancyu: osnovni problemi ta tendencii [The current state of the world and Ukrainian manganese market: main problems and trends]. *Visnik Kiivs'kogo nacional'nogo universitetu imeni Tarasa Shevchenka. Geologiya. – Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2013, vol. 2, pp. 44-48. (Ukr.)
 10. Myanovs'ka Ya.V., Projdak Yu.S., Kamkina L.V. Peretvorennya mineral'nih skladovih margancevih rud pri temperaturnih umovah formuvannya aglomeratu [Transformation of mineral components of manganese ores under temperature conditions of agglomerate formation]. *Teoriya i praktika metalurgii – Theory and Practice of Metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 42-51. doi: 10.34185/tpm.3.2019.07. (Ukr.)
 11. Grishenko S.G., Krivenko V.V., Ovcharuk A.N., Olshansky V.I., Filippov I.Yu. The comprehe - sive analysis of physical and chemical properties and metallurgical value of foreign manganese raw materials used during ferroalloy production. *Proceeding of the fourteenth international ferroalloys congress. Infacon XIV Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry*, Kiev, 2015, vol. II, pp. 436-446.
 12. Gasik M.I. *Marganec* [Manganese]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1992. 608 p. (Rus.)

Рецензент: В.Й. Засельський
д-р техн. наук, проф. ННТІ ДУЕТ

Стаття надійшла 15.04.2021

УДК 621.785.377

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240573

© Маслов В.О.¹, Пустовалов Ю.П.², Трофімова Л.О.³, Дан Л.О.⁴

ОСОБЛИВОСТІ ІНТЕРКАЛЯЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНОГО ГРАФІТУ

Розглянуті особливості інтеркаляції графіту, що був отриманий з залізграфітових відходів металургійного виробництва. Вперше запропонована і обчислена модель розрахунку об'ємної щільності цього графіту. Впроваджено нове поняття «коефіцієнт порушення цілісності графіту K » та формула для його обчислення.

Ключові слова: сполуки інтеркальованого графіту, термографеніт, розширення, об'ємна щільність, коефіцієнт порушення цілісності графіту.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, maslov_v_o@pstu.edu

² науковий співробітник, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, trofimova.pstu@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, trofimova.pstu@gmail.com