

- 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 girnichogo 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

V.O. Maslov, Y.P. Pustovalov, L.O. Trofimova, L.O. Dan. Features of metallurgical graphite intercalating. The article considers the distinguishing features of the intercalation of the graphite obtained from the iron-graphite waste of metallurgical production and its subsequent expansion in the falling gravity layer conditions due to shock thermal heating. In doing so, two stages of the process are considered separately: intercalation and thermal expansion. The importance of knowing the distinguishing features of the first stage in terms of ensuring the specified properties of the finished material is emphasized. A new technique and the formula for calculating the theoretical bulk density of intercalated graphite have been proposed depending on the amount and volumes of graphite and intercalate. The assumption has been made and substantiated that the expansion of the graphite particles will occur only in the direction of the «C» axis. Taking into account the fact that the particles will expand 1.45-4.65 times in this direction, it is necessary to amend the calculation formulas of their motion in the falling gravity layer. To obtain reliable results of the calculation, a new concept was introduced – «the graphite integrity breaching coefficient, K» – to calculate the bulk density of intercalated graphite. Based on the experiments, this parameter has been defined in the interval of the volumetric density of intercalated graphite 390-260 kg/m³ with a simultaneous increase in the bulk volume of the layer up to 1.93 m³ of intercalated graphite per 1 m³ of the original graphite. The formula has been derived to calculate this parameter. The final equation has been obtained for calculating the volume density, depending on the initial parameters. As a result of the calculations and the experiments, the numerical values of the breaching coefficient of the graphite integrity have been defined for the values of the volumetric density of intercalated graphite 200-400 kg/m³ – from 3 to 25.

Keywords: *intercalated graphite compounds, thermograpfenite, expansion, bulk density, the breaching coefficient of the graphite integrity.*

Постановка проблеми. Металургійний графіт є відходом металургійного виробництва, який утворюється на всіх ділянках, де відбувається охолодження рідкого чавуну, при переробці чавуну в сталь [1]. Лише на двох ділянках – міксерному і відділенні десульфурації – організовано його уловлювання [2]. У міксерному відділенні виділення графітовмісних відходів пов'язано з великою швидкістю охолодження чавуну при заливці його в міксер, де струмін чавуну охолоджується за рахунок ефекту барботажу на 40-120°. Це призводить до різкого зниження розчинності вуглецю в чавуні. Це викликає виділення частинок графіту лускатої форми розміром до 0,5-0,8 мм. Системою деаерації ці частинки графіту разом з частинками металевого (оксидного) пилу направляються в систему очищення. Кількість графіту в міксерному пилу досягає 20-40% [3].

У відділенні десульфурації [4] відбувається продування чавуну азотом разом з десульфуруючим агентом. В результаті цього за рахунок інтенсивного охолодження чавуну утворюється залізграфітовий пил десульфурації з вмістом графіту 40-60%. Сумарна кількість такого графітовмісного пилу може досягти 800 т/рік на одному металургійному підприємстві. Тому дуже важливою є проблема його використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами [5] було запропоновано широке використання залізграфітових відходів для отримання композиційних матеріалів, включаючи і терморозширений графіт (ТРГ, термографеніт).

При отриманні термографеніту важливим є метод термообробки сполук інтеркаляції графіту (СІГ). В роботі [6] описано метод обробки сполук СІГ в стрічковій печі. При цьому для нагріву використовувано інфрачервоні мікрохвильові та лазерні випромінювачі. Однак цей метод не отримав розвитку. Наступним напрямком є використання киплячого шару для процесу термообробки бісульфатного комплексу графіту в псевдозрідженому шарі і в висхідному потоці [7-9]. Ці методи дозволяють час обробки матеріалу в печі з 30-60 хв (щільний шар) зменшити до 1-5 хв (псевдозріджений шар), а у висхідному потоці – до 0,25-0,50 хв. Головним недоліком усіх перелічених способів є охолодження термічно розширеного графіту, що утворився, в газових продуктах спучування. Це сприяє повторній адсорбції сірчаних сполук поверхнею ТРГ. За рахунок цього в ТРГ не вдається знизити вміст сірки нижче 0,3-0,5%, а при необхідності її ви-

далення треба нагрівати ТРГ до 2600°C [10], що істотно підвищує вартість цього матеріалу.

Авторами [6] запропоновано проведення процесу спучування в гравітаційно-падаючому шарі, під час якого розподілені частки інтеркальованого і спученого графіту під дією сили тяжіння рухаються вниз. Час спучування становить лише 1-3 с.

Для реалізації цього процесу необхідні початкові знання про шари інтеркальованого графіту з наступним переходом від насипного шару матеріалу, який піддається диспергуванню дозатором, до руху «хмари» з одиночних частинок під дією гравітації в гравітаційно-падаючому шарі.

Мета статті. Розглянути первинний процес інтеркаляції металургійного графіту, який практично не вивчений.

Виклад основного матеріалу. Процес отримання термічно розширеного графіту складається з двох основних стадій: 1) отримання інтеркальованого графіту; 2) термошокового нагріву частинок інтеркальованого графіту; в результаті останнього утворюється термічно розширений графіт. Властивості інтеркальованого графіту істотно впливають на властивості термічно розширеного графіту. Особливо це відчувається в гравітаційно-падаючому шарі, коли в реакторі частинки інтеркальованого графіту рухаються під дією результуючої сил гравітації і лобового опору.

Для проведення чистого експерименту по процесам інтеркаляції металургійного графіту був використаний графіт, що отримується з відходів, що утворилися в міксерному відділенні та відділенні десульфурзації. Ці графітовмісткі відходи в промислових умовах проходять процеси флотажної і хімічної обробки для видалення всіх домішок з графіту. Одержуваний таким способом графіт відповідає марці ГАК-2 з зольністю менше 0,5%. У процесі дослідження інтеркаляцію проводили в 5% розчині $K_2Cr_2O_7$ в концентрованій сірчаній кислоті (98%) за раніше розробленою методикою [11].

З отриманих в роботі [12] даних випливає, що об'ємна щільність термічно розширеного графіту ($\rho_{ТРГ}$) істотно залежить від співвідношення $m_{інтеркаланта} : m_{графіта}$ в межах 0,1-0,2, в якому $m_{інтеркаланта}$ – маса інтеркаланта, яка припадає на одиницю маси графіту; $m_{графіта}$ – одинична маса графіту. Подальше збільшення цього співвідношення практично не впливає на величину $\rho_{ТРГ}$. Тому в подальшому окислювання графіту проводилося при співвідношенні $m_{інтеркаланта} : m_{графіта} = 0,16$. Дослідний зразок окисленого графіту після ретельного відмивання в воді і сушки до повітряно-сухого стану при температурі 105°C містив 1 кг графіту і 0,16 кг інтеркаланта, який знаходився між площинами графіту. З огляду на те, що щільність інтеркалюючої рідини близька до щільності концентрованої сірчаної кислоти ($\rho_{H_2SO_4} = 1700-1830$ кг/м³), шляхом об'ємно-масових розрахунків було встановлено, що за даних умов (1 кг графіту + 0,16 кг інтеркаланта) об'єм інтеркаланта перевищує об'єм графіту на 18,82% об. За рахунок цього відбувається деяке розширення графіту уздовж осі «С» графіту. З одного боку мало б відбуватися збільшення насипної щільності графіту до 464 кг/м³, а з іншого боку – збільшення об'єму графіту в 1,0376 рази. Насипна щільність окисленого графіту за всіма розрахунками повинна б знизитися і скласти 447 кг/м³, однак експеримент показує, що насипна щільність окисленого графіту знижується до 360 кг/м³. Аналіз літературних джерел [8, 9, 13] свідчить, що в процесі інтеркаляції відбувається розширення кристалів графіту, а так само порушення суцільності, розтріскування і інші розпушувальні процеси. Для опису процесу інтеркаляції був прийнятий коефіцієнт розширення кристала графіту уздовж осі «С» рівний 1,4, а також був введений нами вперше коефіцієнт порушення цілісності графіту «К», без якого неможливо описати процес розширення при інтеркаляції графіту в повній мірі.

Розглянемо довільний об'єм інтеркальованого графіту, маса якого складається з маси графіту $M_{Г}$ і маси інтеркаланта $M_{інтеркаланта}$. Об'єм цього шару складається з насипного об'єму графіту $V_{н.г}$ і об'єму інтеркаланта $V_{інтеркаланта}$. При цьому необхідно враховувати розширення решітки кристалів графіту, яке в загальному випадку може бути прийнято 1,4 за даними монографії [13], а також запропонований нами коефіцієнт порушення цілісності графіту.

Всі ці міркування дозволили запропонувати в загальному вигляді початкову формулу для визначення об'ємної щільності шару інтеркальованого графіту, $\rho_{i.г}$:

$$\rho_{i.г} = \frac{M_{Г} + M_{інтеркаланта}}{V_{н.г} + V_{інтеркаланта} \cdot 1,4 \cdot K}, \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

де M_{Γ} – маса графіту, кг; $M_{\text{інтеркаланта}}$ – маса інтеркаланта, кг; $V_{\text{н.г}}$ – насипний об’єм графіту, м^3 ; $V_{\text{інтеркаланта}}$ – об’єм інтеркаланта, м^3 ; K – коефіцієнт порушення цілісності графіту.

Розглянемо кожну складову окремо. Масу інтеркаланта можна представити у вигляді прийнятого співвідношення $m_{\text{інтеркаланта}} : m_{\text{графіта}}$ і маси графіту M_{Γ} . Тоді маса графіту з інтеркалантом:

$$M_{\Gamma} + M_{\text{інтеркаланта}} = M_{\Gamma} \cdot \left(1 + \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{m_{\text{графіта}}}\right), \text{ кг.} \quad (2)$$

У зв’язку з тим, що інтеркалант завжди знаходиться між окремими шарами графіту, то його об’єм тісно пов’язаний з об’ємом самого графіту.

Тому величину істинного об’єму графіту, V_{Γ} , м^3 , який бере участь в процесі інтеркаляції, можна обчислити із співвідношення:

$$V_{\Gamma} = V_{\text{н.г}} \cdot \frac{\rho_{\text{н.г}}}{\rho_{\Gamma}}, \text{ м}^3, \quad (3)$$

де V_{Γ} – істинний об’єм графіту, який бере участь в процесі інтеркаляції, м^3 ; $V_{\text{н.г}}$ – насипний об’єм графіту, м^3 ; $\rho_{\text{н.г}}$ – насипна щільність графіту, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_{Γ} – пікнометрична щільність графіту, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Об’єму частку інтеркаланта щодо чистого графіту можна отримати із співвідношення:

$$\frac{V_{\text{інтеркаланта}}}{V_{\Gamma}} = \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{m_{\Gamma}}; \quad (4)$$

$$V_{\text{інтеркаланта}} = V_{\Gamma} \cdot \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{m_{\Gamma}}. \quad (5)$$

Тоді об’єм інтеркаланта:

$$V_{\text{інтеркаланта}} = V_{\text{н.г}} \cdot \frac{\rho_{\text{н.г}}}{\rho_{\Gamma}} \cdot \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{m_{\Gamma}}. \quad (6)$$

Все це дозволяє запропонувати наступну формулу для визначення об’ємної щільності інтеркальованого графіту, $\rho_{\text{i.г}}^{\text{нас}}$:

$$\rho_{\text{i.г}}^{\text{нас}} = \frac{M_{\Gamma}}{V_{\text{н.г}}} \cdot \frac{1 + \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{m_{\Gamma}}}{\left(1 + \frac{\rho_{\text{н.г}}}{\rho_{\Gamma}} \cdot \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{m_{\Gamma}}\right) \cdot 1,4 \cdot K}, \text{ кг}/\text{м}^3. \quad (7)$$

У зв’язку з тим, що перший співмножник являє собою насипну щільність графіту, то остаточна формула має вигляд:

$$\rho_{\text{i.г}}^{\text{нас}} = \rho_{\text{н.г}} \cdot \frac{1 + \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{m_{\Gamma}}}{1 + \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{m_{\Gamma}} \cdot \frac{\rho_{\text{н.г}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}}} \cdot 1,4 \cdot K}, \text{ кг}/\text{м}^3. \quad (8)$$

Таким чином, величина $\frac{\rho_{\text{н.г}} \cdot m_{\text{інтеркаланта}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}} \cdot m_{\Gamma}}$ характеризує розширення графіту за рахунок інтеркаланта, коефіцієнт 1,4 характеризує розширення решітки графіту, а величина « K » – коефіцієнт порушення цілісності графіту – характеризує розтріскування, розшарування і т. п. в процесі інтеркаляції.

Для визначення емпіричного об’ємного коефіцієнту порушення цілісності графіту « K » використовували результати раніше проведених експериментів на основі графіту акумуляторного марки ГАК-2. Методики наведені в [14]. На підставі більш пізніх досліджень [12] показано, що об’ємна щільність термічно розширеного графіту практично не змінюється при співвідношенні $m_{\text{інтеркаланта}} : m_{\text{графіта}}$ більше 0,12-0,15. Тому в даному дослідженні процес інтеркаляції здійснювався при співвідношенні, рівному 0,16, при різному часі інтеркаляції. На підставі за-

пропонованого рівняння і результатів експериментів були обчислені коефіцієнти порушення цілісності графіту при різних умовах інтеркаляції.

На рисунку представлена залежність коефіцієнту порушення цілісності графіту «*K*» від величини об'ємної щільності інтеркальованого графіту.

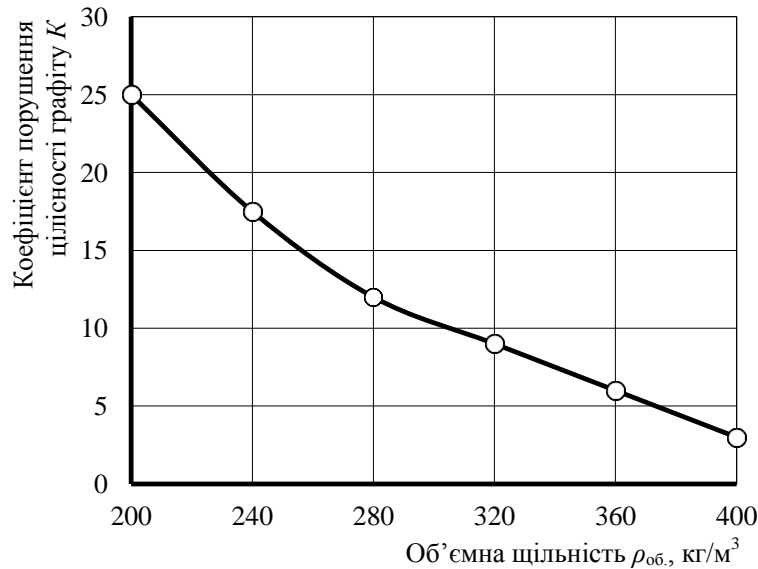


Рисунок – Залежність коефіцієнту порушення цілісності графіту *K* від об'ємної щільності інтеркальованого графіту

Отримана експериментальна залежність в системі координат «*K*- $\rho_{i,r}$ » є слабоопуклою лінією, яка близька до лінійної залежності на початковій ділянці і тільки при дуже сильному окисленні при об'ємній щільності інтеркальованого графіту менш за 260 кг/м³ вона різко загинається вгору. Тому для технічних розрахунків була запропонована залежність:

$$K = K_{\max} \cdot \beta \cdot (\rho_{i,r} - \rho_{i,r\min}), \quad (9)$$

де $\rho_{i,r\min}$ – мінімальна насипна щільність інтеркальованого графіту на даній ділянці кривої; $\rho_{i,r}$ – експериментальна насипна щільність інтеркальованого графіту на даній ділянці кривої.

Було встановлено, що для інтервалу об'ємної щільності інтеркальованого графіту в межах 390-300 кг/м³ справедлива лінійна залежність:

$$K_I = 10,38 - 0,082 \cdot (\rho_{i,r} - 300). \quad (10)$$

У цьому інтервалі похибка лінеаризації не перевищує 2,3%, що допустимо для технічних розрахунків. Подальше посилення інтеркаляції ($\rho_{i,r} < 300$ кг/м³) призводить до істотного збільшення похибки.

При необхідності подальшого посилення інтеркаляції в інтервалі (290-260 кг/м³) може бути запропонована лінійна залежність:

$$K_{II} = 14,89 - 0,10 \cdot (\rho_{i,r} - 260). \quad (11)$$

У цьому інтервалі так само досягнута максимальна похибка не більше 2,3%.

Ще більша інтеркаляція графіту ($\rho_{i,r} < 260$ кг/м³), вочевидь, пов'язана зі значним розтріскуванням частинок, при цьому величина коефіцієнту *K* різко збільшується.

При інтеркаляції графіту насипна щільність знижується з 400 до 240 кг/м³ при одночасному збільшенні насипного об'єму шару до 1,93 м³ інтеркальованого графіту на 1 м³ вихідного графіту.

У процесі обробки матеріалів в гравітаційно-падаючому шарі важливо мати чітке уявлення про морфологію частинок. З літератури [11] відомо, що будь-яке розширення графіту відбувається в напрямку осі «С» графіту. Тому і розширення частинок графіту буде відбуватися тільки в цьому напрямку.

З огляду на наведені дані, можна припустити, що вже в процесі інтеркаляції до термошо-

кового нагріву частинки будуть розширюватися в 1,45-4,65 разів в напрямку «С» і це необхідно врахувати при русі частинок в гравітаційно-падаючому шарі.

Результати проведених розрахунків і досліджень показали, що запропоноване рівняння може бути використано при обчисленні насипної щільності інтеркальованого графіту.

Висновки

1. Розглянуто дві стадії процесу отримання термічно розширеного графіту в режимі гравітаційно-падаючого шару. Визначено важливість для цього процесу знання особливостей першої стадії – отримання інтеркальованого графіту і властивості отриманого матеріалу.

2. Запропоновано нову модель розрахунку насипної щільності інтеркальованого графіту з металургійного графіту, що дозволило отримати формулу для обчислення цього параметру.

3. Введено нове поняття – «коефіцієнт порушення цілісності графіту K » для розрахунку насипної щільності інтеркальованого графіту. На підставі наведених експериментів визначено цей параметр в інтервалі об'ємної щільності інтеркальованого графіту 390-260 кг/м³ з одночасним збільшенням насипного об'єму шару до 1,93 м³ інтеркальованого графіту на 1 м³ вихідного графіту. Запропоновано формулу для обчислення цього параметру. Отримано остаточне рівняння для розрахунку об'ємної щільності в залежності від вихідних параметрів.

Список використаних джерел:

1. Маслов В.А. Дисперсные железорафитовые отходы металлургического производства как сырье для получения новых материалов / В.А. Маслов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Сталь. – 2009. – № 3. – С. 67-70.
2. Кравець В.А. Дослідження властивостей металургійного графіту з метою подальшої утилізації / В. А. Кравець // Збірник наукових праць Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Краматорськ : ДонНАБА, 2018 (11). – № 1. – С. 38-52.
3. Маслов В.А. Новое направление переработки дисперсных железорафитовых отходов металлургического производства / В.А. Маслов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2008. – Вип. 17. – С 32-36.
4. Маслов В.А. Особенности подготовки к переработке дисперсных железорафитовых отходов отделения десульфурации / В.А. Маслов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2010. – Вип. 20. – С. 144-148. – (Серія: Технічні науки).
5. Маслов В.О. Композиційні матеріали на основі залізографітових відходів металургійного виробництва / В.О. Маслов // Хімічна промисловість України. – 1994. – № 4. – С. 54-60.
6. А. с. 1579008 СССР, МКИ С 01 В 31/04. Способ получения расширенного графита / В.А. Маслов [и др.]. – № 4392502; приоритет изобретения 15.03.1988 (ДСП).
7. А. с. 767023 СССР, МКИ С 01 В 31/04. Способ получения расширенного графита / А.Н. Антонов [и др.]. – № 2610959/23-26; заявл. 09.03.78; опубл. 30.09.80, Бюл. № 36.
8. Махорин К.Е. Вспучивание природного графита, обработанного серной кислотой / К.Е. Махорин, А.П. Кожан, В.В. Веселов // Химическая технология. – 1985. – № 2. – С. 3-6.
9. Вспучивание графита в плотном и взвешенном слоях / К.Е. Махорин, А.П. Кожан, В.В. Веселов, В.Н. Александров // Химическая технология. – 1987. – № 2. – С.43-49.
10. Pat. JPS60118618A Japan, IPC CO31B31/04. Method for decreasing residual sulfur contained in expanded graphite / Toshihisa Maeda. – № JP58222358A; app. 25.11.83; publ. 26.06. 26.06.85.
11. Физико-химические свойства графита и его соединений / Черныш И.Г. [и др.]. – К. : Наукова думка, 1990. – 200 с.
12. Возможность получения термографенита с магнитными свойствами из дисперсных железорафитовых отходов металлургии / В.А. Маслов, Ю.П. Пустовалов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2017. – Вип. 34. – С. 24-30. – (Серія: Технічні науки).
13. Динамика превращения соединений интеркалирования графита при термошоковом нагреве / В.А. Маслов, Ю.П. Пустовалов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2019. – Вип. 38. –

С. 23-30. – (Серія: Технічні науки). – Режим доступу : <https://doi.org/10.31498/2225-6733.38.2019.181270>.

14. Исследование процесса окисления дисперсных ЖГО с целью получения соединений интеркалирования графита / В.А. Маслов, Ю.П. Пустовалов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2016. – Вип. 32. – С. 48-53. – (Серія: Технічні науки).

References:

1. Maslov V.A., Trofimova L.A., Dan L.A. Dispersnye zhelezografitovye othody metallurgicheskogo proizvodstva kak syr'e dlya polucheniya novykh materialov [Disperse Fe-C containing wastes of metallurgy as raw material for new materials]. *Stal' – Steel*, 2009, no. 3, pp.67-70. (Rus.)
2. Kravec V.A. Doslidzhennya vlastivostej metalurgijnogo grafitu z metoyu podalshoyi utilizaciyi [Investigation of the properties of metallurgical graphite for further utilization]. *Zbirnik naukovikh prats' Donbas'koï natsional'noi akademii budivnitstva i arkhitekturi – Collection of scientific works of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2018 (11), no. 1, pp. 38-52. (Ukr.)
3. Maslov V.A., Trofimova L.A., Dan L.A. Novoe napravlenie pererabotki dispersnyh zhelezografitovyh othodov metallurgicheskogo proizvodstva [A new direction of processing of dispersed Fe-C waste of metallurgical production]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section*, 2008, vol. 17, pp. 32-36. (Rus.)
4. Maslov V.A., Trofimova L.A., Dan L.A. Osobennosti podgotovki k pererabotke dispersnyh zhelezografitovyh othodov otdeleniya desulfuracii [Features of preparation for the processing of dispersed Fe-C waste of the desulfurization]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2010, vol. 20, pp. 144-148. (Rus.)
5. Maslov V.O. Kompozicijni materialy na osnovi zalizografitovyh vidhodiv metalurgijnogo virobnictva [Composition materials on the basis of Fe-C containing wastes of metallurgy]. *Khimichna promislovist' Ukraini – Chemical industry of Ukraine*, 1994, no. 4, pp. 54-60. (Ukr.)
6. Maslov V.A., V.I. Pauk, Pustovalov Yu.P. *Sposob polucheniya rasshirennoho grafita* [The method of obtaining thermally expanded graphite]. Patent USSR, no. 1579008, 1988. (Rus.)
7. Antonov A.N., Ivanov V.A., Timorin V.D., Fedoseev S.D., Makevnina L.F., Rybalov V.A. *Sposob polucheniya rasshirennoho grafita* [Method for obtaining expanded graphite]. Patent USSR, no. 767023, 1980. (Rus.)
8. Mahorin K. E., Kozhan A.P., Veselov V.V. Vspuchivanie prirodnoho grafita, obrabotannogo sernoj kislotoj [Extrusion of natural graphite treated with sulfuric acid]. *Himicheskaja tehnologija – Chemical Technology*, 1985, no. 2, pp. 3-6. (Rus.)
9. Mahorin K.E., Kozhan A.P., Veselov V.V., Aleksandrov V.N. Vspuchivanie grafita v plotnom i vzveshennom slojah [Graphite swelling in dense and suspended layers]. *Himicheskaja tehnologija – Chemical Technology*, 1987, no. 2, pp. 43-49.
10. Toshihisa Maeda. Method for decreasing residual sulfur contained in expanded graphite. Patent Japan, no. JP58222358A, 1985.
11. Chernysh I.G., Karpov I.I., Prikhod'ko G.P., Shai V.M. *Fiziko-himicheskie svojstva grafita i ego soedinenij* [Physico-chemical properties of graphite and its connections]. Kyev, Naukova dumka Publ., 1990. 200 p. (Rus.)
12. Maslov V.A., Pustovalov Yu.P., Trofimova L.A., Dan L.A. Vozmozhnost' polucheniya termografenita s magnitnymi svojstvami iz dispersnyh zhelezografitovyh othodov metallurgii [The possibility of obtaining thermogranite with magnetic properties from dispersed iron-graphite waste metallurgy]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2017, vol. 34, pp. 24-30. (Rus.)
13. Maslov V.A., Pustovalov Yu.P., Trofimova L.A., Dan L.A. Dinamika prevrasheniya soedinenij interkalirovaniya grafita pri termoshokovom nagreve [Dynamics of turning of the intercalated graphite compounds at thermal shock heating]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo*

Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences, 2019, vol. 38, pp. 23-30. doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181270.

14. Maslov V.A., Pustovalov Yu.P., Trofimova L.A., Dan L.A. Issledovanie processa okisleniya dispersnyh zhelezografitovyh othodov s cel'yu polucheniya soedinenij interkalirovaniya grafita [The study of oxidation process of dispersed Fe-C containing waste to obtain intercalation compounds of graphite]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2016, vol. 32, pp. 48-53. (Rus.)

Рецензент: В.Б. Семакова
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.04.2021

УДК 622.781

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240575

© Чупринов Є.В.¹, Лялюк В.П.², Журавльов Ф.М.³,
Швед С.В.⁴, Василенко І.А.⁵

АЕРОДИНАМІЧНЕ РОЗДІЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ПО КРУПНОСТІ

Розглянуто можливість організації повітряної класифікації обпалених окатишів на відкритих складах готової продукції. Досліджено особливості вибору конструктивних умов аеродинамічного сортування окатишів, що забезпечують максимальні і достатні відстані між частинками різних розмірів на встановленому горизонті для сортування окатишів за їх розмірами. Теоретично показана можливість класифікації обпалених окатишів повітряним потоком з відділенням необхідних крупності і кількості фракцій при їх вивантаженні зі стрічкового конвеєра.

Ключові слова: окатиші, класифікація, повітряний потік, аеродинаміка, моделювання.

E.V. Chuprinov, V.P. Lyalyuk, F.M. Zhuravlev, S.V. Shved, I.A. Vasylenko. Aerodynamic separation of iron ore pellets by size. The studies on reheating of fired pellets of a suitable fraction used in the bottom and side beds have been analyzed. It has been shown that due to the loss of the crystallization of the glass iron silicate bond, the strength of the pellets decreases at their reduction and their destruction in the metallurgical unit increases, thus leading to a deterioration in its performance. It has been concluded that for the bed, it is necessary to purposefully separate the fraction of the pellets of the required size that does not fall into the finished product. The ways of organizing air classification of fired pellets in open warehouses of finished products have been studied and the possibility of its organization has been considered. The particle trajectories and the factors influencing this process have been analyzed. It has been shown that an important charac-

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

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

⁴ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

⁵ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, innav@i.ua