

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ УМОВ ПЕРЕБІГУ ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ НАВУГЛЕЦЮВАННЯ ЗАЛІЗА ГАЗОМ СО ПРИ ВІДНОВЛЕННІ З ВЮСТИТУ

У статті наведено результати термодинамічної оцінки можливості перебігу хімічних реакцій непрямого відновлення із вюститу заліза та його навуглецювання за допомогою відновлювального газу СО. Метою роботи є отримання виразів для розрахунку числових значень вільної енергії Гіббса в залежності від температури для зазначених хімічних реакцій та знаходження за їх допомогою числових значень граничних (рівноважних) температур, що дозволять визначити діапазон числових значень температур, в якому перебіг хімічних реакцій процесу навуглецювання відновленого заліза монооксидом вуглецю термодинамічно можливий. Результати проведеного термодинамічного аналізу з використанням виведених автором виразів для розрахунку числових значень вільної енергії Гіббса для хімічних реакцій непрямого відновлення заліза з вюститу та навуглецювання заліза газом СО дозволили встановити, що процес навуглецювання заліза термодинамічно можливий за хімічною реакцією навуглецювання заліза при непрямому відновленні його з вюститу газом СО, що складається з 2-х окремих стадій, які описуються хімічними реакціями непрямого відновлення заліза з вюститу і навуглецювання відновленого заліза газом СО, тільки при числових значеннях температур до 662°C або в діапазоні негативних значень температур. Враховуючи той факт, що хімічна реакція Белла–Будуара теоретично може перебігати при температурах, які вищі за 557°C або вищі за 697°C, або вищі за 699°C, або вищі за 706°C, або вищі за 748°C, або вищі за 750°C (згідно з літературними даними), або вищі за 709°C (за даними автора), а також великі числові значення температур робочого простору металургійних відновлювальних печей, можна зробити висновок, що навуглецювання відновленого заліза за допомогою газу СО (поряд з неможливістю відновлення заліза з вюститу газом СО понад 765°C, що було встановлено автором роботи раніше) практично не відбувається або ступінь навуглецювання заліза мізерно мала, що добре кореспондується з даними деяких літературних джерел. Зроблено висновок про навуглецювання відновленого заліза за рахунок твердого вуглецю.

Ключові слова: термодинамічний аналіз, монооксид вуглецю, відновлення, навуглецювання, хімічна реакція, вюстит, вільна енергія Гіббса, ентальпія, ентропія, гранична температура.

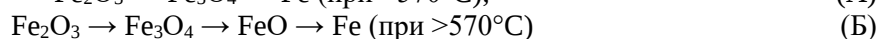
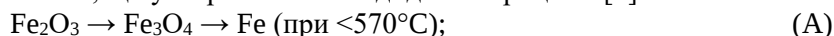
S.P. Panteikov. Thermodynamic analysis of chemical reactions conditions of iron carbonization by CO gas during reduction from wustite. The article presents the results of a thermodynamic assessment of the possibility of chemical reactions of indirect reduction of iron from wustite and its carburization using the reducing gas CO. The purpose of this work is to obtain expressions for calculating the numerical values of the Gibbs free energy depending on the temperature for the specified chemical reactions and finding with their help the numerical values of the boundary (equilibrium) temperatures, allowing us to determine the range of numerical values of temperatures in which the chemical reactions of the process of carburization of reduced iron with carbon monoxide are thermodynamically possible. The results of the thermodynamic analysis performed using the expressions derived by the author for calculating the numerical values of the Gibbs free energy for chemical reactions of indirect reduction of iron from wustite and carburization of iron by

* канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: 0000-0002-0385-7603, ser_pant_in@ukr.net

CO gas made it possible to establish that the process of carburization of iron is thermodynamically possible by the chemical reaction of carburization of iron during its indirect reduction from wustite by CO gas, consisting of two separate stages described by chemical reactions of indirect reduction of iron from wustite and carburization of reduced iron by CO gas, only at numerical values of temperatures up to 662°C or in the range of negative temperature values. Taking into account the fact that the Bell-Boudoir chemical reaction can theoretically proceed at temperatures above 557°C or above 697°C, or above 699°C, or above 706°C, or above 748°C, or above 750°C (according to literature data), or above 709°C (according to the author), as well as high numerical values of temperatures of the working space of metallurgical reduction furnaces, it can be concluded that carburization of reduced iron by CO gas (along with the impossibility of reducing iron from wustite by CO gas above 765°C, which was established by the author of the work earlier) practically does not occur or the degree of carburization of iron is very small, which corresponds well with the data of some literary sources. A conclusion is made about the carburization of reduced iron due to solid carbon.

Keywords: thermodynamic analysis, carbon monoxide, reduction, carburization, chemical reaction, wustite, Gibbs free energy, enthalpy, entropy, boundary temperature.

Постановка проблеми. Відновлення заліза з його оксидів, що містяться в різних залізородних матеріалах, відбувається ступінчасто – за рахунок послідовних етапів відщеплення кисню від оксидів заліза – початкового і тих, що утворюються в ході даних процесів [1]:



Металургійні процеси відбуваються за високих температур, тобто відновлення заліза з його оксидів відбувається за високотемпературною схемою (Б).

Відновлене залізо завжди науглецюється до стану чавуну, при цьому вважається, що процес науглецювання відбувається за рахунок хімічних реакцій взаємодії заліза як із відновлювальним газом CO [2], так і з твердим вуглецем коксу (або вугілля) [3, 4] (зазначені процеси належать до складних гетерогенних фізико-хімічних процесів, в яких беруть участь тверді, рідкі та газоподібні речовини). Ці наукові положення також викладаються для студентів та аспірантів для їх навчання у різних літературних джерелах і на Інтернет-ресурсах.

Неминучість науглецювання відновленого заліза як в доменній печі, так і в інших відновних агрегатах, виключає можливість отримання кінцевого продукту у вигляді чистого або низьковуглецевого заліза (сталі). У зв'язку з цим актуальності набувають питання термодинамічного аналізу процесів науглецювання заліза при його відновленні з вюститу, насамперед, за рахунок газу CO.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Термодинамічний аналіз умов перебігу хімічних реакцій науглецювання відновленого заліза газом CO становить значний інтерес для правильного розуміння цього процесу, а також теоретичного обґрунтування новітніх технологій отримання в одному агрегаті безпосередньо із залізовмісної сировини рідкого заліза – чавуну (або його гранульованого аналога) або сталі (що в сучасних відновних печах не вдавалося здійснити до сьогоднішнього дня, тобто виключивши проміжну стадію отримання чавуну, як це здійснювалося у давнину в різних конструкціях сиродутних горнів).

У джерелі [5] викладено умови відновлення заліза з вюститу та науглецювання відновленого заліза газом CO, які, як зазначено, відповідають двом хімічним реакціям, що відбуваються одночасно:



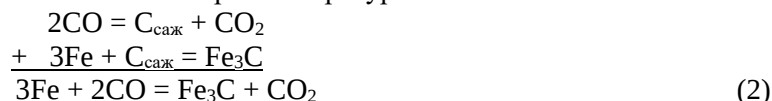
при цьому їх підсумковою реакцією буде реакція (3) непрямого відновлення із вюститу заліза з його науглецюванням до стану чавуну (карбіду заліза Fe_3C) газом CO:



Згідно із джерелом [6], науглецювання заліза теоретично може здійснюватися за двома хімічними реакціями (2) і (3), причому ступінь науглецювання заліза залежить від складу газової фази, температури нагрівання металу та тривалості витримки. При цьому вважається, що

реакція (1) відбувається при низькій температурі та за наявності у відхідному пічному газі високої концентрації оксиду вуглецю (CO). Однак при низькій температурі в шарі шихти концентрація газу CO дуже незначна, через що перебіг цієї реакції в зоні відновлення практично неможливий. На цій підставі вважається, що практично науглецювання у зазначеній зоні відбувається лише за реакцією (2). У даному випадку ступінь науглецювання заліза визначатиметься зазначеними вище факторами, причому максимальний вміст оксиду вуглецю (CO) може забезпечити науглецювання заліза лише в межах 0,10-0,20% С. Однак, як відомо, вміст вуглецю в придатній криці зазвичай становить 1,0-1,5%. На підставі цього вважається, що науглецювання заліза має відбуватися у наступних зонах, переважно, у перехідній зоні (вірогідно маєтись на увазі зона переходу заплечиків у розпар, в якому відбувається розплавлення шихти і пряме відновлення заліза із вюститу – прим. автора).

У джерелах [7, 8] зазначається, що насичення вуглецем заліза при взаємодії останнього з газом CO відбувається (після відновлення заліза з вюститу) у другій стадії процесу науглецювання (стадії вказані нижче у вигляді окремих хімічних реакцій, з яких виводиться підсумкова реакція (2)) за рахунок дифузії утвореного з газу CO в першій стадії процесу сажистого вуглецю $C_{\text{саж}}$ до маси металевого заліза при температурах 950-1150°C за схемою:



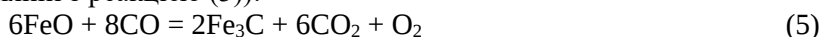
Таким чином підсумковою хімічною реакцією науглецювання заліза знову зазначається реакція (2)

У роботах [9-13] також вважається, що відновлене залізо науглецюється за хімічною реакцією (2), при цьому в джерелах [10, 11] зазначається, що процес науглецювання відбуватиметься поряд із процесом відновлення заліза газом CO за температур, числові значення яких вищі за 400-500°C, а в роботах [12, 13] стверджується, що оксид вуглецю (CO) вступає в реакцію з чистим залізом в інтервалі температур 900-1000°C.

Крім того, можливо, що при взаємодії заліза з газом CO продуктом реакції може бути не діоксид вуглецю (CO_2), а кисень (O_2), при цьому сама реакція науглецювання матиме вигляд, який дещо відрізняється від реакції (2):



З урахуванням даної обставини підсумкова реакція (5) процесу відновлення з вюститу заліза з його науглецюванням до стану чавуну, що складається з окремих реакцій (стадій) непрямого відновлення заліза (реакція (1)) та його науглецювання (реакція (4)) газом CO, також буде мати трохи інший вид (у порівнянні з реакцією (3)):



Тобто процес науглецювання заліза при його відновленні газом CO теоретично може відбуватися за такими двома схемами:

1. реакція (1) + реакція (2) = реакція (3) або
2. реакція (1) + реакція (4) = реакція (5).

Тому з метою з'ясування можливості перебігу всіх хімічних реакцій зазначених схем при температурах робочого простору відновних печей необхідним є їхній термодинамічний аналіз для визначення діапазону числових значень температур перебігу T_{np} цих реакцій. Термодинамічний аналіз передбачає виведення формул для розрахунку вільної енергії Гіббса ΔG_m^o і знаходження за їх допомогою числових значень граничних температур T_{gr} для реакцій (2)-(5) науглецювання відновленого заліза газом CO (реакція (1) є реакцією непрямого відновлення заліза із вюститу газом CO, її термодинамічний аналіз був виконаний автором при аналізі процесу відновлення заліза із гематиту газом CO [14-19]).

Метою даної роботи є термодинамічний аналіз умов перебігу хімічних реакцій (2)-(5) науглецювання газом CO заліза при його непрямому відновленні з вюститу за рахунок газу CO з попереднім виведенням формул розрахунку вільної енергії Гіббса для знаходження числових значень граничних (рівноважних) температур, які дозволять визначити діапазон числових значень теоретичних температур, в якому перебіг зазначених реакцій термодинамічно можливий.

Методика досліджень. Для розрахунку граничних температур T_{gr} автором були виведені та використані вирази для розрахунку числових значень вільної енергії Гіббса (ізобарно-ізотермічного потенціалу) ΔG_m^o залежно від температури T для зазначених вище хімічних реакцій (1)–(5) відновлення та науглецювання заліза газом CO (приймаємо, що FeO, Fe та Fe₃C знаходяться у твердому стані); для здійснення обчислень за їх допомогою та обробки отриманих результатів задіяно комп'ютерну програму MS Excel 2013.

Виведення розрахункових формул для розрахунку температурно-залежних числових значень енергії Гіббса ΔG_m^o здійснювалося за методикою, що описана в літературних джерелах [20, 21], із застосуванням наявних у літературі [22] стандартних значень ентальпій утворення неорганічних речовин $\Delta H_{f,298}^o$ та їх ентропій S_{298}^o ; числові значення необхідних з них (тих, які беруть участь у процесах відновлення і науглецювання заліза газом CO) наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Стандартні значення $\Delta H_{f,298}^o$ і S_{298}^o

Речовина	Стан	$\Delta H_{f,298}^o$, кДж/моль	S_{298}^o , Дж/(моль·К)
FeO	кристалічний	– 264,8	60,8
Fe	кристалічний	0	27,15
Fe ₃ C	кристалічний	25	105,1
C	кристалічний (графіт)	0	5,74
O ₂	газ	0	205,04
CO	газ	– 110,52	197,54
CO ₂	газ	– 393,51	213,67

Методика виведення формул [20, 21] для обчислення температурно-залежних числових значень вільної енергії Гіббса ΔG_m^o полягає в наступному.

Будь-який хімічний процес, як відомо [23], характеризується ентальпійним (ΔH^o) і ентропійним ($T \cdot \Delta S^o$) факторами, які діють одночасно, але протилежні один одному. Їх підсумковий ефект у процесах, що відбуваються при постійному тиску і певних температурах, визначає зміну числового значення вільної енергії Гіббса ΔG_m^o .

Числові значення вільної енергії Гіббса ΔG_m^o в залежності від температури T (у К), виходячи із наслідків закону Гесса, знаходяться для будь-якої хімічної реакції за такою формулою [20, 21]:

$$\Delta G_m^o = \Delta H^o - T \cdot \Delta S^o, \quad (6)$$

де ΔH^o і ΔS^o – числові значення ентальпії (Дж/моль) і ентропії (Дж/(моль·К)) аналізованої хімічної системи (реакції) відповідно; знаходяться за такими виразами [20, 21]:

$$\Delta H^o = \sum \Delta H_{prod}^o - \sum \Delta H_{poc}^o = (e \cdot \Delta H_5^o + d \cdot \Delta H_4^o + c \cdot \Delta H_3^o) - (b \cdot \Delta H_2^o + a \cdot \Delta H_1^o); \quad (7)$$

$$\Delta S^o = \sum \Delta S_{prod}^o - \sum \Delta S_{poc}^o = (e \cdot \Delta S_5^o + d \cdot \Delta S_4^o + c \cdot \Delta S_3^o) - (b \cdot \Delta S_2^o + a \cdot \Delta S_1^o), \quad (8)$$

де $\sum \Delta H_{prod}^o$ і $\sum \Delta H_{poc}^o$ – суми стандартних ентальпій утворення відповідно продуктів реакції і початкових речовин, Дж/моль; $\sum \Delta S_{prod}^o$ і $\sum \Delta S_{poc}^o$ – суми стандартних ентропій відповідно для продуктів реакції і початкових речовин, Дж/(моль·К); ΔH_1^o , ΔH_2^o і ΔH_3^o , ΔH_4^o , ΔH_5^o та ΔS_1^o , ΔS_2^o і ΔS_3^o , ΔS_4^o , ΔS_5^o – стандартні ентальпії утворення (ΔH^o , Дж/моль) початкових речовин і продуктів реакції та їх ентропії (ΔS^o , Дж/(моль·К)) відповідно (див. табл. 1); a , b , c , d , e – коефіцієнти стехіометрії хімічної системи (параметри ΔH_5^o і ΔS_5^o з коефіцієнтом e будуть характерними тільки для хімічної реакції (5)).

Виклад основного матеріалу. Формула для розрахунку числових значень вільної енергії Гіббса ΔG_m^o хімічної реакції (1) залежно від температури T (у К), що виведена автором у роботах [16, 18], має такий вигляд:

$$\Delta G_m^o(1) = -18190 + 17,52 \cdot T, \text{ Дж/моль СО} \quad (\text{I})$$

Формули для розрахунку числових значень енергії Гіббса ΔG_m^o хімічних реакцій (2)-(5) залежно від температури T (у К), що виведені автором, відповідно мають такий вигляд:

$$\Delta G_m^o(2) = -73735 + 78,88 \cdot T, \text{ Дж/моль СО}; \quad (\text{II})$$

$$\Delta G_m^o(3) = -40408 + 42,06 \cdot T, \text{ Дж/моль СО}; \quad (\text{III})$$

$$\Delta G_m^o(4) = 135520 + 71,37 \cdot T, \text{ Дж/моль СО}; \quad (\text{IV})$$

$$\Delta G_m^o(5) = 20237,5 + 30,98 \cdot T, \text{ Дж/моль СО} \quad (\text{V})$$

При цьому теоретичні числові значення граничних температур T_{cp} для хімічних реакцій (1)-(5) можна визначити з виразу $t = \Delta H^o / \Delta S^o - 273$, °С, використовуючи отримані рівняння (I)-(V), тобто для умови хімічної рівноваги $\Delta G_m^o = 0$ кожної із реакцій (1)-(5).

Залежності числових значень вільної енергії Гіббса ΔG_m^o від температури T (у °С) для хімічних реакцій (1)-(3) ілюструє рис. 1; ці залежності побудовані згідно з проведеними розрахунками ΔG_m^o для зазначених реакцій за виведеними автором виразами (I)-(III). Мимовільний їх перебіг в прямому напрямку буде термодинамічно можливим при виконанні умови $\Delta G_m^o < 0$. Згідно з отриманими автором виразами (I)-(III) остання умова для реакцій (1)-(3) виконуватиметься при наступних числових значеннях температур перебігу процесів T_{np} , які в усіх випадках будуть нижчими за обчислене для кожної конкретної із зазначених хімічних реакцій теоретичне числове значення граничної температури T_{cp} (див. рис. 1):

- для реакції (1): $T_{cp} = 765,242^\circ\text{C}$, $T_{np} < T_{cp}$;
- для реакції (2): $T_{cp} = 661,774^\circ\text{C}$, $T_{np} < T_{cp}$;
- для реакції (3): $T_{cp} = 687,631^\circ\text{C}$, $T_{np} < T_{cp}$.

Умова $\Delta G_m^o < 0$ для реакцій (4) і (5), згідно з отриманими автором виразами (IV) і (V), виконуватиметься при наступних числових значеннях температур перебігу процесів T_{np} , які в усіх випадках будуть також нижчими за обчислене для кожної із зазначених хімічних реакцій теоретичне числове значення граничної температури T_{cp} :

- для реакції (4): $T_{cp} = -2171,837^\circ\text{C}$, $T_{np} < T_{cp}$;
- для реакції (5): $T_{cp} = -926,191^\circ\text{C}$, $T_{np} < T_{cp}$.

Таким чином, проведений термодинамічний аналіз дозволив встановити, що хімічні реакції науглецювання монооксидом вуглецю заліза (реакція (2)) та його непрямого відновлення з подальшим науглецюванням (реакція (3)) газом СО можуть мимовільно перебігати як при всіх негативних значеннях температур, так і в інтервалі їх невисоких позитивних значень – відповідно до $661,774^\circ\text{C}$ і до $687,631^\circ\text{C}$ (рис. 1). Проте за більш високих температур робочого простору відновлювальних печей перебіг зазначених реакцій термодинамічно неможливий. При цьому, для хімічної реакції (3), яка складається з 2-х стадій, що описуються хімічними реакціями (1) і (2), лімітуючою стадією, як видно з результатів термодинамічних розрахунків, є стадія науглецювання, яка описується реакцією (2). Тобто, незважаючи на те, що відновлення заліза з вюститу газом СО (див. реакцію (1)) за даними автора термодинамічно можливе до $765,242^\circ\text{C}$ (за даними різних літературних джерел – до $572-777^\circ\text{C}$ [14-19], за даними роботи [24] – до $\approx 327^\circ\text{C}$), і реакція (3) термодинамічно може перебігати при всіх значеннях температур тільки до $687,631^\circ\text{C}$, науглецювання відновленого заліза газом СО можливе лише при значеннях температурах, що нижчі за $661,774^\circ\text{C}$. При цьому ступінь науглецювання відновленого заліза через низьку концентрацію СО у відхідному пічному газі (це підтверджують термодинамічні умови перебігу реакції Белла-Будуара, що зазначені нижче) буде мізерно мала, що також добре кореспондується із джерелом [6] (див. вище).

Беручи до уваги ті факти, що відновлене залізо зазвичай відсутнє у зонах з температурами, значення яких нижчі за $661,774^\circ\text{C}$, а реакція Белла-Будуара теоретично (термодинамічно) може

перебігати при температурах, що, згідно даних [16-19], які отримані автором, вищі за 709°C (згідно з різними літературними даними, що наведені у роботах автора [14, 15, 18, 19], ці температури вищі за 557°C або вищі за 697°C, або вищі за 699°C, або вищі за 706°C, або вищі за 748°C, або вищі за 750°C), а також враховуючи більш високі значення температур (близько 1200°C [25]) у зоні робочого простору металургійних печей, де починається процес відновлення заліза, можна зробити висновок, що процес науглецювання відновленого заліза за допомогою газу CO взагалі не буде відбуватися у відновних печах.

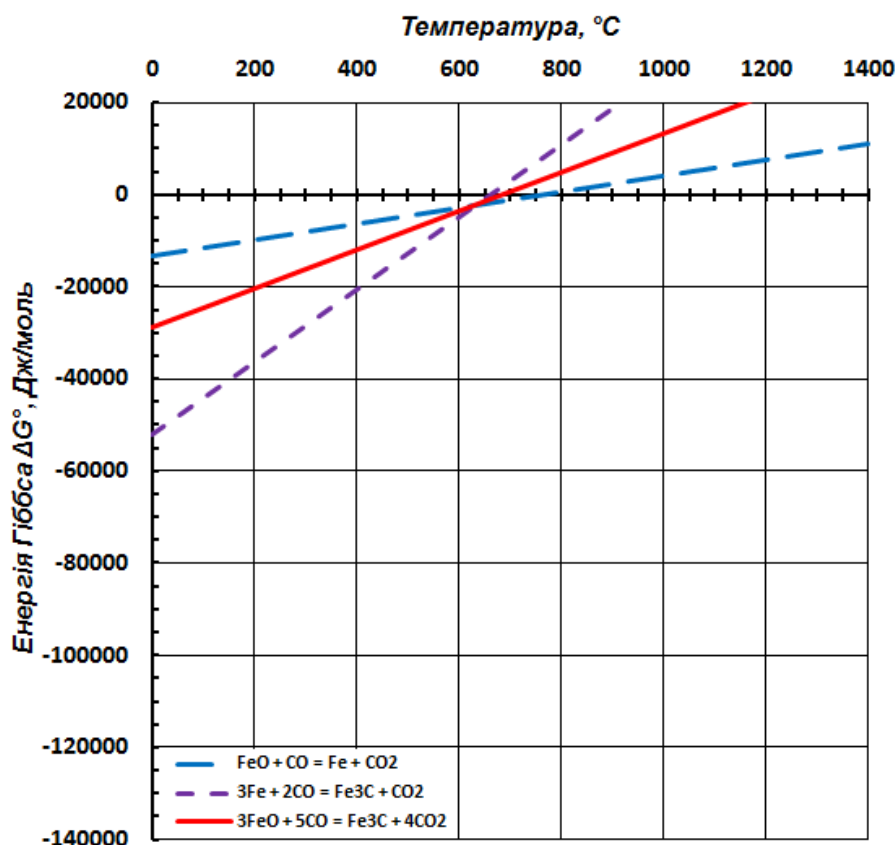


Рис. 1 – Залежність величини вільної енергії Гіббса ΔG_m° від значень температури T для реакцій (1)-(3), що розраховані за виведеними автором формулам (I)-(III)

Хімічна реакція науглецювання (4) і підсумкова хімічна реакція відновлення та науглецювання (5) відновленого заліза за рахунок газу CO взагалі не можуть перебігати при температурах, що можливі у природі, адже теоретичні температури перебігу цих реакцій, що отримані розрахунком, мають числові значення, що нижчі за $-2171,837^\circ\text{C}$ і нижчі за $-926,191^\circ\text{C}$ відповідно. Тобто це свідчить також про неможливість термодинамічного перебігу реакцій (4) і (5) за будь-яких температур робочого простору відновлювальних печей.

Висновки

Результати проведеного у роботі термодинамічного аналізу з використанням виведених автором виразів (I)-(V) для розрахунку числових значень вільної енергії Гіббса ΔG_m° хімічних реакцій (1)-(5) дозволили визначити термодинамічні умови процесу науглецювання відновленого заліза у металургійних відновних печах за допомогою газу CO.

Встановлено, що науглецювання відновленого заліза газом CO за хімічними реакціями (4) і (5) неможливе у робочому просторі відновлювальних печей, оскільки зазначені реакції термодинамічно не можуть перебігати при всіх температурах, що можливі у природі.

Науглецювання відновленого заліза за допомогою газу CO термодинамічно можливе за

хімічною реакцією (3), яка складається з 2-х окремих стадій – відновлення заліза і наступного його науглецювання монооксидом вуглецю, що описуються відповідно хімічними реакціями (1) і (2), однак лише при числових значеннях температури процесу, які нижчі за 662°C. При цьому через низьку концентрацію CO у відхідному пічному газі ступінь науглецювання заліза в цьому випадку буде мізерно мала.

Беручи до уваги, що відновлене залізо зазвичай відсутнє у зонах з температурами, значення яких нижчі за 662°C, враховуючи термодинамічні умови перебігу хімічної реакції газифікації твердого вуглецю (Белла-Будуара) та більш високі значення температур (близько 1200°C) у зоні робочого простору металургійних печей, де починається процес відновлення заліза, можна зробити висновок, що процес науглецювання відновленого заліза за допомогою газу CO взагалі не буде відбуватися.

Це спростовує твердження деяких авторів, що науглецювання відновленого заліза газом CO у відновних печах можливе при температурах 950-1150°C або близьких до них (у тому числі й за рахунок сажистого вуглецю, що утворюється при температурах, значення яких є нижчими за значення рівноважної температури для хімічної реакції Белла-Будуара), підтверджуючи загальновідомий висновок про те, що науглецювання відновленого заліза до стану чавуну у металургійних печах відбувається виключно за рахунок твердого вуглецю.

Проведений термодинамічний аналіз умов перебігу хімічних реакцій науглецювання відновленого заліза газом CO буде сприяти правильному розумінню процесу прямого відновлення заліза (газом CO і твердим вуглецем коксу або вугілля) з подальшим його науглецюванням у металургійних відновних печах з метою створення істинної фізико-хімічної моделі цього процесу. Це необхідно також для подальшого теоретичного обґрунтування та промислової розробки іновативних технологій одностадійного отримання безпосередньо із залізовмісної сировини рідкої сталі замість рідкого чавуну (або його гранульованого аналога), тобто виключивши (як це здійснювалося у давнину в різних конструкціях сиродутних горнів) проміжну стадію отримання чавуну, що в сучасних відновних печах не вдається здійснити до сьогодення, незважаючи на існування у світовому металургійному виробництві різноманітних технологій прямого відновлення заліза.

Перелік використаних джерел:

1. Ефименко Г. Г., Гиммельфарб А. А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. Київ : Вища школа, 1974. 288 с.
2. Morita K., Sano N. Phase diagrams, phase transformations, and the prediction of metal properties. *Fundamentals of Metallurgy: Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. 2005. Pp. 82-108. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845690946.1.82>.
3. Літовченко П. І., Іванова Л. П. Технологія конструкційних матеріалів: навч. посіб. Харків : НА НГУ, 2016. 306 с.
4. Поляков О. І., Гасик М. І. Електрометалургія феросплавів, спеціальних сталей і сплавів. Дніпропетровськ : Журфонд, 2009. 116 с.
5. Демченко М. Т., Харченко В. В. Системи технологій промисловості: стислий конспект лекцій. Донецьк : ДонДУУ, 2011. 91 с.
6. Study of iron carburization in CO-based gas mixtures. URL: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/6980 (дата звернення: 07.10.2024 р.).
7. Смирнов В. О., Білецький В. С. Фізичні та хімічні основи виробництва. Донецьк : Східний видавничий дім, 2005. 148 с.
8. Мовчан В. П., Бережний М. М. Основи металургії. Дніпропетровськ : Пороги, 2001. 336 с.
9. Доменний процес / В. М. Ковшов та ін. Дніпропетровськ : Інститут Технології, 1998. 212 с.
10. Peasey J. G., Davenport W. G. The Iron Blast Furnace: Theory and Practice. Pergamon of Canada, Ontario, 1979. 266 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-023218-8.50005-4>.
11. Селегей А. М., Іващенко В. П., Безшкурченко О.Г. Аналіз сучасних теоретичних та технологічних методів і обладнання та перспектив розвитку завантаження доменних печей. *Теорія і практика металургії*. 2022. № 4(135). С. 30-45. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2022.05>.
12. Geerdes M., Toxopeus H., van der Vliet C. Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction.

- Amsterdam: IOS Press, 2009. 164 p. DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-040-7-i>.
13. Ковшов В. Н., Петренко В. А., Верещак В. И. Моделирование доменного процесса. Днепропетровск : Институт технологии, 1997. 109 с.
 14. Пантейков С. П. О температурах протекания реакций восстановления железа из гематита газом CO с позиций термодинамики. *Trends of development modern science and practice* : Abstracts of the IX-th International Scientific and Practical Conference, Stockholm, Sweden, 16-19 November 2021. Pp. 568-574.
 15. Пантейков С. П. О влиянии степени химического сродства веществ к кислороду на возможность протекания реакций восстановления железа из гематита газом CO. *Science foundations of modern science and practice* : Abstracts of the the X-th International Scientific and Practical Conference, Athens, Greece, 23-26 November, 2021. Pp. 640-648.
 16. Пантейков С. П. Определение температур протекания реакций восстановления железа из гематита газом CO и газификации твёрдого углерода по стандартным значениям энтальпии и энтропии. *Modern aspects of science and practice* : Abstracts of the XI-th International Scientific and Practical Conference, Melbourne, Australia, 30 November – 03 December 2021. Pp. 558-564.
 17. Пантейков С. П. Определение температур протекания реакций восстановления железа из гематита газом CO и газификации твёрдого углерода по степени химического сродства веществ к кислороду. *Perspectives of development of science and practice* : Abstracts of the XIII-th International Scientific and Practical Conference, Prague, Czech Republic, 14-17 December 2021. Pp. 601-610.
 18. Пантейков С. П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом CO і газифікації твердого вуглецю за існуючими формулами і за стандартними значеннями ентальпії та ентропії речовин. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (Технічні науки)*. Кам'янське: ДДТУ, 2021. Том 2(39). С. 16-26. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.2>.
 19. Пантейков С. П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом CO і газифікації твердого вуглецю за мірами хімічної спорідненості речовин до кисню. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2022. Vol. 1(2). Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220102.1>.
 20. Лобурець А. Т. Навчальний посібник «Хімічна термодинаміка» для студентів підготовки бакалавра спеціальності 144 «Теплоенергетика» всіх форм навчання. Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2016. 85 с.
 21. Цветкова Л. Б. Фізична хімія: теорія і задачі: навч. посібник. Львів : Магнолія, 2008. 415 с.
 22. Солдаткіна Л. М. Хімічна термодинаміка в схемах, таблицях, формулах, рисунках. Одеса: «Одеський національний університет», 2012. 101 с.
 23. Лебідь В. І. Фізична хімія. Харків: Фоліо, 2005. 478 с.
 24. Using Ellingham diagram, how to determine that in between C and CO which is better reducing agent? URL: <https://socratic.org/questions/using-ellingham-diagram-how-to-determine-that-in-between-c-and-co-which-is-bette> (дата звернення: 07.10.2024 р.).
 25. Стовба Я. В., Перескока В. В., Камкина Л. В. Оценка возможности использования железо- и марганецсодержащих отходов для получения углеродистого ферромарганца. *Сотрудничество для решения проблемы отходов* : Материалы VI Международной конференции, г. Харьков, 8-9 апреля 2009 г. Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. С. 72-73.

References:

1. Н.Н. Yefymenko, A.A. Hymmelfarb, and V.E. Levchenko, *Metallurhyia chuhuna* [Cast iron metallurgy]. Kyiv, Ukraine: Vyshcha shkola Publ., 1974. (Rus.)
2. K. Morita, and N. Sano, «3-Phase diagrams, phase transformations, and the prediction of metal properties», *Fundamentals of Metallurgy: Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*, pp. 82-108, 2005. doi: 10.1533/9781845690946.1.82. (Eng.)
3. P.I. Litovchenko, and L.P. Ivanova, *Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv: navch. posib.* [Technology of structural materials: textbook]. Kharkiv, Ukraine: NA NHU Publ., 306 p., 2016. (Ukr.)
4. O.I. Poliakov, and M.I. Hasyk, *Elektrometalurhiia ferosplaviv, spetsialnykh stalei i splaviv* [Electrometallurgy of ferroalloys, special steels and alloys]. Dnipropetrovsk, Ukraine: Zhurfond Publ.,

2009. (Ukr.)
5. M.T. Demchenko, and V.V. Kharchenko, *Systemy tekhnolohii promyslovosti: styslyi konspekt lektsii* [Industrial Technology Systems: Lecture Notes]. Donetsk, Ukraine: DonDUU Publ., 2011. (Ukr.)
 6. Study of iron carburization in CO-based gas mixtures. [Online]. Available: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/6980. Accessed on: October 07, 2024. (Eng.)
 7. V.O. Smirnov, and V.S. Biletskii, *Fizichni ta khimichni osnovi virobnitstva* [Physical and chemical principles of production]. Donetsk, Ukraine: Skhidnii vidavnychii dim Publ., 2005. (Ukr.)
 8. V.P. Movchan, and M.M. Berezhnyi, *Osnovi metalurgii* [Fundamentals of metallurgy]. Dnipropetrovsk, Ukraine: Porogi Publ., 2001. (Ukr.)
 9. V.M. Kovshov et al., *Domennyi protses* [Blast furnace proces]. Dnipropetrovsk, Ukraine: Instytut Tekhnolohii Publ., 1998. (Ukr.)
 10. J.G. Peacey, and W.G. Davenport, *The Iron Blast Furnace Theory and Practice*. Pergamon of Canada, Ontario, 1979. doi: 10.1016/B978-0-08-023218-8.50005-4. (Eng.)
 11. A.M. Selehei, V.P. Ivashchenko, and O.H. Bezshkurenko, «Analiz suchasnykh teoretychnykh ta tekhnolohichnykh metodiv i obladnannia ta perspektyv rozvytku zavantazhennia domennykh pechei» [«Analysis of modern theoretical and technological methods and equipment and prospects for the development of blast furnace loading»], *Teoriia i praktyka metalurhii – The Theory and Practice of Metallurgy*, № 4(135), pp. 30-45, 2022. doi: 10.34185/tpm.4.2022.05. (Ukr.)
 12. M. Geerdes, H. Toxopeus, and C. van der Vliet, *Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction*. Amsterdam, Netherland: IOS Press Publ., 2009. doi: 10.3233/978-1-60750-040-7-i. (Eng.)
 13. V.N. Kovshov, V.A. Petrenko, and V.I. Vereshchak, *Modelirovanie domennogo protsessa* [Modeling of the blast furnace process]. Dnepropetrovsk, Ukraine: Institut tekhnologii, 1997. (Rus.)
 14. S.P. Panteikov, «O temperaturakh protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytu hazom CO s pozytsyi termodinamyky» [«On the temperatures of the reaction of reduction of iron from hematite by CO gas from the point of view of thermodynamics»], in Proc. IX-th Int. Scient. and Pract. Conf. «Trends of development modern science and practice», Stockholm, Sweden, 2021, pp. 568-574. (Rus.)
 15. S.P. Panteikov, «O vliyaniy stepeny khymicheskoho srodstva veshchestv k kyslorodu na vozmozhnost protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytu hazom CO» [«On the influence of the degree of chemical affinity of substances for oxygen on the possibility of reactions of reduction of iron from hematite by CO gas»], in Proc. X-th Int. Scient. and Pract. Conf. «Science foundations of modern science and practice», Athens, Greece, 2021, pp. 640-648. (Rus.)
 16. S.P. Panteikov, «Opredelenye temperatur protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytu hazom CO y hazyfykatsyy tvordogo uhleroda po standartnym znacheniyam entalpiy y entropyy» [«Determination of reaction temperatures for the reduction of iron from hematite by CO gas and gasification of solid carbon using standard enthalpy and entropy values»], in Proc. XI-th Int. Scient. and Pract. Conf. «Modern aspects of science and practice», Melbourne, Australia, 2021, pp. 558-564. (Rus.)
 17. S.P. Panteikov, «Opredelenye temperatur protekaniya reaktsyi vosstanovleniya zheleza yz hematytu hazom CO y hazyfykatsyy tvordogo uhleroda po stepeny khymicheskoho srodstva veshchestv k kyslorodu» [«Determination of reaction temperatures for the reduction of iron from hematite by CO gas and gasification of solid carbon based on the degree of chemical affinity of substances for oxygen»], in Proc. XIII-th Int. Scient. and Pract. Conf. «Perspectives of development of science and practice», Prague, Czech Republic, 2021, pp. 601-610. (Rus.)
 18. S.P. Panteikov, «Rozrakhunok temperatur perebihu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu za isnuichymy formulamy i za standartnymi znacheniyamy entalpii ta entropii rehovyn» [«Calculation of the temperatures of chemical reactions of the process of stepwise reduction of iron from hematite by CO gas and gasification of solid carbon using existing formulas and standard values of enthalpy and entropy of substances»], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (Tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, vol. 2(39), pp. 16-26, 2021. doi: 10.31319/2519-2884.39.2021.2. (Ukr.)
 19. S.P. Panteikov, «Rozrakhunok temperatur perebihu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho

- vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu za miramy khimichnoi sporidnenosti rechovyn do kysniu» [«Calculation of the temperatures of chemical reactions of the process of stepwise reduction of iron from hematite by CO gas and gasification of solid carbon based on measures of the chemical affinity of substances to oxygen»], *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, vol. 1(2), pp. 1-8, 2022. doi: 10.46299/j.isjea.20220102.1. (Ukr.).
20. A.T. Loburets, *Navchalnyi posibnik «Khimichna termodinamika» dlya studentiv pidgotovki bakalavra spetsialnosti 144 «Teploenergetika» vsikh form navchannya* [Textbook «Chemical Thermodynamics» for students of Bachelor's degree in specialty 144 "Heat Power Engineering" of all forms of study]. Poltava, Ukraine: PNTU im. Yu. Kondratyuka Publ., 2016. (Ukr.)
21. L.B. Tsvetkova, *Fizychna khimiia: teoriia i zadachi: navch. posibnyk* [Physical chemistry: theory and tasks: textbook]. Lviv, Ukraine: Mahnoliia Publ., 2008. (Ukr.)
22. L.M. Soldatkina, *Khimichna termodinamika v skhemakh, tablytsiakh, formulakh, rysunkakh* [Chemical thermodynamics in diagrams, tables, formulas, figures]. Odesa, Ukraine: Odeskyi natsionalnyi universytet Publ., 2012. (Ukr.)
23. V.I. Lebid, *Fizychna khimiia* [Physical chemistry]. Kharkiv, Ukraine: Folio Publ., 2005. (Ukr.)
24. Using Ellingham diagram, how to determine that in between C and CO which is better reducing agent? [Online]. Available: <https://socratic.org/questions/using-ellingham-diagram-how-to-determine-that-in-between-c-and-co-which-is-better>. Accessed on: October 03, 2024. (Eng.)
25. Ya.V. Stovba, V.V. Pereskoka, and L.V. Kamkina, «Ocenka vozmozhnosti ispolzovaniya zhelezo- i marganecsoderzhashih othodov dlya polucheniya uglerodistogo ferromarganca» [«Evaluation of the possibility of using iron- and manganese-containing waste to obtain carbonaceous ferromanganese»], in Proc. VI-th Int. Conf. «Cooperation to Solve the Waste Problem», Kharkov, Ukraine, 2009, pp. 72-73. (Rus.)

Стаття надійшла 02.11.2024

Стаття прийнята 23.11.2024

УДК 621.74.002: 669.001.2

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321259

© Дан Л.О.¹, Трофімова Л.О.², Павленко П.В.³

ЩОДО ОДНОГО З ШЛЯХІВ ЕКОНОМІЇ МЕТАЛУ ПРИ ВІДЛИВАННІ СТАЛЕВИХ ЗЛИВКІВ

Дана стаття присвячена аналізу шляхів зменшення витрат металу при відливанні сталевих зливок. Наведені чинники, що стосуються необхідності використання додаткового об'єму металу в верхній частині зливку та кількісні дані стосовно витрат металу на додатки. Проаналізовано тепловий баланс додатку, що твердне, та зроблено висновки щодо необхідності утримання додатку в рідкому стані як можна довше. На підставі літературних даних вказано на два шляхи можливого поліпшення теплової роботи додатків, за рахунок чого може бути зменшений їх об'єм. Перший – максимально ефективно використовувати тепло, що містить в собі рідкий метал додатку. Другий – збільшення тепловмісту розплаву в додатку за рахунок зовнішніх джерел. Розглянуті способи внесення тепла до металу додатку: електродуговий, індукційний, газокисневий, електрошлаковий та інші. Обґрунтовано проведення експериментів по відливанню сталевих зливок зі зменшеною додатковою частиною в

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, ORCID: 0000-0002-1954-4871, danleonid.alex@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, ORCID: 0000-0003-4576-2589, trofimova.pstu@gmail.com

³ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, pasha107107@gmail.com