

Дослідження структурно-фазових перетворень, що відбуваються при ресурсозберігаючій технології переробки металургійних відходів

**А. С. Петрищев, М. В. Брагінець, В. В. Борисов, В. В. Братішко,
О. М. Торубара, Б. М. Цимбал, С. В. Борисова, С. М. Лупінович,
А. М. Поляков, В. Ф. Кузьменко**

Досліджено фізико-хімічні властивості легуючого сплаву, отриманого відновлювальною плавкою. Це необхідно для визначення параметрів, що знижують втрати Ni та Cr при переробці оксидної легованої сировини та використанні отриманої легуючої добавки. Визначено, що в сплаві при Si:C в шихті 0,14–0,50 ($O:C=1,78$) присутні фази: твердий розчин C та легуючих елементів в γ -Fe та Fe_3Si . При Si:C=0,14 переважає твердий розчин C та легуючих елементів в γ -Fe при слабкому прояві Fe_3Si . Поетапна зміна Si:C в шихті на 0,26, 0,38 та 0,50 дала підвищення прояву Fe_3Si . Мікроструктура сплаву при різному Si:C в шихті мала чіткий прояв декількох фаз, з різним вмістом основних легуючих елементів. Вміст Ni – 2,97–14,10 % мас., Cr – 0,91–17,91 % мас. З підвищенням Si:C в шихті з 0,14 до 0,50 спостерігалось підвищення вмісту Si з 0,04 % мас. до 0,55 % мас. Вуглець в досліджених локальних ділянках поверхні сплаву, що підлягали рентгенівському мікроаналізу, мав значення від 0,51 до 1,48 % мас. Локальні ділянки мікроструктури з підвищеним Mo (до 9,10 % мас.), Si та C вказують на можливість присутності Mo у вигляді силіцидів або карбосиліцидів. З отриманих результатів дослідження витікає, що найбільш прийнятним Si:C в шихті є 0,26 (при $O:C=1,78$). В цьому випадку забезпечується відновлення з переважанням у фазовому складі твердого розчину C та легуючих елементів в γ -Fe та проявом залишкового Si у вигляді силіцидів. Тобто визначено показники отримання сплаву з відносно низьким вмістом Si та C, але достатнім для забезпечення необхідної відновної та розкиснюючої здатності сплаву. Це розширює можливості ресурсозбереження з використанням отриманого сплаву з заміною деякої частини стандартних легуючих матеріалів при виплавці обмежених по вуглецю та кремнію марок сталей

Ключові слова: окалина корозійностійких сталей, леговані техногенні відходи, відновна плавка, рентгенофазові дослідження

1. Вступ

Наряду із сучасними технологіями одержання тугоплавких легуючих добавок на основі рудних концентратів [1], одним із альтернативних джерел є переробка та повернення у виробництво легованих техногенних відходів. До них належать окалина хром-нікельвмісних корозійностійких сталей. Специфічна особливість цього виду відходів полягає у дисперсності та відносно високому ступені легованості. Це обумовлює необхідність врахування складного характеру фізико-хімічної взаємодії елементів при розробці технологічних умов пе-

перобки. Таким чином, актуальність роботи визначена сучасним рівнем використання легуючих елементів і якістю, що пов'язане з конкурентоспроможністю металопродукції на світовому ринку.

Отже актуальною є проблема ресурсо- та енергозбереження із зниженням втрат Cr та Ni при переробці дрібнодисперсних відходів корозійностійких сталей у металургійному виробництві. Стратегічним напрямком у вирішенні цієї проблеми є розвиток уявлень щодо фізико-хімічних перетворень під час відновної плавки оксидних відходів виробництва корозійностійких сталей.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

За даними роботи [2], після вуглецевотермії залізної окалини разом із Fe в продуктах відновлення було виявлено Fe_3C та C. Схожі результати було виявлено авторами роботи [3] при вуглецевотермічному відновленні окалини хром-нікельвмісної сталі. Згідно результатів фазового аналізу, легуючі елементи були присутні не у вигляді окремих з'єднань, а в якості твердого розчину в фазі Fe. Тобто присутність легуючих елементів у продуктах вуглецевотермічного відновлення окалини більшою мірою проявляється оксидним комплексом з атомами заліза. Це слід враховувати в подальших дослідженнях відновлення та переробки техногенної сировини. Але є необхідність поглиблення уявлень щодо фізико-хімічних закономірностей взаємодії легованої техногенної сировини з відновником.

Авторами роботи [4] виконане дослідження відновних реакцій за участю оксидів та вуглецю в системі Fe–Ni–O при температурах до 1373 К. З підвищенням температури обробки продукти відновлення проявлялися в наступній послідовності: $Fe_3O_4 + NiO \rightarrow Fe_3O_4 + Ni \rightarrow FeO + Fe_xNi_y \rightarrow Fe_xNi_y + Fe (Fe_nC_m)$. Тобто спостерігалася відносно більша схильність до відновлення оксиду Ni ніж оксидів Fe. На окремих етапах простежувалося утворення металевих Ni і Fe. Зазначено можливість присутності карбідів Fe та залізо-нікельвмісної фази Fe_xNi_y , що також можуть проявитися при відновленні оксидних легованих відходів. Але немає можливості прослідкувати протікання перетворень за участю хромвмісної оксидної складової, яка може бути присутня в окаліні корозійностійких сталей.

Відновлення оксидів $FeO \cdot Cr_2O_3$ при різних співвідношеннях C:Fe та температурах від 1373 К до 1523 К було досліджено авторами роботи [5]. Визначено, що з підвищенням C:Fe з 0,8 до 1,4 ступінь вилучення (%) Cr збільшився від 9,6 до 74,3 відповідно. Підвищення температури до 1523 К призводило до збільшення утворення карбідів, деякий залишок яких неминуче присутній в продуктах вуглецевотермічного відновлення [6]. При C:Fe нижче за 0,8 спостерігалася значне зменшення ступеня вилучення Cr та зниження карбідоутворення. Утворені карбіди Cr розчинялися у фазі Fe [5]. Утворення карбідів Cr також було виявлено авторами роботи [7] при відновленні хромової руди. Було досягнуто заданого рівня відновлення з утворенням Cr_3C_2 та Cr_7C_3 після вуглецевотермії при 1273 К та O:C в межах 1,05–1,15. Тобто виходить, що для досягнення збільшення ступеня вилучення Cr при відновленні у складі шихти необхідний деякий надлишок вуглецю відносно кисню. В роботах [8, 9] наведено дослідження відновлення вуглецем Cr_2O_3 в діапазоні 1273–1773 К. Було виявлено протікання паралельного відновлення та утворення карбідів Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, при цьому встановлено можливість отри-

мання залізохромистих лігатур з обмеженим вмістом вуглецю. Тобто є можливість отримання продуктів вуглецевотермічного відновлення з відносно низьким залишком вуглецю, що свідчить про розширені сфери використання, в тому числі легування корозійностійких сталей. Але немає можливості прослідкувати закономірності відновлення комплексу оксидів Cr та Ni.

Авторами роботи [10] наведено дослідження впливу O:C в шихті на властивості сплаву отриманого з відходів хром-нікельвмісних корозійностійких сталей. Зазначено, що найбільш прийнятним O:C в шихті є 1,78, що слід враховувати у дослідженнях при виборі технологічних параметрів. Було забезпечено переважання у фазовому складі твердого розчину C та легуючих елементів в γ -Fe з відносно слабким проявом залишкового вуглецю у вигляді карбідної складової. Але не було досліджено впливу додавання кремнієвого відновника в шихту на фазовий склад та структуру сплаву.

Автори роботи [11] дослідили фазоутворення в системі Fe–Ni–Si. Визначено, що фази FeSi та Fe₃Si мають відносно високі значення розчинності для Ni, на відміну від фази FeSi₂. Утворення силіциду Fe₃Si було виявлено в системі Fe–Cr–C–Si авторами роботи [12] в нанесеному покритті із сплаву марки 45Fe39Cr6C10Si. З результатів робіт [11, 12] випливає, що відновлення оксидних відходів корозійностійких сталей з використанням Si може супроводжуватися утворенням силіцидів заліза з розчиненими легуючими елементами. Але з джерел [11, 12] не має можливості прослідкувати особливості фазового складу продуктів відновлення при різному вмісті C та Si в досліджуваних системах.

Автори роботи [13] експериментально підтвердили існування в системі Ni–Cr–Si при 1273 K та 1373 K потрібних з'єднань Cr₁₃Ni₅Si₂, Cr₃Ni₅Si₂, Cr₂Ni₂Si та Cr₃Ni₃Si₄. Бінарні фази Ni₃₁Si₁₂, Ni₂Si та CrSi проявляли значну розчинність третього елемента. Автори роботи [14] експериментально дослідили відновлення хромової руди частками Si та SiC в діапазоні температур 1389–1661 K. Виявлено утворення часток металу з компонентами Fe, Cr та Si та визначено необхідність температур вище за 1473 K для відновлення хромової руди. В роботі [15] описується закономірність підвищення ступеня відновлення Cr з рудної сировини в температурному інтервалі 1573–2473 K з 42,7 % до 95,1 %. Це досягається підвищенням вмісту відновника (феросиліконікель складу, % мас: Fe – 28, Si – 65; Ni – 7) з 50 % до 105 % від необхідної стехіометричної кількості. Тобто під час відновлення окалини корозійностійких сталей не виключена можливість взаємодії легуючих елементів з Si та утворення складних потрібних та подвійних з'єднань. А відносно високе відновлення хромвмісної складової окалини корозійностійкої сталі може бути забезпечено інтенсифікацією теплового режиму та деяким надлишком відновника щодо стехіометрії. Але не має можливості прослідкувати послідовність змін у фазовому складі та структурі продуктів відновлення при регулюванні вмісту Si у вихідних продуктах.

Слід відзначити наявність вагомих результатів вивчення вуглецевотермічного відновлення окалини вуглецевих [2] та легуваних сталей [3]. Також суттєвими є результати роботи [10] із дослідженням впливу O:C в шихті на фізико-хімічні властивості продуктів відновлення. Але при цьому немає достатньої інформації про взаємодію окалини з Si в якості відновника. Дослідження вуглецевотермії оксидів

в системах Fe–Ni–O–C [4] та Fe–Cr–O–C [5] розширюють уявлення щодо відновлення оксидних відходів корозійностійких сталей. При цьому достатньо значимими є результати роботи [7] з підтвердженням процесів утворення Cr₃C₂ та Cr₇C₃. Разом з цим може утворюватися Cr₂₃C₆ [8] з можливістю отримання залізохромистих лігатур з обмеженим вмістом вуглецю [9]. Але питання впливу факторів відновлення на фазову та структурну складову цільових продуктів розкрито недостатньо. Представлено вагомні результати дослідження існування фаз в системах Fe–Ni–Si [11], Fe–Cr–C–Si [12] та системі Ni–Cr–Si [13]. Також значимими є результати досліджень протікання відновлення в системах Cr–Fe–O–C–Si [14] та Ni–Cr–Fe–O–C–Si [15]. Але не показано вплив зміни Si:C в шихті на фазовий склад та мікроструктуру продуктів відновлення. Дослідження в цьому напрямку можуть забезпечити зменшення втрат Cr та Ni сублімацією оксидних з'єднань під час отримання та використання відновленого легуючого матеріалу.

Отже доцільним є дослідження закономірностей впливу параметрів співвідношення Si та C в шихті на фазовий склад та мікроструктуру ресурсозберігаючого легуючого сплаву, отриманого відновною плавкою. Це дасть змогу визначити характер присутності елементів в сплаві. Разом з цим використання рентгенівського мікроаналізу окремих включень та фаз забезпечить розширення уявлення щодо розподілу легуючих елементів в отриманому сплаві.

3. Ціль та задачі дослідження

Мета роботи полягала в дослідженні фізико-хімічних особливостей хром-нікельвмісних відходів виробництва корозійностійких сталей та легуючого сплаву, отриманого за допомогою відновлювальної плавки. Це необхідно для визначення параметрів, що знижують втрати Ni та Cr сублімацією при переробці оксидної легуючої сировини та використанні отриманої легуючої добавки.

Для досягнення заданої мети були поставлені такі завдання:

- визначити особливості фазового складу легуючого сплаву на основі техногенних відходів корозійностійких сталей з різним співвідношенням Si:C в шихті щодо характеру присутності елементів;
- дослідити мікроструктуру та хімічний склад окремих фаз і включень ресурсозберігаючого хром-нікельвмісного легуючого сплаву з різним співвідношенням Si:C в шихті.

4. Матеріали і методи дослідження властивостей техногенної сировини та отриманого сплаву

4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

Вихідна сировина – суміш окалини хром-нікельвмісних корозійностійких сталей типу 18-10, що утворилася на переділах металургійного виробництва. Відновник – вуглецевий, у вигляді ультрадисперсного пилу від вуглеграфітного виробництва (частка вуглецю – 98 % мас.), додавання якого забезпечувало співвідношення O:C в шихті на рівні 1,78. Зміна кількості кремнію в сплаві забезпечувалася додаванням в шихту феросиліцію марки ФС-65 з регулюванням співвідношення Si:C в шихті в межах 0,14–0,50. Для інтенсифікації прогріву

шихти і процесів відновлення додавали стружку шліфування сталі 08X17H5M3. Зразки для досліджень виплавляли в печі непрямого нагрівання з вугільною футеровкою в алундових тиглях. Температура виплавки – 1873–1913 К. Після виплавки алундові тиглі разом зі сплавом виймалися із печі та охолоджувалися при температурі навколишнього повітря.

Рентгенофазовий аналіз зразків проводили на дифрактометрі "ДРОН-6" (Росія).

Фотографії мікроструктури та хімічного складу окремих ділянок поверхні зразків отримували на растровому електронному мікроскопі "JSM 6360LA", обладнаного системою рентгенівського мікроаналізу "JED 2200", виробництва фірми JEOL (Японія).

4. 2. Методика проведення дослідів та визначення показників властивостей зразків

Фазовий склад зразків визначали методом рентгенофазового аналізу з використанням монохроматичного випромінювання Cu K_α ($\lambda=1,54051 \text{ \AA}$) із Ni фільтром. Вимірювання виконувались при напрузі на трубці $U=40 \text{ кВ}$ та анодному струмі $I=20 \text{ мА}$. Склад фаз визначали за допомогою комплексу програм PDWin 2.0 (Росія).

Дослідження мікроструктури зразків виконували при прискорювальній напрузі 15 кВ і діаметрі електронного зонду 4 нм . Визначення складу фаз виконували безеталоним методом розрахунку фундаментальних параметрів.

5. Результати досліджень властивостей вихідної техногенної сировини та отриманого легуючого сплаву

5. 1. Визначення особливостей фазового складу сплаву з різним Si:C в шихті

Фазовий склад сплаву із Si:C в шихті 0,14 складався в основному з твердого розчину C та легуючих елементів в $\gamma\text{-Fe}$ з проявом Fe_3Si відносно невисокої інтенсивності (рис. 1, а). При Si:C в шихті 0,26 спостерігалось деяке підвищення прояву Fe_3Si по відношенню до твердого розчину C та легуючих елементів в $\gamma\text{-Fe}$. Співвідношення Si:C в шихті 0,38 та 0,50 призводило до зниження прояву твердого розчину C та легуючих елементів в $\gamma\text{-Fe}$ та підвищення інтенсивності дифракційних максимумів Fe_3Si . Карбід Fe_3C на всьому дослідженому діапазоні Si:C проявлявся фрагментарно з відносно невисокою інтенсивністю дифракційних максимумів, що наближалася до рівня фону.

Мікроструктура дослідженого сплаву складалася із декількох фаз (рис. 1, б–г) із різною формою та розміром часток. Виявлено фази із відносно високим вмістом Cr до 17,91 % мас. (рис. 1, 2, табл. 1) та Ni – до 14,2 % мас. Досліджені ділянки складу зразків 6 та 10 мають підвищений вміст Mo 4,49 % мас. та 9,10 % мас. відповідно. Si та C в зазначених ділянках також мали відносно високі рівні масового вмісту. З підвищенням Si:C в шихті з 0,14 до 0,50 спостерігалось підвищення вмісту Si в досліджених ділянках сплаву з 0,04 % мас. до 0,55 % мас. Вуглець в досліджених локальних ділянках поверхні сплаву, що підлягали рентгенівському мікроаналізу, мав значення від 0,51 до 1,48 % мас., що наведено в табл. 1.

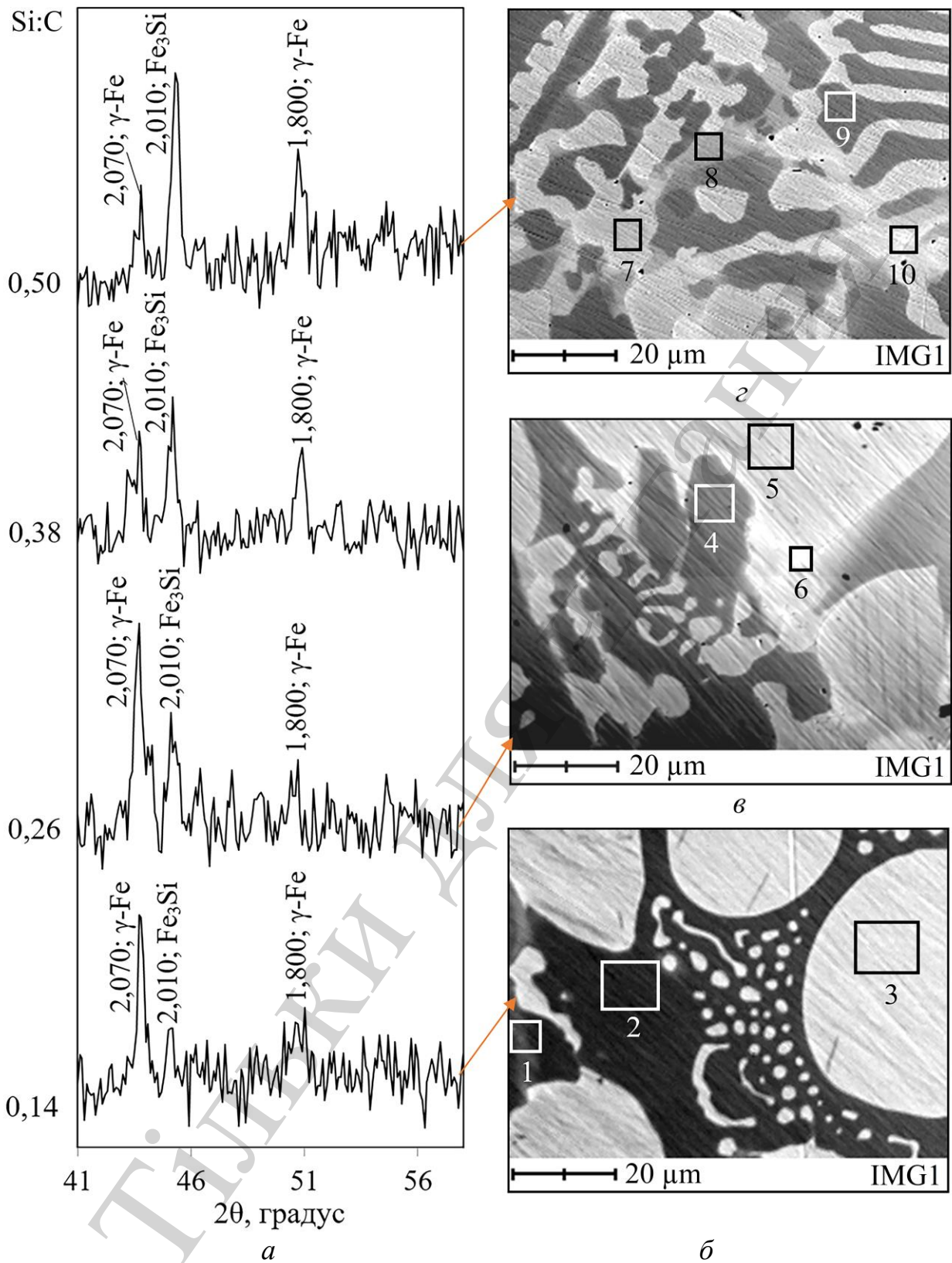


Рис. 1. Рентгенофазові дослідження легуючого сплаву з різним співвідношенні Si:C в шихті при O:C=1,78 та відповідні фотографії мікроструктури із збільшенням $\times 1500$: *a* – ділянки дифрактограм; *б* – 0,14, *в* – 0,26, *г* – 0,50, 1–10 – ділянки рентгенівського мікροаналізу зразків

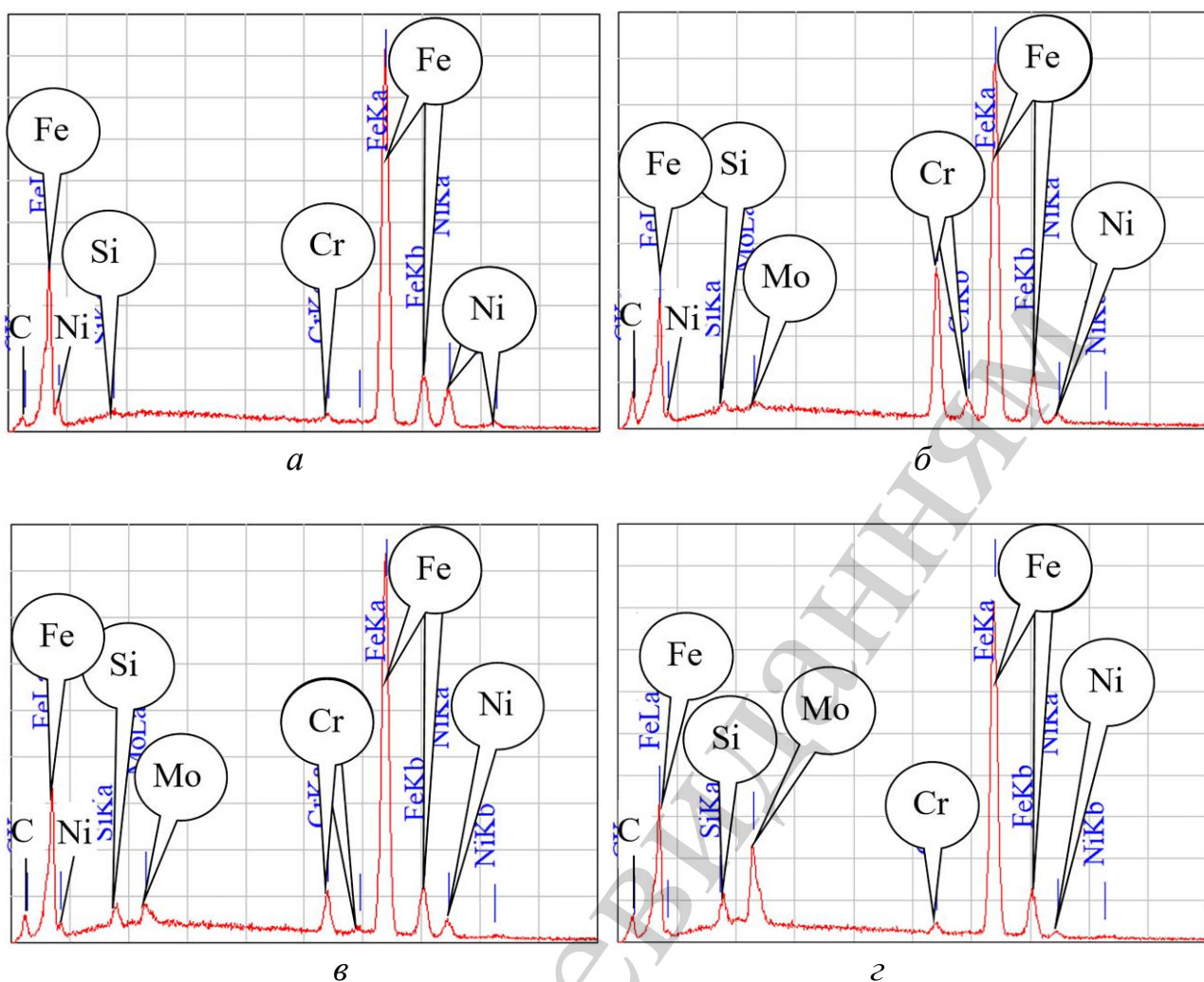


Рис. 2. Спектрограми деяких із досліджених ділянок рентгенівського мікроаналізу зразків відповідно рис. 1: а – 3, б – 4, в – 8, г – 10

Таблиця 1

Результати рентгенівського мікроаналізу легуючого сплаву відповідно рис. 1

Ділянки дослідження складу зразків		Вміст елементів, % мас.						Сумарний вміст
		C	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	
1	Усереднене значення	1,09	0,04	8,73	85,83	3,91	0,40	100
2								
3		0,51	0,06	0,91	84,42	14,10	0,00	100
4		1,48	0,16	17,91	77,06	2,97	0,42	100
5	Усереднене значення	1,15	0,21	1,84	83,55	11,00	2,25	100
6								
7		1,05	0,34	1,65	86,21	9,96	0,79	100
8		1,06	0,31	4,74	87,08	5,90	0,91	100
9		1,29	0,30	6,34	86,11	5,48	0,48	100
10		1,23	0,55	1,21	85,64	2,27	9,10	100

На отриманих шліфах чітко прослідковувався прояв декількох фаз (рис. 1, б). При С:Si в шихті 0,14 на представленому шліфі видно фазові утворення округлої форми. В такій фазі переважав вміст Ni (14,10, % мас.) по відношенню до Cr (0,91, % мас.), табл. 1, ділянка 3. Схожа картина спостерігалася при поетапному підвищенні С:Si в шихті до 0,26 та 0,50 (рис. 1, в, з). При цьому ділянки вказаної фази приймали неправильну форму, деякі включення формувалися більш витягнутими. В фазі зберігалася переважання Ni по відношенню до Cr (табл. 1, ділянки 5, 7). Наряду з цим на всьому проміжку досліджених С:Si в шихті прослідковувалася фаза із більш високим вмістом Cr (табл. 1, ділянки 1, 2, 4, 9). Вказані фази можуть бути твердим розчином вуглецю та легуючих елементів в γ -Fe. Силіцидна складова, напевне, мала локальний характер. Досліджена ділянка 10, табл. 1, вказує на наявність локальних включень із відносно високим вмістом С (1,23 % мас.), Si (0,55 % мас.) та Мо (9,10 % мас.). Такі локальні включення, напевне, можуть бути карбідними, силіцидними або карбосиліцидними фазами.

Визначення концентрації елементів на дослідженій ділянці поверхні зразка (рис. 3) вказують на чіткий розподіл між фазами з підвищеним вмістом Cr та Ni.

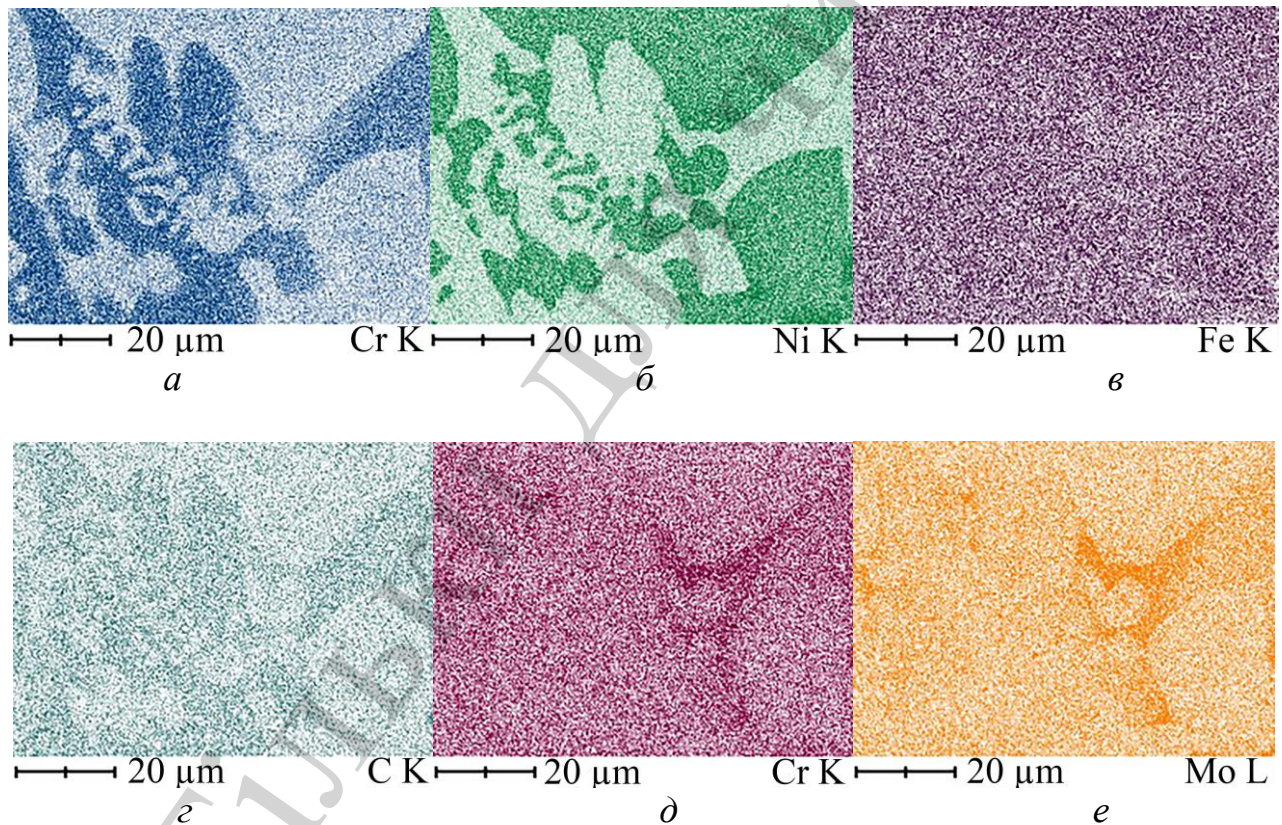


Рис. 3. Результати рентгенівського мікроаналізу в режимі розподілу елементів у характеристичних рентгенівських променях відповідно рис. 1, в (збільшення $\times 1500$). Більшому вмісту елементу відповідає більш інтенсивне забарвлення: *a* – Cr, *б* – Ni, *в* – Fe, *з* – C, *д* – Si, *е* – Mo

Вміст Fe відносно рівномірний по всій дослідженій ділянці, а вуглець дещо інтенсивніше проявлявся в фазі з підвищеною концентрацією Cr. Виявлено локальну ділянку з відносно високим вмістом Si та Мо (рис. 3, д, е)

6. Обговорення результатів досліджень властивостей техногенної сировини та отриманого легуючого сплаву

Фазовий аналіз сплаву із різним Si:C в шихті (рис. 1) вказує, що легуючі елементи та вуглець перебували в твердому розчині в гратці γ -Fe. Деяка частина легуючих елементів може перебувати в якості атомів заміщення у з'єднанні Fe_3Si . Це добре узгоджується з результатами роботи [12], де в дослідженій системі Fe–Cr–C–Si було виявлено утворення відповідного силіциду заліза. Також є відповідність з дослідженнями роботи [11], в якій зазначалося про відносно високу розчинність Ni в фазі Fe_3Si . Разом з цим є узгодження з результатами роботи [3], де на дифрактограмі відновленого легованого продукту чіткий прояв мали лише залізовмісні з'єднання.

На перебування атомів легуючих елементів в якості твердого розчину разом з вуглецем в гратці γ -Fe та силіцидах Fe_3Si вказують результати дослідження мікроструктури та рентгенівського мікроаналізу (рис. 1, 2, табл. 1). Видно, що деякі досліджені ділянки характеризувалися відносно високим вмістом Cr та вуглецю (табл. 1). Це, напевне, може бути обумовлене локальною присутністю залізо-хромвмісних карбідів. Це узгоджується з результатами робіт [7–9], де зазначено протікання утворення хромвмісних карбідів паралельно з відновленням. Також підтверджується неможливість отримання повністю безвуглецевого продукту, що добре узгоджується з результатами робіт [2, 6]. Не виключена можливість розчинення деякої частки локально утворених карбідів в твердому розчині γ -Fe при контакті двох фаз, про що також зазначають автори роботи [5].

Виявлена на фотографіях мікроструктури фаза з відносно високим вмістом Ni (табл. 1, ділянки 3, 5, 7), напевне, є твердим розчином вуглецю та легуючих елементів в γ -Fe. Це узгоджується з роботою [4], в якій підтверджено ефективність відновлення залізо-нікелевої складової вуглецем, та [10], де після відновної плавки одержано схожий розподіл елементів між фазами.

Як видно з фотографій розподілу легуючих елементів (рис. 3), Mo, напевне, в більшій мірі присутній локально у формі силіцидів, карбідів або карбосиліцидів. Про це свідчить більш інтенсивна окраска окремих ділянок (рис. 3, *z–e*) у відповідності із рентгенівським мікроаналізом визначення хімічного складу (рис. 1, *в*, табл. 1, ділянка 6).

В одержаних зразках відсутні з'єднання та фази із відносно високою схильністю до сублимації. Тобто немає потреби створення спеціальних умов, що запобігають випаровуванню та втраті легуючих елементів з газовою фазою. Це також зумовлює підвищення ступеня використання легуючих елементів.

З отриманих результатів дослідження витікає, що найбільш прийнятним Si:C в шихті є 0,26. В цьому випадку забезпечується відновлення з переважанням у фазовому складі твердого розчину C та легуючих елементів в γ -Fe та проявом залишкового Si у вигляді силіцидної складової. Тобто визначено показники отримання продукту відновної плавки з відносно низьким вмістом Si та C, але достатнім для забезпечення необхідної відновної та розкиснюючої здатності сплаву. Це розширює можливості використання отриманого сплаву з заміною деякої частки стандартних легуючих матеріалів при виплавці марок сталей з обмеженнями в складі по вмісту кремнію та вуглецю.

В якості недоліку можна зазначити відсутність фотографій ділянок мікроструктури зразків із різним збільшенням, що підвищило б наглядність досліджень.

Розвиток даного дослідження можливий в напрямку розширення спектру класів сталей, оксидні відходи яких будуть залучатися до переробки способом відновної плавки. Найбільш перспективними є відходи з підвищеним рівнем легованості.

В дуговій печі ДСВ-40 з основною футеровкою виконано дослідно-промислові плавки корозійностійкої сталі типу 18-10. В якості легуючої добавки використано сплав на основі техногенних відходів. Легуючий сплав використовували, як часткову заміну стандартних легуючих матеріалів, в якості шихтової заготовки з витратою 270–330 кг/т сталі. Хімічний склад сплаву, % мас.: С – 0,03–0,05, Si – 0,50–1,80, Mn – 0,5–2,0, Cr – 15,0–25,0, Ni – 8,0–14,0, Ti – 0,50–1,20, Al – 0,50–1,80, Cu ≤ 0,50, S ≤ 0,025, P ≤ 0,035, Fe – залишок. Вигар легуючих елементів знизився на 3–4 % мас. При цьому було досягнуто зниження витрати Ni та Cr на 27–31 % мас. та 25–29 % мас. відповідно з використанням легуючого сплаву [10].

7. Висновки

1. Визначено, що в сплаві при Si:C в шихті в межах 0,14–0,50 (O:C=1,78) присутні фази: твердий розчин С в γ -Fe та Fe_3Si з легуючими елементами в якості атомів заміщення. При Si:C=0,14 фазовий склад переважно складався з твердого розчину С та легуючих елементів в γ -Fe при слабкому прояві Fe_3Si . Поетапна зміна Si:C в шихті на 0,26, 0,38 та 0,50 призводила до підвищення прояву Fe_3Si . Карбід Fe_3C на всьому дослідженому діапазоні Si:C проявлявся фрагментарно з відносно невисокою інтенсивністю дифракційних максимумів, що наближалася до рівня фону.

2. Визначено, що мікроструктура легуючого сплаву з різним Si:C в шихті мала чіткий прояв декількох фаз, що характеризувалися різницею у вмісті основних легуючих елементів. Вміст Ni у досліджених локальних ділянках різних фаз змінювався в межах 2,97–14,10 % мас., Cr – 0,91–17,91 % мас. З підвищенням Si:C в шихті з 0,14 до 0,50 спостерігалось підвищення вмісту Si в досліджених ділянках сплаву з 0,04 % мас. до 0,55 % мас. Вуглець в досліджених локальних ділянках поверхні сплаву, що підлягали рентгенівському мікроаналізу, мав значення від 0,51 до 1,48 % мас. Присутність Mo була в межах до 9,10 % мас. Локальні ділянки мікроструктури з підвищеним Mo, Si та С вказують на можливість присутності Mo у вигляді силіцидів, карбідів або карбосиліцидів.

Література

1. Grigor'ev, S. M., Petrishchev, A. S. (2015). Refining metallized molybdenum concentrate by means of a low-temperature plasma-forming mixture. *Steel in Translation*, 45 (12), 954–958. doi: <https://doi.org/10.3103/s0967091215120049>
2. Mechacht, S., Benchiheb, O., Serrai, S., Shalabi, M. (2013). Preparation of iron Powders by Reduction of Rolling Mill Scale. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4 (5), 1467–1472.
3. Hryhoriev, S., Petryshchev, A., Shyshkanova, G., Zaytseva, T., Frydman, O., Krupey, K. et. al. (2018). A study of environmentally friendly recycling of technogenic chromium and nickel containing waste by the method of solid phase extraction.

Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (10 (91)), 44–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121615>

4. Zhang, Y., Wei, W., Yang, X., Wei, F. (2013). Reduction of Fe and Ni in Fe-Ni-O systems. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 49 (1), 13–20. doi: <https://doi.org/10.2298/jmmb120208038z>

5. Zhao, L., Wang, L., Chen, D., Zhao, H., Liu, Y., Qi, T. (2015). Behaviors of vanadium and chromium in coal-based direct reduction of high-chromium vanadium-bearing titanomagnetite concentrates followed by magnetic separation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25 (4), 1325–1333. doi: [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(15\)63731-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(15)63731-1)

6. Ryabchikov, I. V., Belov, B. F., Mizin, V. G. (2014). Reactions of metal oxides with carbon. *Steel in Translation*, 44 (5), 368–373. doi: <https://doi.org/10.3103/s0967091214050118>

7. Hryhoriev, S., Petryshchev, A., Shyshkanova, G., Yakimtsov, Y., Zhuravel, S., Yamshinskij, M. et. al. (2017). Study into properties of the resource-saving chromium-containing briquetted alloying additive from ore raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (12 (88)), 38–43. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108191>

8. Simonov, V. K., Grishin, A. M. (2013). Thermodynamic analysis and the mechanism of the solid-phase reduction of Cr₂O₃ with carbon: Part 1. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2013 (6), 425–429. doi: <https://doi.org/10.1134/s0036029513060153>

9. Simonov, V. K., Grishin, A. M. (2013). Thermodynamic analysis and the mechanism of the solid-phase reduction of Cr₂O₃ with carbon: Part 2. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2013 (6), 430–434. doi: <https://doi.org/10.1134/s0036029513060165>

10. Petryshchev, A., Milko, D., Borysov, V., Tsymbal, B., Hevko, I., Borysova, S., Semenchuk, A. (2019). Studying the physical-chemical transformations at resource-saving reduction melting of chrome–nickel-containing metallurgical waste. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (12 (98)), 59–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160755>

11. Ackerbauer, S., Krendelsberger, N., Weitzer, F., Hiebl, K., Schuster, J. C. (2009). The constitution of the ternary system Fe–Ni–Si. *Intermetallics*, 17 (6), 414–420. doi: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2008.11.016>

12. Azimi, G., Shamanian, M. (2010). Effects of silicon content on the microstructure and corrosion behavior of Fe–Cr–C hardfacing alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 505 (2), 598–603. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.06.084>

13. Liu, X., Lin, M., Yang, S., Ruan, J., Wang, C. (2014). Experimental Investigation of Phase Equilibria in the Ni–Cr–Si Ternary System. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 35 (3), 334–342. doi: <https://doi.org/10.1007/s11669-014-0279-9>

14. Jung, W.-G., Back, G.-S., Johra, F. T., Kim, J.-H., Chang, Y.-C., Yoo, S.-J. (2018). Preliminary reduction of chromium ore using Si sludge generated in silicon wafer manufacturing process. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 54 (1), 29–37. doi: <https://doi.org/10.2298/jmmb170520054j>

15. Salina, V. A., Zhuchkov, V. I., Zayakin, O. V. (2019). Thermodynamic Simulation of the Manufacture of Fe–Si–Ni–Cr Alloys. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2019 (2), 162–164. doi: <https://doi.org/10.1134/s003602951902023x>