

## Виявлення особливостей структурно-фазових перетворень при переробці техногенних металургійних відходів з вмістом тугоплавких елементів

В. О. Волох, А. М. Поляков, М. М. Ямшинський, І. В. Лук'яненко,  
А. М. Андрєєв, Б. М. Цимбал, Г. П. Педченко, Т. С. Чорна, Т. О. Білько,  
А. І. Дзюба

Досліджено особливості фазового складу та мікроструктури легуючого сплаву, який отримано з використанням відновлювальної плавки оксидних техногенних відходів. Це необхідно для визначення технологічних показників, що забезпечують підвищення ступеня вилучення легуючих елементів під час переробки техногенної сировини та при подальшому використанні легуючого матеріалу. Визначено, що в сплаві при співвідношенні Si:C в шихті 0,11 фазовий склад переважно складався з твердого розчину елементів в  $\alpha$ -Fe, а також карбідів  $Fe_3C$  та  $Fe_3W_3C$ . При співвідношеннях Si:C в шихті 0,28 та 0,52 з разом із твердим розчином елементів в  $\alpha$ -Fe мали прояв  $Fe_8Si_2C$ ,  $Fe_5Si_3$  та  $FeSiC$ ,  $FeSi_2$  відповідно. Мікроструктура сплаву мала чіткий прояв декількох фаз з різним вмістом легуючих елементів. Зміна співвідношення Si:C в шихті з 0,11 до 0,28 та 0,52 призводила до збільшення в досліджених ділянках залишкового вмісту кремнію (% мас.) з 0,00–0,25 до 0,12–1,79 та 0,20–2,11 відповідно. При цьому вміст вуглецю (% мас.) в досліджених ділянках змінювався з 0,25–2,12 до 0,24–2,52 та 0,45–2,68 відповідно. Вміст легуючих елементів у досліджених ділянках змінювався в межах (% мас.): W – 0,00–43,06, Mo – 0,00–32,72, V – 0,19–20,72, Cr – 0,69–33,94, Co – 0,00–3,96. Аналіз результатів досліджень свідчить, що найбільш прийнятним співвідношенням Si:C в шихті є 0,52. В цьому випадку спостерігається певний вміст залишкового кремнію разом з вуглецем у вигляді карбосиліцидних та силіцидних з'єднань. Такі показники сплаву забезпечують достатню віднову здатність сплаву при використанні. Властивості сплаву дозволяють замінити частину стандартних феросплавів при виплавці сталей, що не мають жорстких обмежень за вуглецем.

Ключові слова: окалина легованих сталей, оксидні техногенні відходи, відновна плавка, рентгенофазові дослідження.

### 1. Вступ

Вилучення легуючих елементів при переробці техногенних відходів є одним із важливих джерел поповнення потреб у легуючих добавках. На практиці значні обсяги відходів не знаходять достатньо ефективних шляхів переробки. Значимість використання вторинної сировини зростає в світлі збіднення джерел сировинних ресурсів, що обумовлює підвищення цін світового ринку на легуючі матеріали [1]. Оксидні відходи виробництва швидкоріжучих сталей включають комплекс з легуючих елементів, особливості взаємодії яких необхідно враховувати при розробці технологічних показників переробки. Це обумовлює складнощі у досягненні тех-

нологічності процесу виробництва та прийнятної собівартості продукції, що є суттєвим показником для досягнення конкурентоспроможності на внутрішньому та світовому ринках. В свою чергу забезпечення конкурентоспроможності передбачає не тільки оцінку внутрішнього та зовнішнього середовищ. Необхідно також застосовувати методи визначення шляхів зміцнення існуючих та створення нових конкурентних переваг [2]. До таких конкурентних переваг належить забезпечення умов для ефективної переробки та повернення у виробництво легованих техногенних відходів, що є джерелом високовартісних елементів для виробництва сталі.

Із зазначеного виходить, що в металургійному виробництві дослідження, присвячені проблемі зменшення втрат легуючих елементів при переробці техногенних відходів, є актуальними. Для того, щоб вирішити цю проблему, необхідним є виявлення особливостей структурно-фазових перетворень, що мають місце під час переробки техногенних відходів.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Окалина від виробництва нелегованої сталі має в складі  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , що представлено авторами робіт [3]. При цьому в процесі досліджень окалини швидкоріжучої сталі в роботі [4] було знайдено окрім того  $\text{WO}_2$  і  $\text{W}_2\text{C}\cdot\text{Mo}_2\text{C}$ . Це можна пояснити відносно високою легованістю. Відновлення окалини вуглецевотермічним способом призвело до утворення фаз твердого розчину вуглецю в гратці заліза,  $\text{Fe}_3\text{C}$  та  $\text{C}$ . У випадку легованих відходів з вмістом в тому числі  $\text{Cr}$  та  $\text{Mo}$  авторами роботи [5] було отримано схожі показники з виявленням  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Це вказує, що легуючі елементи в більшій мірі перебувають у вигляді атомів заміщення в залізомісних фазах. Недоліком можна вважати відсутність результатів за участю кремнію, як розкисника, в комплексі з вуглецем. Невирішена частина проблеми пов'язана з визначенням особливостей карбідо- та силіцидоутворення при відновленні легованих відходів.

Після відновної плавки легової техногенної сировини з присутністю кремнію та вуглецю утворювалася фаза твердого розчину елементів в гратці заліза і  $\text{Fe}_3\text{Si}$ , що було показано в роботі [6]. Як відмінність, присутність  $\text{W}$  в техногенній сировині в роботі [7] мала вплив на природу вольфрамвмісних утворень в мікροструктурі продуктів відновної плавки, які, напевне, мали карбідне або силіцидне походження. В фазовому складі разом з твердим розчином елементів в  $\alpha\text{-Fe}$ , карбідами  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  мали прояв силіциди заліза  $\text{FeSi}$  та  $\text{FeSi}_2$ , а також інтерметаліди заліза та вольфраму. В роботі [8] силіцид  $\text{FeSi}$  також було виявлено в системі  $\text{Fe-Cr-C-Si}$  при вивченні покриття із сплаву марки  $45\text{Fe}39\text{Cr}6\text{C}10\text{Si}$ . Недоліком є недостатній обсяг досліджень стосовно властивостей відновленої сировини при різній кількості кремнію та вуглецю в шихті. Частина проблеми, що залишилися невирішеними, стосуються виявлення найбільш раціональних показників відновлення техногенних відходів в системі  $\text{Fe-W-Mo-V-Cr-Co-O-Si-C}$ .

Відновлення комплексних з'єднань  $\text{FeO}\cdot\text{V}_2\text{O}_3$  і  $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$  при  $1373\text{--}1523\text{ K}$  з різним  $\text{C:Fe}$  (атомне співвідношення) наводилося в роботі [9]. Було досягнуто підвищення ступеня вилучення ванадію з  $10,0\%$  до  $45,3\%$ , хрому – з  $9,6\%$  до  $74,3\%$ . Більш інтенсивне карбідоутворення мало прояв при  $1523\text{ K}$ . Відновлення хрому із рудної сировини при температурах від  $1389\text{ K}$  до  $1661\text{ K}$  за участю  $\text{Si}$  та  $\text{SiC}$  пред-

ставлено в роботі [10]. Продукти відновлення містили частки металевої фази з вмістом Cr, Fe і Si. В роботі [11] в системі Mo-O-C виявлено двостадійність перетворень при першочерговому переході MoO<sub>3</sub> в MoO<sub>2</sub>, який в подальшому переходив в Mo та карбіди. Схожа послідовність перетворень спостерігається в системі W-O-C [12]. Однак, як відмінність, при перетворенні WO<sub>3</sub> в якості проміжного оксиду окрім WO<sub>2</sub> було виявлено також WO<sub>2,72</sub>. Недоліком можна вважати відсутність результатів відновлення комплексних оксидних сполук, що можуть бути в складі техногенних відходів. Така особливість перебування елементів може викликати відмінності в проходженні реакцій відновлення. Частина проблеми, що залишилась невирішеною, стосується досліджень структурно-фазового складу техногенних відходів із комплексним вмістом тугоплавких елементів із залученням рентгенофазового аналізу та мікроскопії.

Можна виділити отримані результати при вивченні особливостей складу та процесів відновлення за участю вуглецю оксидних відходів нелегованих сталей [3] та з вмістом тугоплавких елементів [4, 5]. В отриманих матеріалах була присутня фаза твердого розчину елементів в ґратці заліза, залишковий вуглець, карбідна та оксидна складові. Участь кремнію у відновних процесах, що показана авторами робіт [6, 7], обумовила розвиток силіцидоутворення. Дослідження взаємозв'язку елементів в системі Fe-Cr-C-Si було представлено в роботах [8, 10]. Проходження відновлення разом із утворенням карбідів у системі V-Cr-Fe-O-C представлено в роботі [9], при цьому перетворення в системах Mo-O-C [11] і W-O-C [12] протікали двостадійно з утворенням поміжних оксидів. Однак невирішеним залишається виявлення особливостей структурно-фазового складу відновленої техногенної сировини з комплексом тугоплавких елементів при різному вмісті вуглецю і кремнію в шихті. Варіювання співвідношення цих компонентів відкриває можливість досягти необхідних властивостей цільового матеріалу. Залучення новітніх методів рентгенофазового аналізу і електронної растрової мікроскопії з оснащенням приставкою для рентгенівського мікроаналізу дозволило б поглибити уявлення стосовно природи перебування елементів в складі відновленої сировини. Це, в свою чергу, дозволить визначити прийнятні технологічні параметри обробки та знизити втрати присутніх легуючих елементів в процесі отримання та використання сплаву.

### **3. Мета і задачі дослідження**

Мета роботи полягала у виявленні структурно-фазових перетворень при переробці техногенних металургійних відходів виробництва швидкоріжучих сталей з комплексним вмістом тугоплавких елементів при відновленні вуглецем та кремнієм з отриманням сплаву для легування. Це потрібно для визначення відповідних технологічних параметрів, що забезпечують зменшення втрат основних елементів сплаву під час отримання та використання, як легуючої добавки.

Для досягнення заданої мети були поставлені наступні завдання:

- дослідити особливості фаз в сплаві при зміні співвідношення кремнію до вуглецю в шихті;
- визначити особливості мікроструктури сплаву із виявленням вмісту елементів у фазових утвореннях при зміні співвідношення кремнію до вуглецю в шихті.

## **4. Матеріали і методи дослідження**

### **4. 1. Досліджувані матеріали та обладнання використане в експерименті**

В якості вихідної сировини було використано окалину від виробництва швидкоріжучих сталей вольфрам-молібден-кобальтвмісних марок. Як відновник застосовували вуглецевий ультрадисперсний пил, утворений на дільницях виробництва вуглеграфіту, при забезпеченні в шихті масового співвідношення O:C – 1,42. Вміст кремнію в шихті змінювали додавання феросиліцію марки ФС-65, при цьому регулювали в шихті масове співвідношення Si:C в межах 0,11–0,52. Стружка силового шліфування в шихті виконувала функцію покращення теплообміну на початку нагрівання. Виплавку здійснювали при температурі 1873–1913 К в алундових тиглях в печі з непрямим нагрівом, що оснащена вугільною футеровкою. Охолодження виконували при температурі навколишнього середовища в тиглях, які виймали з печі разом із сплавом.

Фазовий склад сплаву було досліджено за допомогою дифрактометра “ДРОН-6” (Росія).

Дослідження мікроструктури сплаву здійснювали за допомогою електронного растрового мікроскопу “JSM-IT300” виробництва компанії JEOL (Японія). Мікроскоп був оснащений приставкою для рентгенівського мікроаналізу “X-MAX80” виробництва компанії Oxford Instruments (Великобританія), завдяки чому виявляли вміст елементів у фазових утвореннях.

### **4. 2. Методика проведення дослідів та визначення властивостей зразків**

Для визначення фазового складу сплаву використовували рентгенофазовий аналіз при монохроматичному випромінюванні  $\text{Co K}\alpha$  з використанням програмного забезпечення PDWin 2.0 (Росія). Анодний струм на трубці складав 20 мА, напруга – 30 кВ.

Прискорювальна напруга при отриманні зображень мікроструктури складала 15 кВ при діаметрі електронного зонда 4 нм. Визначення відсоткового складу хімічних елементів здійснювали за допомогою безеталонного методу розрахунку фундаментальних параметрів.

## **5. Результати досліджень властивостей отриманого легуючого сплаву**

### **5. 1. Визначення особливостей складу фаз в сплаві з різним співвідношенням Si:C в шихті**

Фази виявлені в сплаві при співвідношенні Si:C в шихті 0,11 представлені твердим розчином елементів в  $\alpha\text{-Fe}$ , карбідами  $\text{Fe}_3\text{C}$  та  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ . Сполуки з кремнієм не мали чіткого прояву на дифрактограмі (рис. 1, *a*).

При співвідношенні Si:C в шихті 0,28 разом із твердим розчином елементів в  $\alpha\text{-Fe}$  було виявлено  $\text{Fe}_8\text{Si}_2\text{C}$ , а також  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$  з відносно слабкою інтенсивністю прояву. При співвідношенні Si:C в шихті 0,52 спостерігалася присутність у фазовому складі твердого розчину елементів в  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $\text{FeSiC}$  та  $\text{FeSi}_2$ . Останній мав відносно слабкий прояв. Зміна співвідношення Si:C в шихті з 0,28 до 0,52 призводила до підвищення прояву карбосиліцидних та силіцидних з'єднань по відношенню до твердого розчину елементів в  $\alpha\text{-Fe}$ . Сполуки легуючих елементів мали слабкий фрагментарний прояв близький до фонового рівня.

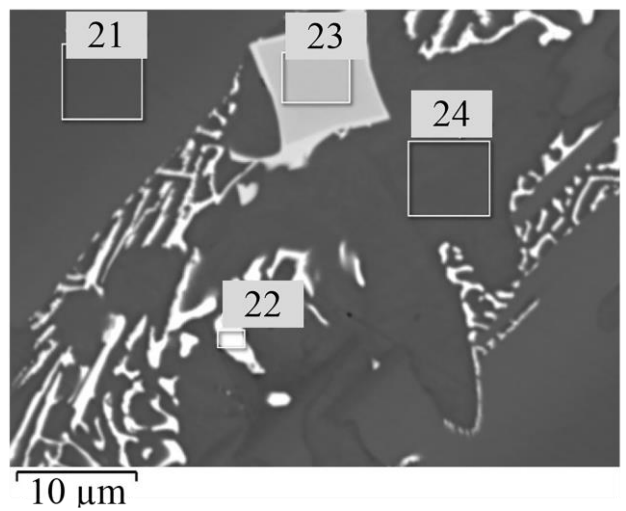
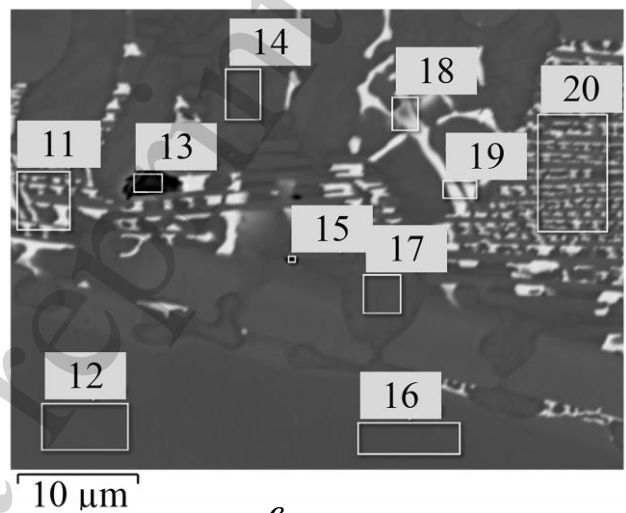
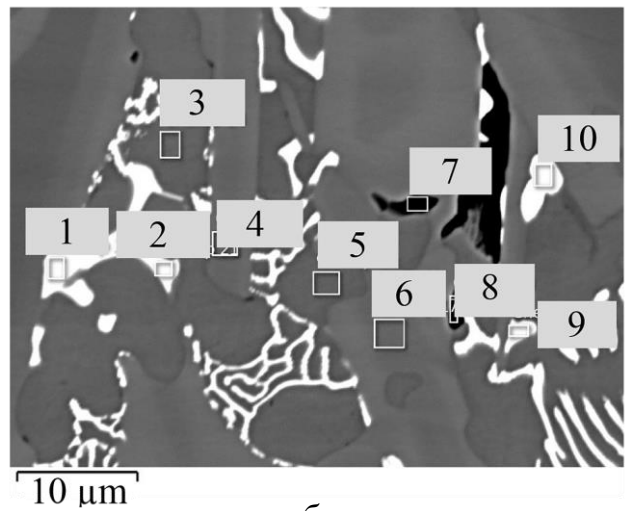
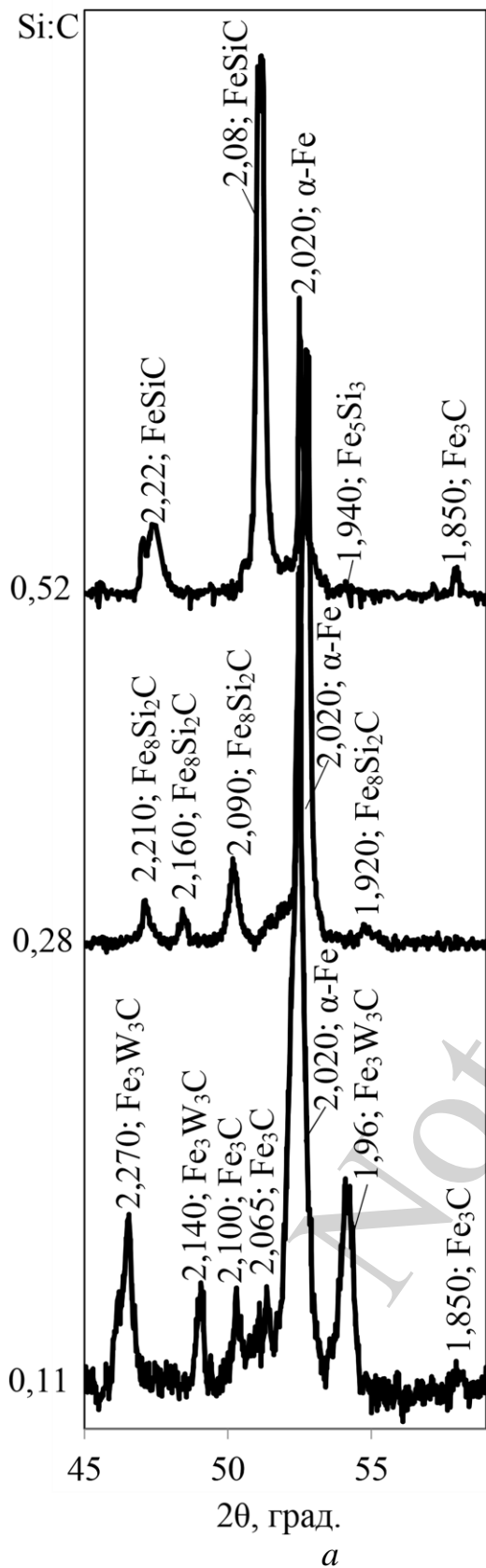


Рис. 1. Рентгенофазові дослідження сплаву при різних значеннях співвідношення Si:C в шихті та відповідні зображення мікроструктури при збільшенні  $\times 2500$ : а – дифрактограми; б – 0,11; в – 0,28; г – 0,52; 1–22 – ділянки визначення складу елементів

## 5. 2. Дослідження особливостей мікроструктури легуючого сплаву з різним співвідношенням Si:C в шихті

Мікроструктура сплаву характеризувалася неоднорідністю. Було виявлено декілька варіацій фаз з різним вмістом елементів (рис. 1–3, табл. 1).

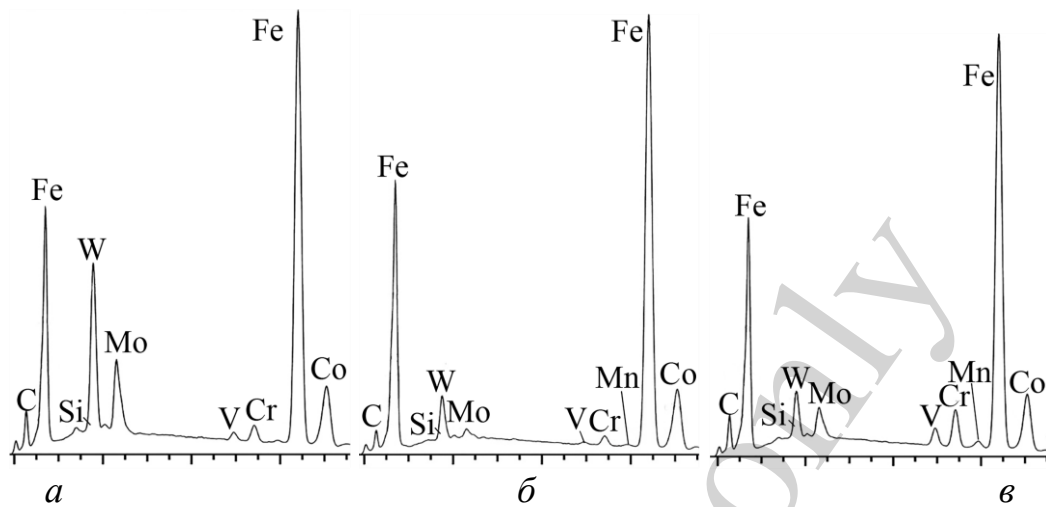
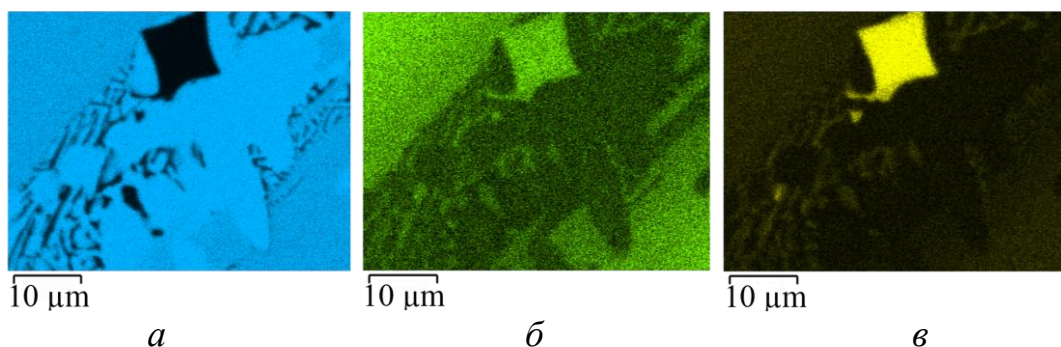


Рис. 2. Спектрограми рентгенівського мікроаналізу деяких досліджених ділянок сплаву відповідно рис. 1: *a* – 11, *б* – 17, *в* – 21

Зміна в шихті співвідношення Si:C з 0,11 до 0,28 та 0,52 обумовлювала підвищення залишкового вмісту кремнію в досліджених ділянках (% мас.) з 0,00–0,25 до 0,12–1,79 та 0,20–2,11 відповідно. Разом з цим значення залишкового вуглецю (% мас.) змінювалися з 0,25–2,12 до 0,24–2,52 та 0,45–2,68 відповідно.

Показники вмісту W (% мас.) в таких умовах змінювали значення з 0,30–43,06 до 0,00–30,88 і 3,36–40,07 відповідно. А вмісту Mo (% мас.) – 0,00–32,72 до 0,00–12,28 і 1,28–28,84 відповідно. Вміст V в ділянках сплаву на всьому дослідженому інтервалі співвідношень Si:C приймав значення в межах 0,19–20,72 % мас., Cr – 0,69–33,94 % мас., і вміст Co (% мас.) – 0,00–3,96 % мас. Окремі залишкові фрагментарні утворення з відносно високим вмістом кисню в межах 20,47–22,99 % мас. мали прояв при співвідношеннях Si:C в шихті 0,11 та 0,28. Марганець та титан в досліджених ділянках проявлялися фрагментарно на рівні супутніх домішок.

Дослідження розподілу елементів в отриманому сплаві при співвідношенні Si:C в шихті 0,52 (рис. 3) свідчить про суміщення ділянок концентрації елементів Mo, W, V, Cr. При цьому зони концентрації Fe з Co співпадали.



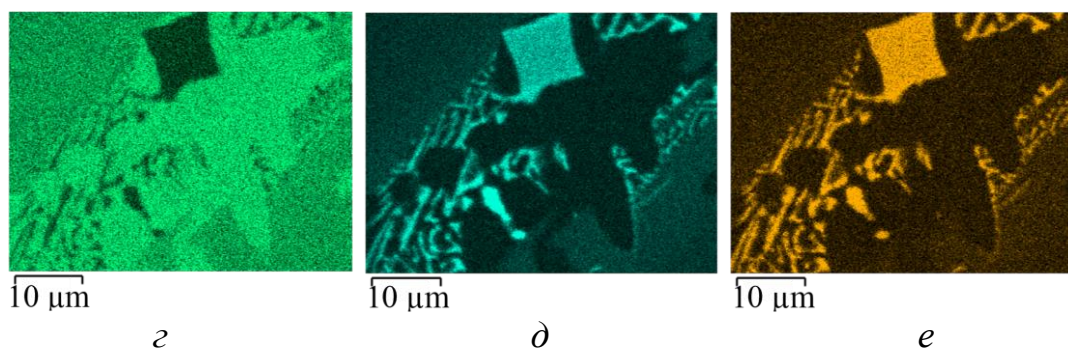


Рис. 3. Розподіл елементів у характеристичних рентгенівських променях за результатами рентгенівського мікроаналізу відповідно рис. 1, з (збільшення  $\times 2500$ ). Інтенсивність забарвлення відповідає вмісту елементів: *a* – Fe, *b* – Cr, *v* – V, *z* – Co, *d* – Mo, *e* – W

Таблиця 1

Результати рентгенівського мікроаналізу ділянок сплаву відповідно рис. 1

№ п/п	Вміст елементів, % мас.											Сума
	C	Si	O	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Mo	W	
1	2,08	0,22	0,00	1,15	18,37	1,91	0,20	18,79	0,07	17,23	39,98	100
2	2,12	0,25	0,00	0,99	12,90	1,41	0,09	25,02	0,58	17,26	39,38	100
3	0,33	0,00	0,00	0,00	0,19	0,89	0,19	89,89	3,40	1,41	3,70	100
4	0,72	0,09	0,00	0,00	1,65	3,70	0,32	82,70	1,88	3,15	5,79	100
5	0,32	0,00	0,00	0,00	0,24	0,91	0,19	90,33	3,57	1,31	3,13	100
6	0,77	0,12	0,00	0,00	1,75	3,61	0,36	82,96	1,77	3,24	5,42	100
7	0,27	0,00	22,99	0,00	16,04	33,03	2,68	24,58	0,11	0,00	0,30	100
8	0,25	0,00	22,44	0,00	14,35	29,92	2,47	28,69	0,34	0,67	0,87	100
9	1,87	0,14	0,00	0,00	1,09	1,13	0,09	32,22	0,67	21,86	40,93	100
10	1,92	0,17	0,00	0,00	0,78	1,04	0,03	20,10	0,18	32,72	43,06	100
11	2,37	1,73	0,00	0,00	0,71	1,38	0,02	70,14	2,35	7,26	14,04	100
12	0,81	0,35	0,00	0,00	2,22	5,40	0,17	83,22	1,55	2,15	4,13	100
13	0,24	0,00	20,47	0,00	16,32	33,91	2,86	25,81	0,00	0,16	0,23	100
14	0,41	0,17	0,00	0,00	0,31	0,96	0,11	90,79	3,01	1,01	3,23	100
15	0,29	0,00	21,72	0,00	16,17	33,94	2,66	25,22	0,00	0,00	0,00	100
16	0,84	0,37	0,00	0,00	2,07	5,50	0,18	82,96	1,64	2,19	4,25	100
17	0,39	0,12	0,00	0,00	0,25	1,01	0,16	92,05	3,02	1,13	1,87	100
18	2,49	1,52	0,00	0,21	5,95	1,31	0,07	60,09	2,07	7,63	18,66	100
19	2,52	1,65	0,00	0,25	10,44	1,57	0,03	39,2	1,18	12,28	30,88	100
20	2,23	1,79	0,00	0,00	0,67	1,65	0,13	74,93	2,12	5,79	10,69	100
21	0,86	0,42	0,00	0,00	1,73	4,14	0,29	82,75	1,98	2,65	5,18	100
22	2,25	1,85	0,00	0,00	1,14	0,92	0,16	21,62	0,32	28,84	42,90	100
23	2,68	2,11	0,00	1,34	20,72	1,69	0,11	15,72	0,07	15,49	40,07	100
24	0,45	0,20	0,00	0,00	0,20	0,69	0,20	89,66	3,96	1,28	3,36	100

## 6. Обговорення результатів досліджень особливостей властивостей отриманого легуючого сплаву

При різних співвідношеннях Si:C в шихті в сплаві було виявлено фази на основі заліза (рис. 1). В числі карбідів був присутній  $Fe_3C$ , що має відповідність з результатами роботи [3] при відновленні залізної окалини. Деяка частина ле-

гуючих елементів перебувала в якості атомів заміщення в твердому розчині в  $\alpha$ -Fe, що узгоджується з результатами роботи [5]. Але відмінність щодо результатів робіт [3, 5] полягає в утворенні окрім  $\text{Fe}_3\text{C}$  додатково комплексного карбіду  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  при співвідношенні Si:C в шихті 0,11. Виявлення з'єднань вольфраму також мало місце в роботах [4, 7]. Присутність  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$  та  $\text{FeSi}_2$  при співвідношеннях Si:C в шихті 0,28 та 0,52 відповідно узгоджується з результатами робіт [6, 8], де також спостерігалось утворення силіцидів заліза. В якості відмінності можна зазначити утворення карбідів, а також карбосиліцидів  $\text{Fe}_8\text{Si}_2\text{C}$ ,  $\text{FeSiC}$ . Це, напевне, може бути пов'язано з більшим вмістом карбідоутворюючих легуючих елементів. На це також вказують результати роботи [7], де присутність вольфраму мала вплив на природу фазових утворень, що відобразилося в фазовому складі та мікроструктурі. Також прослідковується відповідність результатам роботи [12], де зазначено про розвиток утворення карбідів вольфраму при відновленні вуглецем оксидних з'єднань. Схожі процеси карбідоутворення спостерігаються при відновленні Mo [11].

Під час проведення мікроструктурних досліджень та рентгенівського мікроаналізу окремих фаз виявлено суміщення ділянок з відносно високим вмістом Mo, W, V, Cr (рис. 3). Тобто на відміну від результатів робіт [11, 12] прослідковується можливість утворення комплексних карбідних або карбосиліцидних з'єднань Mo, W та інших легуючих елементів. Це має узгодження з результатами роботи [9], де зазначалося про утворення карбідів в системі Fe-Cr-V-O-C. Суміщення зон концентрації Fe та Co (рис. 3) вказує на перебування останнього в переважній кількості в якості твердого розчину в ґратці  $\alpha$ -Fe. Відмінності в характері присутності елементів в утворених частках вказують на наявність декількох фаз різної природи.

Зміна в шихті співвідношення Si:C з 0,11 до 0,28 та 0,52 обумовлювала підвищення залишкового вмісту кремнію у відповідних фазах на досліджених ділянках мікроструктури (рис. 1, табл. 1). Це викликало збільшення прояву у фазовому складі карбосиліцидів та силіцидів по відношенню до карбідів та твердого розчину елементів в ґратці  $\alpha$ -Fe. Виявлення фрагментарного прояву часток з відносно високим вмістом кисню в межах 20,47–22,99 % мас. (рис. 1, табл. 1) при співвідношеннях Si:C в шихті 0,11 та 0,28 вказує на оксидну природу утворень. Проявлення таких утворень при Si:C в шихті 0,28 менше, ніж при 0,11. Однією з причин може бути недостатня кількість або ускладнений доступ відновника стосовно таких ділянок. Слід підкреслити, що вказані частки зустрічаються фрагментарно, тому, очевидно, не мають критичного впливу на загальні цільові характеристики сплаву. Довідновлення таких вкраплень можливе під час легування сталі за рахунок частки залишкового вуглецю та кремнію в сплаві. При співвідношенні Si:C в шихті 0,52, на відміну від попередніх випадків, в структурі не виявлено утворень з відносно високим вмістом кисню. При цьому спостерігається підсилення прояву карбосиліцидів та силіцидів, та, відповідно, збільшення кількості залишкового кремнію, що дещо обмежує витратні коефіцієнти сплаву. З іншого боку при цьому досягається збільшення відновної здатності сплаву та, як наслідок, підвищення ступеня вилучення ле-



гуючих елементів. Спираючись на вище вказане, найбільш прийнятне співвідношення Si:C в шихті складає 0,52.

Обмеження використання сплаву можуть обумовлюватися комплексною легованістю. Ускладнення можуть виникати в тому випадку, коли деякі з компонентів суворо обмежені в цільовому продукті. Такі обставини можуть спричинити перевищення заданих допустимих показників вмісту елементів у складі. Для того, щоб не стикатися з такого роду проблемами та забезпечити достатні витратні коефіцієнти слід дотримуватися близькості вмісту елементів в сплаві та цільовому продукті.

Як недолік можна зазначити відсутність наведених зображень мікроструктурних досліджень різного збільшення. Наявність таких зображень додала би показовості досліддам.

Подальше розвинення досліджень можливе в напрямку розширення спектру залучених до переробки техногенних відходів. Труднощі під час спроб розвинути дане дослідження полягали у недостатній експериментальній базі.

Отриманий сплав характеризується показниками, що дають можливість здійснення в якості легуючої добавки при виплавці марок сталей без жорстких обмежень за вуглецем на заміну частини феросплавів, що зазвичай використовуються. В тому числі феровольфрам марки ФВ70 (ГОСТ 17293-93), феромолібден марки ФМо60 (ГОСТ 4759-91), ферохром марки ФХ100 (ГОСТ 4757-91), ферованадій марки ФВд50У0,4 (ГОСТ 27130-94). Перспективними в такому випадку є швидкоріжучі сталі марок Р6М5К5, Р9М4К8, Р12М3К8Ф2, Р10М4К10Ф3 та інші. Для виплавки можна використовувати електродугову піч з основною футеровкою. Виплавка швидкоріжучої сталі з використанням сплаву можлива за умов діючої технології. При цьому має бути врахований деякий залишковий вміст кремнію в сплаві. Це вплине на кількість додавання інших кремнійвмісних компонентів під час виплавки. Вплив типу печі на потенційно очікуваний результат може бути пов'язаний з конструктивними особливостями, що обумовлюють принцип роботи самого обладнання. Наприклад, наявність концентрованого джерела тепла над металом в електродуговій печі може створити локальні умови для вигару легуючих елементів в такій зоні. Вплив хімічного складу сплаву на результати пов'язаний із вмістом залишкового кремнію. Відносне збільшення вмісту кремнію буде сприяти підвищенню відновної здатності та покращенню умов засвоєння легуючих елементів із сплаву. Але при цьому дещо зменшуються витратні коефіцієнти використання сплаву, обумовлені обмеженнями вмісту кремнію в марках сталі, що виплавляються.

## 7. Висновки

1. Встановлено, що при співвідношенні Si:C в шихті 0,11 в сплаві було виявлено твердий розчин елементів в  $\alpha$ -Fe, карбіди  $Fe_3C$  та  $Fe_3W_3C$ . При зміні співвідношення Si:C в шихті на 0,28 та 0,52 разом із твердим розчином елементів в  $\alpha$ -Fe мали прояв  $Fe_8Si_2C$ ,  $Fe_5Si_3$  та  $FeSiC$ ,  $FeSi_2$  відповідно. Спостерігалось підвищення прояву карбосиліцидних та силіцидних з'єднань.

2. Визначено, що мікроструктура сплаву характеризувалася неоднорідністю. Було виявлено декілька варіацій фаз з різним вмістом елементів. Зміна

співвідношення Si:C в шихті з 0,11 до 0,28 та 0,52 обумовлювала підвищення залишкового вмісту кремнію в досліджених ділянках (% мас.) з 0,00–0,25 до 0,12–1,79 та 0,20–2,11 відповідно. Разом з цим значення залишкового вуглецю (% мас.) змінювалися з 0,25–2,12 до 0,24–2,52 та 0,45–2,68 відповідно. Вміст легуючих елементів змінювався в межах (% мас.): W – 0,00–43,06, Mo – 0,00–32,72, V – 0,19–20,72, Cr – 0,69–33,94, Co – 0,00–3,96. Мали місце залишкові фрагментарні утворення з відносно високим вмістом кисню в межах 20,47–22,99 % мас. Досліджені фазові утворення, що характеризувалися відносно високим вмістом кремнію, вуглецю та легуючих елементів, можуть бути карбосиліцидними з'єднаннями.

### Література

1. Henckens, M. L. C. M., van Ierland, E. C., Driessen, P. P. J., Worrell, E. (2016). Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations. *Resources Policy*, 49, 102–111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.012>
2. Власюк, Ю. О., Педченко, Г. П. (2017). Застосування економіко-математичних методів у дослідженні конкурентоспроможності підприємств. *Збірник наукових праць ТДАТУ: економічні науки*, 3 (35), 279–285.
3. Mechachti, 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. URL: [https://www.researchgate.net/publication/269463295\\_Preparation\\_of\\_iron\\_Powders\\_by\\_Reduction\\_of\\_Rolling\\_Mill\\_Scale\\_International\\_Journal\\_of\\_Scientific\\_Engineering\\_Research\\_Volume\\_4\\_Issue\\_5\\_May-20131457-1472](https://www.researchgate.net/publication/269463295_Preparation_of_iron_Powders_by_Reduction_of_Rolling_Mill_Scale_International_Journal_of_Scientific_Engineering_Research_Volume_4_Issue_5_May-20131457-1472)
4. Grigor'ev, S. M., Petrishchev, A. S. (2012). Assessing the phase and structural features of the scale on P6M5Φ3 and P12M3K5Φ2 steel. *Steel in Translation*, 42 (3), 272–275. doi: <https://doi.org/10.3103/s0967091212030059>
5. Smirnov, A. N., Petrishchev, A. S., Semiryagin, S. V. (2021). Reduction Smelting of Corrosion-Resistant Steel Waste: Aspects of Structural and Phase Transformations. *Steel in Translation*, 51 (7), 484–489. doi: <https://doi.org/10.3103/s0967091221070093>
6. Petryshchev, A., Braginec, N., Borysov, V., Bratishko, V., Torubara, O., Tsymbal, B. et. al. (2019). Study into the structural-phase transformations accompanying the resource-saving technology of metallurgical waste processing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (12 (100)), 37–42. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175914>
7. Grigor'ev, S. M., Petrishchev, A. S. (2012). Resource- and energy-conserving low-silicon alloys in the production of high-speed steel. *Steel in Translation*, 42 (5), 472–476. doi: <https://doi.org/10.3103/s0967091212050051>
8. 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>
9. 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 va-

nadium-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)

10. 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>

11. Zhu, H., Li, Z., Yang, H., Luo, L. (2013). Carbothermic Reduction of MoO<sub>3</sub> for Direct Alloying Process. Journal of Iron and Steel Research International, 20 (10), 51–56. doi: [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(13\)60176-4](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(13)60176-4)

12. Shveikin, G. P., Kedin, N. A. (2014). Products of carbothermal reduction of tungsten oxides in argon flow. Russian Journal of Inorganic Chemistry, 59 (3), 153–158. doi: <https://doi.org/10.1134/s0036023614030206>

Not a reprint