

DOI: 10.20535/kpissn.2021.4.263195
УДК 621.762+621.793

Д.О. Ремізов*, А.М. Степанчук, Т.О. Соловійова, П.І. Лобода, С.В. Завадюк

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*corresponding author: remizz@ua.fm

ВИКОРИСТАННЯ САМОФЛЮСІВНИХ СПЛАВІВ ЯК ДЖЕРЕЛА ЛЕГУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІД ЧАС ОТРИМАННЯ ПОРОШКОВИХ ВИРОБІВ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З НИЗЬКОЛЕГОВАНОГО ЗАЛІЗА

Проблематика. Однією з проблем виготовлення порошкових конструкційних матеріалів на основі заліза, легованих малою кількістю легувальних елементів (0,5–5,0 мас.%), є отримання гомогенного сплаву в кінцевому матеріалі. Рівномірність розподілу легувальних елементів суттєво визначає кінцеві властивості матеріалу. Використання суміші порошків складників для отримання таких сплавів зазвичай не розв'язує проблеми отримання гомогенних сплавів. Тож перспективним є використання порошків сплавів, які вміщують легувальні елементи, як джерела легувальних елементів.

Мета дослідження. Вивчити закономірності формування структури та властивостей матеріалів на основі сплавів заліза, отриманих із використанням самофлюсівних сплавів (СФС) як джерела легувальних елементів.

Методика реалізації. Застосовано методики змішування–розмелювання у планетарних млинах, вивчення процесів змочування розплавами СФС заліза та взаємодії між ними методом лежачої краплі, растрової мікроскопії для вивчення структури матеріалів і розподілу елементів у них, вимірювання механічних властивостей (твердості).

Результати дослідження. Встановлено засади визначення оптимальних умов отримання матеріалів: час розмелювання–змішування (4 хв), тиск пресування вихідних заготовок (600 МПа), температура спікання (1200 °С), час спікання (понад 80 хв). Їх застосування сприяє отриманню виробів з практично стовідсотковою щільністю матеріалу та високим ступенем гомогенності.

Висновки. Використання СФС як джерела легувальних елементів, а також методів готування вихідної суміші змішуванням–розмелюванням у планетарному млині сприяє отриманню матеріалів із високим ступенем гомогенності внаслідок інтенсифікації процесів гомогенізації та спікання та, як наслідок, і підвищенню їх механічних характеристик.

Ключові слова: залізо; легувальні елементи; розмелювання; пресування; спікання; структура матеріалу; твердість.

Вступ

Однією з проблем виготовлення конструкційних матеріалів на основі заліза, легованого малою кількістю легувальних елементів (0,5–5,0 мас.%), є отримання гомогенного сплаву у кінцевому матеріалі. Рівномірність розподілу легувальних елементів істотно визначає кінцеві властивості матеріалу, особливо характеристики міцності. Але за використання як вихідних матеріалів порошків складників матеріалу в кількостях, менших за 5 мас. % (особливо меншій за 1 мас. %),

утворення гомогенних сплавів практично неможливе в разі отримання вихідної шихти для пресування заготовок виробу механічним змішуванням. У цьому випадку важко забезпечити рівномірний контакт між складниками сплаву, що вимагає значного збільшення часу спікання для забезпечення гомогенізації сплаву.

Цю проблему можна частково розв'язати, застосовувавши для виготовлення виробів порошки готових сплавів. Ці порошки можна отримати розпилюванням розплавів, сумісним відновленням оксидів металів, дифузійним наси-

Рекомендуємо цитувати цю статтю так: Д.О. Ремізов, А.М. Степанчук, Т.О. Соловійова, П.І. Лобода, С.В. Завадюк, “Використання самофлюсівних сплавів, як джерела легувальних елементів при отриманні порошкових виробів конструкційного призначення з низьколегованого заліза”, *Наукові вісті КПІ*, № 4, с. 58–68, 2021. doi: 10.20535/kpissn.2021.4.263195.

Please cite this article as: D.O. Remizov, A.M. Stepanchuk, T.O. Soloviova, P.I. Loboda, and S.V. Zavaduik, “The use of self-fluxing alloys as a source of alloying elements in producing powder products of construction purpose from low-alloyed iron”, *KPI Science News*, no. 4, pp. 58–68, 2021. doi: 10.20535/kpissn.2021.4.263195.

ченням, насиченням із точкових джерел [1]–[5]. Однак використання вказаних методів для отримання порошків сплавів, особливо малолегованих, не завжди гарантує бажаний результат і є економічно не вигідними.

Деякою мірою проблему створення більшої площі контакту між складниками сплаву за малої кількості легувальної складової частини можна розв'язати, застосовувавши хімічне змішування [6], [7]. У цьому випадку легувальну добавку під час змішуванні вихідних порошків вводять у вигляді розчину її солі. Під час змішування з одночасним випаровуванням розчинника сіль рівномірно осаджується на поверхні частинок основного матеріалу сплаву (у нашому випадку заліза) та відновлюється (розкладається). Тим самим значно збільшується площа контакту між складовими сплаву й утворюються активні джерела насичення основного матеріалу легувальними елементами, як це відбувається й за отримання сплавів насиченням із точкових джерел [1], [3]. Однак використання цієї технології теж не завжди ефективно через дефіцитність розчинних солей певних елементів, їх невідповідність вимогам відновлюваності чи розкладання та високу вартість, що значно знижує економічну ефективність методу.

Одним із варіантів отримання конструкційних матеріалів зі сплавів на основі заліза, що вміщують легувальні елементи в кількості, меншій за 1–5 мас. %, є використання порошків сплавів, які вміщують необхідні легувальні елементи. Так, перспективними є порошки СФС [1], [8]. Їх легко отримати розпилюванням розплавів. Вони можуть бути на основі нікелю, заліза та кобальту [1], [2] та вмішувати вуглець, силіцій, бор, хром, молібден, мідь тощо. За необхідності до їх складу також можна вводити інші елементи. Особливістю СФС є їх відносно низька температура плавлення (залежно від складу – 920–1180 °С). Тому за спікання конструкційних порошкових матеріалів на основі заліза за температури 1200–1250 °С вони плавитимуться й утворюватимуть рідку фазу, яка за змочування розплавом СФС заліза розтікатиметься поверхнею частинок і проникатиме між ними, що значно збільшуватиме контактну поверхню між ними й так інтенсифікуватиме процеси сплавоутворення. У цьому разі слід чекати утворення (за інших рівних умов) більш гомогенних сплавів і підвищення характеристик їх міцності.

Постановка задачі

Метою роботи є отримати матеріали на основі заліза, легованого СФС на основі нікелю марки АН9 [2] як джерела легувальних елементів; дослідити вплив умов змішування вихідних порошків на структуру та деякі властивості матеріалів.

Результати та їх обговорення

Однією з бажаних вимог до сплавів, які використовують як джерело легувальних елементів, є утворення рідкої фази під час спікання виробів за їх участю. У цьому разі значно прискорюються дифузійні процеси, що лежать в основі гомогенізації (сплавоутворення) кінцевого матеріалу. Але ці процеси відбуватимуться тільки у випадку змочування легувальної добавки твердої фази (у нашому випадку карбонільного заліза) розплавом. Тому в роботі досліджено змочуваність розплавом СФС заліза. Змочування вивчалось методом лежачої краплі [9], [10]. Досліджувався вплив на крайовий кут змочування температури (1100 °С; 1150 °С, 1200 °С і 1250 °С) і часу змочування (1, 2, 3, 4, 5 с).

Результати досліджень наведено на рис. 1.

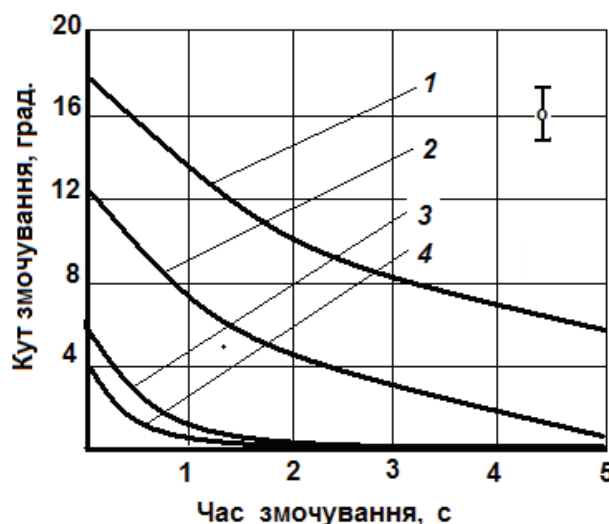


Рис. 1. Залежність кута змочування розплавом СФС поверхні заліза від часу змочування за різних температур (°С): 1 – 1100 °С; 2 – 1150 °С; 3 – 1200 °С; 4 – 1250 °С

Як видно з рис. 1, розплав СФС практично у всіх досліджених умовах змочує залізо (кут змочування менший за 90°). У нашому випадку він значно менший за 90° і змінюється залежно від

умов від 18 до 0°. Кут змочування зменшується зі збільшенням температури та часу змочування. За температур 1200 °С і більше відбувається повне змочування вже за 1–2 с, тобто практично миттєво. Отримані результати узгоджуються з даними роботи [11], у якій досліджено процеси змочування розплавами СФС заліза. Показано, що наявність у залізі інших легувальних елементів, особливо карбідоутворюючих, дещо збільшує кут змочування, але за певних умов, які застосовують у практиці порошкової металургії при отриманні порошкових конструкційних матеріалів на основі заліза, він прагне до нуля.

Тож із погляду відповідності вимогам змочування використання СФС як джерела легувальних елементів є перспективним.

Іншим питанням, яке необхідно розв'язувати під час отримання конструкційних матеріалів на основі заліза, легованого малою кількістю легувальних елементів, є визначення умов спікання спресованих заготовок. У нашому випадку ставиться задача не тільки отримати вироби з максимальною щільністю, від якої суттєво залежать їхні механічні властивості [12], а й забезпечити рівномірний розподіл легувальних елементів у кінцевому виробі, який також має значний

вплив на їх експлуатаційні властивості. Для визначення цих умов необхідно знати температуру та час спікання заготовок, спресованих із суміші вихідних порошків. Аналіз джерел [6], [7], [13] дав змогу визначити температуру та час спікання порошкових матеріалів на основі заліза для отримання виробів із заданими властивостями (щільністю). Але у нашому випадку необхідно поряд із максимальною щільністю отримати й рівномірний розподіл легувальних елементів у матеріалі з використанням їх як джерела СФС. Тому важливо з'ясувати поряд із часом спікання час гомогенізації матеріалу. Останній можна оцінити за результатами визначення кінетики взаємодії заліза з розплавами СФС. Задля цього процеси взаємодії розплаву СФС із компакним залізом досліджено з використанням зразків із чистого (армко) заліза, на поверхню яких розміщували зразок із СФС. Нагрівали зразки за температур, вищих за температуру плавлення останнього, 1100 та 1200 °С. Для дослідження впливу температури та часу на ступінь взаємодії між розплавом СФС і залізом вивчено мікроструктуру зони взаємодії та розподіл і вміст елементів у її межах. Результати наведено на рис. 2–4.

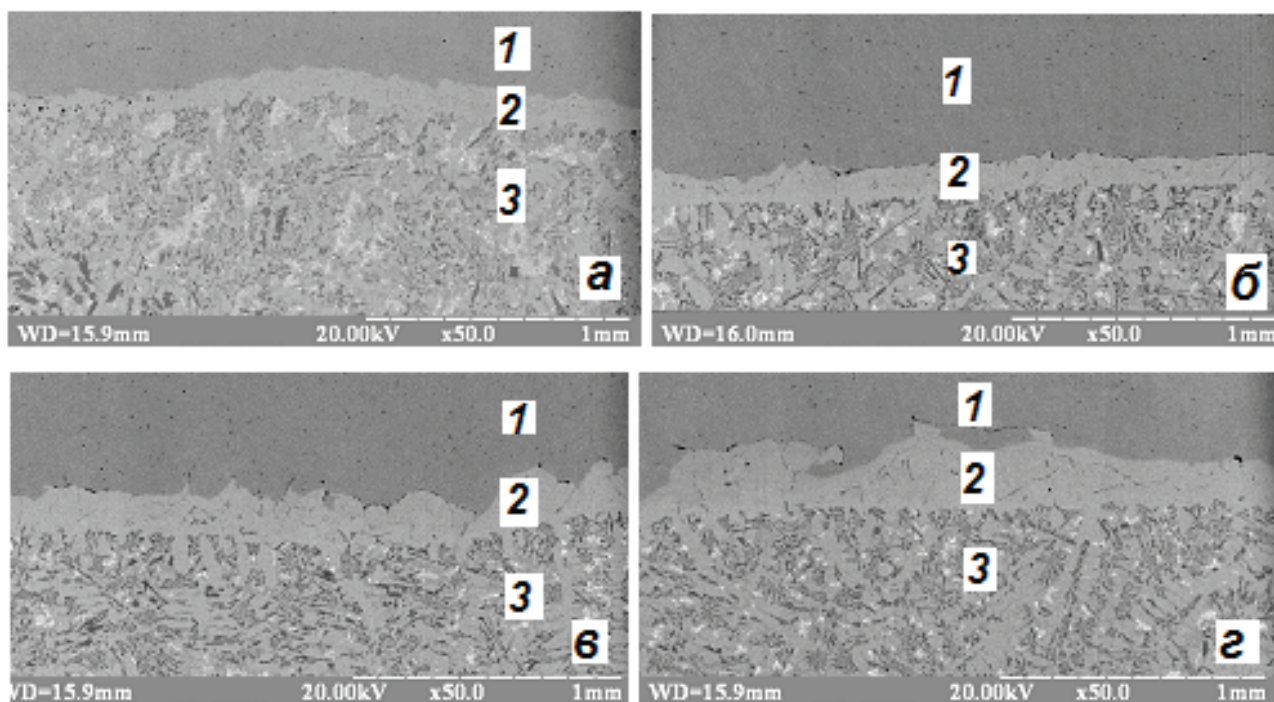
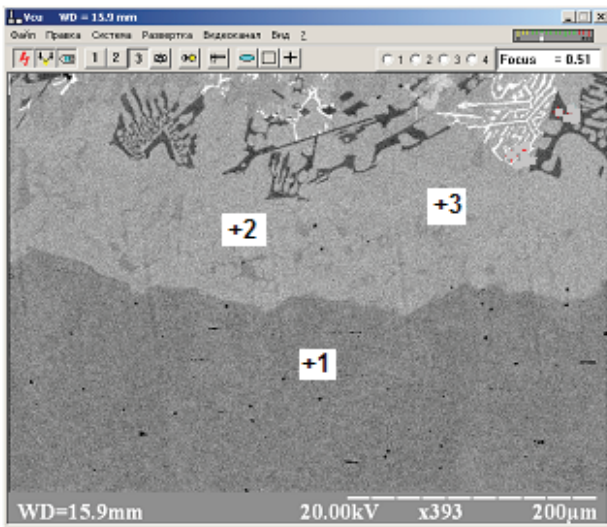


Рис. 2. Структура зони взаємодії СФС із залізом за температури 1200 °С за різного часу ізотермічної витримки (хв): 1 – залізо; 2 – зона взаємодії; 3 – самофлюсівний сплав; а – 10; б – 20; в – 30; г – 40



Информация			
Напряжение (кВ): 20.00			
Сумма %: 100.00			
Элемент	Инт.	С %	
Si	K 47	0.12	
Cr	K 2400	5.96	
Cr	L -1	0.00	
Fe	K 14408	85.71	
Fe	L -11	0.00	
Ni	K 564	5.59	
Ni	L -5	0.00	
Cu	K 38	0.46	
Cu	L -25	0.00	
Mo	L 413	2.17	
Mo	M 7	0.00	

Спектр 3

Информация			
Напряжение (кВ): 20.00			
Сумма %: 100.00			
Элемент	Инт.	С %	
Fe	K 21307	100.00	
Fe	L -3	0.00	

Спектр 1

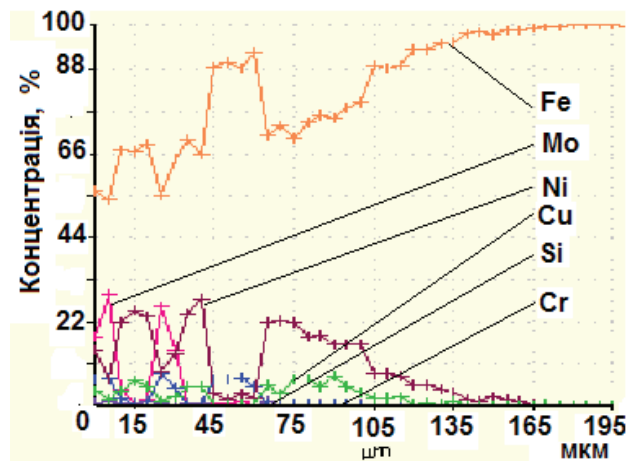


Рис. 4. Розподіл елементів на межі залізо – СФС після їх взаємодії за температури 1100 °С і часу ізотермічної витримки 10 хв

Информация			
Напряжение (кВ): 20.00			
Сумма %: 100.00			
Элемент	Инт.	С %	
Si	K 262	0.56	
Cr	K 458	0.29	
Cr	L -7	0.00	
Fe	K 16020	82.06	
Fe	L -10	0.00	
Ni	K 1569	13.69	
Ni	L -5	0.00	
Cu	K 319	3.40	
Cu	L -25	0.00	

Спектр 2

Як видно з рисунків, розплав СФС і залізо взаємодіють, і в межах контакту між ними утворюються нові фазові складники-прошарки,

ширина яких змінюється залежно від температури та часу ізотермічної витримки. У межах перехідної зони змінюється вміст елементів, а поблизу перехідних зон у СФС суттєво змінюється вміст хрому та нікелю. Водночас у залізі їх вміст, а також вміст кремнію та міді, збільшується. Останнє свідчить про те, що елементи, що входять до складу СФС, дифундують у залізо. Збільшення часу та температури взаємодії сприяє утворенню ширших проміжних прошарків на межі залізо – СФС із боку заліза, що узгоджується з наявними уявленнями про те, що розчинність високолегованих сплавів, до яких можна зарахувати СФС, більша, ніж у низьколегованих сплавів.

Наведені на рис. 3–4 мікроструктури свідчать про утворення широкої зони взаємодії, що пов'язано зі здатністю матеріалів взаємодіяти між собою, яка в свою чергу залежить від хімічної активності компонентів, і яку кількісно можна оцінити за вільною енергією хімічної реакції. А якщо реагуючі речовини перебувають не в чистому вигляді, а в розчиненому стані, то їх здатність взаємодіяти чи хімічна спорідненість додатково визначається їх концентрацією в розчині. Так, розчинність металів і сплавів у сплавах зменшується зі збільшенням ступеня легуваності останніх.

Одним із найважливіших факторів, що визначають процес взаємодії між сплавами на основі заліза з різним вмістом легуючих елементів, є дифузія. Як відомо, дифузійні процеси відбуваються тим швидше, чим сильніше природа елемента, що дифундує, відрізняється від природи розчинника. Це можна пояснити тим, що спотворення силових полів у кристалі поблизу атома розчиненого елемента тим сильніше, чим більше природа елемента відрізняється від природи розчинника. Відбувається вирівнювання концентрації між більш легованим СФС і залізом, у якому в початковому стані немає легувальних елементів.

Як зазначено вище, під час взаємодії СФС на основі заліза з залізом і його сплавами змінюється мікроструктура з утворенням перехідного шару. Самофлюсівний сплав на основі заліза має

евтектичну структуру [14], яка складається переважно з аустеніту, легованого нікелем, хромом, вуглецем, кремнієм, і карбоборидів типу MeB_2 , які можна ідентифікувати як $(Fe, Ni, Cr, Si)_2(B, C)$.

Під час взаємодії евтектичні структури розчиняються з утворенням світлої феритної фази, що є твердим розчином заліза і легуючих елементів із СФС, – це узгоджується з уявленнями І.І. Корнілова, який визначив сприятливу зону розчинності у межах 15 % (тобто приблизно 0,38 E) відхилень від атомного діаметра α -заліза. Отже, у фериті розчиняються кремній, нікель, хром, що підтверджується хімічним аналізом перехідного шару та результатами металографічних досліджень мікроструктур.

Легуючі елементи, розчиняючись у фериті, змінюють його властивості: підвищують корозійну стійкість, твердість, межу міцності та текучості, тобто опір пластичній деформації, а також опір в'язкому руйнуванню.

Виходячи з результатів дослідження процесів змочування та взаємодії розплаву СФС із залізом та його сплавами можна зробити висновок, що СФС можна застосовувати як джерело легувальних елементів при отриманні порошкових виробів на основі заліза. Водночас результати досліджень показують, що оптимальні технологічні режими (температура та час спікання) повинні бути в межах 1200–1250 °C за ізотермічної витримки понад 40 хв. У цьому разі відбувається повне змочування розплавом СФС заліза та суттєва дифузія легувальних елементів із СФС у залізо. Час витримки може змінюватись залежно від виду та вмісту легувальних елементів.

Як показано в роботах [15], [16], одним із перспективних матеріалів для отримання порошкових матеріалів на основі заліза для виробів спеціального призначення є сплав заліза легованого нікелем, молібденом, тому вивчались умови отримання порошкових матеріалів із заліза, легованого нікелем, хромом, вуглецем, міддю. Як вихідні матеріали використовували порошки карбонільного заліза, а як джерело легувальних елементів – порошок СФС. Їхні характеристики наведено в табл. 1.

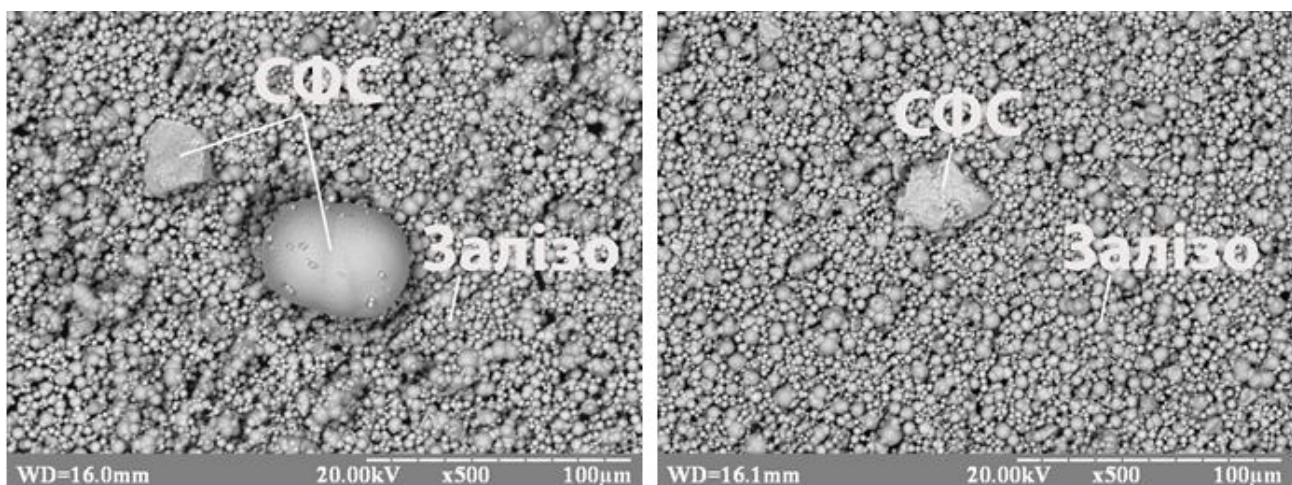
Таблиця 1. Характеристики вихідних порошків

Порошок	Хімічний склад, мас.%								Середній розмір частинок, мкм
	Fe	Si	B	Cr	Cu	P	C	Ni	
СФС	< 5	2,2	2,9	8	< 6	0,6	0,85	74,75	–
Залізо	99,9	0,05	–	–	–	–	0,05	–	< 15
Сплав Fe + 5 % СФС	95	0,11	0,145	0,4	0,3	0,03	0,042	3,723	–

Як видно з таблиці, розмір частинок порошку СФС значно перевищує розмір порошку заліза. Останнє є недоліком таких матеріалів, оскільки під час змішування площа контакту між ними мала, тож процеси гомогенізації матеріалу під час спікання уповільнюються. З урахуванням цього вивчався вплив розміру частинок вихідних порошків на процеси отримання матеріалів і, як наслідок, його кінцеві властивості. Збільшення контактної поверхні між частинками проводили в процесі змішування вихідної шихти з одночасним її подрібненням у планетарному млині. За цих обставин передбачали, що подрібнюватись буде насамперед порошок СФС, який має високу твердість і певну крихкість, що відповідає вимогам подрібнення матеріалів у планетарному млині. Вивчався вплив часу розмелювання на характеристики порошкових сумішей і виробів із них. Час розмелювання складав 0,5, 1, 2, 3 та 4 хв. Досліджено морфологію отримуваних порошків. Встановлено (рис. 5), що зі збільшенням часу розмелювання розмір частинок порошку заліза практично не змінюється, а частинок СФС – зменшується і за часу 4 хв стає практично сумірним із частинками порошку заліза (рис. 5, б). В отримуваних сумішах, особливо за розмелювання протягом 1 хв є частинки СФС із розміром до 50 мкм.

Досліджено процес ущільнення порошкових сумішей, отриманих за різного часу змішування–розмелювання. Пресування проведено в циліндричних пресформах діаметром 10 мм

за тиску пресування 400, 500, 600 і 700 МПа. Встановлено, що за всіх тисків пресування порошки вихідних сумішей мають низьку формуваність, яка зменшується для сумішей зі збільшення часу розмелювання–змішування, особливо за часу 3 та 4 хв. Такий характер ущільнення узгоджується з сучасними уявленнями про процеси ущільнення порошкових матеріалів. Відомо, що формуваність порошків за інших рівних умов залежить від якості контактів між частинками порошків, підпорядкованій площі контактів, процесам схоплювання, зварювання та ін. [11]. Найповніше ці процеси помітні під час ущільнення пластичних матеріалів. За наявності твердих і крихких матеріалів площа контакту між частинками погіршуватиметься (зменшуватиметься), бо в цьому разі немає пластичної деформації та відбувається лише точковий контакт. У нашому випадку зниження формуваності пресовок із порошкових сумішей, отриманих за часу розмелювання 3–4 хв, можна пояснити збільшенням питомої поверхні порошків СФС через зменшення їх розміру з підвищенням часу розмелювання. (рис. 6). Збільшення питомої поверхні порошків СФС запобігає утворенню якісного контакту між частинками порошку заліза та, як наслідок, зменшує формуваність. Тож для пресування порошкових сумішей залізо–СФС для підвищення їх формуваності необхідно використовувати зв'язки, які підвищують міцність контактів між частинками.



а

б

Рис. 5. Морфологія частинок порошкових сумішей Fe–СФС після розмелювання–змішування протягом різного часу; а – ... хв, б – 4 хв

Наявні зв'язки з погляду їх технологічності та можливого внесення домішок у матеріал проаналізовано в статтях [6], [7]. Нами як зв'язку використано 2-відсотковий розчин полівінілового спирту у воді, який уводили в суміш вихідних порошків у кількості 1 об.%. Вивчення процесу пресування таких сумішей (рис. 6) показало, що вони мають задовільну формуваність. Щільність пресовок залежить від тиску пресування та часу розмелювання—змішування вихідних матеріалів. Отримані результати узгоджуються з сучасними уявленнями про вплив тиску, складу та властивостей вихідних порошкових сумішей. Оптимальним тиском пресування слід вважати 600 МПа.

Слід зауважити, що щільність пресовок, отриманих за оптимального тиску, дещо зменшується зі збільшенням часу розмелювання (рис. 6, 1). Останнє можна пояснити тим, що в цьому разі відбувається нагартування матеріалу та водночас зменшення ступеня пластичної деформації, яка переважно лежить в основі ущільнення досліджуваного матеріалу. Іншою причиною зменшення ступеня ущільнення може бути блокування пластичної деформації в зоні контакту між частинками заліза дисперсними частинками твердого СФС, кількість яких збільшується зі збільшенням часу розмелювання.

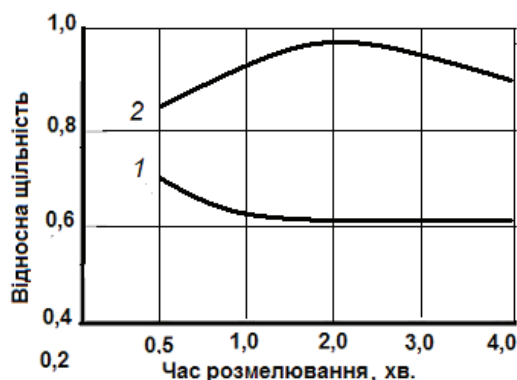


Рис. 6. Залежність відносної щільності від часу розмелювання: 1— після пресування; 2 — після спікання

Вивчалась також структура та деякі властивості матеріалів, отриманих з вихідних шихт, одержаних за різних умов. Зразки пресували за встановленим у роботі оптимальним тиском, а потім спікали в печі за температури 1250 °С із витримкою 80 хв задля підвищення щільності та формування заданих властивостей. Швидкість нагрівання становила 5 °С/хв. Такі умови, як було зазначено вище, найповніше сприяють отриманню щільних виробів і проход-

женню процесів сплавоутворення та гомогенізації матеріалів на основі заліза з використанням СФС як джерела легувальних елементів. Зразки, спечені за таких умов, мають щільність, яка змінюється залежно від часу розмелювання—змішування вихідних порошків у межах 5–10 %. Спостерігалась екстремальна залежність щільності матеріалу після спікання від часу розмелювання вихідної шихти (рис. 6, 2).

Характер цієї залежності можна пояснити таким чином. Відносно низька щільність матеріалу, виготовленого з шихти, отриманої змішуванням—розмелюванням протягом 0,5 хв, може бути зумовлена тим, що в такій шихті є частинки СФС відносно великого розміру (див. рис. 5), і у випадку їх плавлення через досконалу змочуваність, як показано в роботі [13], утворюються закриті пори, що спричинюють уповільнення процесу спікання. Зі збільшення часу розмелювання ступінь подрібнення частинок СФС збільшується, а вірогідність утворення закритих пор зменшується, що й сприяє утворенню матеріалу з практично стовідсотковою щільністю, отриманого з шихти розмелюванням протягом 2–3 хв. Зменшення щільності матеріалів з шихти, отриманої розмелюванням—змішуванням за часу понад 3 хв, може бути зумовлена деяким окисненням частинок порошків заліза. У цьому випадку за спікання відбувається взаємодія кремнію і бору, що входять до складу СФС, із утворенням нерозчинного боросилікатного шлаку [2], який розміщується на межі частинок заліза і в такий спосіб блокує процеси масоперенесення, які лежать в основі спікання [7]. Унаслідок цього щільність матеріалу, спеченого за інших рівних умов, зменшується.

Викладені міркування узгоджуються з результатами вивчення мікроструктури отриманих матеріалів (рис. 7).

Дослідження структури матеріалів після спікання показало, що матеріал має в основному полі зору практично стовідсоткову щільність. Поряд із цим зустрічаються фазові включення (пори, СФС) (рис. 7, а), причиною яких, як було зазначено вище, є наявність в шихті частинок СФС відносно великого розміру. Зі збільшенням часу змішування—розмелювання розмір частинок СФС зменшується, тож зменшується і вміст додаткових фазових включень, кількість яких у структурі матеріалу також зменшується (рис. 7, б, в), а за часу розмелювання 3 хв їх практично немає (рис. 7, г). Матеріали з такою структурою мають максимальну щільність після спікання.

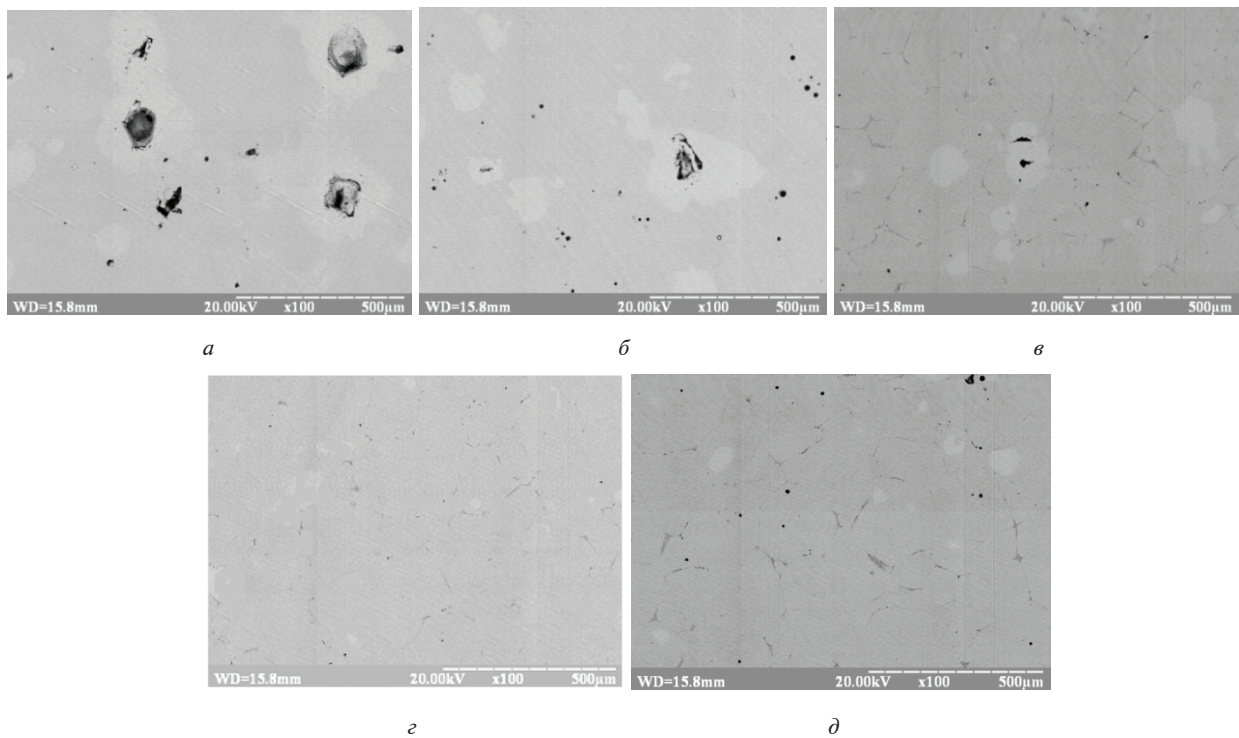
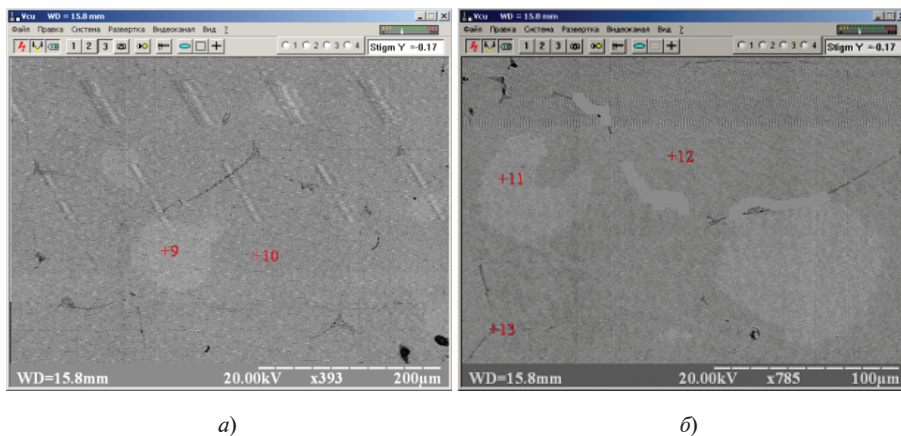


Рис. 7. Мікроструктура спеченого матеріалу з використанням шихти, отриманої змішуванням–розмелюванням порошків заліза та СФС протягом різного часу (хв): *a* – 0,5; *б* – 1; *в* – 2; *г* – 3; *д* – 4

У структурі матеріалів, отриманих із шихти змішуванням–розмелюванням протягом 4 хв теж з'являється фазовий складник на межі зерен заліза (рис. 8, *д*). Він може бути ідентифікований як боросилікатний шлак, який виникає за причин, викладених вище. Наявність його на межі фазових складових також може спричинити вповільнення сплавоутворення (гомогенізації).

Вивчення структури отриманих матеріалів свідчить, що за спікання СФС взаємодіє із залізом, що узгоджується з вищенаведеними отриманими в роботі результатами. Відбувається й пере-

важна дифузія складників СФС у залізо (рис. 8). За досліджуваних умов спікання розподіл елементів у кінцевому матеріалі дещо нерівномірний і залежить від гранулометричного складу вихідної шихти, який залежить (див. рис. 8) від вихідних матеріалів й умов змішування–розмелювання. Наявність легувальних елементів в отриманому матеріалі підтверджується результатами якісного аналізу розподілу елементів (рис. 9), який доводить наявність у ньому заданих елементів і рівномірність їх розподілу у сплаві.



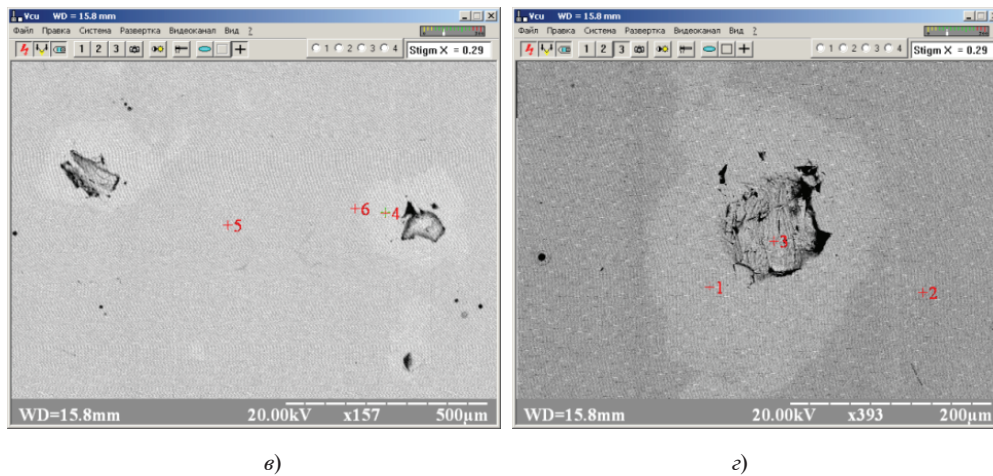


Рис. 8. Розподіл елементів у структурі матеріалу Fe–СФС, отриманого з використанням шихти, одержаної за різного часу змішування—розмелювання.

а) Час змішування 0,5 хв; 1 – Fe – 69,63; Ni – 26,73; Cr – 2,3; Si – 1,34; 2 – Fe – 97,73; Ni – 1,76; Cr – 0,32; Si – 0,19; 3 – Fe – 76,57; Ni – 17,48; Cr – 1,18; Si – 0,19.

б) Час змішування – 1 хв. 4 – Fe – 75,61; Ni – 21,36; Cr – 2,3; Si – 1,11; 5 – Fe – 98,47; Ni – 0,95; Cr – 0,34; Si – 0,24; 6 – Fe – 95,51; Ni – 3,62; Cr – 0,44; Si – 0,44

в) Час змішування – 3,0 хв. 11 – Fe – 91,91; Ni – 6,02; Cr – 1,41; Si – 0,67; 12 – Fe – 95,74; Ni – 3,01; Cr – 0,70; Si – 0,55; 13 – Fe – 96,93; Ni – 1,40; Cr – 1,47; Si – 0,20

г) Час змішування – 4,0 хв. 9 – Fe – 89,89; Ni – 9,10; Cr – 0,54; Si – 0,47; 10 – Fe – 96,45; Ni – 3,02; Cr – 0,11; Si – 0,42.

Для з'ясування впливу ступеня легування на властивості матеріалу вивзначалась твердість зразків після спікання залежно від умов отримання.

Залежність твердості від умов отримання вихідної шихти наведена на рис. 10.

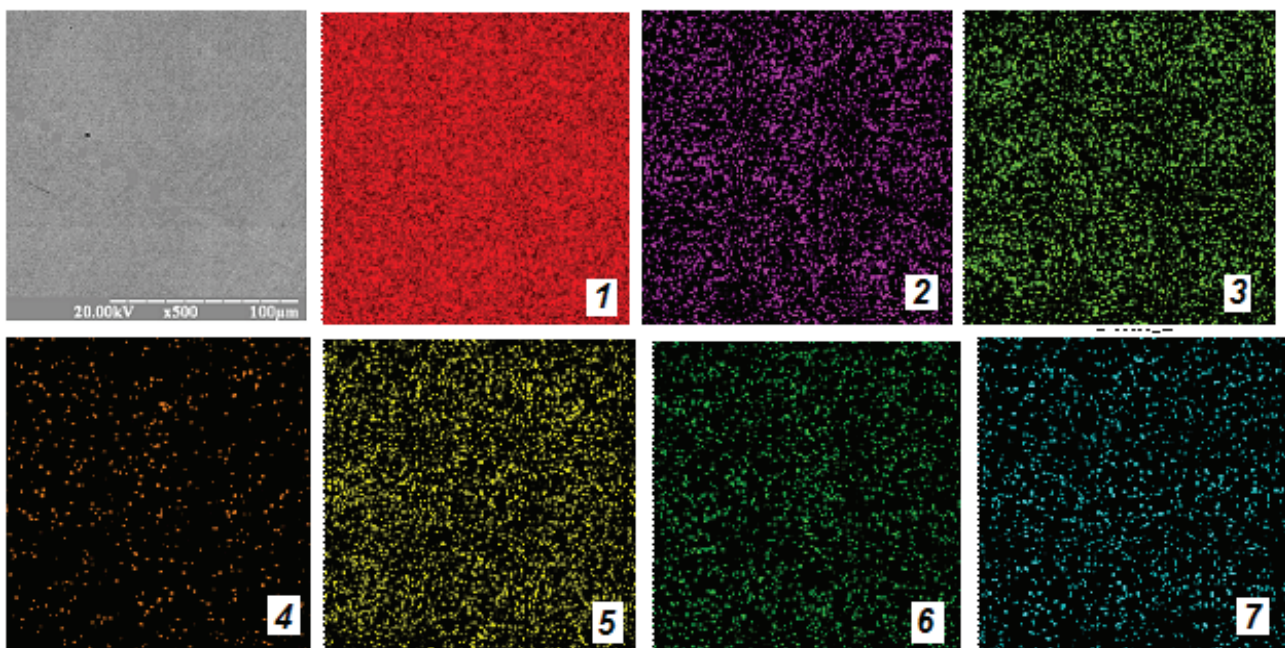


Рис. 9. Розподіл елементів у матеріалі Fe–СФС: 1 – Fe; 2 – Ni; 3 – Cr; 4 – Si; 5 – Cu; 6 – C; 7 – B

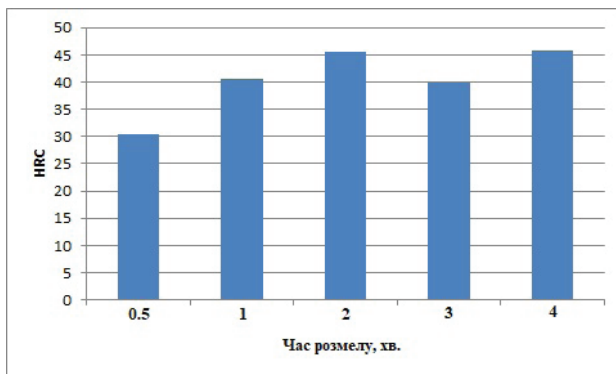


Рис. 10. Залежність твердості матеріалу від часу розмелювання–змішування вихідної суміші AN9–Fe під час його отримання

Як видно з рис. 10, на твердість матеріалу впливають умови отримання вихідної шихти змішуванням–розмелюванням. Отримані значення твердості більші, ніж у чистого заліза, що свідчить про проходження процесів легування під час спікання. При цьому має місце екстремальна залежність твердості кінцевих матеріалів від часу приготування шихти. Збільшення часу від 0,5 до 3 хв сприяє підвищенню твердості, і надалі вона дещо зменшується. Такий характер залежності можна пояснити, виходячи з того, що твердість залежить від хімічного та фазового складу, структури матеріалу, його гомогенності та ін. [12]. Якщо припустити, що хімічний склад матеріалу зразків, отриманих із різної шихти, однаковий, то залежність твердості від часу приготування вихідної шихти слід пов'язувати зі ступенем легування та гомогенністю отриманих матеріалів, які, як було встановлено вище, збільшуються зі збільшенням часу розмелювання–змішування під час отримання вихідної шихти. Деяке зменшення твердості зі збільшенням часу отримання вихідної шихти, більшому

за 3 хв, слід пов'язувати з появою у структурі матеріалу на межах зерен боросилікатного шлаку за вищевказаних причин. Він з одного боку є твердим, але дуже крихким матеріалом, а з іншого – погіршує міцність зв'язку між фазовими складниками та ступінь взаємодії між ними. Усі ці процеси призводять до зменшення твердості.

Висновки

Вивчено процеси сплавоутворення під час отримання порошкового матеріалу на основі заліза з умістом легувальних елементів нікелю, хрому, міді, силіцію, вуглецю, бору та інших у межах 0,5–5 мас.% із використанням як джерела легувальних елементів СФС, які є високолегованими сплавами та вміщують усі ці елементи. Показано, що перспективним методом отримання таких матеріалів є готування вихідної шихти з вихідних порошоків заліза та СФС, її пресування та спікання за наявності рідкої фази. Досліджено процеси змочування розплавами СФС заліза та взаємодії між ними. Встановлено оптимальні режими спікання: температура понад 1200 °С за часу ізотермічної витримки більш ніж 80 хв, які повинні забезпечувати практично стовідсоткову щільність матеріалу та його гомогенність.

Встановлено, що під час спікання відбувається легування заліза елементами, які входять до складу СФС, завдяки уніполярній дифузії. Показано, що на гомогенність кінцевого матеріалу впливає якість змішування–розмелювання. Зменшення розміру частинок порошоків вихідних матеріалів сприяє отриманню більшого ступня легування, гомогенності матеріалу та підвищенню його механічних характеристик.

У подальшому бажано встановити оптимальні режими спікання для отримання більш гомогенних сплавів.

References

- [1] A. M. Stepanchuk, *Theoretical and technological foundations for the production of powders of metals, alloys and refractory compounds*. Kyiv, Ukraine: NTUU “KPI”, 2007.
- [2] A. M. Stepanchuk and I. I. Bilyk, *Materials for spraying coatings. Textbook*. Kyiv, Ukraine: Tsentr uchbovoi literatury, 2016.
- [3] I. D. Radomyselskiy and S. G. Napara-Volgina, *Obtaining alloyed powders by diffusion method and their use*. Kyiv, USSR: Naukova dumka, 1988.
- [4] E. S. Nichiporenko, Yu. I. Naida, and A. B. Medvedovsky, *Sprayed metal powders*. Kyiv, USSR: Naukova dumka, 1980.
- [5] Yu. F. Ternovoy, G.A. Baglyuk, and S. S. Kudievsky, *Theoretical foundations of processes of spraying of metallic melts*. Zaporozhye, Ukraine: Vydavnytstvo Zaporizkoi derzhavnoi inzhenernoi akademii, 2008.
- [6] A. M. Stepanchuk, *Theory and technology of pressing powder materials. Textbook*. Kyiv, Ukraine: Tsentr uchbovoi literatury, 2016.
- [7] A. N. Stepanchuk, I. I. Bilyk, and P. A. Boyko, *Powder metallurgy technology*. Kyiv, USSR: Vyscha shkola, 1989.
- [8] A. N. Stepanchuk, A.A. Nechiporenko and N.S. Vdovichenko, “Obtaining and properties of self-fluxing alloys based on iron”, *Suchasni dosiahnennia v haluzi tekhniki ta zastosuvannia hazotermichnykh ta vakuumnykh pokryttiv*, pp. 78 – 84, 1991.

- [9] V. N. Eremenko, Ed., *Wettability and surface properties of melts and solids*. Kyiv, USSR: Naukova dumka, 1972.
- [10] S. I. Popil, *Surface phenomena in melts*. Moscow, Russia: Metalurhiia, 1994.
- [11] A. M. Stepanchuk, O. A. Demidenko and L. M. Lopushanska, "Wetting and interaction of melts of self-fluxing alloys of iron and its alloys", In *Proc. of the international scientific and technical conference on Materials for work in extreme conditions – 6'03*, 2016, pp. 106–109.
- [12] V. N. Zaplatin, Yu. I. Sapozhnikov and A.V. Dubov, *Fundamentals of materials science (metalworking): a textbook for students of middle prof. education institutions, 8th ed.* Moscow, Russia: Vydavnychiy tsentr "Akademiia", 2017.
- [13] O.A. Demydenko and A.M. Stepanchuk, "Influence of composition and technological factors of obtaining compositional materials of iron-self-flusive alloy on physico-mechanical characteristics", *Materials Science and Technology. European Science*, vol. 2, pp. 126–131, 2020.
- [14] A. M. Stepanchuk, O. I. Goncharuk, I.V. Goltvenko and M.A. Sklyarov, "Structure and some properties of self-fluxing alloys based on iron and coatings from them", "*Naukovi notatky*" LGTU, no. 13, pp. 319 – 334, 2003.
- [15] S. V. Zavadiuk, P. I. Loboda, T. O. Soloviova, I. Iu. Trosnikova and O. P. Karasevska, "Fracture Features of Low-Alloy Steel Produced by Metal Injection Molding", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 59, pp. 641–650, 2021. doi: 10.1007/s11106-021-00199-0
- [16] S.V. Zavadiuk, P.I. Loboda, T.O. Soloviova, I.Iu. Trosnikova and O.P. Karasevska, "Optimization of the Sintering Parameters for Materials Manufactured by Powder Injection Molding", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 59, pp. 22–28, 2020. doi: 10.1007/s11106-020-00134-9.
- [17] V.V. Skorokhod and S.M. Solonin. *Physical and metallurgical foundations of sintering powders*. Moscow, USSR: Metalurhiia, 1984.

D.O. Remizov, A.M. Stepanchuk, T.O. Soloviova, P.I. Loboda, S.V. Zavadiuk

THE USE OF SELF-FLUXING ALLOYS AS A SOURCE OF ALLOYING ELEMENTS IN PRODUCING POWDER PRODUCTS OF CONSTRUCTION PURPOSE FROM LOW-ALLOYED IRON

Background. One of the problems in the production of powder structural materials based on iron alloyed with a small amount of alloying elements (0.5 - 5.0 wt.%) is obtaining a homogeneous alloy in the final material. The distribution uniformity of the alloying elements largely determines the final properties of the material. The use of a mixture of powders constituting the alloy to obtain such alloys, in many cases, does not solve the problem of obtaining homogeneous alloys. Promising in this respect is the use of alloy powders containing alloying elements as sources of alloying elements.

Objective. The purpose of the paper is to study the formation regularities of the material's structure and properties based on iron alloys obtained using self-fluxing alloys (SFA) as a source of alloying elements.

Methods. To solve the problem posed in the work, the methods of mixing-grinding in planetary mills, the study of the processes of wetting with SFA iron melts and the interaction between them by the method of a lying drop, scanning microscopy for studying the structure of materials and the distribution of elements in them, measuring mechanical properties (hardness) were used.

Results. The principles of determining the optimal conditions for obtaining materials - grinding-mixing time (4 min.), compacting pressure of the original workpieces (600 MPa), sintering temperature (1200 °C), sintering time (more than 80 min.) were established. Their use contributes to the production of products with almost one hundred percent material density and a high degree of homogeneity.

Conclusions. As a result of the work carried out, it was found that the use of SFA as alloying elements sources and the preparation of the initial mixture by grinding-mixing methods in a planetary mill promotes the production of materials with a high degree of homogeneity due to the intensification of homogenization and sintering processes and, as a consequence, an increase in their mechanical characteristics.

Keywords: iron, alloying elements, grinding, pressing, sintering, material structure, hardness.

Рекомендована Радою
інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
11 листопада 2021 року

Прийнята до публікації
14 лютого 2022 року