УДК 669.018:621.791.92:543:669.719

І.Е. Скідін¹, ст. викладач, e-mail: skidina1979@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3247-473X>**Б.Ф. Белов²**, канд. техн. наук, e-mail: belosvet100@mail.ru**О.С. Воденнікова³**, канд. техн. наук, доц., e-mail: oksana_vodennikova@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0496-5435>**С.А. Воденніков⁴**, д-р техн. наук, проф., e-mail: s_vodennikov@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5563-5244>**Л.Н. Сaitгареев¹**, канд. техн. наук, доц., e-mail: saitgareev.levan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6841-3202>**Д.Ю. Бабошко¹**, канд. техн. наук, ст. викладач, e-mail: metall.babochko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2332-4721>¹Криворізький національний університет (Кривий Ріг, Україна)²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України (Київ, Україна)³Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)⁴Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

Аналіз структурно-хімічного стану формування шару термітного сплаву на сталевій підкладці самопоширюваним високотемпературним синтезом

Проаналізовано структурно-хімічний стан формування шару термітного сплаву на основі хрому та на основі заліза на сталевій підкладці, отриманого за допомогою самопоширюваного високотемпературного синтезу. Самопоширюваний високотемпературний синтез полягає у протіканні сильної екзотермічної реакції (реакції горіння) суміші, процес характеризується високою температурою ($\approx 3000^\circ\text{C}$) і великою швидкістю поширення фронту горіння (0,5–15 см/с). В результаті самопоширюваного високотемпературного синтезу відбувається відновлення заліза з оксидів і розплавлення тонкодисперсних компонентів шихти.

На основі стохастичного аналізу матеріального балансу хімічних реакцій вихідних компонентів шихти (сталеві окалини, порошку алюмінію, карбюризатора для науглецювання, залізного порошку або порошку хрому) представлено механізм утворення металевої, шлакової та газової фаз при самопоширюваному високотемпературному синтезі.

Показано, що в процесі формування шару термітного сплаву на сталевій підкладці самопоширюваним високотемпературним синтезом, в структурі термітного сплаву утворюються неметалеві включення (так звані корундові центри, які є продуктом реакції оксиду заліза з алюмінієм), які створюють ефект інокулюючого модифікування термітного сплаву та впливають на зародження карбідів хрому та карбідів заліза. Дане твердження знайшло підтвердження в металографічних дослідженнях зразків термітного сплаву на основі заліза та зразків термітного сплаву на основі хрому, які показали, що макроструктура сформованого шару представлена ферито-перлітною матрицею, що містить цементит або залізо-хромовий цементит у кількості 83,0 % і неметалеві включення у вигляді глинозему у кількості 17,0 %.

Встановлено, що мікротвердість зразків із сформованого шару термітного сплаву, отриманого з шихти на основі хрому, в 1,3 рази вище ніж мікротвердість зразків, отриманих з шихти на основі заліза.

Ключові слова: самопоширюваний високотемпературний синтез, алюмотермічні реакції, сформований шар, структурно-хімічний стан, термітний сплав.

Вступ. На сьогодні алюмінотермічний процес, який реалізується при горінні термітної суміші порошоків алюмінію та оксиду заліза і призводить до отримання так званого термітного заліза, широко використовується при зварюванні рейок, сталевих труб, металевих конструкцій, для отримання литого металу, лігатур, феросплавів, вогнетривів, виправленні дефектів лиття, нанесення зносостійких покриттів і для інших цілей [1].

Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС) [2–4] для отримання рідкого термітного сплаву поступово стає все більш перспективним та може стати економічно доцільною технологією виробництва біметалевих виливків. Особлива увага приділяється механізму формування структури та утворення продуктів в самопоширюваних термітних реакціях [5–7]. Для отримання щільного СВС-матеріалу з високими фізико-механічними характе-

Вихідний склад компонентів шихти

Склад шихтових матеріалів, кг						
	Fe ₂ O ₃	Fe	Cr	Al	C	Σ
Шихта № 1	100,0	45,6	–	30,0	8,9	184,5
Шихта № 2	100,0	–	16,6	30,0	6,3	152,9

ристиками необхідно враховувати закономірності горіння реакційної суміші, формування хімічного і фазового складів кінцевого продукту, режим кристалізації сплаву [8].

Важливим завданням СВС-процесу є отримання структури термітних сплавів з карбідами металів. Метод ґрунтується на використанні теплоти від реакції горіння алюмотермітної суміші для розплавлення порошків шихти з легуючими елементами і отримання рівнорозподіленої структури на основі карбідів металів. З основних двох елементів структури – карбідів і металевої основи утворюється висока зносостійкість та міцність сплавів, що визначаються характеристиками головного структурного елементу – карбіду.

Постановка проблеми. Відомо, що ефективність СВС-процесу для утворення зносостійкої поверхні на деталях сталевих виробів при нанесенні термітного сплаву залежить від його структурно-хімічного стану. Однак механізм утворення зміцнюючих фаз мало досліджений і залишається дискусійним питанням.

При організації процесу синтезу сплавів використовуються «класичні» термітні реакції, що засновані на окисненні алюмінію і відновленні заліза [9]:

Для здійснення реакції між алюмінієм і оксидом заліза шихта повинна бути нагріта до температури 1573–1633 К [10].

На прикладі горіння залізо-алюмінієвого термітного сплаву у роботі [11] розглянуто термодинаміку реакції, що протікає, та встановлено закономірності горіння термітного сплаву.

Тому в підтвердження теорії утворення в структурі термітного сплаву неметалевих включень (корундових центрів), які впливають на зародження карбідів металів, при технології отримання синтезованого металу, на сьогодні особливо актуальне проведення аналізу матеріального балансу структурно-хімічних реакцій утворення оксидних та карбідних фаз [12] в структурі сформованого шару металу залежно від складу компонентів шихти при СВС-процесі.

Мета роботи. Проведення стохастичного аналізу структурно-хімічних реакцій утворення оксидних та карбідних фаз в структурі сформованого шару термітного сплаву залежно від складу компонентів шихти при СВС-процесі.

Об'єкт та методика дослідження. Для формування шару термітного сплаву на сталевій підкладці при СВС-процесі використовували у якості компонен-

тів шихти (табл. 1): сталеву окалину, порошок алюмінію марки ПА-2 (ГОСТ 6058-73), порошок заліза марки ПЖРВ 2.300.28 (ГОСТ 9849-86), порошок хрому марки ПХА (ГОСТ 14-00186482-051-2005) та карбюратор для науглецювання у вигляді модифікатора марки МК91А.

Хімічний склад вихідних компонентів шихти та продуктів алюмотермічних реакцій визначали за допомогою спектрального аналізу.

Металографічні дослідження зразків шихти на основі хрому (шихта № 2) з травленням та без травлення проводили на оптичному горизонтальному мікроскопі марки МІМ-8. На нетравлених шліфах диференційовано мікротвердомером ПМТ-3 відповідно до методу Брінелля (ГОСТ 9450-75) визначили мікротвердість зразків з шихти № 1 та шихти № 2.

У якості сталевий підкладки (основи) використовували прокат товстостіловий з вуглецевої сталі марки СтЗсп.

Результати дослідження. При відсутності експериментальних даних про форму існування алюмінію і вуглецю в сформованому шарі термітного сплаву розглянуто наступний з можливих (імовірних) послідовний порядок реалізації структурно-хімічних реакцій:

При відомому складі в шихті № 1 окалини (100 кг) і алюмінію (30 кг), що відповідає 56,7 кг глинозему в шлаку $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{шл}}$, в якому міститься 26,71 кг кисню, тоді як в окалині знаходиться 30,0 кг кисню і 70,0 кг заліза. Отже, залишок кисню в кількості 3,3 кг свідчить про надмірну кількість в шлаку 11,0 кг $(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{шл}}$, який додатково відновлюється вуглецем за реакцією:

При заданій кількості окалини 11,0 кг в шлаку і вуглецю 8,9 кг в шихті утворюється 8,25 кг цементиту $(\text{Fe}_3\text{C})_{\text{Me}}$ і 5,8 кг $\text{CO} \uparrow$, на які витрачається вуглецю в кількості 0,55 кг на Fe_3C і 2,5 кг на CO , в сумі 3,05 кг. Вуглець залишковий шихти (5,85 кг) переходить в шлак, який розчиняється в металі і випаровується за реакцією:

В отриманому шарі сплаву міститься 4,41 кг вуглецю, отже, за реакцією (4) з урахуванням вуглецю в

цементиті в метал переходить 3,85 кг і 2,0 кг вино-
ситься в атмосферу. Вуглець в металі утворює додат-
ково цементит за реакцією:

Вуглець згідно з реакцією (5) в кількості 3,85 кг від-
повідає утворенню цементиту в кількості 57,85 кг, в
якому міститься 54,0 кг заліза.

Вміст заліза в сталевий окаліні становить 70,0 кг,
з яких відповідно до реакції (2) в шлак переходить
7,7 кг Fe з 11,0 кг Fe_2O_3 , отже, металевого заліза утво-
рюється 62,3 кг $(\text{Fe})_{\text{Me}}$. Загальна кількість заліза ста-
новить 70,0 $(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{ш}}$ + 45,6 $(\text{Fe})_{\text{ш}}$ = 115,6 кг.

Глинозем з шлаку частково переходить в метал
згідно з реакцією:

В отриманому шарі сплаву міститься 8,81 кг алюмінію,
що відповідає 16,7 кг глинозему в металі $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Me}}$ і 40,0 кг
 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{шл}}$ при утворенні 56,7 кг загального глинозему.

Сумарна реакція $\Sigma(2+6)$, яка визначає загальний
матеріальний баланс процесу формування шару тер-
мітного сплаву, має вигляд:

Маса шихтових матеріалів становить (кг):

$$\begin{aligned} M_{\text{ш}} = 100,0 (\text{окалина}) + 45,6 (\text{залізний порошок}) + \\ + 30,0 (\text{алюмінієвий порошок}) + 8,9 (\text{карбюризатор}) = \\ = 184,5 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Маса отриманого шару $M_{\text{Me}} \approx 98,0$ кг містить (кг):

$$15,2\text{Fe}_{\text{Me}} + 66,1(\text{Fe}_3\text{C})_{\text{Me}} + 16,7(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{Me}}$$

Маса металевого заліза $M_{\text{Fe}} = 15,2$ кг визначається
зі співвідношення:

$$98,0 - (66,1\text{Fe}_3\text{C} + 16,7\text{Al}_2\text{O}_3) = 15,2 \text{ кг.}$$

Маса заліза в газовій фазі становить:

$$M(\text{Fe})_{\text{газ}} = 115,6 - (15,2\text{Fe}_{\text{Me}} + 61,7\text{Fe з Fe}_3\text{C}) = 38,7 \text{ кг.}$$

Маса газової фази становить:

$$M_{\text{газ}} = 5,8\text{CO} + 2,0\text{C} + 38,7 \text{ Fe} = 46,5 \text{ кг.}$$

Ваговий склад продуктів процесу формування ша-
ру термітного сплаву включає суму маси шлаку, маси
газової фази та маси отриманого шару:

$$40,0 \text{ кг} + 46,5 \text{ кг} + 98,0 = 184,5 \text{ кг.}$$

Хімічний склад отриманого шару за експеримен-
тальними даними містить:

$$9,0 \% (8,8 \text{ кг})\text{Al} + 4,5 \% (4,4 \text{ кг})\text{C} + \text{залишок } 86,5 \% (84,8 \text{ кг}).$$

Залишок включає металеве залізо в кількості
15,2 кг Fe + 61,7Fe $(\text{Fe}_3\text{C}) = 76,9$ кг (78,5 %), решта
84,8 - 76,9 = 7,9 кг (8,0 %) є нев'язкою за рахунок не-
врахованих домішок шихтових матеріалів.

Ваговий склад шихтових матеріалів визначає мі-
кроструктуру сформованого шару, що складається
з ферито-перлітної матриці (83,0 %) з включеннями
глинозему (17,0 %).

При використанні шихти на основі хрому (шихта
№ 2) наведено ряд структурно-хімічних реакцій для
шихти на основі заліза (шихта № 1), доповнений ре-
акцією утворення карбідів хрому:

Стабільними фазами є хімічні сполуки при кратних
співвідношеннях стехіометричних коефіцієнтів [13].
Це відноситься і до карбідів хрому. Згідно з даними
роботи [14], відомі карбіди хрому з дробовими сте-
хіометричними коефіцієнтами Cr_{23}C_6 (94,3/5,7) % і
 Cr_2C_3 (91,0/9,0) % є твердими розчинами на базі Cr_4C
(94,5/5,5) % і Cr_2C (89,7/10,3) % відповідно.

В отриманому шарі утворюється комплексна кар-
бідна фаза згідно з реакцією:

яка містить, %мас.: 78,7Fe + 14,6Cr + 6,7C, що відпо-
відає складу цементиту, легованого хромом [15].

Розподіл хімічних елементів шихтових матеріалів
визначається за викладеною методикою з матеріаль-
ного балансу сумарної реакції (9):

Матеріальний баланс реакції (10) включає:

$$M_{\text{ш}} = 100,0(\text{Fe}_2\text{O}_3) + 30,0(\text{Al}) + 16,6(\text{Cr}) + 6,3(\text{C}) = 152,9 \text{ кг.}$$

$$M_{\text{Me}} = 20,8(\text{Fe}) + 18,0(\text{Fe}_3\text{C}) + 18,3(\text{Cr}_2\text{C}) + 11,8(\text{Al}_2\text{O}_3) = 68,9 \text{ кг.}$$

$$M_{\text{шл}} = 44,9 \text{ кг } (\text{Al}_2\text{O}_3).$$

$$M_{\text{газ}} = 5,75(\text{CO}) + 0,75(\text{C}) + 32,3(\text{Fe}) + 0,3(\text{Cr}) = 39,1 \text{ кг.}$$

$$\Sigma M = M_{\text{Me}} + M_{\text{шл}} + M_{\text{газ}} = 68,9 + 44,9 + 39,1 = 152,9 = M_{\text{ш}}.$$

Обговорення результатів. Експериментальні
та розрахункові дані про склад і кількість продуктів
алюмотермічної реакції при формуванні шару тер-
мітного сплаву на сталевій підкладці представлено
в табл. 2 та 3. Розподіл продуктів алюмотермічних
реакцій за складовими фазами представлено в
табл. 4.

Спектральний аналіз шихти на основі хрому (ших-
та № 2) показав, що отриманий шар містить, %мас.:
9,0Al + 23,6Cr + 4,5C + інше, що відповідає складу
зносостійкого хромистого чавуну (ЗЧХ).

Таблиця 2

Експериментальні дані про склад і кількість продуктів алюмотермічних реакцій в металевій фазі

Шихта	Металева фаза										
	кг					%мас.					
	Fe	Fe ₃ C	Cr ₂ C	Al ₂ O ₃	Σ	Fe	Cr	Al	C	Залишок	Σ
Шихта № 1	15,2	66,1	–	16,7	98,0	78,5	–	9,0	4,5	8,0	100,0
Шихта № 2	20,8	18,0	18,3	11,8	68,9	54,6	23,6	9,0	4,5	8,3	100,0

Таблиця 3

Розрахункові дані про склад і кількість продуктів алюмотермічних реакцій в газовій та шлаковій фазах

Шихта	Шлакова фаза, кг	Газова фаза, кг				
	Al ₂ O ₃	CO	C	Cr	Fe	Σ
Шихта № 1	40,0	5,8	2,0	–	38,7	46,5
Шихта № 2	44,9	5,75	0,75	0,30	32,3	39,1

Таблиця 4

Розподіл продуктів алюмотермічних реакцій за складовими фазами

Шихта	Склад продуктів, %мас.		
	металева фаза	шлакова фаза	газова фаза
Шихта № 1	53,0	21,8	25,3
Шихта № 2	45,0	29,4	25,6

Таблиця 5

Мікротвердість зразків сформованого шару термітного сплаву

Шихта	Мікротвердість сформованого шару, МПа
Шихта № 1	–
зразок № 1	6260
зразок № 2	6050
зразок № 3	6010
Шихта № 2	–
зразок № 1	7740
зразок № 2	7765

а

б

Макроструктура шару термітного сплаву на основі хрому при СВС-процесі: а – зразок без травлення; б – зразок з травленням

Дослідження мікротвердості сформованого шару термітного сплаву показали на перевищення значення мікротвердості отриманого шару для шихти на основі хрому в 1,3 рази в порівнянні з шихтою на основі заліза (табл. 5). Причому у зразках № 2 та № 3 шихти на основі хрому мікротвердість отриманого шару була менше ніж у зразку № 1. Різниця твердості в досліджуваних зразках пояснюється відмінною швидкістю кристалізації сформованого шару термітного сплаву.

Металографічні дослідження підтвердили, що макроструктура сформованого шару шихти на основі хрому (шихта № 2) вміщує неметалеві включення у вигляді корунду (продукту реакції оксиду заліза з алюмінієм) (рисунки) та складається з ферито-перлітної матриці з включеннями цементиту, легованої хромом у кількості 83,0 %, і неметалевих включень глинозему у кількості 17,0 %. Неметалеві включення створюють ефект інокулюючого модифікування термітного сплаву та сприяють утворенню карбідів хрому.

Висновки

1. Представлено механізм утворення металевої, шлакової й газової фаз при СВС-процесі на основі стохастичного аналізу матеріального балансу хімічних реакцій вихідних компонентів шихти.
2. Встановлено, що зміцнюючими фазами сформованого шару залежно від складу шихти є:
  - для шихти на основі заліза – карбід заліза (цементит) у кількості 83 % та глинозем (корунд) у кількості 17,0 %;
  - для шихти на основі хрому – легований хромом цементит у кількості 52,9 % (містить 78,7 % Fe + 14,6 % Cr + 6,7 % C) та глинозем у кількості 17,0 %.
3. Показано, що макроструктура сформованого шару термітного сплаву представлена ферито-перлітною матрицею, що містить цементит або залізохромистий цементит у кількості 83,0 % і неметалеві включення (глинозем) у кількості 17,0 %.
4. Встановлено, що мікротвердість зразків із сформованого шару термітного сплаву, отриманого з шихти на основі хрому, в 1,3 рази вище ніж мікротвердість зразків, отриманих з шихти на основі заліза.

ЛІТЕРАТУРА

1. Яценко В.В. Горение гранулированной железоалюминиевой термитной смеси при получении железа и его композита с карбидом титана: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.17 / Сам. гос. техн. ун-т. Самара, 2011. 187 с.
2. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов; под науч. редакцией В.Н. Анциферова. М.: Машиностроение-1, 2007. 568 с.
3. Новиков Н.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Термодинамический анализ реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. В сб.: *Процессы горения в химической технологии и металлургии*. Черноголовка: ИС-МАН, 1975. С. 174–188.
4. Концепция развития СВС как области научно-технического прогресса: Мержанов А.Г. (ред.). Черноголовка: Территория, 2003. 368 с.
5. Orru' R., Simoncini B., Carta D., Cao G. On the mechanism of structure and product formation in self-propagating thermite reactions. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 1997. Vol. 6. P. 15–27.
6. Orru' R., Simoncini B., Virdis P.F., Cao G. Self-propagating thermite reactions: effect of alumina and silica in the starting mixture on the structure of the final products. *Metallurgical Science & Technology*. 1997. Vol. 15. No. 1. P. 31–38.
7. Orru' R., Simoncini B., Virdis P.F., Cao G. Mechanism of structure formation in self-propagating thermite reactions: the case of alumina as diluent. *Chemical Engineering Communication*. 1998. Vol. 163. P. 23–36.
8. Евтушенко А.Т. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез инструментальной стали. *Известия Томского политехнического института*. 2008. Т. 313. № 3. С. 100–104.
9. Жигуц Ю.Ю., Похмурський В.І., Скиба Ю.Ю., Легета Я.П. Матеріали синтезовані металотермією і СВС-процесами. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. 2004. Випуск 16. С. 93–103.
10. Малкин Б.В., Воробьев А.А. Термитная сварка. Москва: Издательство Министерства жилищно-коммунального хозяйства РСФСР, 1963. 104 с.
11. Яценко В.В., Амосов А.П., Самборук А.Р. Термодинамические исследования горения железоалюминиевого термита. *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. физ.-мат. науки*. 2011. № 2. С. 121–126.
12. Белов Б.Ф., Троцан А.И., Карликова Я.П. Структурно-химические основы процессов рафинирования железоуглеродистых расплавов: монография. Мариуполь: ПГТУ, 2018. 184 с.
13. Рэмсден Э.Н. Начала современной химии. Пер. с англ., Ленинград: Химия, 1989. 784 с.
14. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т.: Т. 1.; под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 992 с. ISBN 5-217-02688-X.
15. Банных О.А., Будберг П.Б., Алисова С.П. и др. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справочное издание. М.: Металлургия, 1986. 440 с.

Надійшла 28.09.2020

REFERENCES

1. Yatsenko, V.V. (2011). Combustion of granular iron-aluminum thermite mixture in the production of iron and its composite with titanium carbide. Candidate's thesis. Samara State Technical University, Samara, Russian Federation, 187 p. [in Russian].
2. Amosov, A.P., Borovinskaya, I.P., Merzhanov, A.G. (2007). Powder technology of self-propagating high-temperature synthesis of materials. Antsiferova, V.N. (Eds.). Moscow: Mashinostroenie-1, 568 p. [in Russian].
3. Novikov, N.P., Borovinskaya, I.P., Merzhanov A.G. (1975). Thermodynamic analysis of reactions of self-propagating high-temperature synthesis. *In collection: Combustion processes in chemical technology and metallurgy*. Chernogolovka: ISMAN, pp. 174–188 [in Russian].
4. Merzhanov, A.G. (Eds.). (2003). The concept of SHS development as an area of scientific and technological progress. Chernogolovka: Territoriya, 368 p. [in Russian].
5. Orru', R., Simoncini, B., Carta, D., Cao, G. (1997). On the mechanism of structure and product formation in self-propagating thermite reactions. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, vol. 6, pp. 15–27.
6. Orru', R., Simoncini, B., Virdis, P.F., Cao, G. (1997). Self-propagating thermite reactions: effect of alumina and silica in the starting mixture on the structure of the final products. *Metallurgical Science & Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 31–38.
7. Orru', R., Simoncini, B., Virdis, P.F., Cao, G. (1998). Mechanism of structure formation in self-propagating thermite reactions: the case of alumina as diluent. *Chemical Engineering Communication*, vol. 163, pp. 23–36.
8. Evtushenko, A.T. (2008). Self-propagating high-temperature synthesis of tool steel. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, vol. 313, no. 3, pp. 100–104 [in Russian].
9. Zhiguts, Yu.Yu., Pokhmursky, V.I., Skiba, Yu.Yu., Legeta Ya.P. (2004). Materials synthesized by metallothermy and SHS processes. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Ser. Physics*, iss. 16, pp. 93–103 [in Ukrainian].
10. Malkin, B.V., Vorobiev, A.A. (1963). Thermite welding. Moscow: Publishing House of the Ministry of Communal Services of the RSFSR, 104 p. [in Russian].
11. Yatsenko, V.V., Amosov, A.P., Samboruk, A.R. (2011). Thermodynamic studies of the combustion of iron-aluminum thermite. *Bulletin of Samara State Technical University. Ser. phys-mat. science*, no. 2, pp. 121–126 [in Russian].
12. Belov, B.F., Trotsan, A.I., Karlikova, Ya.P. (2018). Structurally chemical foundations of refining processes for iron-carbon melts: monograph. Mariupol: PGU, 184 p. [in Russian].
13. Remsden, E.N. (1989). The beginnings of modern chemistry. Transl. from English. Leningrad: Chemistry, 784 p. [in Russian].
14. Lyakishev, N.P. (Eds.). (1996). State diagrams of double metal systems: reference book: in 3 volumes, vol. 1. Moscow: Mashinostroenie, 992 p. [in Russian].
15. Bannykh, O.A., Budberg, P.B., Alisova, S.P. et al. (1986). Diagrams of state of double and multi-component systems based on iron: reference edition. Moscow: Metallurgiya, 440 p. [in Russian].

Received 28.09.2020

Summary

I.E. Skidin¹, Senior Lecturer, e-mail: skidina1979@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-3247-473X>

B.F. Belov², PhD (Engin.), e-mail: belosvet100@mail.ru

O.S. Vodennikova³, PhD (Engin.), Associate Professor,
 e-mail: oksana_vodennikova@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0496-5435>

S.A. Vodennikov⁴, Dr. Sci. (Engin.), Professor, e-mail: s_vodennikov@i.ua,
<https://orcid.org/0000-0002-5563-5244>

L.N. Saithareiev¹, PhD (Engin.), Associate Professor,
 e-mail: saitgareev.levan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6841-3202>

D.Yu. Baboshko¹, PhD (Engin.), Senior Lecturer,
 e-mail: metall.babochko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2332-4721>

¹Kryvyi Rih National University (Kryvyi Rih, Ukraine)

²Institut for Problems in Material Science of I.M. Frantsevich of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

³Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

⁴Zaporizhzhia Polytechnic National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

Analysis of the structural and chemical state of thermite alloy layer formation on a steel substrate by self-propagating high-temperature synthesis

The structural and chemical state of thermite alloy layer formation on the basis of chromium and on the basis of iron on a steel substrate received by means of self-propagating high-temperature synthesis is analyzed. High-temperature self-propagating synthesis covers a strong exothermic reaction of the mixture, i.e. combustion reaction; the process is characterized by high temperature ($\approx 3000^\circ\text{C}$) and high rate of propagation of the combustion front (0.5–15 cm/s). As a result of high-temperature self-propagating synthesis, iron is reduced from oxides and the fine components of the charge are melted.

Based on the stochastic analysis of the material balance of structural and chemical reactions of the initial components of the charge (steel scale, aluminum powder, carburetor for carburization, iron powder or chromium powder) the mechanism of formation of metal, slag and gas phases under alumina and thermo self-propagating high-temperature synthesis is presented. It is approved that in the process of forming thermite alloy layer on a steel substrate by high-temperature aluminothermy self-propagating synthesis, nonmetallic inclusions, so-called corundum centers, which are the product of the reaction of iron oxide with aluminum, are formed in the structure of the thermite alloy, chromium and iron carbides. This statement was confirmed by metallographic studies of samples of thermite alloy based on iron and samples of thermite alloy based on chromium, which showed that the macrostructure of the formed layer is represented by a ferrite and perlite matrix content, cemented or iron-chromium cementite in the amount of 83.0 % and nonmetallic inclusion in the form of alumina in the amount of 17.0 %. It was found that the microhardness of the samples from the formed layer of thermite alloy obtained from the mixture based on chromium is 1.3 times higher than the microhardness of the samples obtained from the mixture based on iron.

Keywords

Self-propagating high-temperature synthesis, aluminothermic reactions, formed layer, structural-chemical state, thermite alloy.