

III ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 669.046.564.001

Канд. техн. наук Б. Ф. Белов¹, д-р техн. наук А. И. Троцан¹,
канд. техн. наук И. Л. Бродецкий¹, канд. хим. наук Ф. С. Крейденко¹, В. С. Кобец²

¹Институт проблем материаловедения НАН Украины, г. Киев²ООО Фирма «Уникон», г. Донецк

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ШЛАКОВЫХ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ РАФИНИРОВАНИИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ РАСПЛАВОВ

Выполнен анализ структурно-химического состояния промежуточных фаз на полигональных диаграммах $FeO-SiO_2-CaO$ и $CaO-Al_2O_3-SiO_2$. Исследован механизм образования ковшевых шлаков и неметаллических включений при рафинировании железоуглеродистых расплавов присадочными материалами. Предложена технологическая схема ЭРПС-процесса с использованием плавильного шлака и бесфтористых ТШС.

Ключевые слова: шлак, структура, фазы, полигональная диаграмма состояния, рафинирование, расплав.

При ковшевой обработке сталей железоуглеродистый расплав доводят до марочного состава посредством обработки присадочными материалами, в том числе шлаковыми смесями, которые в процессах рафинирования образуют шлаковые и неметаллические включения в жидком металле. При этом существующие рафинировочные шлаки обладают невысокой адсорбционной емкостью по вредным примесям, что указывает на целесообразность совершенствования эффективности рафинирования [1, 2].

Процессы образования шлаков и неметаллических включений при рафинировании железоуглеродистых расплавов подчиняются правилу «С-тетраэдра», определяющему функциональную зависимость структурно-химических параметров жидких и твердых металлургических фаз: состав → структура → свойства → синтез. Правило «С-тетраэдра» сформулировано на основе феноменологической теории строения жидких и твердых металлургических фаз по модели гармонических структур вещества (теория МГС-фаз) [3].

Теория МГС-фаз основывается на комплексе методов физико-химических исследований, включающем: системный анализ (СХС-анализ) структурно-химического состояния жидких и твердых металла и шлака с помощью полигональных диаграмм состояния (ПДС), построенных новым графоаналитическим методом (ПДС-метод); наноструктурный анализ ионно-молекулярных комплексов (СИМ-комплексов), энергетические и геометрические параметры которых рассчитываются на основе радиально-орбитальной модели электронного строения атомов (РОМ-атом); стохастический анализ (СТС-анализ) механизмов шла-

кообразования и рафинирования при обработке железоуглеродистых расплавов присадочными материалами с помощью балансовых уравнений структурно-химических реакций.

Ниже приведен СХС-анализ полигональных диаграмм $FeO-SiO_2-CaO$ и $CaO-Al_2O_3-SiO_2$, позволяющий определить стехиометрический, химический и фазовый составы, температуры образования и плавления, области гомогенности твердых и жидких растворов и химических реакций образования плавильных и ковшевых шлаков.

Анализ структурно-химического состояния системы $FeO-SiO_2-CaO$

На рис. 1 представлена ПДС системы $FeO-SiO_2-CaO$, в таблице 1 приведена классификация промежуточных фаз переменного состава $nFeOmSiO_2kCaO$, на основе которой выполнен СХС-анализ тройной системы. В вершинах треугольника – исходные компоненты FeO (вюстит), SiO_2 (кремнезем), CaO (известь), на ребрах треугольника – бинарные системы: $FeO-SiO_2$, $FeO-CaO$, SiO_2-CaO . Двойные и тройные фазы условно обозначены трехзначными числами: первые цифры отвечают стехиометрическим коэффициентам для вюстита, вторые – кремнезема, третьи – извести.

Фигуративные точки бинарных систем отвечают ряду промежуточных фаз:

ПДС $FeO-SiO_2$: $FeO(100) \rightarrow 6FeOSiO_2(610) \rightarrow 4FeOSiO_2(410) \rightarrow 3FeOSiO_2(310, \text{Э}) \rightarrow 2FeOSiO_2(210, \text{ППФ}) \rightarrow 3FeO_2SiO_2(320, \text{Э}) \rightarrow FeOSiO_2(110) \rightarrow FeO_2SiO_2(120) \rightarrow FeO_3SiO_2(130, M_2) \rightarrow FeO_4SiO_2(140) \rightarrow FeO_6SiO_2(160, M) \rightarrow FeO_24SiO_2(1.24, M_1) \rightarrow SiO_2(010)$.

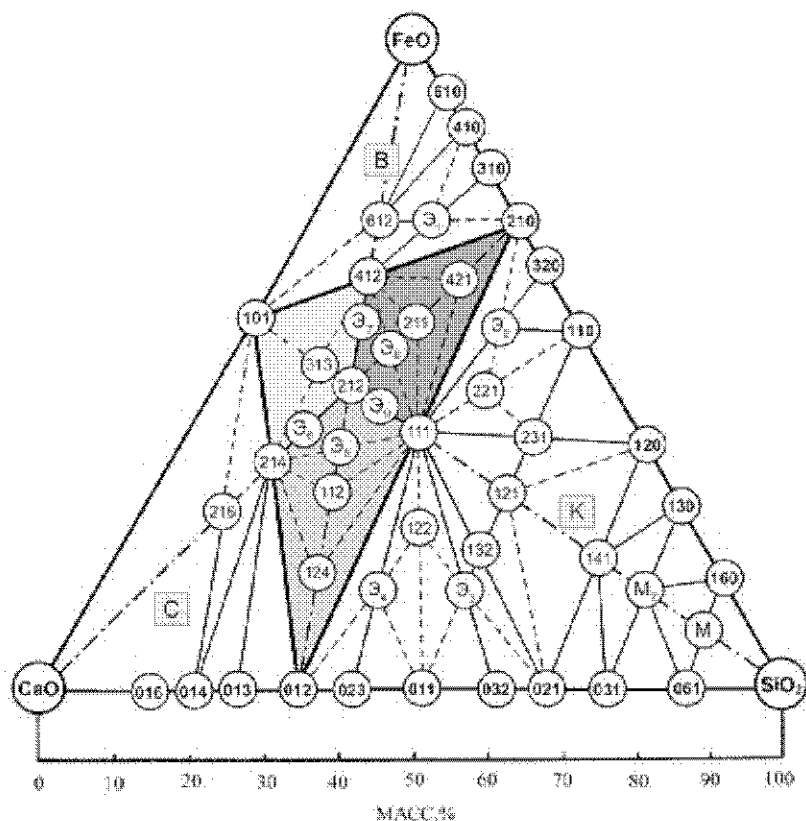


Рис. 1. Полигональная диаграмма системы FeO-SiO₂-CaO

ПДС SiO₂-CaO: SiO₂(010) → 24SiO₂CaO (0.24.1, M₁) → 6SiO₂CaO (061, M) → 3SiO₂CaO (031, M₂) → 2SiO₂CaO (021) → 3SiO₂2CaO (032, Э) → SiO₂CaO (011) → 2SiO₂3CaO (023, Э) → SiO₂2CaO (012, ППФ) → SiO₂3CaO (013) → SiO₂4CaO (014) → SiO₂6CaO (016) → CaO (001).

ПДС FeO-CaO: FeO(100) → FeOCaO (101, ППФ) → CaO(001),

где ППФ - первичная промежуточная фаза, Э-эвтектика, M, M₁, M₂ – монотектические точки купола несмешиваемости.

Триангуляция тройной диаграммы выделяет четыре области существования окислительных силикатных шлаков: шлаки на основе первичных промежуточных фаз бинарных систем – область ППФ, ограниченная внутренним треугольником 012-101-210; шлаки на основе вюститита – область 101-FeO-210; шлаки на основе кремнезема – область 210-SiO₂-012 и шлаки на основе извести – область 012-CaO-101.

Шлаки в области ППФ включают первичную тройную триангуляционную фазу 2FeOSiO₂CaO(212), разделяющую первичные шлаки на три подсистемы на базе первичных бинарных фаз: примыкающих к SiO₂2CaO на плоскости четырехугольника 012-214-212-111; FeOCaO на плоскости 101-412-212-214 и 2FeO SiO₂ на плоскости 210-111-212-412. Область ППФ содержит 13 тройных фаз: 212-436-112-111-211-634(Э₉), -312(Э₇), -412-124-313-214-213(Э₂), -323(Э₈),

из которых пограничными фазами являются 412 (FeO-область), 214 (CaO-область) и 111 (SiO₂-область). Область «FeO» – зона «B» содержит две фазы: 612, 10.3.2(Э₁) и 412; область «CaO» – зона «C» – две фазы: 2.1.6 и 2.1.4; область «SiO₂» – зона «K» – одиннадцать фаз: 1.12.1-1.6.1-1.4.1-1.2.1-2.3.1-2.2.1-4.3.1(Э₂)-1.2.2-1.3.2-1.4.3(Э₃)-1.3.4(Э₄).

Всего в системе FeO-SiO₂-CaO образуются 27 тройных фаз, тогда как на классической диаграмме – три: FeO2SiO₂2CaO (122) – железистый окерманит; FeOSiO₂CaO (111) – железистый монтчеллит (кирштейнит) и FeO2SiO₂CaO (121) – геденбергит [4]. Кроме того, приведенный химический состав тройных фаз на классической диаграмме, стехиометрический состав которых (по нашим определениям) отвечает формулам: FeOSiO₂2CaO (112), 12FeO3SiO₂2CaO (Э₁ 12.3.2), 3FeO2SiO₂CaO (3.2.1) и 2FeO2SiO₂CaO (221).

При заданной окисленности плавильных шлаков, содержащих до 30,0 % FeO, на тройной диаграмме FeO-SiO₂-CaO они располагаются в квазибинарной системе CaO-FeO3SiO₂ на базе волластонита FeO2SiO₂2CaO (23,7/39,5/36,7; B⁰ = 0,93), ранкинита – FeO3SiO₂4CaO (15,1/37,8/47,1; B⁰ = 1,24) белита – FeO2SiO₂4CaO (17,3/28,8/53,8; B⁰ = 1,87) и алита – 2FeOSiO₂4CaO (33,7/14,0/52,3; B⁰ = 3,73). Максимальной жидкоподвижностью обладают шлаки эвтектического состава на базе ранкинита, для высокой основности оптимальный состав шлаков отвечает FeO2SiO₂4CaO на базе белита.

Таблиця 1 – Классификация системы FeO-SiO₂-CaO

Химические формулы	Усл. обозн.	Химсостав, масс. %			В (CaO/SiO ₂)	М (CaO/SiO ₂ +Al ₂ O ₃)
		FeO	SiO ₂	CaO		
2FeOSiO ₂ 2CaO	2.1.2	45,6	19,0	35,4	1,87	4,27
4FeOSiO ₂ 2CaO	4.1.2	62,6	13,1	24,3	1,87	6,63
3FeOSiO ₂ 2CaO	3.1.2 (Э ₇)	55,7	15,5	29,9	1,87	0,41
2FeOSiO ₂ CaO	2.1.1	55,4	23,1	21,5	0,93	3,33
FeOSiO ₂ CaO	1.1.1	38,3	31,9	29,8	0,93	2,13
FeO2SiO ₂ 4CaO	1.2.4	17,3	28,8	53,8	1,87	2,47
2FeOSiO ₂ 4CaO	2.1.4	33,7	14,0	52,3	3,73	6,13
2FeOSiO ₂ 3CaO	2.1.3(Э ₆)	38,7	16,1	45,2	2,80	5,20
6FeO3SiO ₂ 4CaO	6.3.4(Э ₈)	51,7	21,5	26,2	1,24	3,64
FeOSiO ₂ 2CaO	1.1.2	29,5	24,6	45,9	1,87	3,07
4FeO3SiO ₂ 6CaO	4.3.6(Э ₅)	35,8	22,4	41,8	1,87	3,47
3FeO2SiO ₂ 3CaO	3.2.3(Э ₉)	42,9	23,8	33,3	1,4	3,2
3FeOSiO ₂ 3CaO	3.1.3	48,6	13,6	37,8	2,8	6,4
6FeOSiO ₂ 2CaO	6.1.2	71,5	10,0	18,5	1,87	9,0
10FeO3SiO ₂ 2CaO	10.3.2(Э ₁)	71,1	17,8	11,1	0,62	4,6
2FeOSiO ₂ 6CaO	2.1.6	26,7	11,1	62,2	5,6	8,0
4FeO3SiO ₂ CaO	4.3.1(Э ₂)	55,0	34,4	10,6	0,31	1,91
2FeO2SiO ₂ CaO	2.2.1	45,0	37,5	17,5	0,47	1,67
2FeO3SiO ₂ CaO	2.3.1	38,0	47,3	14,7	0,31	1,91
FeO3SiO ₂ 2CaO	1.3.2	19,8	49,4	30,8	0,62	1,02
FeO2SiO ₂ CaO	1.2.1	29,0	48,4	22,6	0,47	1,07
FeO4SiO ₂ 3CaO	1.4.3 (Э ₃)	15,3	51,0	35,7	0,70	1,0
FeO4SiO ₂ CaO	1.4.1 (М ₂)	19,6	65,2	15,2	0,23	0,53
FeO6SiO ₂ CaO	1.6.1	14,8	73,8	11,4	0,16	0,36
FeO12SiO ₂ CaO	1.12.1 (М)	8,5	84,9	6,6	0,08	0,18
FeO2SiO ₂ 2CaO	1.2.2	23,7	39,5	36,7	0,93	1,53
FeO3SiO ₂ 4CaO	1.3.4 (Э ₄)	15,1	37,8	47,1	1,24	1,64

Анализ структурно-химического состояния системы CaO-Al₂O₃-SiO₂

Системным определителем структурно-химического состояния шлаковых и неметаллических включений при ковшевой обработке является диаграмма состояния тройной системы CaO-Al₂O₃-SiO₂. На рис. 2 представлена ПДС CaO-Al₂O₃-SiO₂, построенная новым графоаналитическим методом на базе бинарных систем CaO-Al₂O₃, CaO-SiO₂, Al₂O₃-SiO₂.

Линии, соединяющие бинарные ПДФ, образуют внутренний треугольник 210-011-201, разделяющий общее концентрационное поле на три зоны у каждой вершины треугольника. Зона первичных алюмосиликатов кальция включает 15 промежуточных фаз 211→221→212→411→632→433→623432(Э₂)→412→613(Э₄)→311(Э₅)→111→122→423 (Э₃)→421(Э₁).

Зона глинозема включает три фазы: 261→231→121, зона извести – три фазы: 1211→811→611, зона кремнезема – 12 фаз: 2.1.72 (М₁)→2.1.18 (М)₁→2.1.9(М₂)→2.1.6→2.1.4→1.1.2→4.1.5(Э₇)→5.1.4(Э₈)→3.1.3. Здесь трехзначные числа условно обозначают стехиометрический состав тройных фаз: первая цифра – CaO, вторая – Al₂O₃, третья – SiO₂; Э – эвтектики, М – монотектики. ПДС тройной системы CaO-Al₂O₃-SiO₂ включает квазибинарную линейную систему 3CaO2Al₂O₃-3CaO2SiO₂, которая состоит из трех эвтектических фаз: высокоглиноземистая (Э₁) – 4CaO2Al₂O₃SiO₂ (45,9/41,8/12,3; V⁰ = 4,6), среднеглиноземистая (Э₅) – 3CaOAl₂O₃SiO₂ (50,9/30,9/18,2; V⁰ = 2,8) и низкоглиноземистая (Э₄) – 6CaOAl₂O₃3SiO₂ (54,4/16,5/29,1; V⁰ = 1,87). Оптимальный состав ковшевых рафинировочных шлаков, содержащих до 20,0 % глинозема,

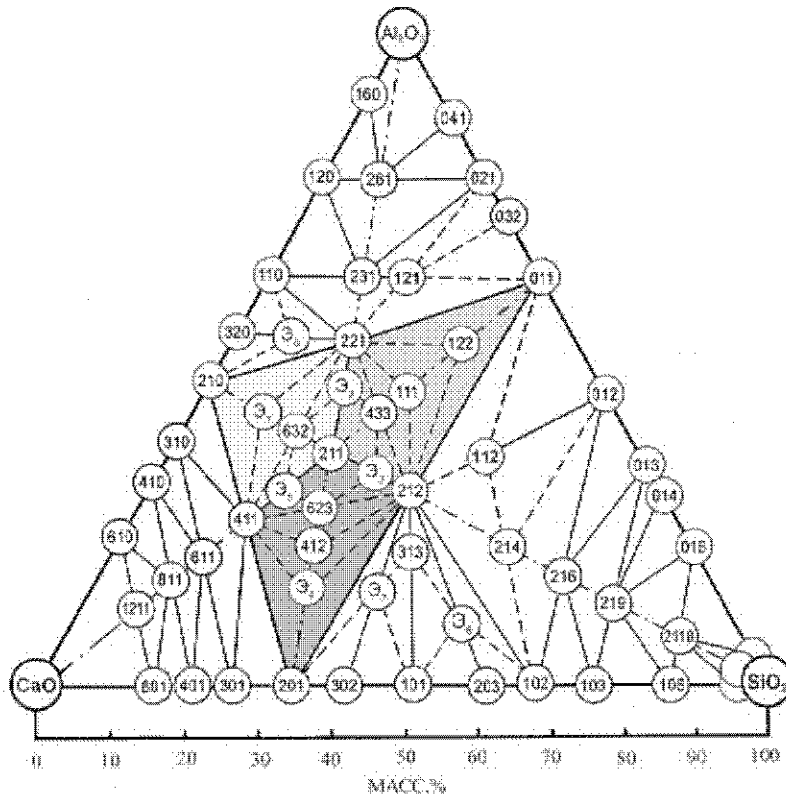


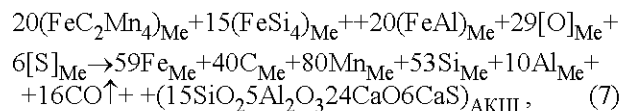
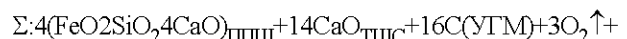
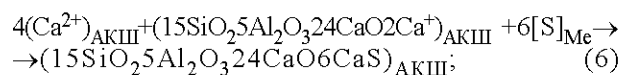
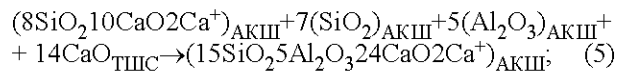
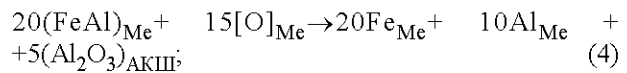
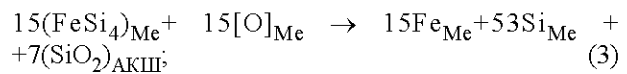
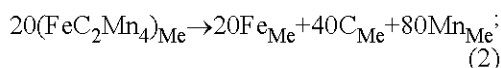
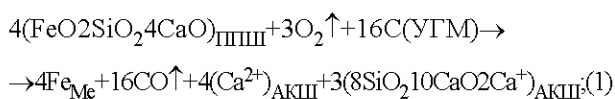
Рис. 2. Полигональная диаграмма состояния системы CaO-Al₂O₃-SiO₂

отвечает составу низкоглиноземистой эвтектики.

В таблице 2 представлены промежуточные фазы тройной системы стехиометрический и химический состав, основность, модуль шлака, температуры образования и плавления).

Технологическая модель рафинирования стали

Механизм рафинирования при ковшевой обработке стали и включает последовательный ряд структурно-химических реакций активирования и формирования попутного плавильного и ковшевого шлаков, раскисления, десульфурации и легирования жидкого металла. В качестве плавильного шлака, как уже отмечалось, служит стехиометрическая фаза FeO₂SiO₂4CaO на ПДС FeO-SiO₂-CaO, для ковшевых рафинировочных шлаков – 6CaOAl₂O₃3SiO₂ на ПДС CaO-Al₂O₃-SiO₂. К присадочным материалам относятся ТШС (известь), углеродистые материалы (УГМ), ферросилиций ФС65 (FeSi₄), ферромарганец ФМн70 (FeC₂Mn₄) и ферроалюминий ФА30 (FeAl). Последовательный ряд структурно-химических реакций рафинирования включает:



где ПШШ – попутный плавильный шлак, АКШ – активированный ковшевой шлак; FeC₂Mn₄, FeSi₄, FeAl – стехиометрические составы ферросплавов; химические реакции: 1 – активирование ПШШ + УГМ; 2 – легирование металла ФМн70; 3 – раскисление металла ФС65; 4 – раскисление металла ФА30; 5 – присадка ТШС+АКШ; 6 – десульфурация металла АКШ; 7 – реакция материального баланса.

Реакция материального баланса (7) описывает технологическую модель энергоресурсоприродосберегающего процесса (ЭРПС-процесса) рафинирования ста-

Таблиця 2 – Тройные фазы системы CaO-Al₂O₃-SiO₂

Стехиометрический состав	Химический состав, масс. %			Условные обозначения	В	М	Температура, °С	
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂				Образования	Плавления
2CaOAl ₂ O ₃ SiO ₂	40,9	37,2	21,9	2.1.1(ГН)	0,87	0,69	900	1600
2CaO2Al ₂ O ₃ SiO ₂	29,8	54,2	16,0	2.2.1	1,87	0,42	1100	1500
2CaOAl ₂ O ₃ 2SiO ₂	33,5	30,5	36,0	2.1.2	0,93	0,50	1000	1500
4CaOAl ₂ O ₃ SiO ₂	58,0	26,4	15,6	4.1.1	3,73	1,38	1200	1500
6CaO3Al ₂ O ₃ 2SiO ₂	44,1	40,2	15,7	6.3.2	2,8	0,79	1200	–
4CaO3Al ₂ O ₃ 3SiO ₂	31,5	43,1	25,4	4.3.3	1,24	0,46	1300	1300
6CaO2Al ₂ O ₃ 3SiO ₂	46,7	28,3	25,0	6.2.3	1,87	0,88	1250	1250
4CaO3Al ₂ O ₃ 2SiO ₂	34,5	47,1	18,4	4.3.2(Э ₂)	1,87	0,53	1300	1300
4CaOAl ₂ O ₃ 2SiO ₂	50,2	22,9	26,9	4.1.2	1,87	1,00	1050	1350
6CaOAl ₂ O ₃ 3SiO ₂	54,4	16,5	29,1	6.1.3(Э ₄)	1,87	1,20	1200	–
3CaOAl ₂ O ₃ SiO ₂	50,9	30,9	18,2	3.1.1(Э ₁)	2,8	1,04	1300	1300
CaOAl ₂ O ₃ SiO ₂	25,7	46,8	27,5	1.1.1	0,93	0,35	1100	1500
CaO2Al ₂ O ₃ 2SiO ₂	14,7	53,7	31,6	1.2.2	0,47	0,17	1400	–
4CaO2Al ₂ O ₃ 3SiO ₂	36,8	34,6	29,6	4.2.3(Э ₃)	1,24	0,58	1400	1400
4CaO2Al ₂ O ₃ SiO ₂	45,9	41,8	12,3	4.2.1(Э ₁)	4,67	0,60	1500	1500
2CaO6Al ₂ O ₃ SiO ₂	14,3	78,1	7,6	2.6.1	1,87	0,17	1500	1800
2CaO3Al ₂ O ₃ SiO ₂	23,4	64,0	12,6	2.3.1	1,87	0,30	1400	–
CaO2Al ₂ O ₃ SiO ₂	17,5	63,8	18,7	1.2.1(ГЛ)	0,93	0,21	н.д.	1550
2CaOAl ₂ O ₃ 72SiO ₂	2,5	2,2	95,3	2.1.72(М ₁)	0,03	0,02	1700	1700
2CaOAl ₂ O ₃ 18SiO ₂	8,7	7,9	83,4	2.1.18(М/М ^б)	0,10	0,09	1600	1700
2CaOAl ₂ O ₃ 9SiO ₂	14,9	13,5	71,6	2.1.9 (М ₂)	0,21	0,17	1700	1700
2CaOAl ₂ O ₃ 6SiO ₂	19,5	17,8	62,7	2.1.6	0,31	0,24	1475	1475
2CaOAl ₂ O ₃ 4SiO ₂	24,7	22,5	52,8	2.1.4	0,47	0,33	1300	–
CaOAl ₂ O ₃ 2SiO ₂	20,1	36,7	43,2	1.1.2 (АН)	0,47	0,25	н.д.	1265
4CaOAl ₂ O ₃ 5SiO ₂	35,8	16,3	47,9	4.1.5 (Э ₁)	0,75	0,55	1300	1300
5CaOAl ₂ O ₃ 4SiO ₂	45,0	16,4	38,6	5.1.4 (Э ₂)	1,17	0,82	1350	1350
3CaOAl ₂ O ₃ 3SiO ₂	37,3	22,7	40,0	3.1.3	0,93	0,60	н.д.	1000
12CaOAl ₂ O ₃ SiO ₂	84,7	9,6	5,7	12.1.1	14,9	5,5	1700	–
8CaOAl ₂ O ₃ SiO ₂	73,5	16,7	9,8	8.1.1	7,5	2,8	1900	1900
6CaOAl ₂ O ₃ SiO ₂	67,5	20,5	12,0	6.1.1	5,6	2,1	1400	–

Примечания: ГН – геленит; Э – эвтектики; ГЛ – глинозит; М – монотектики; АН – анортит.

ли, регламентирующую расходные коэффициенты присадочных материалов, состав и количество шлаковых и неметаллических фаз, а также химический состав металлического расплава.

Присадочные материалы для ковшевой обработки стали в количестве 2,64 кг/т шлакообразующих (1,66 кг/т ППШ + 0,78 кг/т ТШС (CaO) + 0,19 кг/т УГМ (C) и 10,2 кг/т ферросплавов (6 кг/т ФМн70+2,5 кг/т ФС65 + 1,66 кг/т ФА30) формируют рафинировочный шлак в количестве 3,2 кг/т, содержащий (масс. %) 28,2 SiO₂ + 16,0 Al₂O₃ + 42,2 CaO + 13,6 CaS с основностью V⁰ = 1,5 и адсорбционной емкостью (масс. %) 6,0A_с + 13,2 SiO₂ + 16,0 Al₂O₃ + 24,6 CaO + 13,6CaS. Металлический расплав, без учета химического состава полупродукта, содержит (масс.%): 0,05 C + 0,15 Si + 0,44 Mn + 0,03 Al, масса которого увеличивается на 3,3 кг/т Fe, уменьшается на 0,46 кг/т [O]_{Me} (0,046 %) и 0,192 кг/т [S]_{Me} (0,019 %). Присадка ферросплавов (ФС65, ФА30) формирует в количестве 0,93 кг/т заданный тип силлиманит-кварцитовых неметаллических включений стехиометрического состава 7SiO₂5Al₂O₃, которые

адсорбируются активированным шлаком с образованием покровного шлака в ковше.

Выводы

На основе теории МГС-фаз сформулировано правило «С-тетраэдра», регламентирующая функциональную зависимость структурно-химических параметров состав → структура → свойства → синтез жидких и твердых металлургических фаз. Выполнен анализ структурно-химического состояния промежуточных фаз на полигональных диаграммах состояния тройных систем FeO-SiO₂-CaO и CaO-Al₂O₃-SiO₂, являющихся системным определителем плавильных и ковшевых шлаков, соответственно. Исследован механизм образования ковшевых шлаков и неметаллических включений при рафинировании железоуглеродистых расплавов присадочными материалами и разработана технологическая модель ЭРПС-процесса с использованием попутного плавильного шлака и безфтористых ТШС.

Список литературы

1. Процессы шлакообразования и рафинирования жидкого полупродуктодута в конвертере и при ковшевой обработке стали / [Буга И. Д., Белов Б. Ф., Троцан А. И. и др.] // Процессы литья. – 2011. – №1. – С. 17–24.
2. Повышение эффективности рафинирования с использованием конвертерного шлака при ковшевой обработке стали / [Исаев О. Б., Кислица В. В., Троцан А. И. и др.] // Электротехнология. – 2011. – № 2. – С. 16–20.
3. Белов Б. Ф. Структуризация металлургических фаз в жидком и твердом состояниях / Б. Ф. Белов, А. И. Троцан, П. С. Харлашин // Изв. ВУЗов. ЧМ. – 2002. – № 4. – С. 70–75.
4. Торопов Н. А. Высокотемпературная химия силикатных и других окисных систем / Н. А. Торопов, Н. А. Борзакоский В. П. – М. : Изд-во АН СССР. – 1963. – 255 с.

Одержано 29.02.2012

Белов Б.Ф., Троцан А.И., Бродецкий Л.Л., Крейденко Ф.С., Кобець В.С. Механізм утворення шлакових і неметалічних включень при рафінуванні залізовуглецевих розплавів

Виконано аналіз структурно-хімічного стану проміжних фаз на полігональних діаграмах $FeO-SiO_2-CaO$ і $CaO-Al_2O_3-SiO_2$. Досліджено механізм утворення ківшових шлаків і неметалічних включень при рафінуванні залізовуглецевих розплавів присаджувальними матеріалами. Запропонована технологічна схема ЕРПС-процесу з використанням плавильного шлаку та безфтористих ТШС.

Ключові слова: шлак, структура, фази, полігональна діаграма стану, рафінування, розплав.

Belov B., Trotsan A., Brodetskiy, Kreydenko F., Kobets V. The mechanism of slag shots and nonmetallic inclusions formation under iron-carbon melts refining

The analysis of structural-chemical condition of intermediate phases on polygonal diagrams of state $FeO-SiO_2-CaO$ and $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ was done. The mechanism of ladle slag and nonmetallic inclusions formation under refining iron-carbon melts by filler materials is investigated. The technological scheme energy-resource-nature saving process with use of the melting slag and without the fluoric solid slag alloys is offered.

Key words: slag, structure, phases, polygonal diagram of state, refining, melt.

UDC 537.525.5

A. A. Lisenkov¹, V. P. Valuev², E. L. Sanchugov³

¹ Institute of problems of mechanical engineering of Russian Academy of Science Russian Federation, Saint-Petersburg

² Saint-Petersburg State Institute of Machine-Building (LMZ-VTUZ), Russian Federation, Saint-Petersburg

³ German Society for Material Science, FUN Leibniz University of Hanover, Germany, Hanover

RESEARCH OF THE VACUUM ARC DISCHARGE ON INTEGRALLY COLD CATHODE DURING COATING PROCESSES

The vacuum arc plasma source of extended design generating the directed belt plasma stream and operating in pulse mode was presented. The researches carried out gave additional information about development of the cathode spots of the vacuum arc discharge. It is found that the cathode spots' motion speed depends on the cathode temperature.

Key words: plasma, vacuum-arc discharge, cathode spot, coating.

The vacuum arc discharge is a self-maintained discharge developing in the cathode material vapor. The emission center of the discharge is a cathode spot with small dimensions of $10^{-6} \dots 10^{-3}$ m. For very short period of time, the temperature in the cathode spot exceeds the temperature of boiling, what results in the intensive evaporation of the cathode material [1–3].

The cathode spot includes an emitting zone and an adjacent collisionless layer of the spatial charge, where the cathode drop is localized and the energy is transmitted

to the ions. Amount of this energy is enough to heat the cathode to the temperature ensuring energy distribution of the free electrons in the cathode body and reproduction of required amount of the evaporable material.

Discharge combustion is impossible when the temperature in the cathode spot is below certain critical temperature, which is specified by thermophysical properties of the cathode material and electrical parameters of the circuitry: $U_{\text{power supply}} > U_{\text{cat}}, I_{\text{power supply}} > I_{\text{min}}$, where $U_{\text{power supply}}$ – supply voltage; U_{cat} – cathode drop; $I_{\text{power supply}}$ –