

УДК 669.15.198

Б. Ф. Белов, А. И. Троцан, Ф. С. Крейденко, О. С. Мисюра

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев

СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ДУПЛЕКС-СИСТЕМЫ СИЛИКАТЫ-СИЛИЦИДЫ КАЛЬЦИЯ

На основе полигональных диаграмм состояния $\text{SiO}_2\text{-CaO}$ и Si-Ca проведен системный анализ структурно-химического состояния дуплекс-системы силикаты-силициды кальция и предложен механизм рафинирования железоуглеродистых расплавов силикатами кальция. Определены оптимальные составы рафинировочных шлаков, обладающих максимальной жидкотекучестью и высокой адсорбционной емкостью, а также составы стабильных сплавов силикокальция для рафинирования и микролегирования стали и глобуляризации неметаллических включений.

Ключевые слова: диаграмма состояния, структура, рафинирование, микролегирование, шлак, силикаты кальция, силициды кальция, неметаллические включения.

На основі полігональних діаграм стану $\text{SiO}_2\text{-CaO}$ та Si-Ca проведено системний аналіз структурно-хімічного стану дуплекса-системи силікати-силіциди кальцію і запропоновано механізм рафінування залізовуглецевих розплавів силікатами кальцію. Визначено оптимальні склади рафінувальних шлаків, що мають максимальну рідкотекучість та високу адсорбційну ємність, а також склади стабільних сплавів силікокальцію для рафінування та мікролегування сталі і глобуляризації неметалевих включень.

Ключові слова: діаграма стану, структура, рафінування, мікролегування, шлак, силікати кальцію, силіциди кальцію, неметалеві включення.

The system analysis of structurally-chemical state duplex-system silicates-silicides of calcium on the basis of polygonal state diagrams $\text{SiO}_2\text{-CaO}$ and Si-Ca is conducted. The mechanism of refining iron-carbon melts by calcium silicates is offered. Optimum compositions fining slags with the maximum fluidity and high adsorptivity as well as optimum compositions of stable alloys of silicocalcium for refining, microalloying of steel and globularing nonmetallic inclusions are defined.

Keywords: state diagram, structure, refining, microalloying, slag, calcium silicates, calcium silicides, nonmetallic inclusions.

Дуплекс-система силикаты-силициды кальция является базовой для теории процессов рафинирования железоуглеродистых расплавов, определяющей условия образования и формы существования кальция и кремния в силикатах и силицидах при производстве стали. Эффективность практического использования образующихся оксидных и металлических фаз при раскислении и легировании кальцием и кремнием зависит как от химического, так и структурно-фазового состава промежуточных фаз в жидком и твердом состояниях, существующих на бинарных диаграммах фазовых равновесий CaO-SiO_2 и Ca-Si .

Цель настоящего исследования – определение условий образования промежуточных фаз дуплекс-системы силикаты-силициды кальция, форм существования кальция и кремния в минеральном сырье и сплавах силикокальция для повышения эффективности ковшовой обработки стали.

Для исследования этой системы была разработана и использована методика системного анализа структурно-химического состояния (СХС-анализ)[1] окисных (CaO-SiO_2) и металлических (Ca-Si) фаз, включающая построение графоаналитическим методом полигональных диаграмм состояния (ПДС) во всем интервале концентраций твердых и жидких исходных компонентов, определение химического и фазового составов, температур образования и плавления, областей гомогенности и структуризации, которая позволяет выполнять системную классификацию и оптимизацию состава ковшового шлака, неметаллических включений в стали и сплавов силикокальция.

Анализ структурно-химического состояния силикатов кальция был проведен с помощью полигональной диаграммы состояния системы CaO-SiO_2 , построенной графоаналитическим методом (полигональная диаграмма состояния (ПДС) – метод, описанный в работе[2]) во всем интервале твердых и жидких исходных компонентов. Структура ПДС определяется координатами первичной промежуточной фазы (ППФ), которая отличается тем, что образуется в твердом состоянии при низкой температуре, плавится конгруэнтно, включает минимальное число частиц, которые максимально плотно упакованы на плоскости или объеме в виде полигональных (ПГЯ) или полиэдрических (ПДЯ) ячеек, отвечающих определенному стехиометрическому составу химического соединения.

Для бинарной системы CaO-SiO_2 выполнен наноструктурный анализ ПГЯ и ПДЯ исходных компонентов и промежуточных фаз (табл. 1).

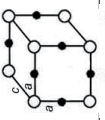
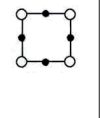
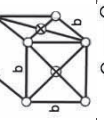
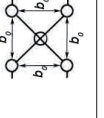
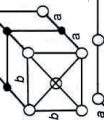
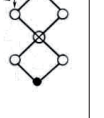
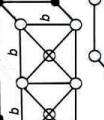
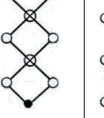

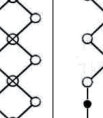
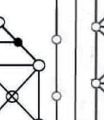
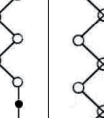
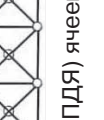
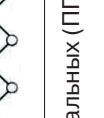
СИМ-комплексы (табл. 1) включают исходные компоненты – оксиды, сеткообразующие и сеткоразрушающие на базе полигональных $(\text{SiO}_4)^{4-}$ и $(\text{Ca}_4\text{O}_4)^0$ или полиэдрических $(\text{Si}_4\text{O}_8)^0$ и $(\text{Ca}_8\text{O}_8)^0$ ячеек, геометрические параметры которых рассчитаны по уравнениям радиально-орбитальной модели электронного строения атомов [3].

Диаграмма CaO-SiO_2 приведена на рис. 1, ее классификация – в табл. 2.

Последовательный ряд силикатов кальция включает 12 промежуточных фаз: $\text{CaO} \rightarrow 12\text{CaOSiO}_2$ (12C) $\rightarrow 6\text{CaOSiO}_2$ (6C) $\rightarrow 4\text{CaOSiO}_2$ (Э_1) $\rightarrow 3\text{CaOSiO}_2$ (АЛ-алит) $\rightarrow 2\text{CaOSiO}_2$ (БЛ-белит) $\rightarrow 3\text{CaO}2\text{SiO}_2$ (Э_2 -ранкинит) $\rightarrow \text{CaOSiO}_2$ (ВЛ-волластонит) $\rightarrow 2\text{CaO}3\text{SiO}_2$ (Э_3) $\rightarrow \text{CaO}2\text{SiO}_2$ (2K) $\rightarrow \text{CaO}3\text{SiO}_2$ (M_2) $\rightarrow \text{CaO}6\text{SiO}_2$ (M) $\rightarrow \text{CaO}24\text{SiO}_2$ (M_1) $\rightarrow \text{SiO}_2$.

При этом на классической диаграмме (вставка на рис. 1 [4]) представлены только четыре, которые находятся на ПДС: АЛ \rightarrow БЛ \rightarrow ВЛ \rightarrow РН(Э_2). Жирная линия ликвидуса проходит через точки плавления исходных компонентов, сингулярных фаз (8C^0 , АЛ⁰, БЛ⁰, ВЛ⁰, 2K), эвтектик (Э_1 , Э_2 , Э_3), монотектик (M_2 , M_1) и разделяет твердые и жидкие растворы на базе исходных компонентов и промежуточных фаз. Сплошные линии сольвуса разделяют области гомогенности твердых растворов, штриховые линии ликвуса – жидкие растворы. На оси абсцисс цифрами обозначены стехиометрические коэффициенты промежуточных фаз: первые – для CaO,

Таблица 1. Структуризация силикатов кальция

| стехиометри- ческий | Формульный состав | | СИМ-комплексы* | |
|-------------------------------------|--|---|--|---|
| | структурный | | (O - кислород, ● - кальций, ⊗ - кремний) | |
| | ПГЯ | ПДЯ | геометрические параметры, нм $a=0,154, b_0=0,229, c=0,199, c_0=0,24, h=0,12, d=0,682$ | |
| CaO | $(Ca_1O_4)^0$ $S=0,0949 \text{ нм}^2$ $N=8$ $S_0=0,0119$ | $(Ca_8O_8)^0$ $V=0,0228 \text{ нм}^3$ $N=16$ $V_0=0,0014$ |  |  |
| SiO ₂ | $(SiO_2)^4-$ $N=5$ $S=0,0524 \text{ нм}^2$ $S_0=0,0175$ | $(Si_4O_8)^0$ $N=12$ $V=0,0079 \text{ нм}^3$ $V_0=0,0007$ |  |  |
| 2CaOSiO ₂ (белит) | $(Ca_2SiO_4)^0$ $N=7$ $S=0,0635 \text{ нм}^2$ $S_0=0,0091$ | $(Ca_4Si_2O_8)^0$ $N=14$ $V=0,0122 \text{ нм}^3$ $V_0=0,0009$ |  |  |
| CaOSiO ₂ (воластонит) | $(Ca_2Si_2O_6)^0$ $N=10$ $S=0,1031 \text{ нм}^2$ $S_0=0,0103$ | $(Ca_4Si_4O_{12})^0$ $N=20$ $V=0,0244 \text{ нм}^3$ $V_0=0,0012$ |  |  |
| 3CaO2SiO ₂ (ранкинит) | $Ca_6Si_4O_{14}$ $N=24$ $S=0,3049 \text{ нм}^2$ $S_0=0,0127$ | — |  |  |
| 3CaOSiO ₂ (алит) | $Ca_6Si_6O_{20}$ $N=18$ $S=0,2257 \text{ нм}^2$ $S_0=0,0125$ | $Ca_6Si_6O_{20}$ $N=36$ $V=0,0739 \text{ нм}^3$ $V_0=0,0020$ |  |  |
| CaO2SiO ₂ | $Ca_2Si_4O_{10}$ $N=16$ $S=0,1823 \text{ нм}^2$ $S_0=0,0114$ | $Ca_4Si_8O_{20}$ $N=32$ $V=0,0561 \text{ нм}^3$ $V_0=0,0018$ |  |  |

* N – число частиц; S – площадь; V – объем; S₀ и V₀ – плотность упаковки полигональных (ПГЯ) и полиэдрических (ПДЯ) ячеек

Таблица 2. Классификация промежуточных фаз системы CaO-SiO₂

| Линейные системы | Промежуточные фазы | | | | | | Температура, °С** | |
|--|--|-------------------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| | Химические реакции | Стехиометрический состав | Условные обозначения* | SiO ₂ , %мас. | CaO/SiO ₂ | образования | плавления | |
| CaO-SiO ₂ | $2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaOSiO_2$ $3(2CaOSiO_2) \rightarrow 3CaO2SiO_2 + 3CaOSiO_2$ | 2CaOSiO ₂ (белит) | 2.1 (БЛ) | 34,9 | 1,87 | $\frac{875}{\text{н. д.}}$ | $\frac{1500}{2130}$ | |
| SiO ₂ -2CaOSiO ₂ | $SiO_2 + 2CaOSiO_2 \leftrightarrow 2(CaOSiO_2)$ $5(CaOSiO_2) \leftrightarrow 3CaO2SiO_2 + 2CaO3SiO_2$ | CaOSiO ₂ (воластонит) | 1.1 (ВЛ) | 51,7 | 0,93 | $\frac{1125}{1125}$ | $\frac{1550}{1545}$ | |
| CaOSiO ₂ -SiO ₂ | $2(CaOSiO_2) + SiO_2 \leftrightarrow 2CaO3SiO_2$ $2(2CaO3SiO_2) \leftrightarrow CaO2SiO_2 + CaOSiO_2$ | 2CaO3SiO ₂ | 2.3 (Э ₁) | 61,6 | 0,62 | $\frac{1350}{1400}$ | $\frac{1350}{1400}$ | |
| 2CaO3SiO ₂ -SiO ₂ | $2CaO3SiO_2 + SiO_2 \leftrightarrow 2(CaO2SiO_2)$ | CaO2SiO ₂ | 1.2 (2К) | 68,2 | 0,47 | $\frac{1475}{\text{н. д.}}$ | $\frac{''''}{\text{н. д.}}$ | |
| SiO ₂ -CaO2SiO ₂ | $4SiO_2 + CaO2SiO_2 \leftrightarrow CaO6SiO_2$ $7(CaO6SiO_2) \leftrightarrow 6(CaO3SiO_2) + CaO24SiO_2$ | CaO6SiO ₂ | 1.6 (М/М') | 81,1 | 0,23 | $\frac{1600}{\text{н. д.}}$ | $\frac{1700/2200}{2200}$ | |
| CaO2SiO ₂ -CaO6SiO ₂ | $3(CaO2SiO_2) + CaO6SiO_2 \leftrightarrow 4(CaO3SiO_2)$ | CaO3SiO ₂ | 1.3 (М ₂) | 76,3 | 0,31 | $\frac{1700}{\text{н. д.}}$ | $\frac{1700}{\text{н. д.}}$ | |
| SiO ₂ -CaO6SiO ₂ | $CaO6SiO_2 + 18SiO_2 \leftrightarrow CaO24SiO_2$ | CaO24SiO ₂ | 1.24 (М ₁) | 96,3 | 0,04 | $\frac{1700}{\text{н. д.}}$ | $\frac{1700}{\text{н. д.}}$ | |

Продолжение табл. 2

| | | | | | | | |
|---|--|--|----------------------|------|------|-----------------------------|-----------------------------|
| $\text{CaO}-2\text{CaOSiO}_2$ | $\text{CaO}+2\text{CaOSiO}_2 \leftrightarrow 3\text{CaOSiO}_2$ $2(3\text{CaOSiO}_2) \leftrightarrow 4\text{CaOSiO}_2 + 2\text{CaOSiO}_2$ | 3CaOSiO_2 (аллит) | 3.1(3С) | 76,3 | 031 | $\frac{1250}{\text{н. д.}}$ | $\frac{2100}{\text{н. д.}}$ |
| $\text{CaO}-3\text{CaOSiO}_2$ | $5\text{CaO}+3\text{CaOSiO}_2 \leftrightarrow 8\text{CaOSiO}_2$ $4(6\text{CaO}6\text{SiO}_2) \leftrightarrow 3(4\text{CaOSiO}_2) + 12\text{CaOSiO}_2$ | 6CaOSiO_2 | 6.1(6С) | 15,2 | 5,58 | $\frac{1600}{\text{н. д.}}$ | $\frac{2300}{\text{н. д.}}$ |
| $\text{CaO}-8\text{CaOSiO}_2$ | $4\text{CaO}+8\text{CaOSiO}_2 \leftrightarrow 12\text{CaOSiO}_2$ | 12CaOSiO_2 | 12.1(12С) | 8,2 | 11,2 | $\frac{2000}{\text{н. д.}}$ | $\frac{''''}{\text{н. д.}}$ |
| 3CaOSiO_2 -8CaOSiO_2 | $2(3\text{CaOSiO}_2) + 8\text{CaOSiO}_2 \leftrightarrow 3(4\text{CaOSiO}_2)$ | 4CaOSiO_2 | 4.1(Э ₃) | 21,1 | 3,73 | $\frac{1800}{1900}$ | $\frac{1800}{1900}$ |
| CaOSiO_2 -2CaOSiO_2 | $\text{CaOSiO}_2 + 2\text{CaOSiO}_2 \leftrightarrow 3\text{CaO}2\text{SiO}_2$ | $3\text{CaO}2\text{SiO}_2$ (ранкинит) | 3.2(Э ₂) | 41,7 | 1,4 | $\frac{1400}{1400}$ | $\frac{1400}{1400}$ |

* первые цифры относятся к стехиометрическим коэффициентам СаО, вторые – к SiO₂; Э₁, Э₂, Э₃ – эвтектики; M₀, M₁, M₂ – монотектики; ** прочерк в числителе означает, что данная фаза плавится инконгруэнтно и не имеет точки плавления; н. д. – нет данных

вторые – для SiO₂. Сингулярные фазы, которые образуются в твердом состоянии и плавятся конгруэнтно, образуют две модификации α и β в области гомогенности. Ниже точки образования находится гомогенный периодический двухструктурный (диссипативный) твердый раствор – (Д), выше точки плавления – жидкий раствор (L). Это же относится к эвтектическим и монотектическим фазам. Для промежуточных фаз, плавящихся инконгруэнтно, выше точки их образования существует гомогенный моноструктурный непрерывный твердый раствор (M). Для исходных компонентов выше точки плавления – полиэдрическая (L^{ПД}), полигональная (L^{ПГ}) и разупорядоченная (L^{ПА3}) жидкости, в твердом состоянии – структурные модификации α, β, γ и т. д., которые являются следствием тепловых или концентрационных воздействий. На коноде M₁M₂ находится купол несмешиваемости (L_M) двух жидкостей L_{M1} и L_{M2} с критической точкой M⁰. Кристобаллит (SiO₂) плавится при 1600 °С, образуя вязкую стеклофазу полигональной структуры (L^{ПГ}), оптически прозрачное стекло существует в области гомогенности (L^{ПА3}). В табл. 2 приведены химические реакции образования промежуточных фаз, температуры их образования и плавления, области гомогенности твердых и жидких растворов.

Информация о структуре и составе СИМ-комплексов позволяет исследовать механизм рафинирования и оптимизировать технологические параметры шлаковой обработки. Основное требование к рафинировочным шлакам для ковшовой обработки стали – низкая температура плавления и высокая адсорбционная емкость к примесным элементам и неметаллическим включениям. Силикатные шлаки заданного химического и фазового состава широко используются при ковшовой обработке стали. Легкоплавкие шлаки в системе силикатов кальция относятся к эвтектическим составам 3CaO2SiO₂ (Э₂, T_{пл} ~ 1400 °С) и 2CaO3SiO₂ (Э₃, T_{пл} ~ 1350 °С). Адсорбционная емкость определяется структурой СИМ-комплекса, приведенного в активированное состояние

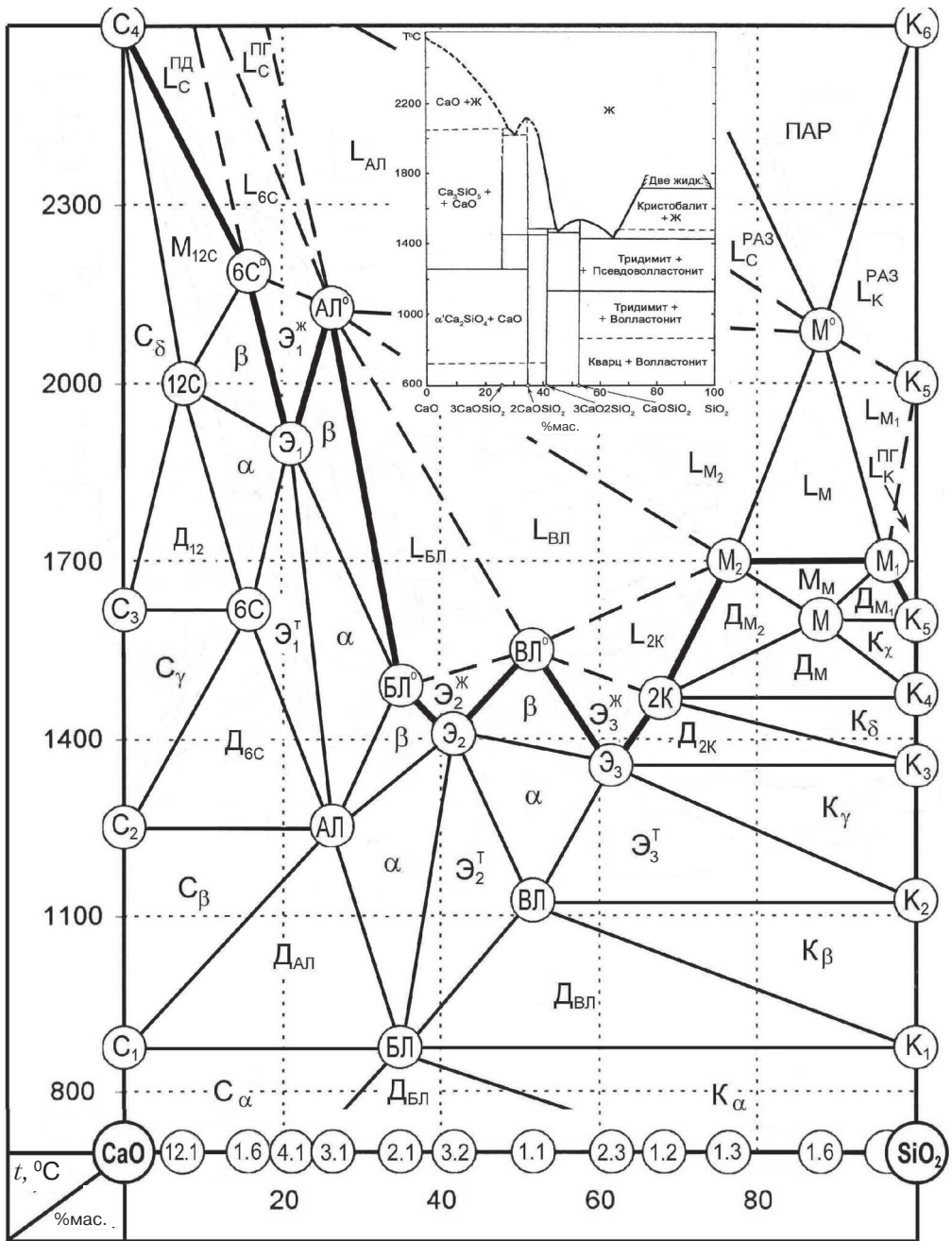


Рис. 1. Полигональная диаграмма состояний силикатов кальция

за счет освобождения химической связи кислорода с кальцием и образования его свободных ионов (катионов). Активирование происходит при тепловой обработке с большим перегревом, достаточным для диссоциации оксидов кальция, или при взаимодействии оксидов и химических элементов с высоким сродством к кислороду. Последовательно возрастающий ряд химической активности отдельных элементов к кислороду, рассчитанный по модели POM-атома [3], имеет следующий вид: Fe → Mn → Ca → Mg → Al → C → Ti → Si, следовательно, оксиды кальция восстанавливаются магнием, алюминием, углеродом, титаном и кремнием.

Механизм рафинирования металлических расплавов шлаками включает последовательный ряд структурно-химических реакций шлакообразования, активирования

Таблица 3. Эффективность рафинирования силикатными шлаками

| Параметры шлака и металла | Стехиометрический состав силикатов кальция | | | | | | |
|------------------------------------|--|-------------|------------------------------------|------------|------------------------------------|--------------|--------------|
| | $3CaOSiO_2$ | $2CaOSiO_2$ | $3CaO_2SiO_2$ (Э ₂) | $CaOSiO_2$ | $2CaO_3SiO_2$ (Э ₃) | CaO_2SiO_2 | CaO_3SiO_2 |
| B^0 | 2,8 | 1,87 | 1,40 | 0,93 | 0,62 | 0,47 | 0,31 |
| $T_{пл}, ^\circ C$ | 2100 | 1500 | 1400 | 1550 | 1350 | 1475 | 1700 |
| $A_S, \%$ | 24,6 | 17,0 | 20,0 | 13,0 | 10,4 | 8,7 | 6,6 |
| $\Delta S, \%$ | 0,028 | 0,018 | 0,022 | 0,014 | 0,011 | 0,009 | 0,007 |

Примечание: $B^0 = CaO/SiO_2$ – основность шлака; $A_S, \%$ – содержания серы в шлаке; $\Delta S, \%$ – эффективность рафинирования (убыль серы в металле при расходе рафинировочного шлака 1,0 кг/т металла)

и адсорбции примесных элементов (кислород, сера и др.). Сопоставительный анализ эффективности рафинирования шлаками на базе силикатов кальция, представленных на построенной полигональной диаграмме состояния $CaO-SiO_2$ (см. рис. 1), приведен в табл. 3.

При температурах металлического расплава порядка 1600-1700 °С рафинировочные шлаки находятся в жидком состоянии, кроме алита ($3CaOSiO_2$). Как видно из таблицы, к оптимальным составам силикатных рафинировочных шлаков относится эвтектический ранкинит – шлак ($3CaO_2SiO_2$) с высокой жидкотекучестью ($T_{пл} \approx 1400$ °С) и адсорбционной емкостью ($A_S \approx 20$ %) при основности $1,0 \leq B^0 \leq 2,0$, который существует в области гомогенности сингулярных фаз волластонита и белита.

Эффективность практического использования сплавов силикокальция для раскисления и легирования железуглеродистых расплавов зависит от физико-химических свойств интерметаллидов (силицидов кальция) промежуточных фаз в системе кальций-кремний, существующих на бинарной диаграмме фазовых равновесий.

На полигональной диаграмме Ca-Si (рис. 2) первичная промежуточная фаза Ca_2Si , образующаяся при восстановлении ортосиликатов кальция, например, углеродом, по реакции $2CaOSiO_2 + 5C \rightarrow Ca_2Si + 5CO$, разделяет систему Ca-Si на две подсистемы Ca- Ca_2Si и Si- Ca_2Si , в которой образуются вторичные силициды кальция.

Классификация системы Ca-Si приведена в табл. 4. Последовательный ряд силицидов кальция представлен в следующем виде: Ca (100, 850) → $Ca_{12}Si$ (Э₁, 94,8/5,2, $T_3 = 750$) → Ca_3Si (81,0/19,0; 550/-) → Ca_2Si (74,1/25,9; 400/1000) → Ca_3Si_2 (Э₂, 68,2/31,8; 900/900) → CaSi (58,8/41,2; 600/1250) → Ca_2Si_3 (Э₃, 48,8/51,2; 900/900) → $CaSi_2$ (41,7/58,3; 800/-) → $CaSi_3$ (26,3/73,7; 700/1100) → $CaSi_6$ (19,2/80,8; 1000/-) → $CaSi_{24}$ (2,7/97,3; 900/-) → Si (100, 1420). Цифры в скобках обозначают: первые – концентрацию (%мас.) кальция/кремния, остальные – температуры (°С) образования/плавления соответственно; Э₁, Э₂ – эвтектики.

На классической диаграмме (см. вставку рис. 2, [5]) имеют место четыре интерметаллида: Ca_2Si , CaSi, Ca_3Si_4 , $CaSi_2$ и две неидентифицированные промежуточные фазы. На полигональной диаграмме между Ca_2Si и CaSi существуют эвтектики Э₁ (Ca_3Si_2) и Э₂ (Ca_2Si_3) вместо (Ca_3Si_4), также остальные интерметаллиды, для которых установлены условия их образования и существования.

На рис. 2 показаны промежуточные фазы с конгруэнтным и инконгруэнтным способами плавления. К стабильным сплавам относятся сингулярные фазы, обра-

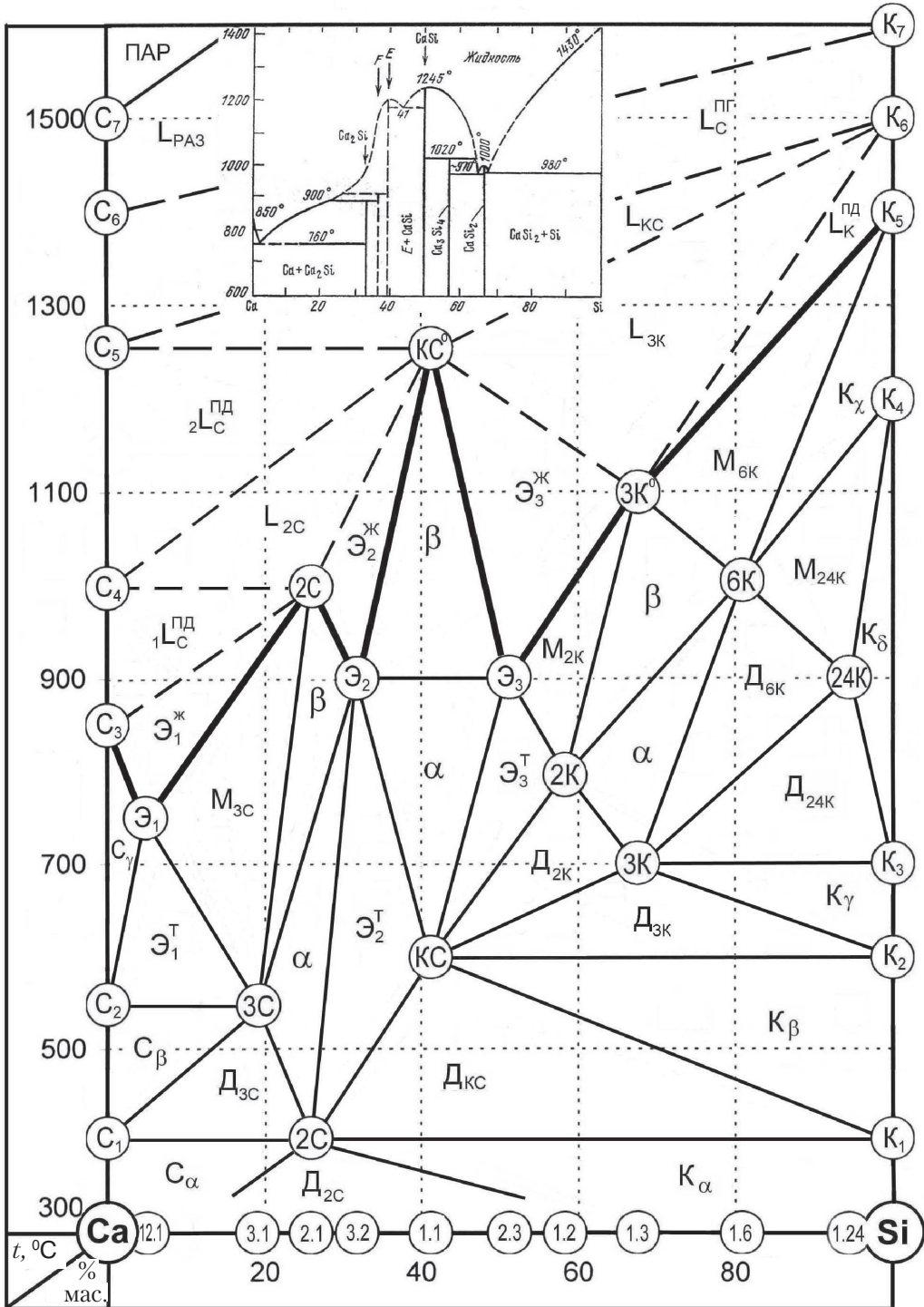


Рис. 2. Полигональная диаграмма состояния сплавов силикокальция

Таблица 4. Классификация сплавов силикокальция

| линейные системы | Промежуточные фазы | | | | | | | температура, °С | |
|--|---|---------------------------------|---------------------------------|-----------|-------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| | химические реакции | стехиометрический состав | условные обозначения | Si, %мас. | Si/Ca | ρ, г/см ³ | образования | плавления | |
| Si-Ca | $Si+2Ca \rightarrow SiCa_2$ $3(SiCa_2) \leftrightarrow SiCa_3+Si_2Ca_3$ | SiCa ₂ | 1.2 (2K) C25K75 | 25,9 | 0,35 | 1,76 | $\frac{400}{\text{н. д.}}$ | $\frac{1000}{\text{н. д.}}$ | |
| Ca-SiCa ₂ | $Ca+SiCa_2 \leftrightarrow SiCa_3$ | SiCa ₃ | 1.3 (3C) C20K80 | 19,0 | 0,23 | 1,72 | $\frac{550}{\text{н. д.}}$ | $\frac{\text{---}}{\text{н. д.}}$ | |
| Ca-SiCa ₃ | $3Ca+SiCa_3 \rightarrow SiCa_{12}$ | SiCa ₁₂ | 1.12 (Э ₁) C5K95 | 5,2 | 0,05 | 1,60 | $\frac{750}{780}$ | $\frac{750}{780}$ | |
| Si-SiCa ₂ | $Si+SiCa_2 \rightarrow 2(SiCa)$ $5(SiCa) \leftrightarrow Si_2Ca_3 + Si_3Ca_2$ | SiCa | 1.1 (CK) C40K60 | 41,2 | 0,70 | 1,90 | $\frac{600}{\text{н. д.}}$ | $\frac{1150}{1245}$ | |
| Si-SiCa | $Si+SiCa \rightarrow Si_2Ca$ $3(Si_2Ca) \leftrightarrow Si_3Ca_2 + Si_3Ca$ | Si ₂ Ca | 2.1 (2C) C60K40 | 58,3 | 1,40 | 2,04 | $\frac{800}{\text{н. д.}}$ | $\frac{\text{---}}{1000}$ | |
| SiCa-Si ₂ Ca | $SiCa+Si_2Ca \leftrightarrow Si_3Ca_2$ | Si ₃ Ca ₂ | 3.2 (Э ₂) C50K50 | 51,2 | 1,05 | 1,98 | $\frac{900}{970}$ | $\frac{900}{970}$ | |
| Si-Si ₂ Ca | $22Si+Si_2Ca \leftrightarrow Si_{24}Ca$ | Si ₂₄ Ca | 24.1 (24C) C95K5 | 94,4 | 16,8 | 2,38 | $\frac{900}{\text{н. д.}}$ | $\frac{\text{---}}{\text{н. д.}}$ | |
| Si ₂ Ca-Si ₂₄ Ca | $9(Si_2Ca)+Si_{24}Ca \leftrightarrow 11(Si_6Ca)$ $Si_6Ca \leftrightarrow 3Si + Si_3Ca$ | Si ₆ Ca | 6.1 (6C) C80K20 | 80,8 | 4,2 | 2,24 | $\frac{1000}{\text{н. д.}}$ | $\frac{\text{---}}{\text{н. д.}}$ | |
| Si ₂ Ca-Si ₆ Ca | $3(Si_2Ca)+Si_6Ca \leftrightarrow 4(Si_3Ca)$ | Si ₃ Ca | 3.1 (3C) C70K30 | 67,7 | 2,1 | 2,18 | $\frac{700}{\text{н. д.}}$ | $\frac{1100}{\text{н. д.}}$ | |
| SiCa ₂ -SiCa | $SiCa_2+SiCa \leftrightarrow Si_2Ca_3$ | Si ₂ Ca ₃ | 2.3 (Э ₂) C30K70 | 31,8 | 0,47 | 2,10 | $\frac{900}{\text{н. д.}}$ | $\frac{900}{\text{н. д.}}$ | |

зующиеся в твердом состоянии – SiCa_2 (C25K75) → SiCa (C40K60) → Si_3Ca (C65K35) и плавящиеся конгруэнтно при 1000, 1250 и 1100 °С соответственно, пригодные для раскисления шлака.

Для раскисления металла и глобуляризации неметаллических включений в стали сплавы силикокальция применяют в виде компактных материалов (порошковые проволоки, ленты), которые вводят в объем металла с помощью трайбаппаратов в количестве 1,0-3,0 кг/т.

Выводы

- Проведен системный анализ структурно-химического состояния дуплекс-системы силикаты-силициды кальция на основе полигональных диаграмм SiO_2 -CaO и Si-Ca.

- Изучен механизм рафинирования силикатами кальция железоуглеродистых расплавов при температуре 1600-1700 °С и определены оптимальные составы рафинировочных шлаков с основностью $1,0 \leq B^0 \leq 2,0$, обладающих максимальной жидкотекучестью и высокой адсорбционной емкостью.

- Определены оптимальные составы стабильных сплавов силикокальция для рафинирования и микролегирования стали и глобуляризации неметаллических включений.



Список литературы

1. Белов Б. Ф., Троцан А. И., Харлашин П. С. Структуризация металлургических фаз в жидком и твердом состояниях // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2002. – № 4. – С. 70-75.
2. Пат. 2825. Методика построения полигональных диаграмм состояния бинарных металлургических систем / Б. Ф. Белов, А. И. Троцан, П. С. Харлашин и др. – Оpubл. 14.03.2000 р.
3. Троцан А. И., Белов Б. Ф., Харлашин П. С. О природе химической связи элементов в металлургических фазах // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2002. – № 4. – С. 60-64.
4. Атлас шлаков: Справочник [пер. с нем.]. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.
5. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. – М.: Машиностроение, 1996. – Т. 1. – 821 с.

Поступила 03.10.2013

Вниманию авторов!

Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

*Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.*

Статьи в редакции проходят научное рецензирование.