

УДК 669.13:669.018.9

**Б. Ф. Белов, А. И. Троцан, И. Л. Бродецкий,  
И. В. Рябчиков, В. С. Кобец, Я. П. Карликова**

Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев  
НПО «Перспектива», Запорожье  
ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь

## **СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОКСИДНЫХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО-КРЕМНИЙ-ТИТАН-КИСЛОРОД. ДУПЛЕКС-СИСТЕМА: ЖЕЛЕЗО-ТИТАНИСТЫЕ СИЛИКАТЫ/СИЛИЦИДЫ. Сообщение 3**

*С использованием построенных полигональных диаграмм состояния тройных систем FeO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> и Fe-Si-Ti выполнен анализ структурно-химического состояния оксидных и металлических фаз; исследован механизм рудно-восстановительного процесса получения углетермических сплавов ферросиликотитана и проведена их сертификация.*

**Ключевые слова:** структурно-химический анализ, полигональные диаграммы, дуплекс-системы, железо, титан, силикаты, силициды, сплавы.

*З використанням побудованих полігональних діаграм стану потрійних систем FeO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> і Fe-Si-Ti виконано аналіз структурно-хімічного стану оксидних і металевих фаз; досліджено механізм рудно-відновного процесу отримання вуглетермічних сплавів ферросилікотитану та проведено їх сертифікацію.*

**Ключові слова:** структурно-хімічний аналіз, полігональні діаграми, дуплекс-системи, залізо, титан, силікати, силіциди, сплави.

*By means of the built polygonal diagrams of threefold systems FeO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> and Fe-Si-Ti the structurally-chemical analysis of the oxides and metal phases is executed; the mechanism of ore-regenerative process of recovery carbothermic alloys ferrosilicotitan are offered; their certification is spent.*

**Keywords:** structurally-chemical analysis, polygonal diagrams, duplexes-systems, iron, titan, silicates, silicides, alloys.

**В** предыдущих сообщениях [1, 2] нами проведён анализ структурно-химического состояния оксидных и металлических фаз дуплекс-систем титанаты-титаниды железа и силикаты-силициды титана с использованием построенных полигональных диаграмм состояния бинарных систем FeO-TiO<sub>2</sub>, Fe-Ti, SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> и Si-Ti. В настоящем сообщении изложены результаты анализа структурно-химического

## Получение и обработка расплавов

состояния оксидных и металлических фаз дуплекс-системы железо-титанистые силикаты/силициды, выполненного с помощью полигональных диаграмм состояния тройных систем  $\text{FeO-SiO}_2\text{-TiO}_2$  и  $\text{Fe-Si-Ti}$ , построенных на базовых бинарных системах графо-аналитическим методом [3, 4] во всём интервале концентраций твёрдых и жидких исходных компонентов.

### Силикаты железо-титана

Системным классификатором комплексных силикатов железа и титана, на базе которых формируются шихтовые материалы для рудно-термического способа получения сплавов ферросиликотитана и образуются неметаллические включения – продукты раскисления, является полигональная диаграмма состояния тройной системы  $\text{FeO-SiO}_2\text{-TiO}_2$ , представленная на рис. 1, которая в справочных материалах отсутствует. Количество промежуточных фаз равно 23, включая первичные – 8, эвтектические – 6 и базовые – 9, расположенные в четырёх зонах концентрационного треугольника. Зона первичных фаз находится в центральном треугольнике, образованном прямыми линиями, соединяющими первичные промежуточные фазы бинарных систем  $2\text{FeOSiO}_2(210)\text{-SiO}_2\text{TiO}_2(011)\text{-}2\text{FeOTiO}_2(201)$ . Эвтектические тройные фазы образуются на базе двойных  $8\text{FeOTiO}_2(801)\text{-}3\text{FeOSiO}_2(310)\text{-}3\text{FeOSiO}_2(310)\text{-}3\text{FeO}_2\text{SiO}_2(320)\text{-FeO}_3\text{TiO}_2(103)\text{-}2\text{FeO}_3\text{TiO}_2(203)\text{-}3\text{FeO}_2\text{TiO}_2(302)$ . Базовые и эвтектические фазы располагаются в зонах исходных компонентов – область вюстита ( $201\text{-FeO-}210$ ), кремнезёма ( $210\text{-SiO}_2\text{-}011$ ) и рутила ( $011\text{-TiO}_2\text{-}201$ ).

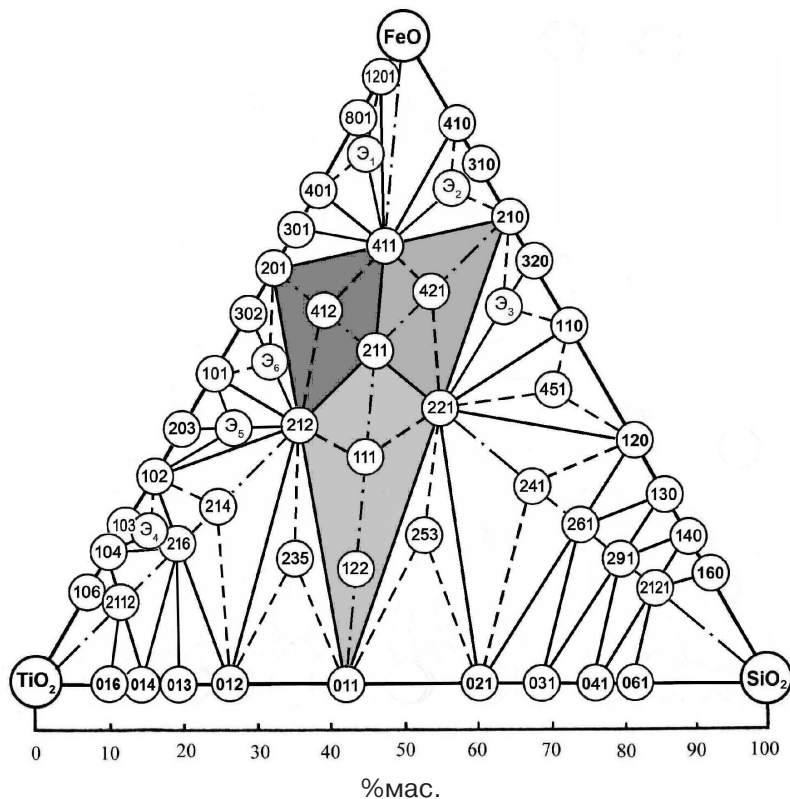


Рис. 1. Полигональная диаграмма системы  $\text{FeO-SiO}_2\text{-TiO}_2$

В табл. 1 приведена классификация силикатов системы  $\text{FeO-SiO}_2\text{-TiO}_2$ , включающая линейные и триангуляционные системы, образующие промежуточные фазы, стехиометрический и химический составы. Условные обозначения: первые цифры – стехиометрические коэффициенты для  $\text{FeO}$ , вторые –  $\text{SiO}_2$ , третьи –  $\text{TiO}_2$ . Температуры ликвидуса ( $t$ , °C) рассчитаны аддитивно из реакций их образования.

В табл. 2 представлены структурные ионно-молекулярные комплексы

Таблица 1. Классификация системы FeO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>

Линейные и триангуляционные системы	Промежуточные фазы					
	химические формулы	условные обозначения	химический состав, %мас.			T <sub>л</sub> , °C
			FeO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	
первичные фазы						
2FeOTiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub>	4FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	4.1.1	67,3	14,0	18,7	1330
2FeOSiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	2FeO2SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	2.2.1	41,9	34,9	23,2	1440
SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> -2FeOTiO <sub>2</sub>	2FeOSiO <sub>2</sub> 2TiO <sub>2</sub>	2.1.2	39,6	16,5	43,9	1580
2FeOTiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	2FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	2.1.1	50,7	21,1	28,2	1450
4FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> -2FeO2SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> 2TiO <sub>2</sub>						
4FeOSiO <sub>2</sub> 2TiO <sub>2</sub> -4FeO2SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> -FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>						
4FeOSiO <sub>2</sub> 2TiO <sub>2</sub> -4FeO2SiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> -FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> -2FeOTiO <sub>2</sub> -4FeO-SiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> -2FeO2SiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> 2TiO <sub>2</sub>						
SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> -FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	FeO2SiO <sub>2</sub> 2TiO <sub>2</sub>	1.2.2	20,5	34,0	45,5	1650
SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	1.1.1	34,0	28,3	37,7	1560
2FeOTiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	4FeOSiO <sub>2</sub> 2TiO <sub>2</sub>	4.1.2	56,7	11,8	31,5	1450
2FeOSiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	4FeO2SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	4.2.1	59,0	24,6	16,4	1340
эвтектические фазы						
8FeOTiO <sub>2</sub> -4FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	20FeOSiO <sub>2</sub> 3TiO <sub>2</sub>	20.1.3 (Э <sub>1</sub> )	82,8	3,4	13,8	1150
4FeOTiO <sub>2</sub> -12FeOTiO <sub>2</sub> -4FeOSiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub>						
3FeOSiO <sub>2</sub> -4FeOSiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	10FeO3SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	10.3.1 (Э <sub>2</sub> )	73,5	18,4	8,1	1000
4FeOSiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> -4FeOSiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub>						
3FeO2SiO <sub>2</sub> -2FeO2SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	5FeO4SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	5.4.1 (Э <sub>3</sub> )	52,9	35,3	11,8	1050
3FeOSiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> -2FeO2SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>						
FeO3TiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> 6TiO <sub>2</sub>	4FeOSiO <sub>2</sub> 12TiO <sub>2</sub>	4.1.12 (Э <sub>4</sub> )	22,0	4,6	73,4	1450
FeO2TiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> 6TiO <sub>2</sub> -FeO-4TiO <sub>2</sub>						
2FeO3TiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> 2TiO <sub>2</sub>	4FeOSiO <sub>2</sub> 5TiO <sub>2</sub>	4.1.5 (Э <sub>5</sub> )	38,5	8,0	53,5	1400
FeO2TiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> 2TiO <sub>2</sub> -FeOTiO <sub>2</sub>						
3FeO2TiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> 2TiO <sub>2</sub>	5FeOSiO <sub>2</sub> 4TiO <sub>2</sub>	5.1.4 (Э <sub>6</sub> )	48,6	8,2	43,2	1300
2FeOTiO <sub>2</sub> -2FeOSiO <sub>2</sub> 2TiO <sub>2</sub> -FeOTiO <sub>2</sub>						

*продолжение таблицы 1*

базовые фазы						
$\text{FeO}_2\text{SiO}_2\text{-}2\text{SiO}_2\text{TiO}_2$	$2\text{FeO}_6\text{SiO}_2\text{TiO}_2$	2.6.1	24,7	61,6	13,7	1700
$2\text{FeO}_2\text{SiO}_2\text{TiO}_2\text{-FeO}_2\text{SiO}_2\text{-}2\text{SiO}_2\text{TiO}_2$	$2\text{FeO}_4\text{SiO}_2\text{TiO}_2$	2.4.1	31,0	51,7	17,3	1600
$\text{FeO}_4\text{SiO}_2\text{-}4\text{SiO}_2\text{TiO}_2$	$2\text{FeO}_{12}\text{SiO}_2\text{TiO}_2$	2.12.1	15,3	76,3	8,4	1600
$\text{FeO}_4\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{TiO}_2$	$2\text{FeOSiO}_2\text{TiO}_2$	2.1.12	12,4	5,2	82,4	1550
$\text{FeO}_2\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{TiO}_2$	$2\text{FeOSiO}_2\text{TiO}_2$	2.1.6	21,0	8,8	70,2	1500
$\text{FeO}_2\text{TiO}_2\text{-}2\text{FeOSiO}_2\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{TiO}_2$	$2\text{FeOSiO}_2\text{TiO}_2$	2.1.4	27,5	11,5	61,0	1550
$3\text{SiO}_2\text{TiO}_2\text{-}2\text{FeO}_2\text{SiO}_2\text{TiO}_2$	$2\text{FeO}_5\text{SiO}_2\text{TiO}_2$	2.5.3	21,0	43,9	35,1	1400
$2\text{FeO}_2\text{SiO}_2\text{TiO}_2\text{-}2\text{SiO}_2\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{TiO}_2$						
$2\text{SiO}_2\text{TiO}_2\text{-}2\text{FeOSiO}_2\text{TiO}_2$	$2\text{FeO}_3\text{SiO}_2\text{TiO}_2$	2.3.5	19,9	24,9	55,2	1400
$2\text{FeOSiO}_2\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{TiO}_2\text{-Si}_2\text{TiO}_2$						
$\text{FeO}_3\text{SiO}_2\text{-}3\text{SiO}_2\text{TiO}_2$	$2\text{FeO}_9\text{SiO}_2\text{TiO}_2$	2.9.1	18,8	70,7	10,5	1580

(СИМ-комплексы) исходных компонентов, первичных двойных и тройных промежуточных фаз, геометрические параметры полигональных (ПГЯ) и полиэдрических (ПДЯ) ячеек определены из квантово-механических параметров по модели РОМ-атома [5]. Обозначения в таблице 2:  $N$  – число частиц,  $S_0$  и  $V_0$  – приведённые площадь и объём ПГЯ и ПДЯ, соответственно. ПГЯ образуют плоские замкнутые или открытые, ПДЯ – закрытые, объёмные структурные элементы, обладающие ионным типом химической связи. Плотность упаковки ( $S_0$ ,  $V_0$ ) определяет термодинамическую прочность в ряду  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2 \rightarrow \text{FeO}$ , что позволяет установить последовательность химических реакций и механизм их образования.

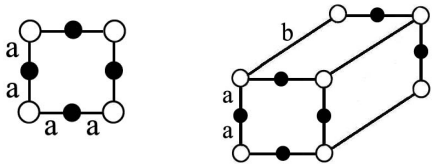
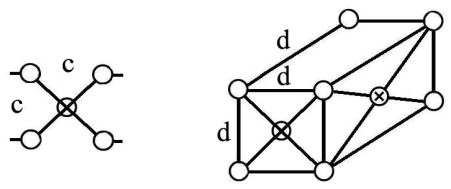
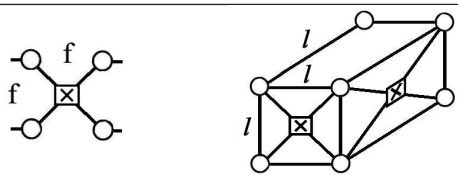
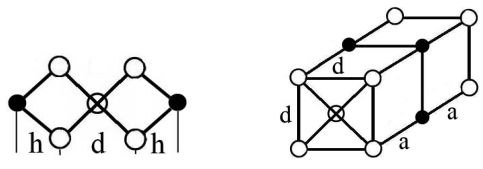
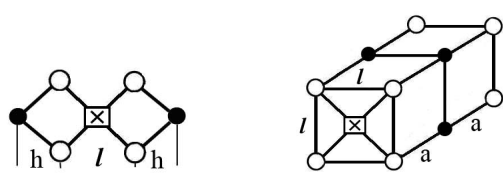
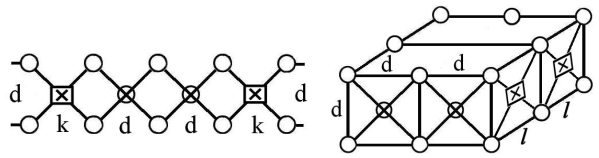
*Силициды железо-титана*

Системным классификатором комплексных силицидов железа и титана, на базе которых образуются сплавы ферросиликотитана, является полигональная диаграмма (ПДС) тройной системы Fe-Si-Ti, представленная на рис. 2. ПДС Fe-Si-Ti построена на базе полигональных диаграмм бинарных систем Fe-Si, Fe-Ti, Si-Ti [1, 2] и включает 23 промежуточные фазы, классификация которых приведена в табл. 3. Промежуточные фазы ПДС Fe-Si-Ti условно обозначены трёхзначными числами, отвечающими стехиометрическим коэффициентам исходных компонентов в составе тройных интерметаллидов: первые цифры – Fe, вторые – Si, третьи – Ti.

Концентрационное поле общего треугольника включает область тройных первичных промежуточных фаз, полученных при взаимодействии двойных первичных фаз. Химические реакции протекают в узловых точках пересечения полевых и лучевых линейных систем, образующих триангуляционную зону.

Триангуляционная зона первичных промежуточных фаз на рис. 2 имеет вид треугольника, вершины которого находятся в фигуративных точках бинарных базовых систем, соединённых прямыми линиями:  $\text{Fe}_2\text{Si}$  (210) –  $\text{SiTi}$ (011) –  $\text{Fe}_2\text{Ti}$  (201). В узловых точках полевых линейных систем образуются фазы стехиометрического состава  $\text{Fe}_4\text{SiTi}$  (411) –  $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Ti}$  (221) –  $\text{Fe}_2\text{SiTi}_2$  (212). В узловой точке пересечения лучевых

Таблица 2. Структуризация системы FeO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>

Формульный состав		СИМ-комплексы (O - кислород, $\boxtimes$ - железо, $\bullet$ - кремний, $\otimes$ - титан)
стехиометрический	структурный	полигональные ячейки / полиэдрические ячейки
FeO	$(Fe_4O_4)^0$ $N = 8; S_0 = 0,0148$	$a = 0,172$ нм, $b = 0,24$ нм
	$(Fe_8O_8)^0$ $N = 16; V_0 = 0,0018$	
SiO <sub>2</sub>	$(SiO_4)^{4-}$ $N = 5; S_0 = 0,0104$	$c = 0,228$ нм, $d = 0,200$ нм
	$(Si_4O_8)^0$ $N = 12; V_0 = 0,0067$	
TiO <sub>2</sub>	$(TiO_4)^{4-}$ $N = 5; S_0 = 0,0113$	$f = 0,238$ нм, $l = 0,208$ нм
	$(Ti_4O_8)^0$ $N = 12; V_0 = 0,0009$	
2FeOSiO <sub>2</sub>	$(Fe_2SiO_4)^0$ $N = 7; S_0 = 0,0114$	$d = 0,200$ нм, $h = 0,100$ нм
	$(Fe_4Si_2O_8)^0$ $N = 14; V_0 = 0,0010$	
2FeOTiO <sub>2</sub>	$(Fe_2TiO_4)^0$ $N = 7; S_0 = 0,0119$	$l = 0,208$ нм, $h = 0,104$ нм
	$(Fe_4Ti_2O_8)^0$ $N = 14; V_0 = 0,00106$	
SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	$(Si_2Ti_2O_{10})^{4-}$ $N = 14; S_0 = 0,0121$	$d = 0,200$ нм, $k = 0,223$ нм, $l = 0,208$ нм
	$(Si_4Ti_4O_{16})^0$ $N = 24; V_0 = 0,0028$	

$2\text{FeOSiO}_2\text{TiO}_2$	$(\text{Fe}_8\text{Si}_4\text{Ti}_4\text{O}_{24})^0$ $N = 40; S_0 = 0,0178$	$a = 0,172 \text{ нм}, l = 0,208 \text{ нм}, d = 0,200 \text{ нм}, h = 0,123 \text{ нм}$
	$(\text{Fe}_{16}\text{Si}_8\text{Ti}_8\text{O}_{48})^0$ $N = 80; V_0 = 0,0044$	

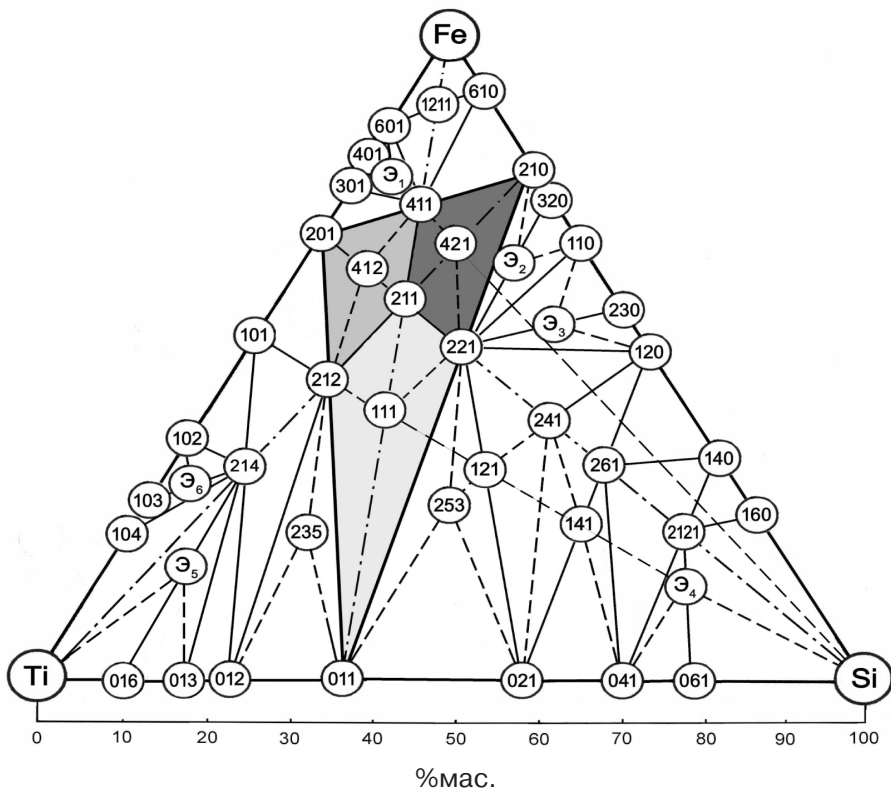


Рис. 2. Диаграмма состояния Fe-Si-Ti

линейных систем образуется триангуляционная тройная первичная промежуточная фаза  $\text{Fe}_2\text{SiTi}$  (211), разделяющая зону первичных фаз на три части: 201-411-211-212, 411-210-221-211, 221-011-212-211, в которых существуют вторичные триангуляционные фазы 412, 421 и 111, соответственно.

Зона первичных фаз общее концентрационное поле разделяет на три части зоны у вершин большого треугольника: сплавы на основе железа (область 201-Fe-210), кремния (210-Si-011) и титана (011-Ti-201). На классической диаграмме известны лишь две промежуточные фазы:  $\text{FeSiTi}$  и  $\text{FeSi}_2\text{Ti}$  [6].

Классификация силицидов системы Fe-Si-Ti является базой для гостирования сплавов ферросиликотитана, которые в настоящее время не сертифицированы. В таблице 3 представлен марочный состав, включающий стабильные

**Таблица 3. Классификация сплавов ферросиликотитана (ферросилит)**

Линейные триангуляционные системы	Промежуточные фазы							
	хими- ческие формулы	услов- ные обозна- чения	химический состав, %мас.			$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$T_{л}$ , °С	мароч- ный состав
			Fe	Si	Ti			
первичные сплавы								
Fe <sub>2</sub> Si - Fe <sub>2</sub> Ti	Fe <sub>4</sub> SiTi	4.1.1	74,7	9,3	16,0	6,81	1380	ФС10Ti15
Fe <sub>2</sub> Si - SiTi	Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Ti	2.2.1	51,9	25,9	22,2	5,68	1480	ФС25Ti20
SiTi - Fe <sub>2</sub> Ti	Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>2</sub>	2.1.2	47,4	11,9	40,7	5,84	1630	ФС10Ti40
Fe <sub>2</sub> Si - SiTi - Fe <sub>2</sub> Ti	Fe <sub>2</sub> SiTi	2.1.1	59,6	14,9	25,5	6,18	1485	ФС15Ti25
Fe <sub>4</sub> SiTi - Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Ti - - Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>2</sub>								
Fe <sub>2</sub> SiTi - SiTi	FeSiTi	1.1.1	42,4	21,2	36,4	5,46	1600	ФС20Ti35
SiTi - Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>2</sub> - - Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>2</sub> - Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Ti								
Fe <sub>2</sub> Ti - Fe <sub>2</sub> SiTi	Fe <sub>4</sub> SiTi <sub>2</sub>	4.1.2	64,4	8,0	27,6	6,40	1515	ФС5Ti25
Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>2</sub> - Fe <sub>2</sub> Ti - - Fe <sub>4</sub> SiTi - Fe <sub>2</sub> SiTi								
Fe <sub>2</sub> SiTi - Fe <sub>2</sub> Si	Fe <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> Ti	4.2.1	68,3	17,1	14,6	6,30	1385	ФС15Ti15
FeSiTi - Fe <sub>4</sub> SiTi - - Fe <sub>2</sub> Si - Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Ti								
эвтектические сплавы								
Fe <sub>4</sub> Ti - Fe <sub>4</sub> SiTi	Fe <sub>8</sub> SiTi <sub>2</sub>	8.1.2 (Э <sub>1</sub> )	78,3	4,9	16,8	7,03	1340	ФС5Ti15
Fe <sub>4</sub> SiTi - Fe <sub>3</sub> Ti - Fe <sub>6</sub> Ti								
Fe <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> - Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Ti	Fe <sub>5</sub> Si <sub>4</sub> Ti	5.4.1 (Э <sub>2</sub> )	63,6	25,5	10,9	6,08	1325	ФС25Ti10
Fe <sub>2</sub> Si - FeSi - Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Ti								
Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Ti - Fe <sub>2</sub> Si <sub>3</sub>	Fe <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> Ti	4.5.1 (Э <sub>3</sub> )	54,3	34,0	11,7	5,54	1350	ФС30Ti10
Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Ti - FeSi - FeSi <sub>2</sub>								
Fe <sub>2</sub> Si <sub>12</sub> Ti - Si <sub>6</sub> Ti	FeSi <sub>9</sub> Ti	1.9.1 (Э <sub>4</sub> )	15,7	70,8	13,5	3,46	1250	ФС70Ti10
SiTi <sub>3</sub> - Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>4</sub> - Ti	FeSiTi <sub>5</sub>	1.1.5 (Э <sub>5</sub> )	17,3	8,6	74,1	4,85	1350	ФС10Ti70
SiTi <sub>6</sub> - Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>4</sub>								
FeTi <sub>3</sub> - Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>4</sub>	Fe <sub>4</sub> SiTi <sub>10</sub>	4.1.10 (Э <sub>6</sub> )	30,6	3,8	65,6	5,45	1420	ФС5Ti65
FeTi <sub>4</sub> - FeTi <sub>2</sub> - Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>4</sub>								
Fe <sub>3</sub> Ti <sub>2</sub> - Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>2</sub>	Fe <sub>5</sub> SiTi <sub>4</sub>	5.1.4 (Э <sub>7</sub> )	56,0	5,6	38,4	6,26	1430	ФС5Ti35
FeTi - Fe <sub>2</sub> Ti - Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>2</sub>								



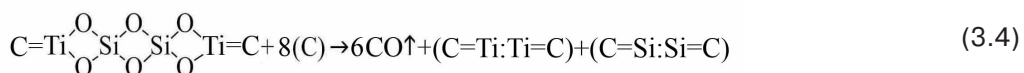
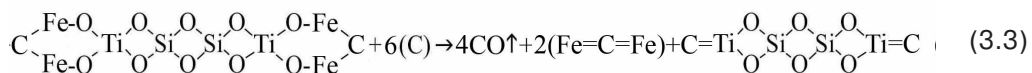
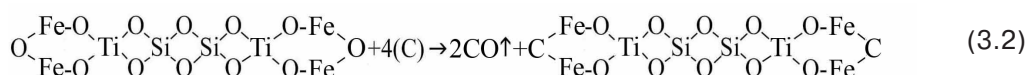
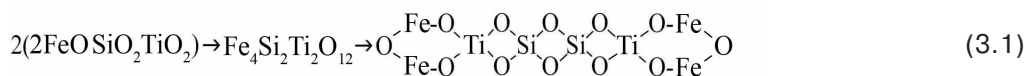
*продолжение таблицы 3*

сплавы кремния								
FeSi <sub>2</sub> - Si <sub>2</sub> Ti	Fe <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> Ti	2.6.1	34,2	51,2	14,6	4,50	1330	ФС50Ti15
Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Ti - FeSi <sub>2</sub> - Si <sub>2</sub> Ti	Fe <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> Ti	2.4.1	41,2	41,2	17,6	4,95	1390	ФС40Ti15
FeSi <sub>4</sub> - Si <sub>4</sub> Ti	Fe <sub>2</sub> Si <sub>12</sub> Ti	2.12.1	22,6	67,7	9,7	3,76	1600	ФС65Ti10
Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Ti - Si <sub>2</sub> Ti - SiTi	Fe <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> Ti <sub>3</sub>	2.5.3	28,2	35,4	36,4	4,65	1560	ФС35Ti35
Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Ti - Si <sub>2</sub> Ti	FeSi <sub>2</sub> Ti	1.2.1	35,0	35,0	30,0	4,91	1680	ФС35Ti30
сплавы титана								
Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>2</sub> - Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>12</sub>	Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>7</sub>	2.1.7	23,5	5,9	70,6	5,45	1650	ФС5Ti70
FeTi <sub>4</sub> - SiTi <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>12</sub>	2.1.12	15,6	4,0	80,4	4,94	1350	ФС5Ti80
Fe <sub>2</sub> SiTi <sub>2</sub> - SiTi - SiTi <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> Ti <sub>5</sub>	2.3.5	25,7	19,3	55,0	4,69	1825	ФС20Ti55
сплавы железа								
Fe <sub>6</sub> Ti - Fe <sub>6</sub> Si	Fe <sub>12</sub> SiTi	12.1.1	89,8	3,8	6,4	7,44	1450	ФС5Ti5

сплавы в первичной зоне 201-210-011: ФС10Ti15, ФС25Ti20, ФС10Ti40, ФС15Ti25, ФС20Ti35, а также высоколегированные титаном: ФС20Ti55, ФС5Ti55 и ФС5Ti80.

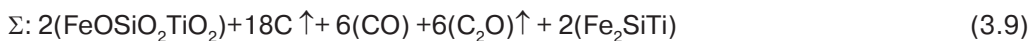
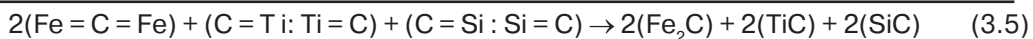
*Механизм рудно-восстановительных процессов получения углеродистых сплавов ферросиликотитана*

Механизм рудно-восстановительных процессов получения углеродистых сплавов ферросиликотитана (ферросилит) определяется структурно-химическим состоянием промежуточных фаз системы FeO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>, на базе которой формируются шихтовые материалы, включающие железо-рудное сырьё или ильменитовую руду, кварцит, рутил, углеродистые материалы. Первичной промежуточной фазой комплексных силикатов железо-титан является триангуляционная фаза стехиометрического состава 2FeOSi<sub>2</sub>TiO<sub>2</sub> (50,7/21,1/28,2, T<sub>л</sub> ~ 1380 °C – см. табл. 1). Первичной промежуточной фазой комплексных силицидов железо-титан является интерметаллид стехиометрического состава Fe<sub>2</sub>SiTi (59,6/14,9/25,5, T<sub>л</sub> ~ 1480 °C – см. табл. 3) – сплав марки ФС15Ti25. Механизм получения сплава ФС15Ti25 включает многостадийные этапы углеродистого восстановления оксидных фаз, отвечающие последовательному ряду структурно-химических реакций:





## Получение и обработка расплавов



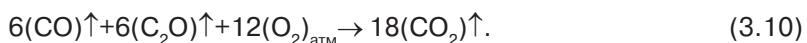
Реакция (3.1) – образование полигональной ячейки первичной промежуточной оксидной фазы. Многостадийность механизма получения углеродтермического сплава вызвана различным уровнем химического сродства к кислороду железа, титана, кремния. Реакция (3.2) – начальная стадия восстановления оксидов железа, реакции (3.3-3.4) – восстановление оксидов титана и кремния с образованием карбидных фаз, реакция (3.5) – перевод структурных формул карбидных фаз в стехиометрические, реакции (3.6-3.8) – металлизации карбидных фаз с образованием закиси углерода ( $\text{C}_2\text{O}$ ), которая открывает последовательный ряд оксидов углерода разной валентности [7].

Балансовое уравнение суммарной реакции (3.9) позволяет рассчитать расходные коэффициенты шихтовых материалов и конечных продуктов структурно-химических реакций: соотношение масс восстановителя (С), оксидной фазы шихтовых материалов (Ш), сплава (Ме) и газовой фазы (газ).

$$M_{\text{C}} : M_{\text{Ш}} : M_{\text{Ме}} : M_{\text{ГАЗ}} = 1,0 : (2,5-3,0) : (1,5-2,0) : 2,0,$$

где  $M_{\text{Ш}} : M_{\text{Ме}} = 2 : 1$ .

Газовые компоненты продуктов реакции окисляются в атмосфере воздуха с образованием углекислого газа по реакции (3.10):



### Выводы

- Выполнен системный анализ структурно-химического состояния дуплекс-системы силикаты-силициды железо-титана с помощью полигональных диаграмм состояния тройных систем  $\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$  и  $\text{Fe}-\text{Si}-\text{Ti}$ , построенных графо-аналитическим методом на базе бинарных оксидных и металлических диаграмм, позволяющих классифицировать составы шихтовых материалов и сплавов ферросиликотитана (ферросилит).

- Представлены структурные ионно-молекулярные комплексы (СИМ-комплексы) исходных компонентов и первичных промежуточных оксидных фаз в виде полигональных и полиэдрических ячеек, геометрические параметры которых (длина, площадь, объём) рассчитаны по орбитальным радиусам атомов с ионным типом химической связи. Параметры СИМ-комплексов определяют термодинамическую прочность оксидов в убывающем ряду  $\text{SiO}_2 \uparrow \text{TiO}_2 \uparrow \text{FeO}$ , что позволяет установить последовательность структурно-химических реакций восстановления шихтовых материалов.

- Исследован механизм рудно-термического процесса получения углеродтермических сплавов ферросилита, включающий последовательный ряд структурно-химических реакций восстановления минерального сырья углеродом с образованием промежуточных оксидных, оксикарбидных, карбидных, металлических и газовой фаз, который позволяет оптимизировать состав шихтовых материалов и марочный состав сплавов с учётом взаимосвязи компонентов дуплекс-системы оксиды-металлы.



### Список литературы

1. Структурно-химическое состояние и классификация оксидных и металлических фаз системы железо-кремний-титан-кислород. Сообщение 1. Анализ структурно - химического состояния дуплекс-системы титанаты-титаниды железа / Б. Ф. Белов, А. И. Троцан, И. Л. Бродецкий и др. // Процессы литья. – 2015. – № 2. – С. 10-17.
2. Структурно-химическое состояние и классификация оксидных и металлических фаз системы железо-кремний-титан-кислород. Сообщение 2. Структурно-химическое состояние дуплекс-системы силикаты-силициды титана / Б. Ф. Белов, А. И. Троцан, И. Л. Бродецкий // Там же. – 2015. – № 5. – С. 47-54.
3. Методика построения полигональных диаграмм состояния бинарных металлургических систем / Б. Ф. Белов, А. И. Троцан, П. С. Харлашин, Ф. С. Крейденко // Свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір. ПА № 2825 від 29.02.2000 р.
4. Метод побудови полігональних діаграм стану потрійних металургійних систем / Б. Ф. Белов, І. Д. Буга, А. І. Троцан та інші // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 48344 від 18.03.2013.
5. Троцан А. И. О природе химической связи элементов в металлургических фазах / А. И. Троцан, Б. Ф. Белов, П. С. Харлашин // Изв. ВУЗов. ЧМ. – 2002. – № 4. – С. 60-64.
6. Диаграммы состояния двойных многокомпонентных систем на основе железа / Справочник под ред. проф. Д. А. Банньих // М.: Металлургия. – 1986. – 440 с.
7. Рябчиков И. В. О механизме взаимодействия оксидов металлов с углеродом / И. В. Рябчиков, Б. Ф. Белов, В. Г. Мизин // Сталь. – 2014. – № 5. – С. 35-40.



### References

1. Belov B. F., Trotsan A. I., Brodetskiy I. L. et al. The structurallychemical state and classification phases of the oxide and metal in system ironsilicontitaniumoxygen. Message 1. The structurally-chemical analysis of the state duplexsystem titanatetitanades of the iron. Casting Processes. 2015, № 2 (110), pp. 10-17 [in Russian].
2. Belov B. F., Trotsan A. I., Brodetskiy I. L. et al. The structurallychemical state and classification phases of the oxide and metal in system ironsilicontitaniumoxygen. Message 2. The structurally-chemical analysis of the state duplexsystem silicatessilicides of the titan. Casting Processes. 2015, № 5 (113), pp. 8-15 [in Russian].
3. Belov B. F., Trotsan A. I., Charlashin P. S., Creydenko F. S. Method of construction of the polygonal state diagrams binary metallurgical systems. The certificate of state registration the intellectual property rights on production. № 2825 of 29.02.2000 [in Russian].
4. Belov B. F., Buga I. D., Trotsan A. I. et al. Method of construction of the polygonal state diagrams triple metallurgical systems. The certificate of state registration the intellectual property rights on production. № 48344 of 18.03.2013 [in Ukrainian].
5. Trotsan A. I., Belov B. F., Charlashin P. S. About the nature of a chemical bond of elements in metallurgical phases. Izvestiya VUZ. Chernaya Metallurgiya. 2002, № 4, pp. 60-64 [in Russian].
6. Diagrams of state the double multicomponent systems on iron basis. Reference book under the editorship of prof. D. A. Bannyh. Moscow: Metallurgy. 1986, 440 p. [in Russian].
7. Rjabchikov I. V., Belov B. F., Mizin V. G. About the interaction mechanism oxides of the metals with carbon. Steel. 2014, № 5, pp. 35-40 [in Russian].

Поступила 26.12.2015