

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

Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев
*НПО «Перспектива», Запорожье

СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОКСИДНЫХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО-КРЕМНИЙ-ТИТАН-КИСЛОРОД. АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДУПЛЕКС-СИСТЕМЫ ТИТАНАТЫ-ТИТАНИДЫ ЖЕЛЕЗА. Сообщение 1

На основе результатов исследования структурно-химического состояния оксидных и металлических фаз дуплекс-системы титанаты-титаниды железа предложены оптимальные составы шихтовых материалов и сплавов ферротитана для ковшовой обработки стали.

Ключевые слова: структурно-химический анализ, полигональные диаграммы, дуплекс-системы, оксиды, фазы, ферросиликотитан, шихта, сплавы.

На основі результатів дослідження структурно-хімічного стану оксидних і металевих фаз дуплекс-системи титанати-титаниди заліза запропоновано оптимальні склади шихтових матеріалів і сплавів ферротитану для ковшової обробки сталі.

Ключові слова: структурно-хімічний аналіз, полігональні діаграми, дуплекс-системи, оксиди, фази, ферросилікотитан, шихта, сплави.

The optimum compositions of burden materials and alloys of the ferrotitanium for ladle treatment of steel on the basis of results research of the structurally-chemical state of the oxide and metal phases duplex-system titanates-titanades of the iron are offered.

Keywords: structurally-chemical analysis, polygonal diagrams, duplexes-systems, oxides, phases, ferrotitanium silicon, furnace, alloys.

Производство ферросплавов является наиболее консервативной отраслью в черной металлургии, характеризуется высокой энерго-материало-трудоемкостью и неустойчивым технологическим режимом выплавки [1].

Эффективность рудно-термического процесса получения ферросплавов и лигатур определяется скоростью и полнотой химических взаимодействий восстановителя с оксидными фазами, исследование которых связано с методическими сложностями при реализации твердо-жидкофазных высокотемпературных химических реакций [1, 2]. Химизм окислительно-восстановительных реакций, включающий количество и последовательность их протекания, сопровождается стохастическим процессом образования промежуточных оксидных фаз между компонентами шихтовых материалов, влияющих на состав, количество и качество конечного металлопродукта.

Цель работы – определение закономерностей взаимосвязи оксидных и металлических фаз дуплекс-систем (оксид / металл) рудно-термического процесса для оптимизации состава компонентов шихтовых материалов и сплавов ферросиликотитана при ковшевой обработке стали.

Поставленная задача решается путем анализа структурно-химического состояния (СХС-анализ [3]) и классификации оксидных и металлических фаз системы

железо-кислород-кремний-титан с помощью полигональных диаграмм состояния (ПДС) $\text{FeO-SiO}_2\text{-TiO}_2$ и Fe-Si-Ti , построенных графо-аналитическим методом на базе бинарных систем во всем интервале концентраций твердых и жидких исходных компонентов [4,5].

Тройная дуплекс-система включает базовые бинарные системы: $\text{FeO-SiO}_2/\text{Fe-Si}$, $\text{FeO-TiO}_2/\text{Fe-Ti}$, $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{Si-Ti}$, которые и являются предметом исследований в настоящем и последующих сообщениях. СХС-анализ дуплекс-системы силикаты-силициды железа выполнен нами ранее [6].

Титанаты железа

Системным классификатором титанатов железа является полигональная диаграмма состояния системы FeO-TiO_2 (рис. 1), включающая 11 промежуточных фаз: $\text{FeO} \rightarrow 12\text{FeOTiO}_2 \rightarrow 6\text{FeOTiO}_2 (\Theta_1) \rightarrow 4\text{FeOTiO}_2 \rightarrow 3\text{FeOTiO}_2 \rightarrow 2\text{FeOTiO}_2 (\text{ППФ}) \rightarrow (\Theta_2) 3\text{FeO}2\text{TiO}_2 \rightarrow \text{FeOTiO}_2 \rightarrow \text{FeO}2\text{TiO}_2 \rightarrow \text{FeO}3\text{TiO}_2 \rightarrow \text{FeO}4\text{TiO}_2 \rightarrow \text{FeO}6\text{TiO}_2 \rightarrow \text{TiO}_2$. На классической диаграмме (вставка рис. 1 [7]) известны лишь три химических соединения – 2FeOTiO_2 , FeOTiO_2 , $\text{FeO}2\text{TiO}_2$ и четыре эвтектики, которые находятся на ПДС FeO-TiO_2 . В табл. 1 приведена классификация промежуточных фаз, включающая химические реакции их образования в линейных системах, стехиометрический и химический состав, а также плотность, температуры образования и плавления, область гомогенности твердых и жидких растворов. Плотность титанатов изменяется от 4,08 до 5,55 г/см³, температура плавления не превышает 1500 °С.

В табл. 2 представлена структуризация оксидных фаз в соответствии с теорией строения металлургических расплавов [3], состоящих из нанометрических элементов – структурных ионно-молекулярных комплексов (СИМ-комплексов), геометрические параметры которых определены из квантово-механических характеристик атомов, рассчитанных по радиально-орбитальной модели электронного строения [8]. СИМ-комплексы представлены в виде структурных элементов двух типов: плоские (двухмерные) полигональные (ПГЯ) и объемные (трехмерные) полиэдрические ячейки (ПДЯ), сосуществующие в матричном моно-нульмерном разупорядоченном растворе.

Геометрический образ диаграммы и тип структурных элементов определяется первичной промежуточной фазой (ППФ), которая отличается максимально плотной упаковкой минимального числа образующих её частиц (атомов). ППФ состава $2\text{FeOTiO}_2 (\text{Fe}_2\text{TiO}_4)$ содержит число частиц $N = 7$, относительная плотность упаковки $S_0 = 0,0140 \text{ нм}^2$, которая рассчитана из приведенной площади полигональной ячейки: $S_0 = S_{\text{ПГЯ}} / N$. Для исходных компонентов $S_0(\text{FeO}) = 0,015 \text{ нм}^2$ и самая плотная у рутила: $S_0(\text{TiO}_2) = 0,011 \text{ нм}^2$. В табл. 2 СИМ-комплексы приведены для исходных компонентов и отдельных промежуточных фаз, включая эвтектическую – $3\text{FeO}2\text{TiO}_2 (\Theta_2)$.

Титаниды железа

СХС-анализ системы FeO-TiO_2 , определяющий последовательный ряд оксидных промежуточных фаз, позволяет не только исследовать механизм шлакообразования в пирометаллургических процессах, но и установить последовательный ряд промежуточных металлических фаз, образующихся в результате руднотермического передела.

На ПДС FeO-TiO_2 к стабильным фазам относятся сингулярные фазы, образующиеся при твердофазных реакциях, плавящихся конгруэнтно и существующих в области гомогенности жидкого раствора (сингулярные фазы). К таким оксидным фазам (рис. 1) относятся, прежде всего, первичная промежуточная фаза 2FeOTiO_2 , а также $\text{FeO}2\text{TiO}_2$. Стабильность металлических фаз, восстановленных из оксидов, подчиняется законам кинетики и зависит от времени релаксации. Продолжительность жизни таких фаз зависит от температуры их образования – чем ниже температура, тем больше время жизни (распада), то есть продолжительность хранения и качества товарной продукции.

Последовательный ряд титанатов железа предполагает последовательный ряд

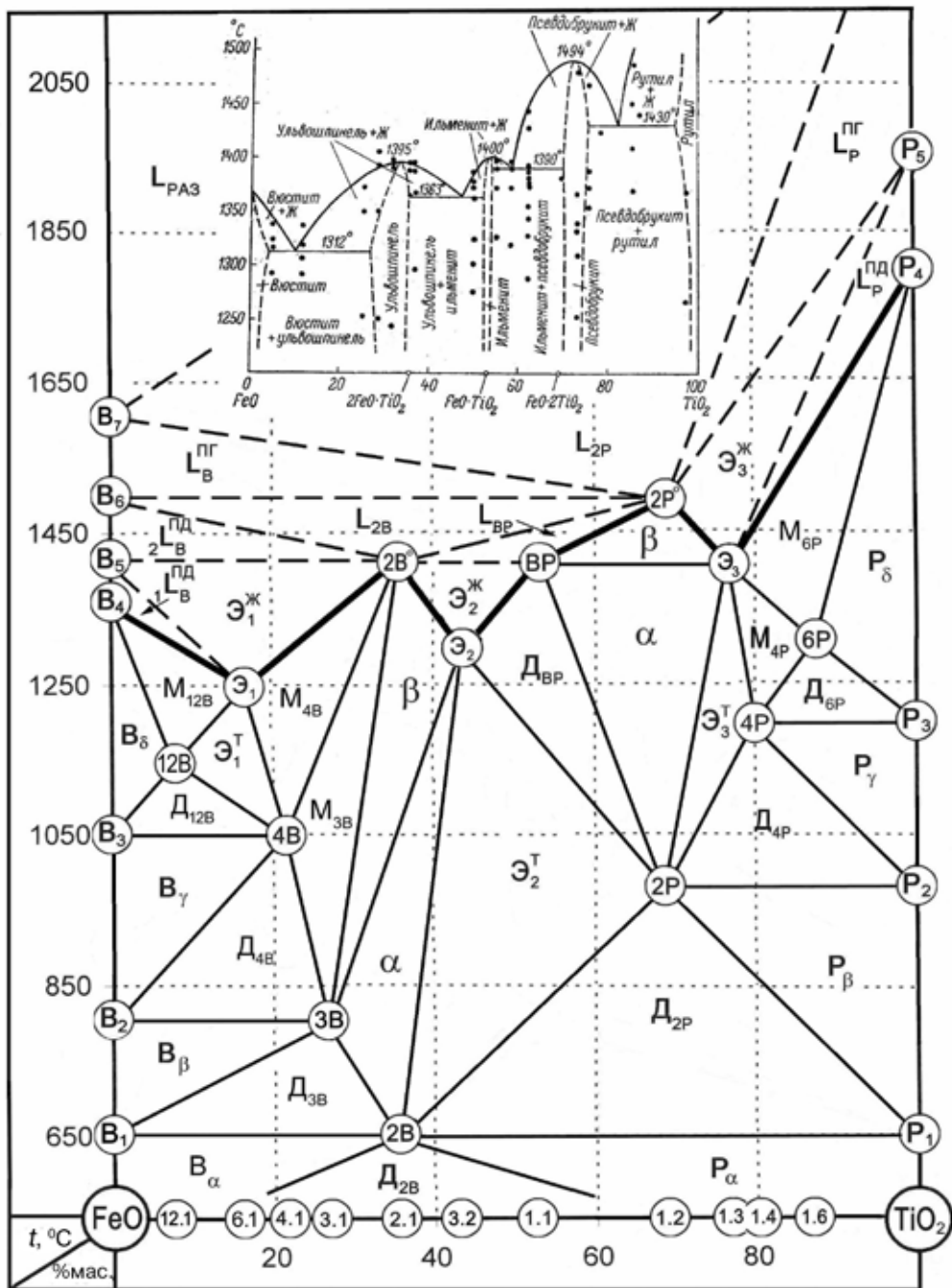


Рис. 1. Полигональная диаграмма системы FeO-TiO₂

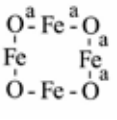
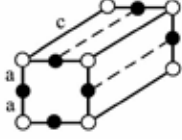

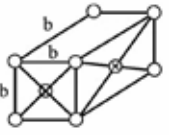
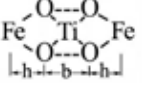

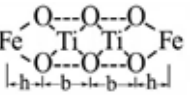
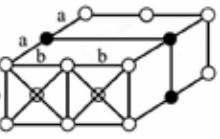
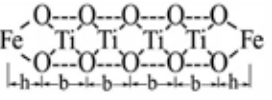
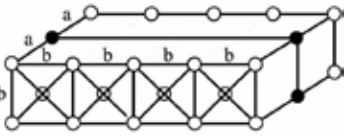
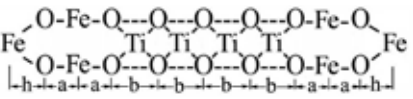
существования интерметаллидов – титанидов железа: $Fe \rightarrow Fe_{12}Ti \rightarrow Fe_6Ti \rightarrow Fe_4Ti (\mathcal{E}_1) \rightarrow Fe_3Ti \rightarrow Fe_2Ti \rightarrow Fe_3Ti_2 (\mathcal{E}_2) \rightarrow FeTi \rightarrow FeTi_2 (\mathcal{E}_3) \rightarrow FeTi_3 \rightarrow FeTi_4 \rightarrow FeTi_5 \rightarrow Ti$, представленный на полигональной диаграмме состояния железо-титан (рис. 2), являющийся системным классификатором сплавов ферротитана, где условно обозначены двухзначными цифрами – стехиометрическими коэффициентами в интерметаллидах: первые – для железа, вторые – для титана. Промежуточные фазы – интерметаллиды, которые образуются в результате химических реакций исходных компонентов (табл. 3), представлены титанидами железа различной природы: эвтектоидные, эвтектические, перитектоидные, сингулярные.

Таблица 1. Классификация титанатов железа

линейные системы	химические реакции	Промежуточные фазы				температура, °С	
		стехиометрический состав	условные обозначения	TiO ₂ %мас.	FeO/TiO ₂	образования	плав-ления
FeO-TiO ₂	$2\text{FeO} + \text{TiO}_2 \leftrightarrow 2\text{FeOTiO}_2$ $3(2\text{FeOTiO}_2) \leftrightarrow 3\text{FeO}_2\text{TiO}_2 + 3\text{FeO}_2\text{TiO}_2$	2FeOTiO ₂	2.1 (2В)	35,7	1,8	650 н.д.*	1400 1395
FeO-2FeOTiO ₂	$\text{FeO} + 2\text{FeOTiO}_2 \leftrightarrow 3\text{FeOTiO}_2$ $2(3\text{FeOTiO}_2) \leftrightarrow 4\text{FeO}_2\text{TiO}_2 + 2\text{FeO}_2\text{TiO}_2$	3FeOTiO ₂	3.1 (3Ф)	27,0	2,7	850 н.д.	"-"** н.д.
FeO-3FeOTiO ₂	$\text{FeO} + 3\text{FeOTiO}_2 \leftrightarrow 4\text{FeOTiO}_2$ $2(4\text{FeOTiO}_2) \leftrightarrow 6\text{FeO}_2\text{TiO}_2 + 2\text{FeO}_2\text{TiO}_2$	4FeOTiO ₂	4.1 (4В)	26,3	2,8	1050 н.д.	"-" н.д.
FeO-4FeOTiO ₂	$8\text{FeO} + 4\text{FeOTiO}_2 \leftrightarrow 12\text{FeOTiO}_2$	12FeOTiO ₂	12.1 (12В)	8,5	10,8	1150 н.д.	"-" н.д.
12FeOTiO ₂ - -4FeOTiO ₂	$12\text{FeOTiO}_2 + 3(4\text{FeOTiO}_2) \leftrightarrow$ $\leftrightarrow 4(6\text{FeO}_2\text{TiO}_2)$	6FeOTiO ₂	6.1 (Э ₁)	15,6	5,4	1250 1280	1250 1280
TiO ₂ -2FeOTiO ₂	$3\text{TiO}_2 + 2\text{FeOTiO}_2 \leftrightarrow 2(2\text{FeO}_2\text{TiO}_2)$ $2(2\text{FeO}_2\text{TiO}_2) \leftrightarrow \text{FeO}_2\text{TiO}_2 + \text{FeO}_3\text{TiO}_2$	FeO ₂ TiO ₂	1.2 (2Р)	69,0	0,45	1000 н.д.	1500 1495
FeO ₂ TiO ₂ - -TiO ₂	$\text{FeO}_2\text{TiO}_2 + 2\text{TiO}_2 \leftrightarrow \text{FeO}_4\text{TiO}_2$ $3(\text{FeO}_4\text{TiO}_2) \leftrightarrow 2(\text{FeO}_3\text{TiO}_2) + \text{FeO}_6\text{TiO}_2$	FeO ₄ TiO ₂	1.4 (4Р)	81,6	0,23	1200 н.д.	"-" н.д.
TiO ₂ -FeO ₄ TiO ₂	$2\text{TiO}_2 + \text{FeO}_4\text{TiO}_2 \leftrightarrow \text{FeO}_6\text{TiO}_2$	FeO ₆ TiO ₂	1.6 (6Р)	87,0	0,15	1300 н.д.	"-" н.д.
FeO ₂ TiO ₂ - -FeO ₄ TiO ₂	$\text{FeO}_2\text{TiO}_2 + \text{FeO}_4\text{TiO}_2 \leftrightarrow 3(\text{FeO}_3\text{TiO}_2)$	FeO ₃ TiO ₂	1.3 (Э ₃)	76,9	0,30	1400 1430	1400 1430
FeO ₂ TiO ₂ - -3FeO ₂ TiO ₂	$\text{FeO}_2\text{TiO}_2 + 3\text{FeO}_2\text{TiO}_2 \leftrightarrow 4(\text{FeO}_2\text{TiO}_2)$	FeO ₂ TiO ₂	1.1(ВР)	52,6	0,9	1400 н.д.	1400 1400
FeO ₂ TiO ₂ - -2FeO ₂ TiO ₂	$\text{FeO}_2\text{TiO}_2 + 2\text{FeO}_2\text{TiO}_2 \leftrightarrow 3\text{FeO}_2\text{TiO}_2$ $3(3\text{FeO}_2\text{TiO}_2) \leftrightarrow 4(2\text{FeO}_2\text{TiO}_2) + \text{FeO}_2\text{TiO}_2$	3FeO ₂ TiO ₂	3.2 (Э ₂)	42,6	1,35	1300 1360	1300 1360

* н. д. – нет данных; ** – инконгруэнтное плавление

Таблица 2. Структуризация исходных компонентов и промежуточных фаз системы FeO-TiO₂ *

Формульный состав		СИМ-комплексы	
стехиометрический	структурный	геометрические параметры, * (нм)	
		полигональные ячейки (ПГЯ)	полиэдрические ячейки (ПДЯ)
		a=0,173, c=0,346	
FeO	(Fe ₄ O ₄) ⁰ N=8, S ₀ =0,015 S _{пгя} =0,120 нм ²		
	(Fe ₈ O ₈) ⁰ N=16, V ₀ =0,0026 V _{пдя} =0,041 нм ³		
TiO ₂	(TiO ₄) ⁴⁻ N=5, S ₀ =0,0113 S _{пгя} =0,056 нм ²	d=0,238, b=0,208	
	(Ti ₄ O ₈) ⁰ N=12, V ₀ =0,00075 V _{пдя} =0,009 нм ³		
2FeOTiO ₂	(Fe ₂ TiO ₄) ⁰ N=7, S ₀ =0,0140 S _{пгя} =0,098 нм ² L _{пгя} =0,472 нм	h=0,132	
	(Fe ₄ Ti ₂ O ₈) ⁰ N=14, V ₀ =0,0010 V _{пдя} =0,015 нм ³		
FeOTiO ₂	(Fe ₂ Ti ₂ O ₆) ⁰ N=10, S ₀ =0,0141 S _{пгя} =0,141 нм ² L _{пгя} =0,680 нм		
	(Fe ₄ Ti ₄ O ₁₂) ⁰ N=20, V ₀ =0,0015 V _{пдя} =0,0299 нм ³		
FeO2TiO ₂	(Fe ₂ Ti ₄ O ₁₀) ⁰ N=16, S ₀ =0,0142 S _{пгя} =0,228 нм ² L _{пгя} =1,10 нм		
	(Fe ₄ Ti ₈ O ₂₀) ⁰ N=32, V ₀ =0,0019 V _{пдя} =0,060 нм ³		
3FeO2TiO ₂ (Э ₂)	(Fe ₆ Ti ₄ O ₁₄) ⁰ N=24, S ₀ =0,0155 S _{пгя} =0,372 нм ² L _{пгя} =1,784 нм		

* – S_{пгя}, S₀ – общая и приведенная площади полигональной ячейки, соответственно; V_{пдя}, V₀ – общий и приведенный объемы полиэдрической ячейки, соответственно; N – число частиц в ячейке; L_{пгя} – длина полигональной ячейки; ○ – кислород, ● – железо, ⊗ – титан

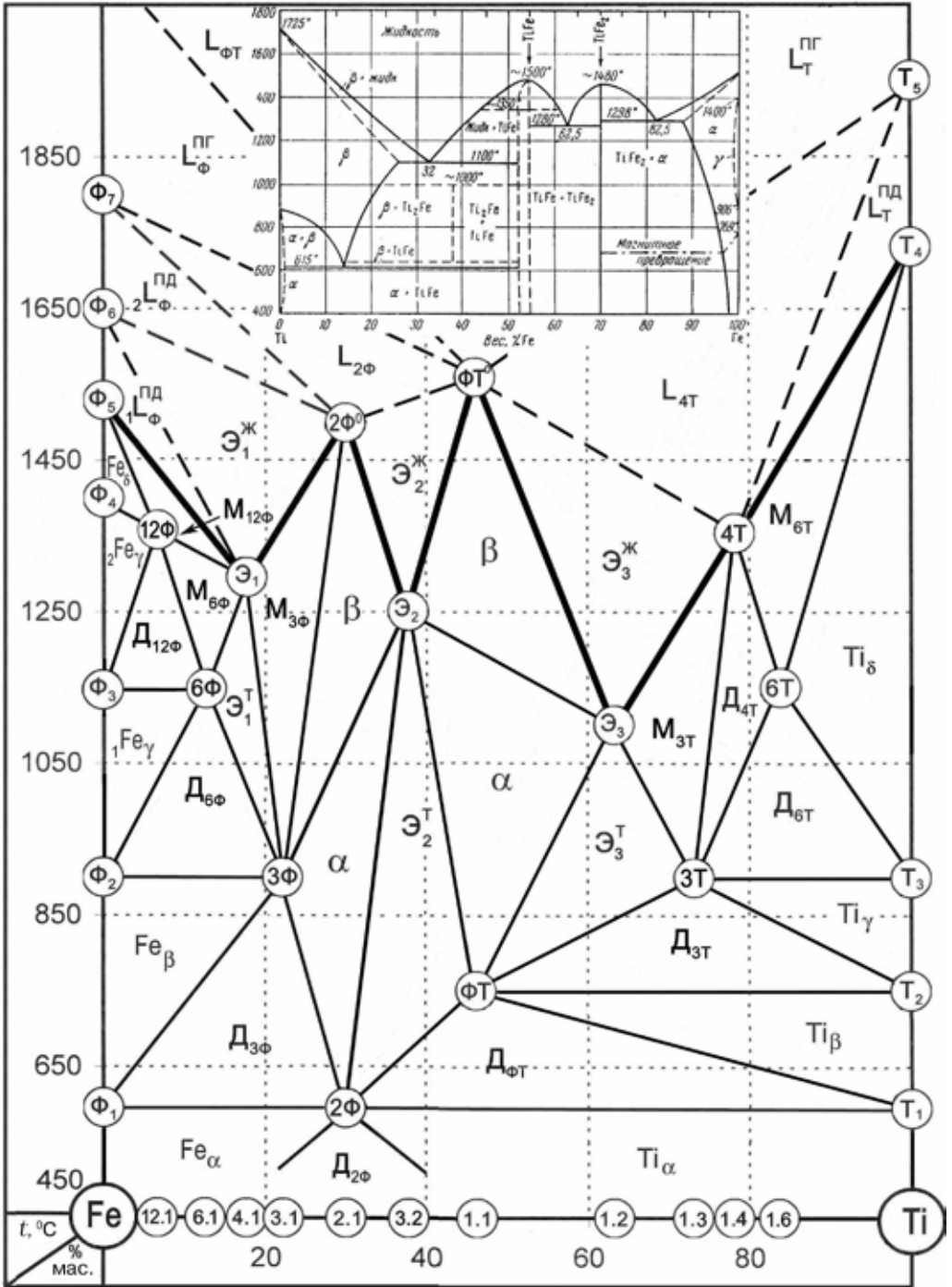


Рис. 2. Полигональная диаграмма системы Fe-Ti

Сингулярные фазы находятся в точках на линии ликвидуса $Fe \rightarrow \Phi_1 \rightarrow Fe_2Ti \rightarrow \Phi_2 \rightarrow FeTi \rightarrow FeTi_2 \rightarrow \Phi_3 \rightarrow FeTi_4 \rightarrow Ti$ и различаются тем, что образуются в жидком или в твердом состоянии и плавятся конгруэнтно. Эвтектоидные фазы (Fe_6Ti , Fe_3Ti , $FeTi_3$) образуются в твердом состоянии и плавятся инконгруэнтно в интервале температур от эвтектической точки до линии ликвидуса в точке плавления сингулярной фазы, ограничивающей область гомогенности жидкой эвтектики. Перитектоидные фазы ($FeTi_6$) образуются в твердом состоянии, сохраняют кристаллическую форму до «перитектической» температуры в сингулярной точке, выше которой переходят

Таблица 3. Классификация сплавов ферротитана

Линейные системы	Промежуточные фазы										Марочный состав
	химические реакции	химические формулы	условные обозначения	Ti, %мас.	Fe/Ti	Fe/Ti	температура, °С				
							образования	плавления			
Fe-Ti	$2\text{Fe} + \text{Ti} \ll \text{Fe}_2\text{Ti}$ $3(\text{Fe}_2\text{Ti}) \ll \text{Fe}_3\text{Ti} + \text{Fe}_3\text{Ti}_2$	Fe_2Ti	2.1 (2Ф)	30,0	6,86	2,33	550 н. д.	1500 1480	ФTi30		
Fe-Fe ₂ Ti	$\text{Fe} + \text{Fe}_2\text{Ti} \ll \text{Fe}_3\text{Ti}$ $2(\text{Fe}_3\text{Ti}) \ll \text{Fe}_4\text{Ti} + \text{Fe}_2\text{Ti}$	Fe_3Ti	6.1 (6Ф)	22,2	7,12	3,5	900 н. д.	"-" н. д.	ФTi20		
Fe-Fe ₃ Ti	$3\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{Ti} \ll \text{Fe}_6\text{Ti}$	Fe_6Ti	6.1 (6Ф)	12,5	7,45	7,0	1150 н. д.	"-" н. д.	ФTi15		
Fe ₆ Ti-Fe ₃ Ti	$\text{Fe}_6\text{Ti} + 2(\text{Fe}_3\text{Ti}) \ll 3(\text{Fe}_4\text{Ti})$	Fe_4Ti	4.1 (Э ₁)	17,6	7,28	4,67	1300 1340	1300 1340	ФTi5		
Fe-Fe ₆ Ti	$6\text{Fe} + \text{Fe}_6\text{Ti} \ll \text{Fe}_{12}\text{Ti}$	Fe_{12}Ti	12.1 (12Ф)	46,2	7,44	14,0	1430 н. д.	"-" н. д.	ФTi30		
Ti-Fe ₂ Ti	$\text{Fe}_2\text{Ti} + \text{Ti} \ll 2(\text{FeTi})$ $4(\text{FeTi}) \ll \text{Fe}_3\text{Ti}_2 + \text{FeTi}_2$	FeTi	1.1 (ФТ)	46,2	6,31	1,17	750 н. д.	1550 1530	ФTi45		
FeTi-FeTi ₆	$3(\text{FeTi}) + 2(\text{FeTi}_6) \ll 5(\text{FeTi}_3)$	FeTi_3	1.3 (3Т)	46,2	2,78	0,39	900 н. д.	"-" н. д.	ФTi70		
FeTi ₃ -Ti	$\text{FeTi}_3 + 3\text{Ti} \ll \text{FeTi}_6$	FeTi_6	1.6 (6Т)	83,7	5,05	0,19	1150 н. д.	"-" н. д.	ФTi80		
FeTi ₃ -FeTi ₆	$2(\text{FeTi}_3) + \text{FeTi}_6 \ll 3(\text{FeTi}_4)$	FeTi_4	1.4 (4Т)	77,4	2,86	0,26	1350 н. д.	1350 н. д.	ФTi75		
FeTi-FeTi ₃	$\text{FeTi} + \text{FeTi}_3 \ll 2(\text{FeTi}_2)$	FeTi_6	1.2 (Э ₃)	63,2	5,74	0,58	1100 1100	1100 1100	ФTi60		

Примечание: н. д. – нет данных; * – инконгруэнтное

в твердо-жидкую фазу до температуры ликвидус и далее остаются жидкими при более высоких температурах в области гомогенности сингулярных фаз.

На классической диаграмме [9] (вставка на рис. 2) известны лишь три интерметаллида и три эвтектики, которые находятся среди промежуточных фаз полигональной диаграммы, что свидетельствует как об адекватности экспериментальных и теоретических данных, так и о значительной большей информативности ПДС.

Промышленные сорта ферротитана гостированы (ГОСТ 4761-91) для марочного состава ФТи25→ФТи30→ФТи35→ФТи40→ФТи70. На основании полученных результатов марочный состав сплавов составляет последовательный ряд: ФТи5→ФТи10→ФТи15→ФТи20→ФТи30→ФТи35→ФТи45→ФТи60→ФТи75→ФТи80, который расширен за счет низко- и высоколегированных сплавов. При этом из приведенного маркировочного ряда стабильными сплавами являются сплавы на базе эвтектоидных (ФТи10, ФТи20, ФТи70), перитектоидных ФТи80 и сингулярных (ФТи30, ФТи45) фаз полигональной диаграммы Fe-Ti которым отвечают интерметаллиды: $Fe_6Ti \rightarrow Fe_3Ti \rightarrow FeTi_3$; Fe_2Ti ; $FeTi$ и шихтовые материалы, отвечающие составу промежуточных оксидных фаз: $6FeOTiO_2 \rightarrow 3FeOTiO_2 \rightarrow FeO3TiO_2$; $FeO6TiO_2$; $2FeOTiO_2 \rightarrow FeOTiO_2$, соответственно. Эвтектические и перитектические сплавы образуются в жидком состоянии и распадаются при затвердевании, эвтектоидные и сингулярные существуют в твердом виде.

Таким образом, на основании проведенного СХС-анализа дуплекс-системы $FeO-TiO_2/Fe-Ti$ определены марочные составы сплавов ферротитана, отвечающие стехиометрическому составу интерметаллидов в области их гомогенности, и шихтовые материалы, отвечающие составу титанатов железа, компонентами которых служат минеральное сырье (рутил, ильменат, железная руда), а также промышленные отходы (железная окалина, углеродистые материалы и др.).

Выводы

Проведен анализ структурно-химического состояния оксидных и металлических фаз дуплекс-системы титанаты-титаниды железа с использованием построенных во всем интервале концентраций твердых и жидких исходных компонентов полигональных диаграмм состояния бинарных систем $FeO-TiO_2$ и $Fe-Ti$.

Установлено, что компоненты шихтовых материалов рудно-термического процесса получения сплавов ферротитана отвечают составу титанатов железа, а сплавы – титанидам железа.

Определены оптимальные составы шихтовых материалов для ковшевой обработки стали на основе титаносодержащих окислов и сплавов ферротитана: $6FeOTiO_2 \rightarrow 3FeOTiO_2 \rightarrow 2FeOTiO_2 \rightarrow FeOTiO_2 \rightarrow FeO3TiO_2$, которым отвечают интерметаллиды: $Fe_6Ti \rightarrow Fe_3Ti \rightarrow Fe_2Ti \rightarrow FeTi \rightarrow FeTi_3$, образующие сплавы марочного состава: ФТи10→ФТи20→ФТи30→ФТи45→ФТи70, соответственно.



Список литературы

1. Рябчиков И. В. Кремнистые ферросплавы и модификаторы нового поколения. Производство и применение / И. В. Рябчиков, В. Г. Мизин, В. В. Андреев // Челябинск: ЮурГУ. – 2013. – 295 с.
2. Гасик М. И. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов: учебн. для вузов / М. И. Гасик, Н. П. Лякишев. – М.: Спб. Интернет инжиниринг. – 1999. – 764 с.
3. Белов Б. Ф. Теория МГС-фаз и ее применение для разработки рафинировочных шлаков / Б. Ф. Белов, А. И. Троцан, И. Л. Бродецкий и др. // ОАО «Черметинформация». Бюл. «Черная металлургия». – 2014. – № 4. – С. 34-41.
4. Белов Б. Ф. Методика побудови полігональних діаграм стану бінарних металургійних систем / Б. Ф. Белов, А. І. Троцан, П. С. Харлашин, Ф. С. Крейденко // Свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір. – ПА № 2825 від 29.02.2000 р.

5. Белов Б. Ф. Метод побудови полігональних діаграм стану потрійних металургійних систем / Б. Ф. Белов, І. Д. Буга, А. І. Троцан та ін. // Свідोцтво про державну реєстрацію авторського права на твір № 48344 від 18.03.2013.
6. Белов Б. Ф. Структурно-химический анализ дуплекс-системы силикаты-силициды железа / Б. Ф. Белов, А. И. Троцан, Ф. С. Крейденко и др. // Бюл. «Черная металлургия». – 2013. – № 10. – С. 31-38.
7. Атлас шлаков. Справочник, пер. с нем. – М.: Металлургия. – 1985. – 208 с.
8. 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.
9. Банных Д. А. Диаграммы состояния двойных многокомпонентных систем на основе железа / Справочник, под ред. Д. А. Банных // М.: Металлургия. – 1986. – 440 с.

Поступила 21.01.2015

УДК 512.017

Я. Ю. Дмитришина

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ II РОДА В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Разработан метод прогнозирования условий, при которых возможны фазовые переходы второго рода в жидкометаллической системе, основанный на представлении о равномерном распределении энергии связи в кристаллической решетке металла. Полученные расчетные данные согласуются с экспериментальными.

Ключевые слова: жидкометаллическая система, фазовые переходы, кристаллическая решетка, энергия связей, обработка металлов, микроструктурная неоднородность, структурные превращения.

Розроблено метод прогнозування умов, за яких можливі фазові переходи другого роду у рідкометалевій системі, що базується на уявленнях про рівномірний розподіл енергій зв'язків в кристалічній ґратці металу. Отримані дані узгоджуються з експериментальними.

Ключові слова: рідкометалева система, фазові переходи, ґратка кристалічна, енергія зв'язку, обробка металів, мікроструктурна неоднорідність, структурні перетворення.

A method for predicting the conditions, under which second order phase transitions in liquid metal systems are possible, was developed. It is based on the concept of a uniform distribution of energy in the crystal lattice of the metal. The calculated data is in agreement with the experimental.

Keywords: liquid-metal system, phase transition, crystal lattice, binding energy, metal working, microstructure inhomogeneity, structure transformation.

Введение

Эффективность обработки металлов и сплавов в жидком состоянии связывают с определенными температурными режимами, а если обработка осуществляется с помощью физических полей, то еще и со способом их наложения. Исследования последних лет показали, что эффект обработки связан с изменением структуры металлической жидкости, при этом существуют температурные интервалы, в которых эти изменения наиболее вероятны. В работах [1-3] экспериментальным