

**ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА**

---

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ  
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА  
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 2 (2022)

---

**ПАВЛОДАР**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**  
выходит 1 раз в квартал

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания  
№ KZ51VPY00036165

выдано  
Министерством информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

Публикация научных исследований по широкому спектру проблем  
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,  
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

**Подписной индекс – 76129**

<https://doi.org/10.48081/UIQR5237>

**Импакт-фактор РИНЦ – 0,342**

---

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);  
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);  
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);  
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

**Члены редакционной коллегии:**

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);  
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);  
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);  
Богомоллов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);  
Кажыбаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

**Зарубежные члены редакционной коллегии:**

Waigang Sun – профессор (Пекин, Китай);  
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);  
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);  
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);  
Magin Laruerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);  
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);  
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);  
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);  
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);  
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);  
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);  
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);  
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);  
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);  
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов  
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

**\*Е. Ж. Шабанов<sup>1</sup>, Н. А. Сәлімгерей<sup>2</sup>, С. Т. Габдуллин<sup>3</sup>,  
Р. Т. Төлеуқадыр<sup>4</sup>, Д. Р. Мұздыбаев<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева,  
Республика Казахстан, г. Караганда

## **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ-ДИАГРАММНЫЙ АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ Cr-Mn-Si-Fe**

*В теории и практике металлургического производства важное значение имеет изучение состояния материалов, вовлекаемых в металлургический передел, в зависимости от температуры и давления. Однако классическое термодинамическое исследование процессов в сложных системах требует применения сложных математических моделей и математических расчетов, и связано с необходимостью определения термодинамических параметров большого количества независимых реакций.*

*Методом термодинамического диаграммного анализа построена диаграмма состояния многокомпонентной металлической системы Cr-Mn-Si-Fe, которая моделирует составы комплексного хром-марганец-кремний содержащего сплава (ФХМнС). Проведенными теоретическими исследованиями установлено, что система состоит из 8 элементарных тетраэдров. Сумма относительных объемов элементарных тетраэдров равна единице (1,00000), что подтверждает верность проведенной тетраэдрации. В работе выведены аналитические выражения каждого тетраэдра.*

*В результате проведенных расчетов установлено, что фазовые составы комплексного сплава ФХМнС характеризуются тетраэдром №2. Найденный тетраэдр является наиболее объемным фазовым треугольником металлической системы Cr-Mn-Si-Fe, следовательно, большой объем тетраэдра обеспечивает благоприятные условия для осуществления процесса выплавки хром-марганец-кремний содержащего сплава т.е. появляется возможность свободно регулировать состава шихт для получения требуемого марочного состава сплава.*

*Ключевые слова: диаграмма, хром, марганец, фаза, метод Хиза, комплексный сплав.*

### **Введение**

В теории и практике металлургии важное значение имеет изучение состояния материалов, вовлекаемых в металлургический передел, в зависимости от температуры и давления. Однако классическое термодинамическое исследование процессов в сложных системах требует применения сложных математических расчетов и связано с необходимостью определения термодинамических параметров большого количества независимых реакций.

### Материалы и методы

В связи с этим дилеммой классическому термодинамическому исследованию процессов в металлургии является термодинамически-диаграммный анализ. Этот метод эффективен в плане приложения к металлургической технологии, поскольку позволяет выявить особенности фазового состояния вовлекаемых в металлургический передел сырьевых материалов. При этом конечным результатом таких исследований является диаграмма фазового состава отдельно взятой системы, наиболее близкой к составам металлургической продукции. По этой диаграмме можно наглядно проследить эволюцию фазовых превращений в шлаковых и металлических системах и прогнозировать конечное их состояние [1, 2].

Согласно поставленным задачам, необходимо выявить фазовые закономерности превращения в металлических системах на основе хрома, марганца и установление областей составов в сложных металлических расплавах.

В настоящей работе построена диаграмма фазового состава четырехкомпонентной системы Cr-Mn-Si-Fe и математическая модель для оценки вида и количества образующихся в ней вторичных фаз.

Система Cr-Mn-Si-Fe характеризует составы комплексного сплава, который получает из бедных хромовых и марганцевых руд карботермическим методом. Сплав ФХМнС используется для раскисления и легирования стали.

В графическом изображении четырехкомпонентная система Cr-Mn-Si-Fe представляет собой тетраэдр, сложенный из четырех трехкомпонентных систем. При их анализе для построения диаграммы производился отбор только конгруэнтно плавящихся соединений.

Система Fe-Cr-Si состоит из трех бинарных систем: Fe-Cr; Cr-Si и Fe-Si. В системе Fe-Cr двойные соединения не обнаружены, а во втором имеются четыре силицида хрома:  $Cr_3Si$ ;  $CrSi$ ;  $Cr_5Si_3$ ;  $CrSi_2$ , один из которых ( $CrSi$ ) плавится с разложением (инконгруэнтно). В последней бинарной системе имеется пять силицидов железа:  $Fe_5Si_3$ ;  $FeSi_2$ ;  $FeSi$ ;  $Fe_3Si$ ;  $Fe_2Si$ , три из которых ( $Fe_5Si_3$ ;  $FeSi_2$ ;  $Fe_3Si$ ) плавятся инконгруэнтно и не взяты для построения диаграммы. Обнаруженные конгруэнтные соединения плавятся в интервале температур 1212-1770 °С. В результате проведения триангуляции системы Fe-Cr-Si (рисунок 1) выявлено шесть термодинамически-устойчивых областей ( $Fe-Cr_3Si-Cr$ ;  $Fe-Fe_2Si-Cr_3Si$ ;  $Fe_2Si-Cr_3Si-FeSi$ ;  $FeSi-Cr_3Si-Cr_5Si_3$ ;  $FeSi-Cr_5Si_3-CrSi_2$ ;  $FeSi-CrSi_2-Si$ ).

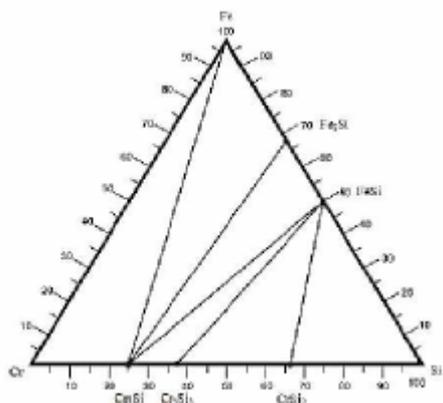


Рисунок 1 – Фазовые диаграммы системы Fe-Cr-Si

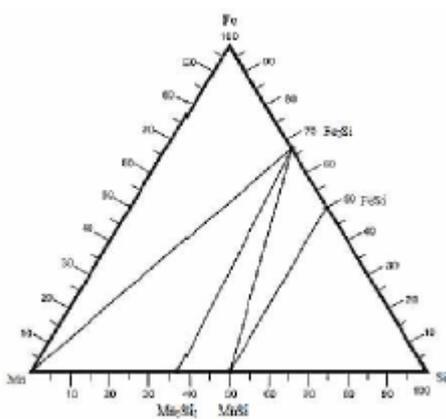


Рисунок 2 – Фазовые диаграммы системы Fe-Mn-Si

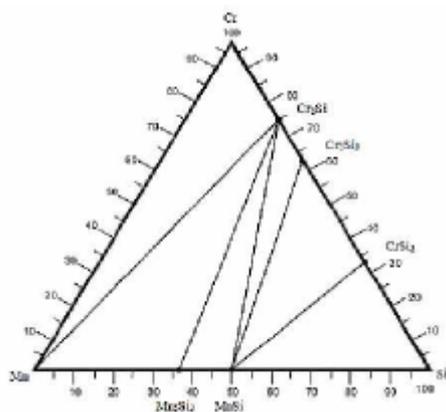


Рисунок 3 – Фазовые диаграммы системы Cr-Mn-Si

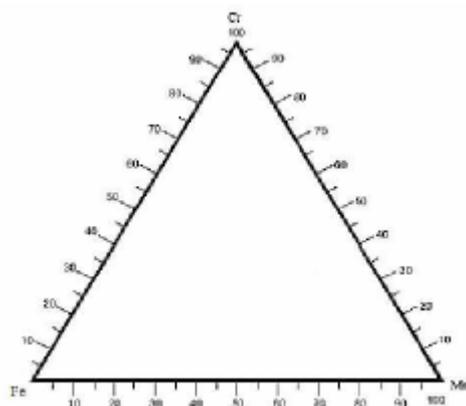


Рисунок 4 – Фазовые диаграммы системы Cr-Mn-Fe

**Система Fe-Mn-Si** состоит из трех двойных систем: Fe-Mn – не имеет бинарных соединений; Mn-Si - в системе имеются четыре силицида марганца:  $Mn_5Si_3$ ; MnSi;  $Mn_{11}Si_{19}$ ;  $Mn_3Si$ , два последние из которых плавятся инконгруэнтно и не приняты для построения диаграммы. Система Fe-Si, имеющиеся в которой силициды железа были перечислены выше. Таким образом, в этой трехкомпонентной металлической подсистеме обнаружено четыре конгруэнтных соединений ( $FeSi$ ,  $Fe_2Si$ ,  $Mn_5Si_3$ , MnSi). С использованием метода термодинамически-диаграммного анализа эта система (рисунок 2) разбивается на пять устойчивых областей ( $Fe-Mn-Fe_2Si$ ;  $Mn-Fe_2Si-Mn_5Si_3$ ;  $Fe_2Si-Mn_5Si_3-MnSi$ ;  $Fe_2Si-MnSi-FeSi$ ;  $MnSi-FeSi-Si$ ).

При проведении триангуляции выявила в **системе Cr-Mn-Si** (рисунок 3) шесть термодинамически-устойчивых областей ( $Mn-Cr_3Si-Cr$ ;  $Mn_5Si_3-Cr_3Si-Mn$ ;  $MnSi-Cr_3Si-Mn_5Si_3$ ;  $Cr_5Si_3-MnSi-Cr_3Si$ ;  $CrSi_2-MnSi-Cr_5Si_3$ ;  $Si-CrSi_2-MnSi$ ). А также система состоит из трех бинарных систем: Cr-Mn; Cr-Si; Mn-Si. В первой системе двойные соединения отсутствуют, а во второй и третьей системе имеющиеся силициды хрома и марганца были описаны выше в двух тройных системах. Таким образом, в системе имеются пять конгруэнтных соединений ( $Cr_3Si$ ,  $Cr_5Si_3$ ,  $CrSi_2$ ,  $Mn_5Si_3$  и MnSi).

**Система Cr-Mn-Fe** состоит из трех бинарных систем: Cr-Mn, Mn-Fe, Cr-Fe. Все три двойные системы не имеют бинарных соединений (рисунок 4).

В итоге, рассмотрев по аналогичному методу все треугольники четырех тройных подсистем, выводили диаграмму фазового состава системы Cr-Mn-Si-Fe. Таким образом, изученные фазовые равновесия четверной металлической системы Cr-Mn-Si-Fe моделирующей составы различных марок комплексного сплава ФХМнС, привели к тому, что она состоит из 8 элементарных тетраэдров. Резюльтированные элементарные четверные системы и их объемы сведены в таблицу 1.

Таблица 1

№	Тетраэдер	Объем
1	Fe-Cr-Cr <sub>3</sub> Si-Mn	0,152
2	Fe-Cr <sub>3</sub> Si-Fe <sub>2</sub> Si-Mn	0,1696
3	Fe <sub>2</sub> Si-Mn-Mn <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> -Cr <sub>3</sub> Si	0,158746
4	Fe <sub>2</sub> Si- Mn <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> -MnSi- Cr <sub>3</sub> Si	0,069875
5	Fe <sub>2</sub> Si-Cr <sub>3</sub> Si-FeSi-MnSi	0,074776
6	FeSi-Cr <sub>3</sub> Si-Cr <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> -MnSi	0,040684
7	FeSi-Cr <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> -CrSi <sub>2</sub> -MnSi	0,121611
8	FeSi-CrSi <sub>2</sub> -Si-MnSi	0,212708
Итого		1,000000

Разбивка общей системы осуществлена с учетом конгруэнтных соединений. Сумма относительных объёмов элементарных тетраэдров равна единице (1,000000), что подтверждает верность проведённой тетраэдрации.

Данные диаграммы фазового состава можно обработать аналитически без визуализации системы с получением уравнений для изучения ее физико-химических свойств [3, 4]. Простейший и доступный для ручного расчета метод выведения уравнений трансформации, выражающих любую вторичную систему через первичные компоненты базовой системы, изложен в известной работе [5]. Критерием месторасположения заданного состава расплавов в одну из квазисистем, является положительные величины n-го количества вторичных компонентов, определенного политопа, рассчитанных по уравнению Хиза. С учетом вышеуказанного, по методике [5, 6] выведены коэффициенты, вычисленные для каждого вторичного компонента из 8 квазисистем базового тетраэдра и представлены в таблице 2.

На рисунке 5 представлена полученная нами фазовая диаграмма четырехкомпонентной системы Cr-Mn-Si-Fe. Графически она изображается в виде тетраэдра.

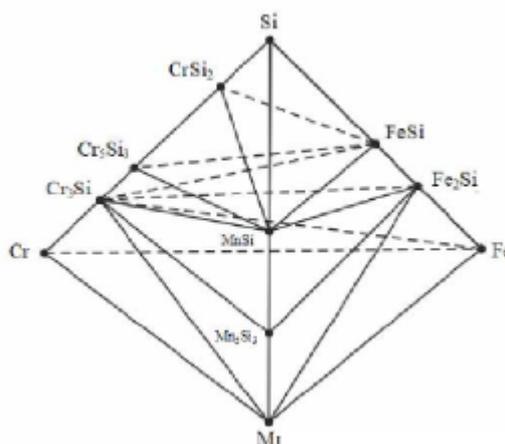


Рисунок 5 – Тетраэдрация металлической системы Cr-Mn-Si-Fe

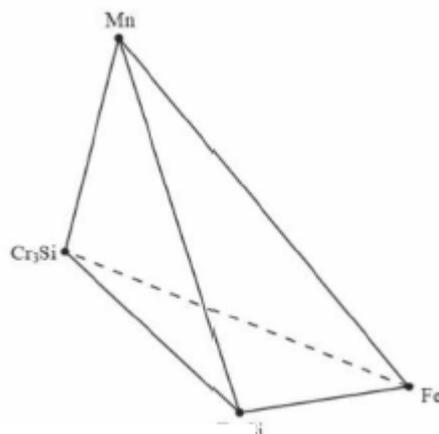


Рисунок 6 – Тетраэдр, моделирующий состав продуктов плавки

**Результаты и обсуждение**

В результате выяснилось, что состав сплава ФХМнС, получаемые из смеси хромовых и марганцевых руд, моделируются тетраэдром № 2 (рисунок 6). Данный тетраэдр имеет второе значение по относительному объему среди восьми найденных тетраэдров. В свою очередь большой объем четырехгранника обеспечивает наиболее благоприятные условия осуществления процесса плавки, т.е. свободного регулирования по составу шихты.

Таблица 2 – Перечень элементарных тетраэдров, их объемы и коэффициенты уравнений для расчета равновесных соотношений вторичных компонентов системы Cr-Mn-Si-Fe

Исходные компоненты	Коэффициенты	Тетраэдр, их объемы и коэффициенты трансформации							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		Fe-Cr-Cr <sub>3</sub> Si-Mn	Fe-Fe <sub>2</sub> Si-Cr <sub>3</sub> Si-Mn	Mn <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> -Fe <sub>2</sub> Si-Cr <sub>3</sub> Si-Mn	Mn <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> -Fe <sub>2</sub> Si-Cr <sub>3</sub> Si-MnSi	FeSi-Fe <sub>2</sub> Si-Cr <sub>3</sub> Si-MnSi	FeSi-Cr <sub>3</sub> Si-Cr <sub>3</sub> Si-MnSi	FeSi-Cr <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> -Cr <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> -MnSi	FeSi-Si-CrSi <sub>2</sub> -MnSi
Объемы		0,152	0,170	0,159	0,070	0,075	0,041	0,122	0,213
Fe	a1	1	1	-1,068	1,609	-1,504	1,499	1,499	1,499
	a2	0	0	1,25	1,25	2,504	-4,602	0,873	-0,499
	a3	0	0	0	0	0	4,103	-1,372	0
	a4	0	0	0,818	-1,859	0	0	0	0
Cr	b1	0	0,717	-0,766	1,154	-1,078	0	0	0
	b2	1	-0,896	0	0	0,899	-1,652	1,887	-1,079
	b3	0	1,179	1,179	1,179	1,179	2,652	-0,887	2,079
	b4	0	0	0,58676	-1,3330	0	0	0	0
Mn	c1	0	0	0	3,272	-3,027	0	0	0
	c2	0	0	0	0	2,549	-4,685	0,889	-0,508
	c3	0	0	0	0	0	4,177	-1,397	0
	c4	1	1	1	-2,272	1,508	1,508	1,508	1,508
Si	d1	0	-4	4,274	-6,437	6,015	0	0	0
	d2	-5,579	5	0	0	-5,015	9,217	-1,749	1
	d3	6,579	0	0	0	0	-8,217	2,749	0
	d4	0	0	-3,274	7,437	0	0	0	0

Хронология перемещения относительных составов сплава ФХМнС по содержанию в них хрома и марганца, проходит в тетраэдре, приведенных в таблице 3.

Таблица 3 – Расчетный химический состав сплава ФХМнС, получаемого из смеси хромовых и марганцевых руд, а также перечень тетраэдров, в которых они располагаются

Марка сплава	Cr	Fe	Mn	Si	Тетраэдр	Объем
£Cr+Mn=55%	27,24	30,13	27,34	9,76	Fe-Cr3Si- Fe2Si-Mn	0,1696

### Выводы

Таким образом, приведенные сведения и результаты проведенных расчетов подтверждают достоверность тетраэдрации диаграммы фазового строения металлической системы Cr-Mn-Si-Fe. Это впоследствии позволит определить фазовый состав металлических продуктов при выплавке различных марок комплексного сплава ФХМнС.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Байсанов, С. О., Нургали, Н. З., Алмагамбетов, М. С.** Математическое моделирование диаграммы фазового состава CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> // Промышленность Казахстана. – 2008. – № 4(49). – С. 75–77.

2 **Нурумғалиев, А. Х., Киекбаева, Е. Е.** Исследование кинетики совместного восстановления железа, марганца и хрома из концентратов // Караганда : Труды Университета. – 2008. – № 1. – С. 20–23

3 **Касенов, Б. К.** Методы прикладной термодинамики в химии и металлургии / Б. К. Касенов, М.К. Алдабергенов, А. С. Пашинкин, Ш. Б. Касенова, Г. Т. Балакеева, С. М. Адекенов. – Караганда : «Гласир», 2008. – 332 с.

4 **Marey, G. M.** Analytical Methods in Phase-Rule Problems // J. Phys. Chem. –2003. – Vol. 34. – № 8. – P. 1745–1750.

5 **Dah'i, J. A.** Analytical treatment of Multicomponent system // J. Amer. Ceram. Soc. – 2001. – Vol. 52. – P. 698–729.

6 **Heath, D. L.** Mathematical Treatment of Multicomponent Systems // Jour. Amer. Ceram. Soc. – 1957. – Ш. 40. – № 2. – P. 50–53.

7 **Акбердин, А. А.** Балансовый метод расчета равновесного фазового состава многокомпонентных систем // КИМС. – 1995. – № 3. – С. 92–93.

8 **Толымбеков, М. Ж., Байсанов, С. О.** Состояние и перспективы развития ферросплавного производства Казахстана // Сталь. – М., 2007. – № 8. – С. 45–68.

9 **Толымбеков, М. Ж., Байсанов, С. О., Привалов, О. Е., Осипова, Л. В.** Состояние ферросплавного производства Казахстана и перспективы его развития // Сталь. – 2008. – № 8. – С. 47–51.

10 Симбинов, Р. Д., Малышев, В. П. Термодинамическое, стехиометрическое и эксергетическое моделирование фазовых равновесий. – Алматы : Ғылым, 1999. – 100 с.

## REFERENCES

1 Baysanov, S. O., Nurgali, N. Z., Almagambetov, M. S. Matematicheskoe modelirovanie diagrammy fazovogo sostava CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> [Mathematical modeling of the diagram of the phase composition of CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>] // Promyshlennost Kazakhstana. – 2008. – № 4(49). – P. 75–77.

2 Nurumgaliev, A. Kh., Kiekbaeva, E. E. Issledovanie kinetiki sovmestnogo vosstanovleniia zheleza, margantsa i khroma iz kontsentratorov [Study of the kinetics of combined reduction of iron, manganese and chromium from concentrates] // Karaganda : Trudy Universiteta. – 2008. – № 1. – P. 20–23.

3 Kasenov, B. K. Metody prikladnoi termodinamiki v khimii i metallurgii [Methods of Applied Thermodynamics in Chemistry and Metallurgy] / B. K. Kasenov, M. K. Aldabergenov, A. S. Pashinkin, Sh. B. Kasenova, G. T. Balakeeva, S. M. Adekenov. – Karaganda : «Glasir», 2008. – 332 p.

4 Marey, G. M. Analytical Methods in Phase-Rule Problems // J. Phys. Chem. – 2003. – Vol. 34. – № 8. – P. 1745–1750.

5 Dah'l, J. A. Analytical treatment of Multicomponent system // J. Amer. Ceram. Soc. – 2001. – Vol. 52. – P. 698–729.

6 Heath, D. L. Mathematical Treatment of Multicomponent Systems // Jour. Amer. Ceram. Soc. – 1957. – T. 40. – № 2. – P. 50–53.

7 Akberdin, A. A. Balansovyi metod rascheta ravnovesnogo fazovogo sostava mnogokomponentnykh sistem [Balance method for calculating the equilibrium phase composition of multicomponent systems] // KIMS. – 1995. – № 3. – P. 92–93.

8 Tolymbekov, M. Zh., Baysanov, S. O. Sostoianie i perspektivy razvitiia ferrosplavnogo proizvodstva Kazakhstana [State and prospects for the development of ferroalloy production in Kazakhstan] // Stal. – Moscow, 2007. – № 8. – P. 45–68.

9 Tolymbekov, M. Zh., Baysanov, S. O., Privalov, O. E., Osipova, L. V. Sostoianie ferrosplavnogo proizvodstva Kazakhstana i perspektivy ego razvitiia [The state of ferroalloy production in Kazakhstan and prospects for its development] // Stal. – 2008. – № 8. – P. 47–51.

10 Симбинов, Р. Д., Малышев, В. П. Термодинамическое, стехиометрическое и эксергетическое моделирование фазовых равновесий. – Алматы : Ғылым, 1999, 100 с.

Материал поступил в редакцию 06.06.22.

**\*Е. Ж. Шабанов<sup>1</sup>, Н. А. Сәлімгерей<sup>2</sup>, С. Т. Габдуллин<sup>3</sup>,  
Р. Т. Төлеуқадыр<sup>4</sup>, Д. Р. Мұздыбаев<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты,  
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.  
Материал 06.06.22 баспаға түсті.

## **CR-MN-SI-FE МЕТАЛЛДЫҚ ЖҮЙЕСІНДЕГІ ФАЗАЛЫҚ ТЕПЕ-ТЕҢДІКТЕРДІ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ-ДИАГРАММА ӘДІСІМЕН ТАЛДАУ**

*Металлургияның теориясы мен тәжірибесінде температура мен қысымға байланысты металлургиялық қайта өңдеуге қатысатын материалдардың жай-күйін зерттеудің маңызы зор. Алайда, күрделі жүйелердегі процестерді классикалық термодинамикалық зерттеу күрделі математикалық есептеулерді қолдануды талап етеді және көптеген тәуелсіз реакциялардың термодинамикалық параметрлерін анықтау қажеттілігімен байланысты.*

*Бұл жұмыста кешенді хром-марганец-кремний құрамдас балқыманың (ФХМнС) құрамын бейнелейтін Cr-Mn-Si-Fe металлдық жүйесін термодинамикалық-диаграмма әдісімен талдау арқылы күй диаграммасы тұрғызылған. Теориялық зерттеулердің қорытындысы бойынша бұл жүйе 8 қарапайым тетраэдрден тұратыны анықталды. Қарапайым тетраэдрлердің салыстырмалы көлемдерінің қосындысы 1-ге тең, бұл өз кезегінде жүргізілген тетраэдрацияның дұрыстығын білдіреді. Әр бір тетраэдрдың талдамалы өрнегі шығарылды.*

*Жүргізілген есептеулердің нәтижесі бойынша кешенді ФХМнС балқымасының фазалық құрамы № 2-ші тетраэдрмен мінезделетіні анықталды. Табылған тетраэдр Cr-Mn-Si-Fe металлдық жүйесіндегі ең көлемді фазалы үшбұрыштардың қатарына жатады. Бұл өз кезегінде хром-марганец-кремний құрамдас балқыманы балқыту кезінде қолайлы жағдай туғызуына мүмкіндік береді. Атап айтатын болсақ, қажетті құрамдағы балқыма алу үшін шикіқұрам материалдарын еркін түрде реттеп отыруға мүмкіндік береді.*

*Кілтті сөздер: диаграмма, хром, марганец, фаза, Хиза әдісі, кешенді балқыма.*

**\*Ye. Zh Shabanov<sup>1</sup>, N. A. Salingerey<sup>2</sup>, S. T. Gabdullin<sup>3</sup>,  
R. T. Toleukadyr<sup>4</sup>, D. R. Muzdybayev<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute,  
Republic of Kazakhstan, Karaganda.  
Material received on 06.06.22.

---

---

**THERMODYNAMIC-DIAGRAM ANALYSIS OF PHASE  
EQUILIBRIA IN METAL SYSTEM CR-MN-SI-FE**

*In the theory and practice of metallurgy, it is important to study the state of materials involved in metallurgical processing, depending on temperature and pressure. However, the classical thermodynamic study of processes in complex systems requires the use of complex mathematical calculations and is associated with the need to determine the thermodynamic parameters of a large number of independent reactions.*

*The method of thermodynamic-diagram analysis is used to create the phase diagram of metal system Cr-Mn-Si-Fe modeling the structures of complex chromium-manganese-silicon-containing alloy (FeCrMnSi). Theoretical studies have shown that the system consists of 8 elementary tetrahedra. The sum of the relative volumes of elementary tetrahedra is equal to one (1,00000), which confirms the accuracy of the tetrahedral. Analytical expressions of each tetrahedron are derived.*

*As a result of the calculations it was found that the phase compositions of the complex alloy are characterized by tetrahedron № 2. The found tetrahedron is the most voluminous phase triangle of the metal system Cr-Mn-Si-Fe, therefore, a large volume of tetrahedron provides favorable conditions for the smelting of chromium-manganese-silicon containing alloy i.e., there is the possibility to freely adjust the composition of charge for obtaining the desired grade composition of the alloy.*

*Keywords: diagram, chromium, manganese, phase, Hiza method, complex alloy.*

Теруге 06.06.22 ж. жіберілді. Басуға 30.06.22 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

8,9 Мб RAM

Шартты баспа табағы 12,4. Таралымы 300 дана.

Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: З. С. Искакова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3964

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

<https://vestnik.tou.edu.kz/>

<http://stk.tou.edu.kz/>