

<sup>1</sup>Б.С. Келаманов\*, <sup>1</sup>Д.А. Есенгалиев, <sup>2</sup>Е.Б. Тажиев, <sup>3</sup>О.В. Заякин

<sup>1</sup>Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актюбе, Казахстан

<sup>2</sup>Satbayev University, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Институт металлургии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

\*e-mail.ru: [kelamanov-b@mail.ru](mailto:kelamanov-b@mail.ru)

## ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ Ti-Zr-Al-Si МЕТОДОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ- ДИАГРАММНОГО АНАЛИЗА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СПЛАВА ФЕРРОСИЛИКОЦИРКОНИЯ

**Аннотация.** На основе справочных термодинамических данных построена четырехкомпонентная система титан - цирконий - алюминий - кремний (Ti-Zr-Al-Si) и создана ее математическая модель фазовой структуры. В результате определили, что она состоит из 12 элементарных тетраэдров. Для каждого из тетраэдров определены аналитические уравнения, с помощью которых можно установить месторасположение в факторном пространстве общей системы составы различных металлических расплавов с вычислением их нормативных фазовых составов.

Правильность разбивки на элементарные тетраэдры, можно увидеть за счет объемов этих же тетраэдров, где сумма этих объемов равна единице (1,00000).

Установлены квазиобъемы в системе Ti-Zr-Al-Si, моделирующие составы образующихся металлических продуктов при выплавке различных ферросиликоциркониевых сплавов в процессе восстановления. В результате выяснилось, что сплав марки ЦК-20 моделируется тетраэдром TiAl<sub>3</sub>-Al-Zr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-ZrAl<sub>3</sub>, а составы сплава ФСЦр-45 распложены в тетраэдре TiAl<sub>3</sub>-Zr<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>-TiAl-Zr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> соответственно.

**Ключевые слова:** сплав, ферросиликоцирконий, четырехкомпонентная система, термодинамический-диаграммный анализ, квазиобъем, тетраэдрация.

**Введение.** В металлургии высокое значение имеет изучение состояния материалов, которые в зависимости от температуры и давления вовлекаются в металлургический передел. Однако классическое термодинамическое исследование процессов, в сложных системах требует применения сложных математических расчетов и связано с необходимостью определения термодинамических параметров большого количества независимых реакций. Часто ограничены данные по ряду свойств веществ, необходимые для определения трансформации свободной энергии Гиббса реакций, что в некоторых случаях вообще исключает возможность термодинамического анализа многокомпонентных систем.

Термодинамически-диаграммный анализ (ТДА) сложных систем, за рекомендовал себя, как наиболее простой и при этом точный метод изучения фазовых закономерностей в сравнении с классическими термодинамическими исследованиями процессов металлургии. Эффективностью метода, как приложения к металлургической технологии, является возможность выявить особенности фазового строения образующихся расплавов в процессе металлургического передела различных сырьевых материалов. На основе результатов таких исследований строят диаграммы фазового состава, позволяющие проследивать фазовый метаморфизм и прогнозировать конечное состояние отдельно взятой системы, моделирующей состав исследуемого расплава. Диаграммы состояния двойных и тройных металлических систем являются базой для изучения фазового состава, структурных составляющих, механических, технологических свойств промышленных сплавов.

**Методы.** Разбивка металлической системы Ti-Zr-Si-Al с помощью ТДА осуществлена

разбивкой граничных подсистем на элементарные тетраэдры. Граничные подсистемы рассматриваемой системы представляют металлические соединения различной сложности [1-5]. Для дальнейших исследований полей кристаллизации системы Ti-Zr-Si-Al, в таблице 1 приведены конгруэнтные соединения исследуемой системы и их координаты на четверном концентрационном симплексе, где состоит из 13 соединений.

Таблица 1. Конгруэнтные соединения в системе Ti-Zr-Si-Al и их координаты на четверном концентрационном симплексе (тетраэдре)

№ п.п.	Соединения	Координаты на основе массового состава			
		Ti	Zr	Si	Al
1.	Ti	1000	0	0	0
2.	Zr	0	1000	0	0
3.	Si	0	0	1000	0
4.	Al	0	0	0	1000
5.	TiAl	640	0	0	360
6.	TiAl <sub>3</sub>	372	628	0	0
7.	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	740	0	260	0
8.	TiSi <sub>2</sub>	460	0	540	0
9.	Zr <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	0	836	0	164
10.	ZrAl <sub>2</sub>	0	628	0	371
11.	ZrAl <sub>3</sub>	0	530	0	470
12.	Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0	844	156	0
13.	Zr <sub>6</sub> Si <sub>5</sub>	0	796	204	0

Разбивка общей системы осуществлена с учетом конгруэнтных соединений. Сумма объемов простых тетраэдров равна единице (1,000000), что подтверждает правильность разбивки на элементарные тетраэдры.

Для построения диаграмм состав-свойства, в таблице 2 приведены вычисленные в реальных пропорциях по теории *p*-мерного пространства квадрат расстояния квазибинарных линий сосуществующих вершин с косоугольными координатами A<sub>1</sub> (x<sub>1</sub>; y<sub>1</sub>; z<sub>1</sub>; u<sub>1</sub> ...), A<sub>2</sub> (x<sub>2</sub>; y<sub>2</sub>; z<sub>2</sub>; u<sub>2</sub>...) по нижеуказанной формуле [6]:

$$L^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 + (u_2 - u_1)^2 + \dots + (x_2 - x_1) \cdot (y_2 - y_1) + (x_2 - x_1) \cdot (z_2 - z_1) + (x_2 - x_1) \cdot (u_2 - u_1) + \dots + (y_2 - y_1) \cdot (z_2 - z_1) + (y_2 - y_1) \cdot (u_2 - u_1) + \dots + (z_2 - z_1) \cdot (u_2 - u_1) + \dots \quad (1)$$

Исходя из результатов тетраэдрации, выше частных тройных систем элементарные тетраэдры общей системы Ti-Zr-Si-Al проще установить путем выписывания родственных треугольников подсистем. Далее за счет суммирования этих треугольников определяется необходимый тетраэдр, исследуемой четверной системы. [7-9]. На рисунке 1 приведены результаты тетраэдрации конгруэнтно плавящихся соединений в системе Ti-Zr-Si-Al.

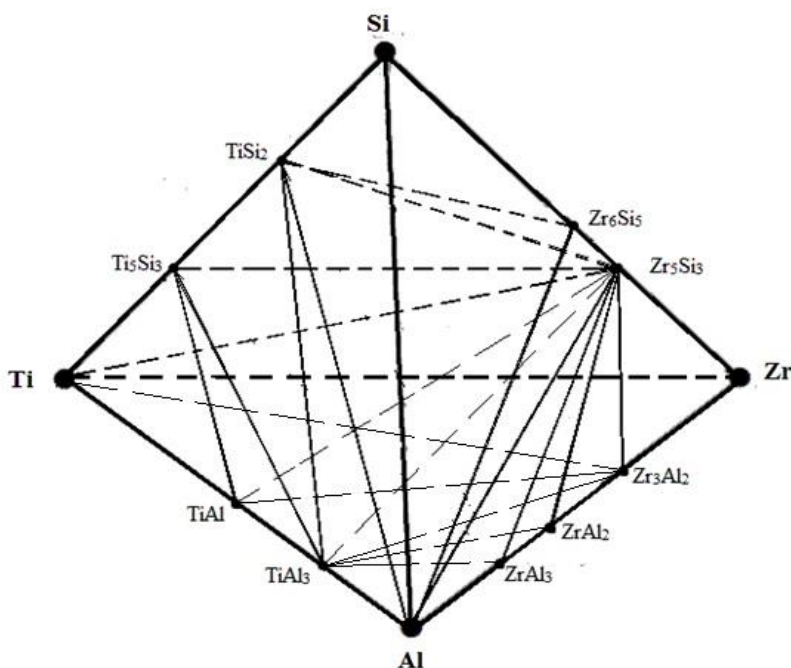


Рис. 1. Тетраэдрация металлической системы Ti-Zr-Si-Al

**Результаты.** При суммировании четырехкомпонентной системы указанные треугольники не учитываются вследствие того, что в суммарной четверной системе один из четырех компонентов будет равен нулю, т.е. они образуют тетраэдр в тройной системе. Результирование осуществляется согласно примеру, показанному в таблице 2.

Таблица 2. Вывод результирующих тетраэдров системы Ti-Zr-Si-Al по данным триангуляции ее граничных систем

Система	Исходные треугольники		
Граничные	12	11	5
Ti-Zr-Si	Ti-Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> -Zr	-	Si-Zr <sub>6</sub> Si <sub>5</sub> - TiSi <sub>2</sub>
Ti-Zr-Al	Ti-Zr-Zr <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	TiAl <sub>3</sub> -Zr <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> -TiAl	-
Ti-Si-Al	-	-	-
Zr-Si-Al	Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> -Zr-Zr <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	-	Si-Al- Zr <sub>6</sub> Si <sub>5</sub>
Общая	Результирующие тетраэдры		
Ti-Zr-Si-Al	Ti-Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> -Zr-Zr <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	TiAl <sub>3</sub> -Zr <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> -TiAl-Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	Si-Al-Zr <sub>6</sub> Si <sub>5</sub> -TiSi <sub>2</sub>

Изученные фазовые равновесия металлической системы Ti-Zr-Si-Al, моделирующей составы комплексного сплава ферросиликоциркония с различными составами, привели к тому, что она состоит из 12 элементарных соединений. В таблице 3 представлены результаты элементарной четверной и их объемы.

Как показывают результаты ТДА, данный метод пренебрегает сложный математический аппарат, где позволяет с помощью диаграмм фазового строения многокомпонентных систем установить оптимальные области составов сплавов. Далее, с учетом данных о температурах плавления вторичных компонентов элементарного объема можно определять относительные температуры плавления сплавов.

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, в таблицу 4 сведены

коэффициенты, вычисленные нами для каждого вторичного компонента из 12 квазисистем базового тетраэдра.

Таблица 3. Перечень элементарных тетраэдров системы Ti -Zr-Si-Al

№ п/п	Тетраэдры	Элементарные объемы
1.	Ti-TiAl-Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> -Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0,117188
2.	TiAl-TiAl <sub>3</sub> -Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> -Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0,058594
3.	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> -TiSi <sub>2</sub> -TiAl <sub>3</sub> -Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0,136875
4.	TiAl <sub>3</sub> -Al-TiSi <sub>2</sub> -Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0,104219
5.	TiSi <sub>2</sub> -Si-Zr <sub>6</sub> Si <sub>5</sub> -Al	0,181485
6.	TiSi <sub>2</sub> -Zr <sub>6</sub> Si <sub>5</sub> -Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> -Al	0,026640
7.	ZrAl <sub>2</sub> -TiAl <sub>3</sub> - Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> -ZrAl <sub>3</sub>	0,007781
8.	TiAl <sub>3</sub> -Al-Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> -ZrAl <sub>3</sub>	0,023438
9.	TiAl <sub>3</sub> -ZrAl <sub>2</sub> -Zr <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> - Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0,025031
10.	Zr <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> -TiAl -Ti- Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0,112500
11.	TiAl <sub>3</sub> -Zr <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> -TiAl-Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0,056250
12.	Zr <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> - Zr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> -Ti- Zr	0,150000
<b>Сумма</b>		<b>1,000000</b>

*Определение тетраэдров, характеризующих составы различных марок сплавов.*

Для определения фазового состава разных марок комплексного сплава ферросиликоциркония пересчитали средневзвешенный вещественные составы на четыре основных элементов Ti-Zr-Si-Al, которые приведены в таблице 5.

Таблица 5. Средневзвешенный химический ферросиликоциркония, получаемого по различным технологиям, %

Сплав	Ti	Zr	Si	Al
ЦК-20	1,3	57,7	34,6	6,4
ФСЦр-45	3,6	53,6	32,1	10,7

**Обсуждение.** При обработке составов ферросиликоциркониевых сплавов марок ЦК-20 и ФСЦр-45 по средствам термодинамически-диаграммного анализа было установлено:

1. Состав сплава ЦК-20 моделируется тетраэдром TiAl<sub>3</sub>-Al-Zr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-ZrAl<sub>3</sub>. Уравнения трансформации для расчета равновесных соотношений вторичных компонентов через первичный компонент ниже, где Ti, Zr, Si, Al – содержание первичных металлов в сплаве.

Результаты расчета:

Объём политопа ZrAl<sub>3</sub>-Zr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-TiAl<sub>3</sub>-Al V= 0.023438

ZrAl<sub>3</sub>= -6.66667\*Si 4.00000\*Zr

Zr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>= 2.66667\*Si

TiAl<sub>3</sub>= 4.00000\*Ti

Al= -3.00000\*Ti+ 5.00000\*Si+ 1.00000\*Al-3.00000\*Zr

2. Состав сплава ФСЦр-45 моделируется тетраэдром TiAl<sub>3</sub>-Zr<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>-TiAl-Zr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. Уравнения трансформации для расчета равновесных соотношений вторичных компонентов через первичный компонент ниже, где Ti, Zr, Si, Al – содержание первичных металлов в сплаве.

Таблица 4. Перечень элементарных тетраэдров, их объемы и коэффициенты уравнений для расчета равновесных соотношений вторичных компонентов системы Ti-Zr-Si-Al [10,11]

		Пентагоны, их объемы и коэффициенты трансформации											
Исходные компоненты	Коэффициенты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Объемы	0,11719	0,05859	0,13688	0,10422	0,18149	0,02664	0,007781	0,023438	0,025031	0,1125	0,05625
Ti	a <sub>1</sub>	1	-2	0	4	-2,003	13,6455	-12,0361	0	3,74157	0	0	0
	a <sub>2</sub>	0	3	-1,2843	0	3,003	3,003	4	0	4	1	-2	0
	a <sub>3</sub>	0	0	2,28425	-3	0	0	9,03614	4	-6,74157	0	3	0
	a <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	-15,648	0	-3	0	0	0	1
Zr	b <sub>1</sub>	1	-2	0	1,1982	-0,8349	5,6875	-8,03614	4	2,49813	1,66667	1,66667	0
	b <sub>2</sub>	0	3	-1,2843	-0,8996	0	0	0	0	0	0,66667	-1,3333	0
	b <sub>3</sub>	-1,6	-1,6	0,68425	-0,8987	0	0	9,03614	0	-1,49813	-1,3333	0,66667	1
	b <sub>4</sub>	1,6	1,6	1,6	1,6	1,83486	-4,6875	0	-3	0	0	0	0
Si	c <sub>1</sub>	-1,6667	3,3333	0	-1,997	1	-6,8125	13,39357	-6,6667	-4,16355	-2,7778	-2,7778	0
	c <sub>2</sub>	0	-5	2,14041	1,49925	0	0	0	2,66667	0	-1,1111	2,22222	2,66667
	c <sub>3</sub>	2,66667	2,66667	-1,1404	1,49775	0	0	-15,0602	0	2,49688	2,22222	-1,1111	-1,6667
	c <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	7,8125	2,66667	5	2,66667	2,66667	2,66667	0
Al	d <sub>1</sub>	-1	2	1,3333	0	0	0	4,01205	0	-1,24719	2	0	2,5
	d <sub>2</sub>	2	-1	0,42808	0	0	0	0	0	0	-1	2	0
	d <sub>3</sub>	0	0	-0,7614	1	1	1	-3,01205	0	2,24719	0	-1	-1,5
	d <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

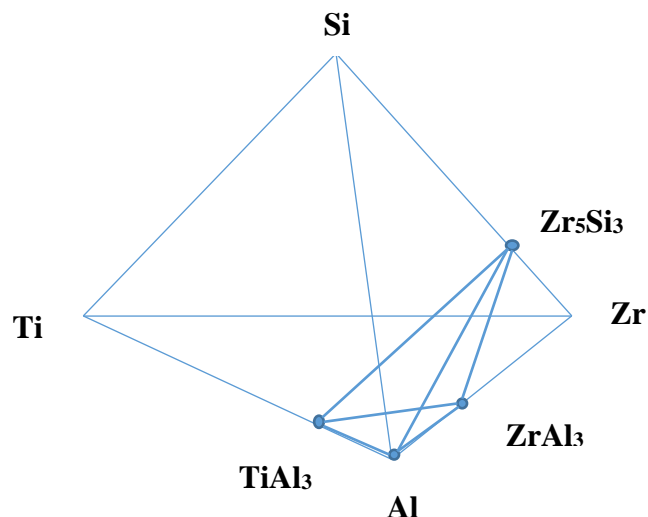


Рис. 2. Область тетраэдра, характеризующий сплав марки ЦК-20

Результаты расчета:

Объём политопа  $Zr_3Al_2-TiAl_3-TiAl-Zr_5Si_3$   $V= 0.056250$

$Zr_3Al_2= 1.66667*Zr-2.77778*Si$

$TiAl_3= -2.00000*Ti-1.33333*Zr+ 2.22222*Si+ 2.00000*Al$

$TiAl= 3.00000*Ti+ 0.66667*Zr-1.11111*Si-1.00000*Al$

$Zr_5Si_3= 2.66667*Si$

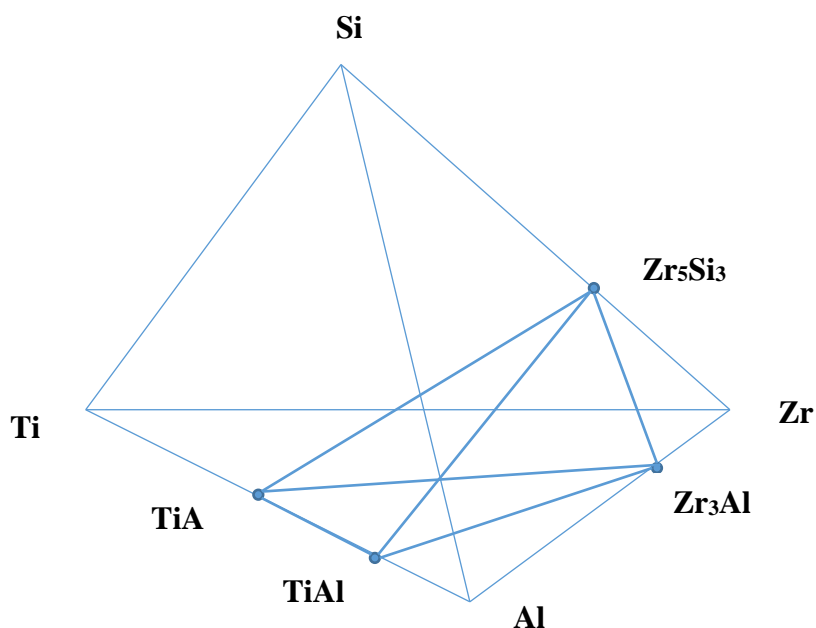


Рис. 3. Область тетраэдра, характеризующий сплав марки ФЦр-45

В результате установлены квазиобъемы в системе Ti-Zr-Al-Si, моделирующие составы образующихся металлических продуктов при выплавке различных ферросиликоциркониевых сплавов в процессе восстановления. В результате выяснилось, что сплав марки ЦК-20 моделируется тетраэдром  $TiAl_3-Al-Zr_5Si_3-ZrAl_3$ , а составы сплава ФЦр-45 распложены в тетраэдре  $TiAl_3-Zr_3Al_2-TiAl-Zr_5Si_3$  соответственно.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Акбердин А.А. Балансовый метод расчета равновесного фазового состава многокомпонентных систем // КИМС. - 1995. - №3. - С. 92-93
- [2] Б.К. Касенов, М.К. Алдабергенов, А.С. Пашинкин, Ш.Б. Касенова, Г.Т. Балакеева, С.М. Адекенов. Методы прикладной термодинамики в химии и металлургии // Караганда: «Гласир», 2008. - 332 с.
- [3] Нурумгалиев А.Х. Моделирование и анализ в системе Al-O-C // Республ. науч. журнал «Технология производства металлов и вторичных материалов».- Темиртау: КарМетИ.- 2007. - №2 (12). - С. 67-72.
- [4] Makhambetov Y.N., Timirbayeva N.R., Baisanov S.O., Baisanov A.S. Research of physical and chemical characteristics of the new complex calcium-containing ferroalloy // CIS Iron and Steel Review, 2020. - №19, pp. 18-22.
- [5] Baisanov A., Kopabaev A., Baisanov S., Tolymbekov M., Dzhundibaev M. Theoretical and practical aspects of smelting new complex alloy - Aluminosilicomanganese with calcium // Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry, 2020, pp. 775-780.
- [6] Бережной А.С. Многокомпонентные системы окислов. – Киев: Наукова думка, 1970. – 544 с.
- [7] Akberdin, A.A., Kim, A.S., Sultangaziev, R.B. Experiment Planning in the Simulation of Industrial Processes Steel in Translation, 2018, 48(9), pp. 573-577.
- [8] Akberdin A., Kim A., Sultangaziyev R., Karbayev M. Thermodynamic modeling of the borbarium ferroalloy smelting technological process // Metalurgija, 2020, 59(3), pp. 333-336.
- [9] Baisanov S. Phase equilibrium thermodynamics in binary systems // Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry, 2020, pp. 605-620.
- [10] Zhumagaliev, Ye., Baisanov, S., Chekimbaev, A., Nurgali, N. Phase diagram of Ti-Fe-Al system // Proceedings of the 12th International Ferroalloys Congress: Sustainable Future, 2010, P. 653-656.
- [11] Kelamanov B., Samuratov Y., Zhumagaliyev Y., Akuov A., Sariev O. Titanium and chrome oxides system thermodynamic diagram analysis // Metalurgija, 2020, 59 (1), pp. 101-104.

**REFERENCES**

- [1] Akberdin A.A. Balansovyy metod rascheta ravnovesnogo fazovogo sostava mnogokomponentnykh sistem // KIMS. - 1995. - №3. - S. 92-93
- [2] B.K. Kasenov, M.K. Aldabergenov, A. S. Pashinkin, Sh.B. Kasenova, G.T. Balakeeva, S.M. Adekenov. Methods of applied thermodynamics in chemistry and metallurgy // Karaganda: "Glaser", 2008. - 332 p.
- [3] Nurumgaliev A.Kh. Modelirovanie i analiz v sisteme Al-O-C [Modeling and analysis in the Al-O-C system].- Temirtau: KarMetI.- 2007. - №2 (12). - Pp. 67-72.
- [4] Makhambetov Y.N., Timirbayeva N.R., Baisanov S.O., Baisanov A.S. Research of physical and chemical characteristics of the new complex calcium-containing ferroalloy // CIS Iron and Steel Review, 2020. - №19, pp. 18-22
- [5] Baisanov A., Kopabaev A., Baisanov S., Tolymbekov M., Dzhundibaev M. Theoretical and practical aspects of smelting new complex alloy - Aluminosilicomanganese with calcium // Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry, 2020, pp. 775-780.
- [6] Bereshnoy A.S. Multicomponent oxide systems. – Kiev: Naukova Dumka, 1970. – 544 p.
- [7] Akberdin, A.A., Kim, A.S., Sultangaziev, R.B. Experiment Planning in the Simulation of Industrial Processes Steel in Translation, 2018, 48(9), pp. 573-577.
- [8] Akberdin A., Kim A., Sultangaziyev R., Karbayev M. Thermodynamic modeling of the borbarium ferroalloy smelting technological process // Metalurgija, 2020, 59(3), pp. 333-336.
- [9] Baisanov S. Phase equilibrium thermodynamics in binary systems // Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry, 2020, pp. 605-620
- [10] Zhumagaliev, Ye., Baisanov, S., Chekimbaev, A., Nurgali, N. Phase diagram of Ti-Fe-Al system // Proceedings of the 12th International Ferroalloys Congress: Sustainable Future, 2010, P. 653-656.
- [11] Kelamanov B., Samuratov Y., Zhumagaliyev Y., Akuov A., Sariev O. Titanium and chrome oxides system thermodynamic diagram analysis // Metalurgija, 2020, 59 (1), pp. 101-104.

<sup>1</sup>Б.С. Келаманов\*, <sup>1</sup>Д.А. Есенгалиев, <sup>2</sup>Е.Б. Тажиев, <sup>3</sup>О.В. Заякин  
<sup>1</sup>Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан  
<sup>2</sup>Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан  
<sup>3</sup>Металлургия институты, Ресей ғылым академиясының Орал филиалы,  
Екатеринбург, Ресей  
\*e-mail.ru: kelamanov-b@mail.ru

## Ti-Zr-Al-Si ЖҮЙЕСІН ТЕРМОДИНАМИКАЛЫ-ДИАГРАММДЫ ТАЛДАУ ӘДІСІМЕН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ФЕРРОСИЛИКОЦИРКОНИЙ ҚОРЫТПАНЫҢ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫ

**Аңдатпа.** Анықтамалық термодинамикалық термодинамикалық мәліметтер негізінде титан - цирконий - алюминий - кремний (Ti-Zr-Al-Si) төрт компонентті жүйесі құрылды және оның фазалық құрылымының математикалық моделі жасалды. Нәтижесінде оның 12 қарапайым тетраэдрден тұратындығы анықталды. Тетраэдрлердің әрқайсысы үшін аналитикалық теңдеулер анықталған, олардың көмегімен Жалпы жүйенің факторлық кеңістігінде олардың нормативтік фазалық құрамын есептей отырып, әртүрлі металл балқымаларының құрамын анықтауға болады.

Қарапайым тетраэдрлердің салыстырмалы көлемдерінің қосындысы бірлікке тең (1,00000), бұл жүргізілген тетраэдрацияның дұрыстығын растайды.

Ti-Zr-Al-Si жүйесінде әртүрлі ферросиликоцирконий қорытпаларын балқыту кезінде түзілетін металл өнімдерінің құрамын модельдейтін квази-көтергіштер орнатылған. Нәтижесінде ЦК-20 маркалы қорытпаны  $TiAl_3$ -Al-Zr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-ZrAl<sub>3</sub> тетраэдрі модельдейтіні, ал ФСЦр-45 қорытпасының құрамы сәйкесінше  $TiAl_3$ -Zr<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>-TiAl - Zr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> тетраэдрінде орналасқаны белгілі болды.

**Негізгі сөздер:** қорытпа, ферросиликоцирконий, төрт компонентті жүйе, термодинамикалық-диаграммалық талдау, квазиөем, тетраэдрация.

<sup>1</sup>B.S. Kelamanov, <sup>1</sup>D. A. Yessengaliyev, <sup>2</sup>Ye.B. Tazhiyev, <sup>3</sup>O.V. Zayakin  
<sup>1</sup>Aktobe regional university named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan  
<sup>2</sup>Satbayev University, Almaty, Kazakhstan  
<sup>3</sup>Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yekaterinburg, Russia  
\*e-mail.ru: kelamanov-b@mail.ru

## STUDY OF THE Ti-Zr-Al-Si SYSTEM BY THERMODYNAMIC-DIAGRAM ANALYSIS AND PHASE COMPOSITION OF FERRUM-SILICON-CYRCONIUM ALLOY

**Abstract.** Based on reference thermodynamic data, a four - component titanium - zirconium - aluminum-silicon (Ti-Zr-Al-Si) system is constructed and its mathematical model of the phase structure is created. As a result, it was determined that it consists of 12 elementary tetrahedra. For each of the tetrahedra, analytical equations are defined, with the help of which it is possible to determine the location in the factor space of the general system of compositions of various metal melts with the calculation of their standard phase compositions.

The sum of the relative volumes of elementary tetrahedra is equal to one (1.00000), which confirms the correctness of the tetrahedron.

Quasi-volumes in the Ti-Zr-Al-Si system are established, which simulate the compositions of the metal products formed during the smelting of various ferrosilicocyrconium alloys during the reduction process. As a result, it turned out that the TsK-20 alloy is modeled by the  $TiAl_3$ -Al-Zr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-ZrAl<sub>3</sub> tetrahedron, and the compositions of the FSTsr-45 alloy are decomposed in the  $TiAl_3$ -Zr<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>-TiAl - Zr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> tetrahedron, respectively.

**Key words:** alloy, ferrosilicocyrconium, four-component system, thermodynamic-diagram analysis, quasi-volume, tetrahedral structure.