

¹Н.З. Нурғали, ¹Б.С. Келаманов*, ²Е.Б. Тажиев, ³О.В. Заякин

¹Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актобе, Казахстан

²Satbayev University, Алматы, Казахстан

³Институт металлургии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: kelamanov-b@mail.ru

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ-ДИАГРАММНЫЙ АНАЛИЗ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ФЕРРОСИЛИКОЦИРКОНИЯ (Fe-Zr-Al-Si) С УЧЕТОМ КОНГРУЭНТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аннотация. На основе справочных термодинамических данных построена четырехкомпонентная система Fe-Zr-Al-Si и создана ее математическая модель фазовой структуры. В результате выяснилось, 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.

Разбивка общей системы осуществлена с учетом конгруэнтных соединений. Совокупность условных объемов элементарных тетраэдров одинакова единице (1,00000), который подтверждает неизменность проведенной тетраэдрации.

Установлены квазиобъемы в системе Fe-Zr-Al-Si, моделирующие составы образующихся металлических продуктов при выплавке различных ферросиликоциркониевых сплавов в процессе восстановления. В результате выяснилось, что сплав с содержанием 25% Zr моделируется тетраэдром Si-Fe₂Al₅-FeSi₂- Zr₆Si₅, а составы сплава с 35 и 50% Zr, распложены в тетраэдрах Si-Fe₂Al₅-FeSi₂- Zr₆Si₅ и Zr₅Si₃-Fe- Fe₂Al₅-FeSi, соответственно.

Ключевые слова: сплав, многокомпонентная система, термодинамический-диаграммный анализ, триангуляция, тетраэдрация, квазиобъем.

Введение. В теории и практике металлургии важное значение имеет изучения состояния материалов, вовлекаемых в металлургический передел, в зависимости от температуры и давления. Следует отметить, что общеизвестные термодинамические исследования процессов в многокомпонентных системах достаточно сложны и требует огромных трудовых, материальных и временных затрат, в плане определения математических расчетов, которые напрямую связаны с необходимостью определения термодинамических функций большого количества независимых реакций. Во многом некоторые данные о свойствах веществ необходимых для определения свободной энергии Гиббса реакций, ограничены или вообще отсутствует, что в подобных случаях исключает применимость термодинамического анализа для изучения многокомпонентных систем. Последний, к тому же, не учитывает особенности промежуточных стадий процесса, так как оперирует только с входными и выходными параметрами процесса [1-4].

Методы. Металлические система Fe-Zr-Si-Al может являться представлена в образе тетраэдра, его поверхности представляют собой тройные системы Fe-Zr-Al, Fe-Si-Al, Fe-Zr-Si и Zr-Si-Al.

При исследовании изотермические сечение Fe-Zr-Si-Al методом термодинамически-диаграммного анализа необходимо исходить от трюих соеденение на элементарные тетраэдры. Ради этого нуждается в первую очередь описать металлические объединения разной сложности, соединяющих испытываемую систему.

Установленные местоположение сравнимых сочетаний концепции Fe-Al-Zr-Si, применяемые во последующем присутствии исследовании пустотелее их кристаллизации (в базе общественной части *1000), повергнуты во таблице 1. Во концепси возникают 13 простых соединений.

Таблица 1. Сравнимые объединения во концепции Fe-Zr-Si-Al также их местоположение в тетрадном концентрационном симплексе (тетраэдре)

№ п.п.	Соединения	Координаты на основе массового состава			
		Al	Fe	Zr	Si
1	Al	1000	0	0	0
2	Fe	0	1000	0	0
3	Si	0	0	1000	0
4	Zr	0	0	0	1000
5	Fe ₂ Al ₅	453	547	0	0
6	ZrAl ₂	372	628	0	0
7	ZrAl ₃	471	529	0	0
8	Zr ₃ Al ₂	165	0	835	0
9	ZrFe ₂	0	552	448	0
10	Zr ₅ Si ₃	0	0	844	156
11	Zr ₆ Si ₅	0	0	795	205
12	FeSi ₂	0	500	0	500
13	FeSi	0	666	0	334

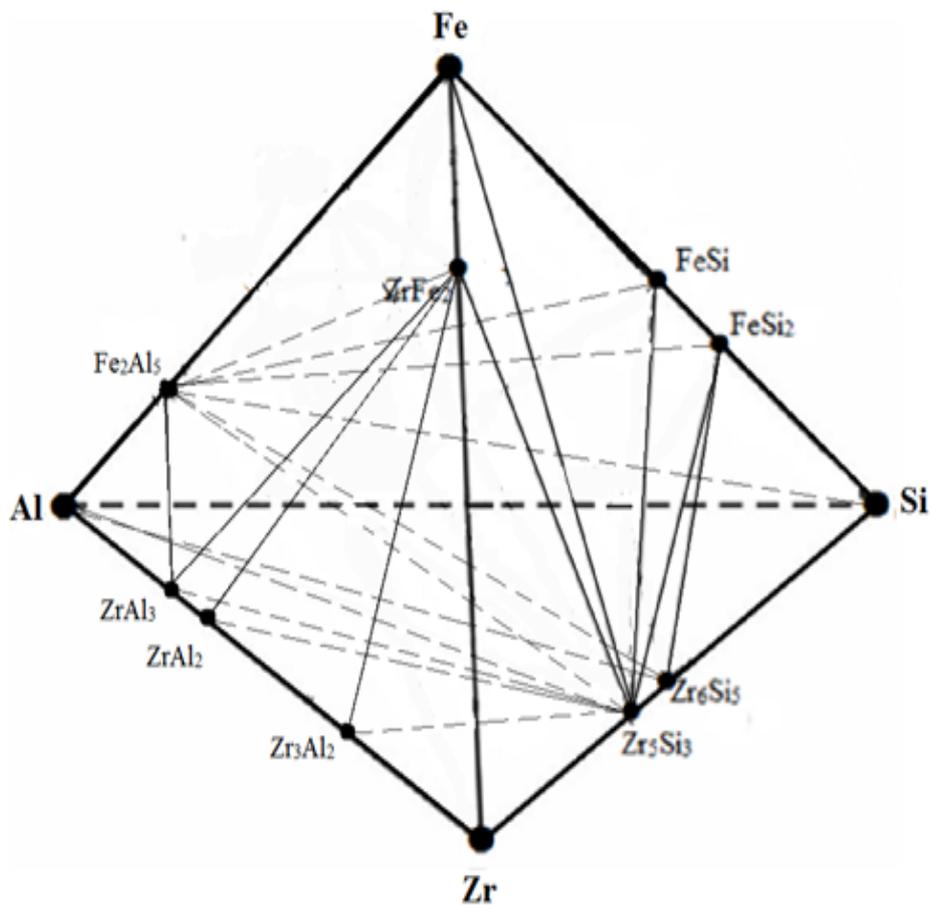


Рисунок 1. Тетраэдрация металлической системы Fe-Zr-Si-Al

Квазисистемы общей системы Fe-Zr-Si-Al и их математические модели. Для построения диаграмм состав-свойства, в таблице 5 приведены вычисленные в реальных пропорциях по теории p -мерного пространства квадрат расстояния квазибинарных линий сосуществующих вершин с косоугольными координатами $A_1(x_1; y_1; z_1; u_1 \dots)$, $A_2(x_2; y_2; z_2; u_2 \dots)$, по нижеуказанной формуле [1]:

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

Основываясь с целью итоги тетраэдрации, показанных значительнее 4 тройных систем, элементарные тетраэдры исходной системы Fe-Al-Zr-Si вывели путем выписывания аналогичных (имеющие отличия отдельным компонентом с 3-х) с общей сферы треугольников, объединяющих подсистемы. После путем суммирования данных треугольников вводится результирующая пирамида, исследуемой тетраэдрной системы.

Таблица 2. Перечень тетраэдров системы Fe-Al -Zr-Si

№ п/п	Тетраэдры	Элементарные объемы
1	ZrAl ₂ -ZrAl ₃ -Fe ₂ Al ₅ -Zr ₅ Si ₃	0.008902
2	Zr ₃ Al ₂ -ZrAl ₂ -Fe ₂ Al ₅ -Zr ₅ Si ₃	0.028636
3	FeSi- FeSi ₂ - Fe ₂ Al ₅ - Zr ₅ Si ₃	0.074524
4	Al- Fe ₂ Al ₅ -ZrAl ₃ -Zr ₅ Si ₃	0.026813
5	Si-FeSi ₂ -Fe ₂ Al ₅ - Zr ₆ Si ₅	0.129580
6	Al- Si-Zr ₆ Si ₅ -Fe ₂ Al ₅	0.155870
7	Fe-FeSi-Fe ₂ Al ₅ -Zr ₅ Si ₃	0.223125
8	ZrFe ₂ -Zr ₃ Al ₂ -Zr-Zr ₅ Si ₃	0.100050
9	Fe-ZrFe ₂ -Fe ₂ Al ₅ -Zr ₅ Si ₃	0.089161
10	ZrFe ₂ -Zr ₃ Al ₂ -Fe ₂ Al ₅ -Zr ₅ Si ₃	0.121439
11	Zr ₅ Si ₃ -Zr ₆ Si ₅ -FeSi ₂ -Fe ₂ Al ₅	0.019021
12	Al-Zr ₅ Si ₃ -Zr ₆ Si ₅ -Fe ₂ Al ₅	0.057120
	Сумма	1,000000

Разбивка общей системы осуществлена с учетом конгруэнтных соединений. Совокупность сравнительных объемов элементарных тетраэдров равна единице (1,000000), то что доказывает верность выполненной тетраэдрации.

С приведенных абстрактных сведений необходимо доказательство этого прецедента, то что ТДА, присутствие коем пренебрегается непростой общематематический устройство, дает возможность со поддержкой диаграмм фазисного структуры многокомпонентных концепций определить подходящие сфере составов сплавов. Затем, со учетом сведений об жару плавления вторичных частей элементарного объема возможно устанавливать сравнительные температуры плавления сплавов.

Критерием месторасположения данного состава расплавов во одну с квазисистем, представляется утвердительные величины n -го доли вторичных компонентов, определенного политопа, рассчитанных в области уравнению Хиза. Со учетом вышеуказанного, во таблицу 3 переведены коэффициенты, вычисленные нами с целью каждого вторичного элемента с 12 квазисистем базисного тетраэдра [5-8].

Таблица 3. Перечень элементарных тетраэдров, их размеры также коэффициенты уравнений с целью расплаты равновесных пропорций вторичных компонентов системы Fe-Al -Zr-Si

Исходные компоненты	Пентаэдры, их объемы и коэффициенты трансформации											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Коэффициенты	ZrAl ₃ -	ZrAl ₃ -	Zr ₂ Si ₃ -	Al-	Si-	Si-	Zr ₂ Si ₃ -	Zr-	ZrFe ₂ -	ZrFe ₂ -	Zr ₂ Si ₃ -	Zr ₂ Si ₃ -
	Fe ₂ Al ₃ -	Fe ₂ Al ₃ -	Fe ₂ Al ₃ -	Fe ₂ Al ₃ -	Fe ₂ Al ₃ -	Fe ₂ Al ₃ -	Fe-	ZrFe ₂ -	Fe ₂ Al ₃ -	Fe ₂ Al ₃ -	Fe ₂ Al ₃ -	Fe ₂ Al ₃ -
	ZrAl ₃ -	Zr ₂ Al ₃ -	FeSi ₂ -	ZrAl ₃ -	FeSi ₂ -	Al-	Fe ₂ Al ₃ -	Zr ₂ Al ₃ -	Fe-	Zr ₂ Al ₃ -	FeSi ₂ -	Al-
	Zr ₂ Si ₃ -	Zr ₂ Si ₃ -	FeSi ₂ -	Zr ₂ Si ₃ -	Zr ₂ Si ₃ -	Zr ₂ Si ₃ -	FeSi ₂ -	Zr ₂ Si ₃ -	Zr ₂ Si ₃ -	Zr ₂ Si ₃ -	Zr ₂ Si ₃ -	Zr ₂ Si ₃ -
Объемы	0,008902	0,028636	0,074524	0,026813	0,129580	0,38913		0,223125	0,100050	0,089161	0,121439	0,019021
a ₁	7,51959	-5,61012	0	-2,4965	2,003	0	0	-0,49925	0	1,32288	13,64546	0
a ₂	3,4965	3,4965	0	3,4965	0	0	1	1,49925	0	0,41132	0	0
a ₃	-10,01609	3,11362	-2,99401	0	3,003	1	0	0	1	0,7342	3,003	1
a ₄	0	0	3,99401	0	0	0	0	0	0	0	15,64846	0
b ₁	9,03614	-1,49813	1,6	-3	-0,83486	-0,83486	1,6	1	3,003	0,35326	5,6875	5,6875
b ₂	0	0	0	0	0	0	0,6	0	0	-0,82387	0	0
b ₃	-8,03614	2,49813	-1,79641	4	0	0	0	0	-2,003	1,47061	0	0
b ₄	0	0	1,19641	0	1,83486	1,83486	-1,2	0	0	0	-4,6875	-4,6875
c ₁	-15,06024	2,49688	0	5	1	1	0	-1,66667	-5,005	-0,58877	-6,8125	-6,8125
c ₂	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1,37311	0	0
c ₃	13,39357	-4,16355	2,99401	-6,66667	0	0	0	0	3,33834	-2,45101	0	0
c ₄	2,66667	2,66667	-1,99401	2,66667	0	0	2	2,66667	2,66667	2,66667	7,8125	7,8125
d ₁	-3,01205	2,24719	0	1	0,80232	0	0	-1,5	0	-0,52989	-5,46583	0
d ₂	0	0	1,40056	0	1,40056	1,40056	-0,40056	0	1,40056	1,2358	1,40056	1,40056
d ₃	4,01205	-1,24719	1,19928	0	-1,20288	-1,40056	1,40056	2,5	-0,40056	0,29409	-1,20288	-0,40056
d ₄	0	0	-1,59984	0	0	0	0	0	0	0	6,26815	0

Результаты и обсуждение. Установление тетраэдров, определяющих составы различных марок сплавов.

Таблица 4. Средневзвешенный химический состав различных ферросиликоциркониевых сплавов, %

Сплав	Zr	Al	Si	Fe
с 50% Zr	47	9	26	18
с 35% Zr	36	6	48	9
с 25% Zr	21	5	36	38

При обработке составов различных ферросиликоциркониевых сплавов по средствам термодинамически-диаграммного анализа установлено [9,10]:

1. Состав сплава с 50% Zr моделируется тетраэдром Zr_5Si_3 -Fe- Fe_2Al_5 -FeSi ($V=0,223125$). Уравнения трансформации для расчета равновесных соотношений вторичных компонентов через первичный компонент ниже, где Si, Fe, Zr, Al - содержание первичных металлов в сплаве. Относительный объем тетраэдра $V=0,223125$.

$$Zr_5Si_3 = 1.60000 * Zr$$

$$Fe = 1.00000 * Fe + 0.60000 * Zr - 1.00000 * Si - 0.40056 * Al$$

$$Fe_2Al_5 = 1.40056 * Al$$

$$FeSi = -1.20000 * Zr + 2.00000 * Si$$

Из этого следует, что сплав с 50% Zr в области температур ликвидуса включает в себя фазы, в %: (Zr_5Si_3)=75.20%; (Fe)=16.59%; (Fe_2Al_5)=12,61% и (FeSi)= - 4.40%.

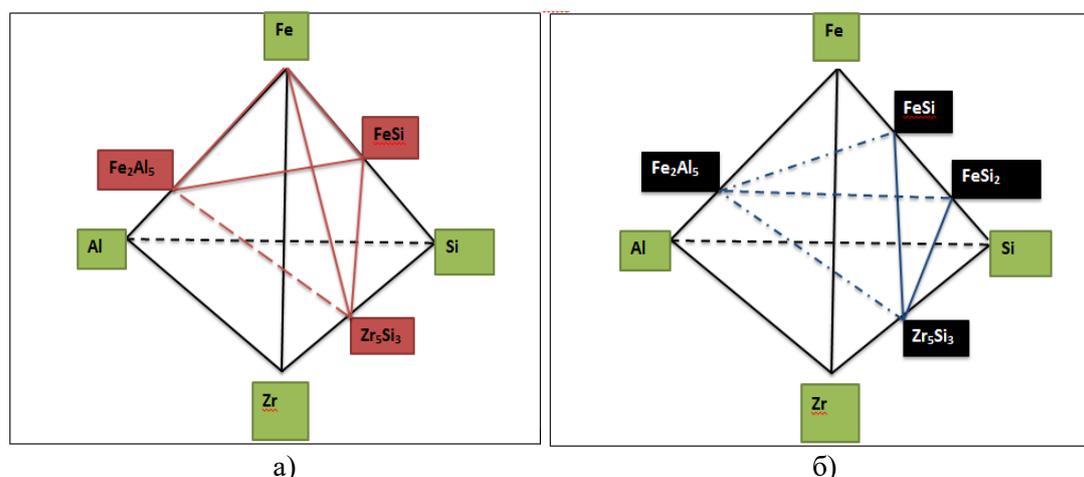


Рисунок 2. Область тетраэдра, характеризующий сплав

а) с 50 % циркония

б) с 35 % циркония

2. Состав сплава с 35% Zr моделируется тетраэдром Zr_5Si_3 - Fe_2Al_5 - $FeSi_2$ -FeSi ($V=0,074524$). Для расчета равновесных соотношений вторичных компонентов этой системы выведены уравнения модификации.

Относительный объем тетраэдра $V=0,074524$

$$Zr_5Si_3 = 1.6000 * Zr$$

$$Fe_2Al_5 = 1.40056 * Al$$

$$FeSi_2 = -2.99401 * Fe - 1.79641 * Zr + 2.99401 * Si + 1.19928 * Al$$

$$FeSi = 3.99401 * Fe + 1.19641 * Zr - 1.99401 * Si - 1.59984 * Al$$

Из этого следует, что сплав с 35% Zr в области температур ликвидуса включает в себя

фазы, в %: $(Zr_5Si_3) = 59.20\%$; $(Fe_2Al_5) = 8.40\%$; $(FeSi_2) = 57.49\%$ и $(FeSi) = -25.09\%$.

3. Состав сплава с 25% Zr расположен в тетраэдре Si-Fe₂Al₅-FeSi₂-Zr₆Si₅ (V=0.129580). Уравнения, рассчитывающие фазовый состав, образующегося сплава через первичный компонент приведены ниже:

$$Si = -2.00300 * Fe - 0.83486 * Zr + 1.00000 * Si + 0.80232 * Al - 53.63446$$

$$Fe_2Al_5 = 1.40056 * Al - 7.0028$$

$$FeSi_2 = 3.00300 * Fe - 1.20288 * Al - 108.0996$$

$$Zr_6Si_5 = 1.83486 * Zr$$

Из этого следует, что сплав с 25 Zr в области температур ликвидуса включает в себя фазы, в %: $(Si) = -53.63\%$ $(Fe_2Al_5) = 7.00\%$; $(FeSi_2) = 108.10\%$; $(Zr_6Si_5) = 38.53\%$.

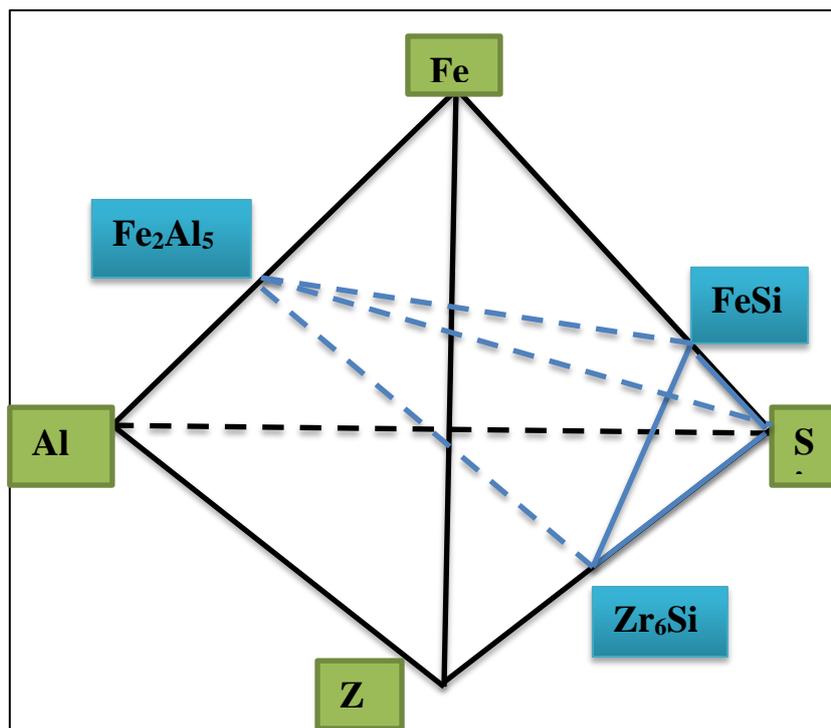


Рисунок 3. Область тетраэдра, характеризующий сплав с 25 % циркония

Выводы. Установлены квазиобъемы в системе Fe-Zr-Al-Si, моделирующие составы образующихся металлических продуктов при выплавке различных ферросиликоциркониевых сплавов в процессе восстановления. В результате выяснилось, что сплав с содержанием 25% Zr моделируется тетраэдром Si-Fe₂Al₅-FeSi₂- Zr₆Si₅, а составы сплава с 35 и 50% Zr, распложены в тетраэдрах Si-Fe₂Al₅-FeSi₂- Zr₆Si₅ и Zr₅Si₃-Fe- Fe₂Al₅-FeSi, 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 - Alumosilicomanganese with calcium // Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry, 2020, pp. 775-780
- [6] 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
- [7] Akberdin A., Kim A., Sultangaziyev R., Karbayev M. Thermodynamic modeling of the borbarium ferroalloy smelting technological process // Metalurgija, 2020, 59(3), pp. 333-336
- [8] 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
- [9] Б.С. Келаманов, Е.У. Жумағалиев, А.М. Ақуов, Е.К. Самуратов, Е.А. Дөңесов. Термодинамически-диаграммный анализ системы Fe-Mo-Si-Al // Вестник КазНУ, 2020. - №2, С. 207-212.
- [10] 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] В.К. Касенов, М.К. Алдабергенов, А.С. Пашинкин, Ш.В. Касенова, Г.Т. Балакеева, С.М. Адекенов. Methods of applied thermodynamics in chemistry and metallurgy // Karaganda: "Glasir", 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 - Alumosilicomanganese with calcium // Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry, 2020, pp. 775-780
- [6] 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
- [7] Akberdin A., Kim A., Sultangaziyev R., Karbayev M. Thermodynamic modeling of the borbarium ferroalloy smelting technological process // Metalurgija, 2020, 59(3), pp. 333-336
- [8] 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
- [9] B.S. Kelamanov, Ye.U. Zhumagaliyev, A.M. Akuov, Ye.K. Samuratov, Ye.A. Dөңесов. Termodinamicheski-diagrammnyy analiz sistemy Fe-Mo-Si-Al // Vestnik KazNITU, 2020.- №2, S. 207-212.
- [10] 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

¹Н.З. Нурғали, ¹Б.С. Келаманов*, ²Е.Б. Тажиев, ³О.В. Заякин

¹Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан

² Satbayev University, Алматы, Қазақстан

³Металлургия институты, Ресей ғылым академиясының Орал филиалы, Екатеринбург, Ресей

*e-mail: kelamanov-b@mail.ru

ТӨРТ КОМПОНЕНТТІ ФЕРРОСИЛИКОКИРКОНИЙДІҢ (Fe-Zr-Al-Si) ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ-ДИАГРАММАЛЫҚ ТАЛДАУ

Андатпа. Анықтамалық термодинамикалық мәліметтер негізінде Fe-Zr-Al-Si төрт компонентті жүйесі құрылды және оның фазалық құрылымының математикалық моделі жасалды. Нәтижесінде ол 12 қарапайым тетраэдрден тұратыны белгілі болды. Тетраэдрлердің әрқайсысы үшін аналитикалық теңдеулер анықталған, олардың көмегімен Жалпы жүйенің факторлық кеңістігінде олардың нормативтік фазалық құрамын есептей отырып, әртүрлі металл балқымаларының құрамын анықтауға болады.

Жалпы жүйені бөлу сәйкес қосылыстарды ескере отырып жүзеге асырылады. Қарапайым тетрадрлердің салыстырмалы көлемдерінің қосындысы бір бірлікке тең (1,00000), бұл жүргізілген тетраэдрацияның дұрыстығын растайды.

Fe-Zr-Al-Si жүйесінде қалпына келтіру процесінде әртүрлі ферросиликоцирконий қорытпаларын балқыту кезінде түзілетін металл өнімдерінің құрамын модельдейтін квази-көтергіштер орнатылған. Нәтижесінде 25% Zr құрамы бар қорытпаны Si-Fe₂Al₅-FeSi₂ - Zr₆Si₅ тетраэдрі модельдейді, ал 35 және 50% Zr қорытпалары сәйкесінше Si-Fe₂Al₅-FeSi₂ - Zr₆Si₅ және Zr₅Si₃-Fe - Fe₂Al₅-FeSi тетрадрлерінде орналасады.

Негізгі сөздер: қорытпа, көп компонентті жүйе, термодинамикалық-диаграммалық талдау, триангуляция, тетраэдрация, квазикөлем.

¹N.Z. Nurgali, ¹B.S. Kelamanov*, ²Ye.B. Tazhiyev, ³O.V. Zayakin

¹Aktobe regional university named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

³Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia

*e-mail: kelamanov-b@mail.ru

THERMODYNAMIC-DIAGRAM ANALYSIS OF A FOUR-COMPONENT FERROSILICOCYRCONIUM (Fe-Zr-Al-Si) SYSTEM) CONSIDERING CONGRUENT CONNECTIONS

Abstract. Based on the reference thermodynamic data, a four-component Fe-Zr-Al-Si system is constructed and its mathematical model of the phase structure is created. As a result, it turned out 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 breakdown of the overall system is carried out taking into account congruent connections. 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 Fe-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 was found that the alloy with a 25% Zr content is modeled by the Si-Fe₂Al₅-FeSi₂ - Zr₆Si₅ tetrahedron, and the alloy compositions with 35 and 50% Zr are decomposed in the Si-Fe₂Al₅-FeSi₂ - Zr₆Si₅ and Zr₅Si₃-Fe-Fe₂Al₅-FeSi tetrahedra, respectively.

Keywords: alloy, multicomponent system, thermodynamic-diagram analysis, triangulation, tetrahedration, quasi-volume.