

ность прогнозировать и управлять структурой сплавов, что обеспечивает получение отливок различного функционального назначения в реальных условиях их производства.

Разработаны новые составы жаростойких и износостойких чугунов, из этих сплавов изготовлены опытно-промышленные партии отливок различного назначения, которые прошли успешные испытания и внедрены на различных промышленных предприятиях России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ри Э.Х., Колокольцев В.М., Ри Хосен и др. Комплексно-легированные белые чугуны функционального назначения в

литом и термообработанном состоянии. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 275 с.

2. Петроченко Е.В., Валишина Т.С. // Изв. вуз. Чер. металлургия. 2009. № 2. С. 39 – 42.
3. Воронков Б.В., Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. Комплексно-легированные белые износостойкие чугуны / Под ред. В.М. Колокольцева. – Челябинск: Печатный салон «Издательство РЕКПОЛ», 2005. – 178 с.
4. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 8. С. 31 – 34.
5. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Миронов О.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 3. С. 41 – 47.

© 2012 г. Е.В. Петроченко

Поступила 12 декабря 2011 г.

УДК 669.017:544.344

Пикунов М.В., Баженов В.Е., Сидоров Е.В.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОНОД В ДВУХФАЗНЫХ ОБЛАСТЯХ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ

Положение конод – линий, связывающих составы равновесных фаз на диаграмме состояния – необходимо знать для описания процессов изменения фазового состава системы под действием температуры. Классические способы решения этой задачи состоят либо в проведении термодинамических расчетов, либо экспериментальным путем [1, 2].

Для решения поставленного вопроса можно использовать более простой прием. Предлагаемый способ отыскания составов двух равновесных фаз-растворов на изотермических сечениях равновесных диаграмм состояния трехкомпонентных систем основан на том, что геометрический образ термодинамического равновесия (диаграмма состояния), содержит в себе все признаки равновесия, отражаемые геометрическими закономерностями. Описываемый способ пригоден для использования в тех областях двухфазных равновесий, где действуют неизменные термодинамические закономерности.

Предлагаемый способ можно назвать «геометрическим». Суть его заключается в следующем. При температуре t в двухфазной области Тв + Ж (рис. 1), находящейся между линиями ликвидуса ($f-g$) и солидуса ($d-e$), теоретически существует бесконечное число конод, крайними из которых являются ($f-d$) на стороне $A-B$ и ($g-e$) на стороне $B-C$ треугольника составов $A-B-C$. Следовательно, каждой точке на линии ликвидуса ($f-g$) соответствует точка на линии солидуса ($d-e$). На этом основании можно утверждать, что применительно к сплаву X , находящемуся при температуре t в двухфазном состоянии, должно быть справедливо соотношение

$$\frac{s'}{s} = \frac{l'}{l}, \quad (1)$$

где s' – длина части линии солидуса от d до $C_{Тв}$; s – длина всей линии солидуса; l' – длина части линии ликвидуса от f до $C_{ж}$; l – длина всей линии ликвидуса; $C_{Тв}$ и $C_{ж}$ – содержание любого из трех компонентов (A, B, C) в твердой и жидкой фазе сплава X .

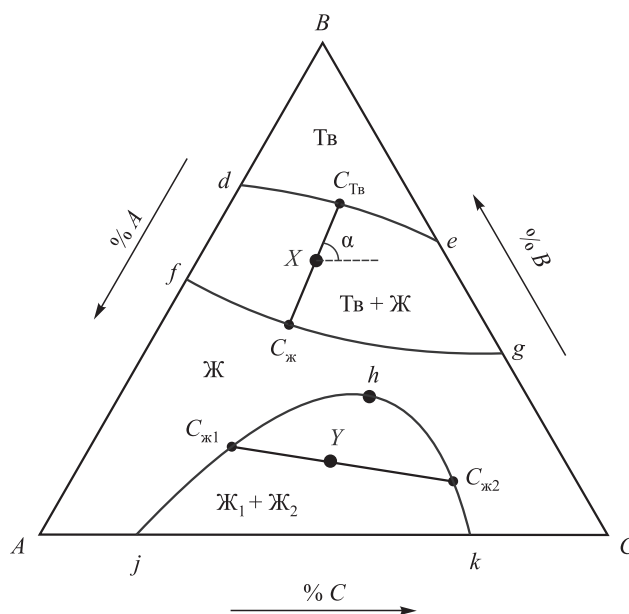


Рис. 1. Изотермическое сечение диаграммы трехкомпонентной системы $A-B-C$ ($t_B > t > t_A$) с неограниченными жидкими и твердыми растворами (сплавы на основе B) и расслоением в жидком состоянии (сплавы на основе $A-C$) при температуре t .

В случае двухфазной области с несмешивающимися жидкостями, идущей от стороны *AC* до крайнего состава *h* (см. рис. 1), для сплава *Y* можно записать

$$\frac{l'_1}{l_1} = \frac{l'_2}{l_2}, \quad (2)$$

где l'_1 – длина части изотермы от *h* до $C_{ж1}$; l_1 – длина части изотермы от *h* до *j*; l'_2 – длина части изотермы от *h* до $C_{ж2}$; l_2 – длина части изотермы от *h* до *k*; $C_{ж1}$ и $C_{ж2}$ – содержание любого из трех компонентов (*A*, *B*, *C*) в жидкостях J_1 и J_2 сплава *Y*.

Отыскание коноды для сплава *X* (см. рис. 1), находящегося при температуре *t* в двухфазном состоянии, выполнялось следующим образом. Изотермическое сечение диаграммы состояния системы *A – B – C* необходимо представить в любой системе автоматизированного проектирования (САПР) на треугольнике составов. В данном случае была использована САПР SolidWorks. На рис. 1 через точку *X* проводили произвольную гипотетическую коноду, которая составляет угол α с горизонталью (стороной *AC*). Далее находили длину линии ликвидуса между точками *f* и *g* и длину отрезка этой линии между точками *f* и $C_{ж}$. То же самое делали для линии солидуса, используя точки *d*, *e*, $C_{ТВ}$. Исходя из равенства (1), находили разность

$$\Delta = \frac{s'}{s} - \frac{l'}{l}. \quad (3)$$

Такие же вычисления проводили при угле $\phi = (\alpha - \delta\phi)$. Величину $\delta\phi$ принимали равной одному-двум угловым градусам. Находили величину Δ по зависимости (3). Повторяли указанные вычисления, каждый раз уменьшая угол ϕ на $\delta\phi$ и вычисляя величину Δ . При этом $\delta\phi$ уменьшали в два раза с каждым шагом. Когда величина Δ становилась достаточно малой, обеспечивающей необходимую точность всего расчета, считали, что последние значения $C_{ТВ}$ и $C_{ж}$ являются составами твердой и жидкой фаз сплава *X*, находящихся в равновесии при температуре *t*. Прямая линия между указанными точками есть искомая конода.

В табл. 1 представлены значения величин в равенстве (3) для трех сплавов системы *Al–Mg–Cu*, определенные описанным способом на изотермическом сечении

при 600 °С, построенном в программе Thermo-Calc. На рис. 2 изображено указанное изотермическое сечение с найденными конодами. Итоговые сведения об указанных трех сплавах представлены далее в табл. 2.

Для более полной проверки описанного «геометрического» способа расчета составов равновесных твердой и жидкой фаз были сопоставлены результаты, полученные предлагаемым способом и с помощью CALPHAD-метода, реализованного в программе Thermo-Calc, на шести сплавах системы *Al–Mg–Cu*, на трех сплавах системы *Al–Si–Mg*, на шести сплавах системы *Mg–Al–Zn* (всего рассмотрено 15 сплавов) при 500 и 600 °С. Находили состав твердой и жидкой фаз по трем компонентам и массовую долю твердой фазы. В табл. 2 представлены результаты расчетов, где обычным шрифтом даны результаты, полученные в программе Thermo-Calc, жирным шрифтом – по предложенному «геометрическому» способу.

Как видно, для всех 15 сплавов разница между содержанием любого компонента в твердой и жидкой фазах, найденным в программе Thermo-Calc и вычисленным

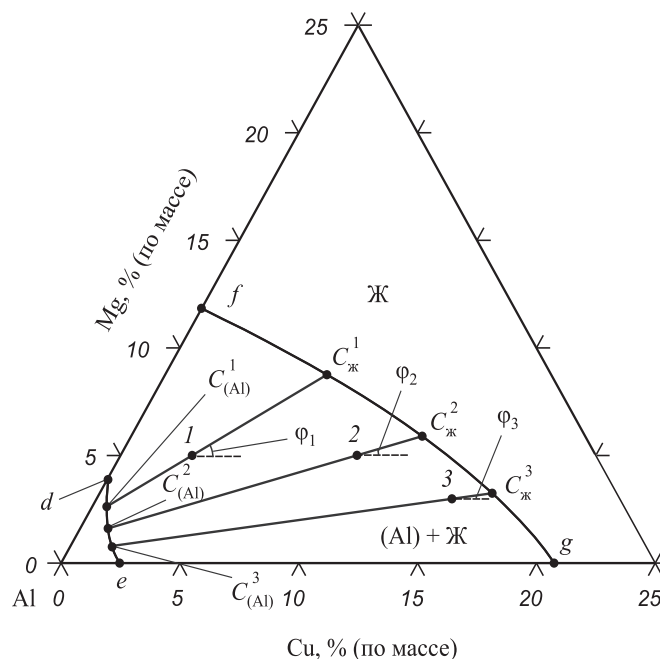


Рис. 2. Изотермическое сечение диаграммы системы *Al–Mg–Cu* при 600 °С, построенное в программе Thermo-Calc с конодами, найденными «геометрическим» способом

Таблица 1

Численные значения членов уравнения (3) для трех сплавов системы *Al–Mg–Cu* при 600 °С

Номер сплава	Состав сплава, % (по массе)			$\frac{s'}{s}$	$\frac{l'}{l}$	Δ^i	ϕ^i , град
	Al	Cu	Mg				
1	92	5	3	0,324994	0,324991	$3 \cdot 10^{-6}$	29,793
2	85	5	10	0,584965	0,584963	$2 \cdot 10^{-6}$	15,738
3	82	3	15	0,789000	0,788997	$3 \cdot 10^{-6}$	7,568

Вычисленные в программе Thermo-Calc (обычный шрифт) и определенные предложенным методом (жирный шрифт) составы твердой и жидкой фаз и массовые доли твердой фазы в сплавах Al–Mg–Cu, Al–Si–Mg, Mg–Al–Zn

Система	Температура, °С	Состав сплава, % (по массе)			Массовая доля твердой фазы	Состав твердой фазы, % (по массе)			Состав жидкой фазы, % (по массе)		
		Al	Mg	Cu		Al	Mg	Cu	Al	Mg	Cu
Al–Mg–Cu	500	87	10	3	0,8303 0,8295	91,13 91,16	7,73 7,70	1,14 1,14	66,82 66,79	21,09 21,17	12,09 12,04
		80	15	5	0,5310 0,5306	90,70 90,75	8,42 8,35	0,88 0,90	67,88 67,84	22,45 22,52	9,67 9,64
		78	15	10	0,3600 0,3617	91,59 91,59	6,95 6,95	1,46 1,46	65,67 65,60	19,53 19,56	14,80 14,84
	600	92	3	5	0,6639 0,6602	97,21 97,26	1,63 1,55	1,16 1,19	81,71 81,77	5,70 5,82	12,59 12,41
		82	3	15	0,1027 0,1044	97,44 97,48	0,87 0,77	1,69 1,75	80,24 80,20	3,24 3,26	16,52 16,54
		92	5	3	0,6175 0,6130	96,72 96,79	2,71 2,62	0,57 0,59	84,37 84,41	8,70 8,77	6,93 6,82
Al–Si–Mg	600	97	2	1	0,8319 0,8321	98,60 98,54	0,79 0,73	0,61 0,73	89,06 89,36	8,01 8,30	2,93 2,34
		88	2	10	0,0597 0,0612	96,82 96,61	0,11 0,07	3,07 3,32	87,44 87,43	2,12 2,13	10,44 10,44
		94	3	3	0,5883 0,5955	98,23 97,99	0,53 0,43	1,24 1,58	87,96 88,12	6,53 6,79	5,51 5,09
Mg–Al–Zn	500	90	5	5	0,8313 0,8266	94,08 94,18	3,82 3,70	2,10 2,12	69,92 70,09	10,79 11,19	19,29 18,72
		75	5	20	0,2614 0,2582	94,93 95,05	2,18 2,02	2,89 2,93	67,95 68,02	6,00 6,04	26,05 25,94
		85	10	5	0,6155 0,6105	93,07 93,20	5,73 5,54	1,20 1,26	72,08 72,15	16,84 16,99	11,08 10,86
	600	98	1	1	0,9841 0,9829	98,18 98,19	0,97 0,96	0,85 0,85	86,92 87,06	3,09 3,32	9,99 9,62
		87	1	12	0,0962 0,0945	98,50 98,52	0,34 0,31	1,16 1,17	85,78 85,80	1,07 1,07	13,15 13,13
		93	2	5	0,5388 0,5350	98,17 98,20	0,99 0,94	0,84 0,86	86,96 87,01	3,18 3,23	9,86 9,76

ным предлагаемым способом, не превышает $\pm 0,5\%$ (по массе). Различие в массовых долях твердой фазы составляет $\pm 0,01$.

Представленные данные позволяют утверждать, что описанный способ поиска конод в двухфазных областях пригоден для проверки новых, изучаемых и уже существующих диаграмм состояния тройных систем. Данный способ позволил решать различные задачи, связанные с расчетами кристаллизации в трехкомпонентных системах.

Результаты, полученные предложенным способом, сравнивали с результатами термодинамических расче-

тов в программе Thermo-Calc для системы Fe–S–O, в которой имеется область несмешивания в жидком состоянии. В табл. 3 представлены рассчитанные «геометрическим» способом составы фаз и массовые доли (выделены жирным шрифтом), а также вычисленные CALPHAD-методом в программе Thermo-Calc (обычный шрифт) для рассматриваемой системы при температурах 1500 и 1600 °С и давлении 101 кПа. Можно видеть, что в данном случае результаты, полученные расчетами в Thermo-Calc и «геометрическим» способом, различаются достаточно сильно и достигают нескольких абсолютных процентов, особенно по со-

Таблица 3

Вычисленные в программе Thermo-Calc (обычный шрифт) и определенные предложенным методом (жирный шрифт) составы жидких фаз l_1 и l_2 и массовые доли l_1 в системе Fe–S–O

Температура сечения, °С	Состав сплава, % (по массе)			Массовая доля жидкости l_1	Состав жидкости l_1 , % (по массе)			Состав жидкости l_2 , % (по массе)		
	Fe	S	O		Fe	S	O	Fe	S	O
1500	90	5	5	0,711 0,740	96,31 95,15	3,53 4,70	0,16 0,15	74,48 75,34	8,62 5,85	16,90 18,81
	80	5	15	0,206 0,220	97,75 95,86	2,11 3,99	0,14 0,15	75,40 75,52	5,75 5,29	18,85 19,20
	75	15	10	0,164 0,215	87,79 83,53	11,78 15,74	0,42 0,73	72,49 72,65	15,63 14,80	11,88 12,54
1600	90	5	5	0,724 0,757	95,75 94,50	3,97 5,17	0,28 0,33	74,93 76,00	7,69 4,47	17,37 19,53
	80	10	5	0,667 0,718	90,69 89,08	8,85 10,39	0,46 0,53	73,60 74,58	12,30 8,99	14,10 16,43
	75	5	15	0,205 0,226	97,12 94,07	2,63 5,58	0,25 0,35	75,59 75,89	5,61 4,83	18,80 19,28

держанию серы в жидкости с бóльшим содержанием железа. Возможно, это связано с неточностями экспериментальных данных из-за высокой температуры и агрессивности растворов Fe–S–O.

Выводы. Предложен «геометрический» способ расчета составов двух равновесных фаз-растворов и их массовых долей в диаграммах трехкомпонентных систем.

Предложенный способ дает результаты, практически совпадающие с расчетами термодинамическим CALPHAD-методом, реализованным в программе Thermo-Calc в системах Al–Mg–Cu, Al–Si–Mg, Mg–Al–Zn.

Для системы Fe–S–O расхождения между результатами термодинамического и «геометрического» расчетов достаточно большие, особенно по содержанию серы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Г.М., Ротенберг В.А., Цурган Л.С. // Изв. вуз. Цветная металлургия. 1972. № 4. С. 99.
2. Новик Ф.С. // Изв. вуз. Цветная металлургия. 1972. № 4. С. 105.

© 2012 г. Пикунев М.В., Баженов В.Е., Сидоров Е.В.
Поступила 13 января 2012 г.