

плотных коэффициентов вклада признаков в качество и полученных уравнений обобщенных показателей, главных компонент и центроидных факторов для анализа, оптимизации, моделирования, разработки новых химических составов сталей и различных процессов обработки металлоизделий.

Библиографический список

1. Моделирование характеристик эксплуатационной стойкости крестовин стрелочных переводов из высокомарганцовистой стали / Гасик М.И., Семенов И.А., Юшкевич О.П. и др. // Проблемы специальной металлургии. - 2002. - № 1. - С. 40-43.
2. Гасик М.И. Сталь Гадфильда: современное состояние технологии и материаловедения крестовин железнодорожных стрелочных переводов // Современная электрометаллургия. - 2004. - № 1. - С. 29-39.
3. Юшкевич О.П. Модель представления комплексного показателя качества сталей до и после термической обработки / Теория и практика металлургии // Общегосударственный научно-технический журнал. АИНУ. – Днепропетровск. - 2011. - № 3-4. - С. 150-154.
4. Большаков В.И., Юшкевич О.П. Разработка ме-

тодов расчёта весовых коэффициентов и обобщенных показателей стали / Металознавство та термічна обробка металів: Науков. та інформ. журн. / ПДАБтаА. – Дніпропетровськ. - 2013. - № 1. - С. 14-27.

5. Большаков В.И., Юшкевич О.П. Разработка методов расчёта обобщенных показателей вклада признаков сталей в их качество / Металознавство та термічна обробка металів: Науков. та інформ. журн. / ПДАБтаА. – Дніпропетровськ. - 2013. - № 2-3. - С. 21-35.

6. Иберла К. Факторный анализ / Пер. с нем. В.М. Ивановой; Предисл. А.М. Дуброва. - М.: Статистика, 1980. – 398 с. - (Математико-статистические методы за рубежом).

7. Металлургия высокомарганцевой стали / М.И. Гасик, Ю.В. Петров, И.А. Семёнов и др. – К.: Техника, 1990. - 136 с.

Поступила 01.08.2013



УДК 669.2\8-154.621.315.5.92

**Приходько Э.В. /д.т.н./, Пиптюк В.П. /к.т.н./,
Петров А.Ф., Мороз В.Ф. /к.т.н./, Греков С.В.**
ИЧМ НАНУ им. З.И. Некрасова

Логозинский И.Н.
ПАО «Днепрспецсталь»

Наука

Прогнозирование плотности стандартных марок феррохрома методом физико-химического моделирования

Разработаны модели для описания плотности стандартных марок феррохрома. Установлены закономерности изменения этой физической характеристики в зависимости от модельных параметров межатомного взаимодействия. Ил. 3. Табл. 3. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: феррохром, плотность, модель, критерии, интегральные параметры

Models are worked out for description of density of standard marks of ferrochromium. determine to conformity of change of this physical description are set depending on the model parameters of interatomic interaction.

Keywords: ferrochromium, density, model, criteria, integral parameter

Среди наиболее важных физико-химических и структурно-чувствительных характеристик сплавов особое место занимает плотность, которая влияет на плавление и усвоение кусков ферросплава в ковше, а также на скорость его растворения и равномерность распределения в объеме металла. В литературе дискутируется вопрос о величине оптимальной плотности ферросплава. А.И. Строганов [1] считает, что оптимальная плотность ферросплава должна быть равна плотности жидкого обрабатываемого металла.

В противном случае сплав запутается в шлаке или опустится на дно ковша. Исследование влияния плотности на скорость растворения частиц ферросплавов в стальной ванне показало, что более полно вовлекаются в движение частицы ферросплава, имеющие плотность, равную плотности жидкого расплава [2]. Есть мнение, что плотность ферросплава должна быть больше плотности обрабатываемого металла [3].

Анализ плотности ряда твердых промышленных ферросплавов [4] показал, что величина их зависит от

химического состава. Плотность ферросплава должна быть такой, чтобы сплав полностью вовлекался в объем металла потоками стали, не опускаясь при этом на дно ковша. Наилучшие условия для растворения ферросплава в стали (чугуне) создаются при полном погружении и движении кусков сплава, причем более легкие по сравнению со сталью куски будут двигаться с отличающимися от жидкости скоростями и, следовательно, обтекаться жидкостью, ускоряя свое растворение. Под воздействием струи жидкого металла, сливаемого в ковш, твердые куски совершают циркуляционное движение, в котором можно выделить три фазы: 1 – движение по поверхности жидкости; 2 – погружение в струе жидкости; 3 – всплытие. Поэтому оптимальная величина плотности ферросплавов имеет конкретные пределы, связанные с движением его кусков в ковше. Сплавы, обладающие оптимальной плотностью, наиболее полно вовлекаются в гидродинамическое движение потоками стали в ковше и, как следствие, успевают наиболее быстро и полно расплавиться и полностью усвоиться железоуглеродистым расплавом за время, отведенное на обработку. Сплавы с меньшей плотностью не вовлекаются вглубь расплава, а с большей – опускаются на дно. Рекомендуемая плотность промышленных ферросплавов, предназначенных для обработки чугунов и сталей, составляет 5,0-7,0 г/см³, причем, в зависимости от размера куска ферросплава, пределы оптимальной плотности конкретизируются. Феррохром один из немногих промышленных ферросплавов, который по данным производителей имеет плотность близкую к плотности жидкой стали. Важнейшим требованием сталеплавильной промышленности к феррохрому являются однородность, плотность, легкая растворимость и высокое усвоение хрома стальной ванной, особенно при введении его через шлак.

Плотность ферросплавов хрома до настоящего времени исследована недостаточно. Экспериментальные данные, по этой физической характеристике, которые имеются в литературе, ограничены и весьма противоречивы, что не позволяет осуществлять достаточно эффективное прогнозирование большинства металлургических процессов с ее использованием. Поэтому разработка расчетных методов определения его плотности представляет научный и практический интерес.

В настоящей работе авторы предлагают методику и критерии для прогнозной оценки плотности хромсодержащих ферросплавов, которая была разработана ранее и использована при описании строения и свойств металлических систем в твердом и жидком состояниях [5].

Информация о составе сплавов закодирована в виде параметра Z^y , определяемого как число электронов, принимающих участие в образовании среднестатистической связи между двумя атомами сплава заданного состава и являющегося его электронным химическим эквивалентом и струк-

турного параметра d , характеризующего среднестатистическое расстояние между атомами в квазихимическом приближении. При этом учет влияния микро-неоднородности сплавов на их свойства обеспечивается за счет избыточных параметров (DZ^y) и (Dd). Эти параметры определяются как разница между Z^y и d для разупорядоченных систем и механической смеси из компонентов этой системы. Исследование связи состав–свойство при таком подходе расчленяется на две части. Первая сводится к расчету модельных параметров, а вторая – к установлению корреляций свойств с модельными параметрами с использованием современных математических методов обработки.

С позиций предложенной методики нами уже были разработаны модели для описания температуры кристаллизации (плавления) стандартных марок феррохрома и показана возможность оценки теплофизических свойств [6]. По вышеприведенному методу моделирования, с использованием предлагаемых физико-химических критериев произведены расчёты плотности (ρ) стандартных марок феррохрома.

Анализ экспериментальных данных о плотности жидких и твердых сплавов железо-хром с различным содержанием C и Si , выплавленных на Серовском заводе ферросплавов [7] показал, что использование разработанных модельных параметров позволяет описать зависимость (ρ) от параметров межатомного взаимодействия.

В табл. 1 приведены данные, представленные в [7], о плотности промышленного феррохрома различного состава, а также рассчитанные значения интегральных параметров.

Сплавы изученного состава кристаллизуются с изменением плотности ($\Delta\rho = \rho_{\text{сол}} - \rho_{\text{лик}}$), которая зависит от концентрации углерода. Минимальные изменения объема при кристаллизации соответствуют сплавам, близким к эвтектическому составу. Плотность сплавов при 1700 °С уменьшается с повышением концентрации углерода, при этом обнаруживаются минимумы, при 0,06 и 0,27 % C, что характерно и для сплавов Fe-C. Третий минимум изотермы плотности наблюдается при концентрации углерода, близкой к эвтектической. Плотность промышленного углероди-

Таблица 1. Интегральные параметры межатомного взаимодействия и плотности жидких и твердых сплавов железо-хром с различным содержанием C и Si

Хим. состав сплава, %				Плотность при температурах, г/см ³		Интегральные параметры			
C	Cr	Si	P	TS	TL	Z	d	ΔZ	Δd
0,027	72,5	0,7	0,02	6,83	6,49	1,9372	2,8281	0,5245	-0,0201
0,050	70,8	0,7	0,02	6,81	6,43	1,9547	2,8252	0,5453	-0,0208
0,14	72,7	0,6	0,03	6,82	6,50	1,9363	2,8186	0,5247	-0,0229
0,22	71,1	0,9	0,03	6,74	6,42	1,9550	2,8044	0,5519	-0,0263
1,00	71,2	1,4	0,03	6,85	6,45	1,9708	2,7235	0,5854	-0,0450
1,20	70,6	1,5	0,03	6,88	6,47	1,9784	2,7049	0,5994	-0,0483
2,90	70,8	0,2	-	6,93	6,59	1,9718	2,5930	0,6212	-0,0654
4,65	67,5	0,6	-	6,87	6,48	1,9936	2,4824	0,6850	-0,0673

стого феррохрома снижается с повышением содержания углерода. Сплав с содержанием углерода более 7,5 % становится пористым, а с ростом его концентрации выше 8 % с рыхлым рассыпчатым.

Анализ изменения модельных параметров взаимодействия в сплавах железо-хром с различным содержанием *C* и *Si* позволяет выразить значения плотности как линейную функцию предлагаемых параметров. Это дает основание предполагать, что параметры предлагаемой модели могут эффективно использоваться для обобщения информации в форме удобной для решения задач прогнозирования. С учетом указанной информации и с использованием экспериментальных данных [7], методом корреляционно-регрессионного анализа были получены уравнения (1-2) для оценки указанной в твердом и жидком состояниях плотности феррохрома

$$\rho_{тв.} = 6,22 + 3,19 Z' - 1,22 d - 4,18 \Delta Z' - 2,73 \Delta d; \quad (1)$$

$$\rho_{ж.} = 17,9 - 8,19 Z' + 1,03 d + 2,7 \Delta Z' - 8,2 \Delta d. \quad (2)$$

Высокий коэффициент корреляции ($r = 0,9-0,97$) (ρ) с параметрами межатомного взаимодействия достигнут за счет ввода избыточных параметров $\Delta Z'$ и Δd .

На рис. 1 представлена зависимость экспериментальных значений плотности от рассчитанных по уравнениям (1-2), для жидкого и твердого феррохрома разных марок и групп.

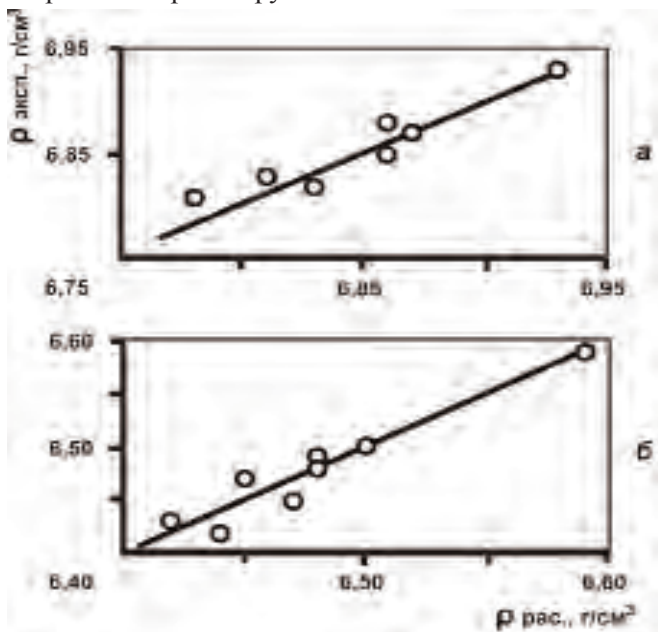


Рис. 1. Соотношение между рассчитанными по уравнениям (1)-(2) и экспериментальными значениями плотности феррохрома в твердой (а) и жидкой (б) фазах [8]

Аналогичные результаты получены при анализе данных работы [8], в которой приведена экспериментальная информация о кажущейся и истинной плотности для феррохрома производства различных ферросплавных заводов. Использование интегральных параметров в сочетании с их избыточными значениями позволило выразить плотность феррохрома стандартных марок как линейную функцию предлагаемых параметров. Причем коэффициенты корреляции между расчетными и экспериментальными значения-

ми не ниже 0,97. Ниже приведены уравнения (3)-(4) для вычисления кажущейся и истинной плотности феррохрома стандартных марок, полученные по экспериментальным данным Челябинского ферросплавного завода, а уравнения (5)-(6) по данным Актюбинского завода ферросплавов

$$\rho_{каж.} = 624,4 Z' + 1391,9 d - 397 \Delta Z' - 5046,6 \Delta d - 5034; \quad (3)$$

$$\rho_{ист.} = 159,8 Z' + 1485,3 d - 89,9 \Delta Z' - 5245 \Delta d - 4564; \quad (4)$$

$$\rho_{каж.} = 36,6 - 24,16 Z' + 3,97 d + 12,06 \Delta Z'; \quad (5)$$

$$\rho_{ист.} = 62,7 - 48,36 Z' + 8,13 d + 29,6 \Delta Z'. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что прогнозная точность уравнений (5-6) достигается с меньшим количеством интегральных параметров. В данном случае использование сочетания характеристик Z' , $\Delta Z'$, Δd позволило обеспечить наиболее высокий коэффициент корреляции. На рис. 2, 3 приведена зависимость экспериментальных значений [9] кажущейся и истинной плотности феррохрома Актюбинского и Челябинского ферросплавных заводов, от рассчитанных по уравнениям (3)-(6).

Уравнения (3)-(6) могут быть использованы для прогнозных расчетов плотности стандартных марок низко-, средне-, и высокоуглеродистого феррохрома, однако следует заметить, что расчет модельных параметров проводился нами по указанному в [8] химическому составу, в котором отсутствовал кремний.

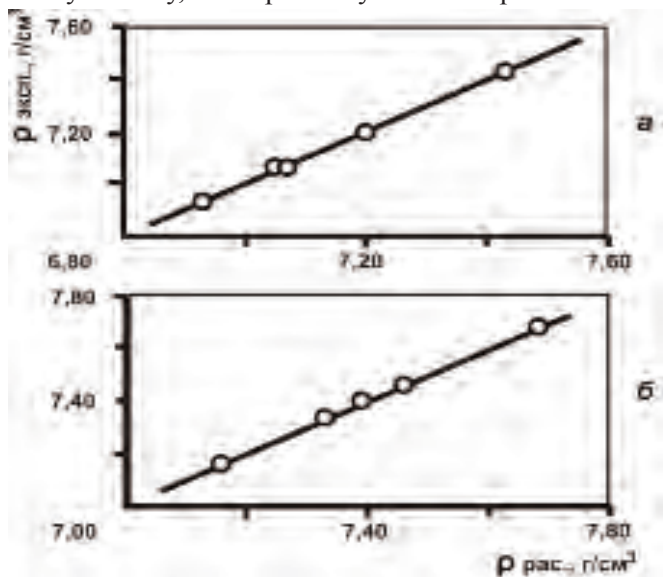


Рис. 2. Соотношение экспериментальных и расчётных значений кажущейся (а) и истинной (б) плотности феррохрома стандартных марок производства Актюбинского ферросплавного завода

Содержание кремния в феррохроме, как известно, является не менее важным показателем, определяющим не только его принадлежность к той или иной марке, но и качество сплава. Имеются данные, свидетельствующие о том, что плотность феррохрома в значительной степени зависит от содержания кремния и в меньшей от количества в сплаве хрома. По данным В.И. Жучкова увеличение содержания кремния с 0,56 до 10,32 % приводит к снижению плотности с 7,6 до 6,8 г/см³, а увеличение хрома на 9 % повышает плот-

ность всего на 2,6 %. По существующим стандартам превышение концентрации кремния выше 2 % не допускается, т.к. металл с таким его содержанием пользуется пониженным спросом.

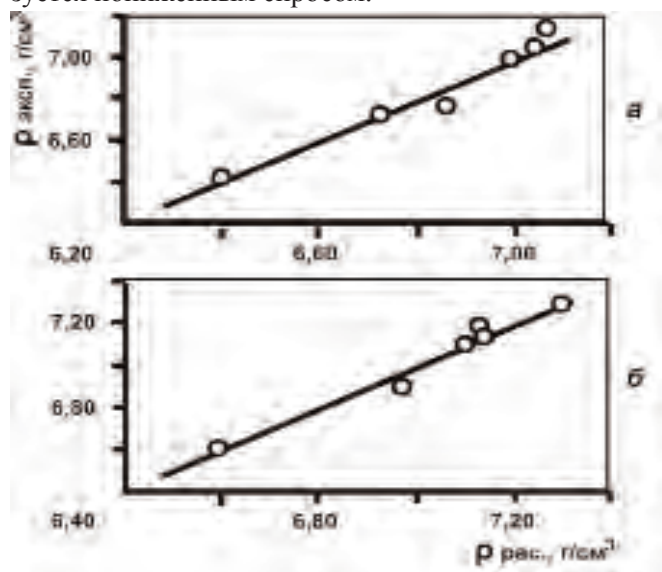


Рис. 3. Аналогично рис. 2 для Челябинского ферросплавного завода

Анализ показал, что для практического применения для расчета кажущейся плотности стандартного феррохрома (ГОСТ 4757-91 и ИСО 5448-81), приведенного в табл. 2, целесообразно использовать уравнение (7)

$$\rho_{\text{каж.}} = 37,8 - 29,8 Z' + 6,1 d + 18,9 \Delta Z' - 2,6 \Delta d. \quad (7)$$

Сравнение расчетных величин плотности стан-

Таблица 2. Стандартные диапазоны химического состава в разных группах феррохрома (ГОСТ 4757-91 и ИСО 5448-81) и расчётных значений интегральных параметров

Группа феррохрома	Содержание элементов, % масс.					Интегральные параметры			
	Не менее	Не более				Z'	d	ΔZ'	Δd
		Cr	C	Si	P				
Низкоуглеродистый	65 - 68	0,01-0,50	0,8-2,0	0,02-0,03	0,02-0,03	1,9725-2,0118	2,7575-2,8259	0,5758-0,6399	-0,0353- -0,0204
Среднеуглеродистый	65	1,0-4,0	2,0	0,03	0,04	2,0161-2,0212	2,5061-2,7138	0,6542-0,7119	-0,0644- -0,0440
Высокоуглеродистый	65	6,5-9,0	2,0	0,03	0,05-0,06	1,9760-2,0038	2,2803-2,3802	0,7333-0,7384	-0,0580- -0,0430

Таблица 3. Сопоставление значений кажущейся плотности (rho_kazh), для групп низко-, средне- и высокоуглеродистого феррохрома, приведенных в [9], с рассчитанными по уравнению (7)

Группа феррохрома	Литературные данные			Аддитивный метод	Результаты расчета
	[9]	[10]	[11]		
Низкоуглеродистый	6,83	7,10	7,3-7,35	7,28	6,86-7,19
Среднеуглеродистый	6,85-7,28	6,9	7,1-7,3	7,5	6,61-6,75
Высокоуглеродистый	6,75-6,93	6,3	6,7-7,1	6,8	6,51-6,89

дартных марок низко-, средне- и высокоуглеродистого феррохрома с экспериментальными (табл. 3) свидетельствует о достаточной для практических целей точности прогноза по уравнению (7). Для некоторых групп феррохрома расчетные значения кажущейся

плотности несколько занижены, что может быть связано с неполным химическим составом ферросплавов, представленных в научной литературе.

Выводы

1. Разработаны полуэмпирические модели для расчета плотности стандартных марок низко-, средне- и высокоуглеродистого феррохрома в зависимости от интегральных и избыточных параметров межатомного взаимодействия, являющихся сверткой химического состава.

2. Резервом повышения точности моделей для расчетов плотности феррохрома является получение надежной экспериментальной информации о плотности при наличии полного химического состава.

Библиографический список

1. Строганов А.И. Требования к ферросплавам для раскисления и легирования // Производство ферросплавов. – Новокузнецк, 1980. – С. 5-24.

2. Моделирование процесса растворения ферросплавов в сталеплавильном ковше / Паримончик И.Б., Казачков И.П., Резчик В.Г. // Респ. Межвед. Науч.-технич. сб. Metallургия и коксохимия. - № 32. - С. 62-65. – К.: Техника, 1972.

3. Власенко В.Е., Фролов В.Ф. О критериях при выборе сортамента ферросплавов // Metallургия марганца: Тез. докл. Всесоюз. совещ. - М.: Ин-т Metallургии АН СССР, 1975. - С. 79-81.

4. Игнатьев В.С., Вихлевщук В.А., Тхоревский В.С. Совершенствование технологии микролегирования стали ферросплавами и лигатурами редкозе-

мельных элементов: Информ. листок. - Запорожье: ЦНТИ, 1985.

5. Приходько Э.В. Metallохимия многокомпонентных систем. - М.: Metallургия, 1995. – 320 с.

6. Приходько Э.В., Пиптюк В.П., Логозинский И.Н. и др. Модельное прогнозирование температуры плавления феррохрома физико-химическим мето-

дом // Metallург. и горноруд. пром-сть. – 2012. - № 4. - С. 49-53.

7. Теплофизические свойства промышленных марок феррохрома / Ермаченков В.А., Островский О.И., Григорян В.В. и др. // Изв. вузов. Черная metallургия. – 1980. – № 9. – С. 56–80.

8. Мизин В.Г., Чирков Н.А., Игнатьев В.С. и др. Ферросплавы: справ. изд. - М.: Metallургия, 1992. – 415 с.

9. Комплексное исследование свойств легирующих и микролегирующих материалов / Вихлевщук В.А., Игнатьев В.С., Ю.Н. Омесь и др. // Теория и практика metallургии. - 1999. - № 3. - С. 29-30.

Поступила 24.04.2013