

В.П.Пиптюк, А.Ф.Петров, С.В.Греков, В.А.Буршитин

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ СТАНДАРТНЫХ МАРГАНЕЦ– И КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ ФЕРРОСПЛАВОВ

Приведены результаты физико–химического прогнозирования основных свойств стандартных марганец– и кремнийсодержащих ферросплавов, производимых в настоящее время предприятиями Украины и России. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о достаточной их сходимости.

Современное состояние вопроса. Исследованиями [1] показана актуальность наличия свойств промышленных марганец– и кремнийсодержащих ферросплавов и возможность их оценки методами физико–химического прогнозирования.

Кроме того, знание свойств ферросплавов, используемых при производстве стали массового и специального назначения, обеспечивает возможность повышения эффективности их применения, в том числе дорогостоящих и импортируемых Cr, Nb, V, Mo, W, Ca, Ni, Ti–содержащих ферросплавов.

Цель и методика исследования. Отсутствующие в литературе физические, теплофизические и другие свойства ферросплавов, необходимы для использования в качестве исходных данных при математическом, физико–химическом и физическом моделировании сталеплавильных процессов, происходящих в плавильном агрегате или сталеразливочном ковше при их применении. Ниже представлены основные положения и подходы в реализации использованной для прогнозирования свойств ферросплавов физико–химической методике.

Предлагаемая методика многофакторного физико–химического моделирования базируется на вводе в связь между составом и свойствами многокомпонентных систем промежуточного звена – комплекса интегральных и парциальных параметров, характеризующих химическое и структурное состояние исследуемых систем. Исследование связи состав – свойства при таком подходе разделяется на две части. Первая – сводится к выбору для каждой группы материалов физико–химических моделей (условий стабильности структуры), адекватно отражающих особенности их строения и специфику свойств. Вторая – связана с установлением корреляций свойств с модельными физико–химическими параметрами и использованием современных математических методов для разработки на базе этих корреляций статистических моделей для прогнозирования свойств многокомпонентных материалов и результатов их взаимодействия. При разработке физико–химической модели электронной структуры металлических расплавов, подробно описанной в работах Э.В.Приходько [2, 3], исходным было допущение того, что при любой форме записи условий стабильности структуры таких расплавов заряды всех компонентов

жидкости должны рассматриваться как функция длин связей и физико-химических свойств их партнеров.

Основными параметрами модели являются эффективные заряды компонентов Z_j , определяемые для каждой пары реагентов – $Z_{i(i-j)}$ и для всей системы – среднестатистические значения $Z_{\text{ср}}$, характеризующие зарядовое состояние каждого из компонентов в расплаве в зависимости от реального кристаллографического окружения. Интегральными характеристиками электронной структуры расплава, как химически единой системы, являются ее химический эквивалент Z' , суммирующий данные о зарядах компонентов с учетом вероятностей образования связей разного типа, и структурный параметр d , характеризующий среднестатистическое расстояние между атомами в квазихимическом приближении.

Для решения перечисленных выше задач с единых методологических позиций предлагаются физико-химические критерии для интегральной оценки роли химической и структурной микронеоднородности расплавов в формировании их свойств. Методика определения этих критериев, базирующаяся на определении степени отклонения химического эквивалента состава ($\Delta Z'$) и структурного параметра (Δd), для конкретных составов расплавов от вычисляемых для идеальных смесей исходных компонентов Z' и d , предложена Э.В.Приходько с учениками [4,5].

По рассмотренной методике моделирования с использованием предлагаемых физико-химических критериев была исследована зависимость физических и теплофизических свойств стандартных марок ферромарганца, ферросиликомарганца, марганца металлического и ферросилиция.

Оценены свойства указанных групп стандартных ферросплавов отечественных (ДСТУ4127:2002, ДСТУ3547–97, ДСТУ3548–97) и российских (ГОСТ1415–78, ГОСТ4756–91, ГОСТ6008–90) производителей. Свойства ферросплавов, произведенных на Украине и в России, оценивались совместно потому, что нормативное содержание химических элементов в аналогичных марках разных стран отличается друг от друга, а некоторые марки, например, ферросилиций ФС92 по ГОСТ 1415–78 вообще отсутствуют в ДСТУ4127:2002. Российский ГОСТ 4755–91 «Ферромарганец. Технические требования и условия поставки» отменен и взамен его еще не создан новый ГОСТ. В Украине сейчас действует только ДСТУ 3547–97 «Ферромарганец. Общие технические условия». Кроме этого, еще не создан отечественный стандарт, регламентирующий требования к марганцу металлическому. Поэтому, в настоящее время на Украине, действует российский ГОСТ6008–90 «Марганец металлический и марганец азотированный. Технические условия».

Ниже приведены типичные уравнения, полученные по вышеприведенной методике, для расчета свойств ферросплавов по их составу и записанные в терминах модельных параметров. Изменения кажущейся плотности (D), теплоты плавления (Q), теплоемкости (C), теплопроводности (λ), удельного электросопротивления (ρ), коэффициента температуропро-

водности (α), временного сопротивления (σ_B) изучаемых ферросплавов в зависимости от интегральных параметров межатомного взаимодействия описываются следующими уравнениями.

Для ферромарганца, ферросиликомарганца, марганца металлического:

$$D = 21,6 - 21,3 Z' + 3,98 d + 19,4 \Delta Z' - 9,7 \Delta d \quad r = 0,99 \quad (1)$$

$$T_{пл} = 9114,6 Z' - 2645 d - 10044 \Delta Z' + 1051,9 \Delta d - 1792 \quad r = 0,99 \quad (2)$$

$$C = 5562 Z' - 1376 d - 6075 \Delta Z' - 406 \Delta d - 1974 \quad r = 0,95 \quad (3)$$

$$Q = 3927,7 Z' - 193,5 d - 3178 \Delta Z' + 1049 \Delta d - 3987 \quad r = 0,99 \quad (4)$$

$$\rho = 5,66 + 23,9 Z' - 10,9 d - 29,8 \Delta Z' + 9,29 \Delta d \quad r = 0,90 \quad (5)$$

$$\alpha = 93,9 - 177 Z' + 43,9 d + 184,6 \Delta Z' - 11,9 \Delta d \quad r = 0,95 \quad (6)$$

$$\sigma_B = 576 Z' + 259,6 d - 405,9 \Delta Z' - 912,3 \Delta d - 1387,6 \quad r = 0,98 \quad (7)$$

$$\lambda = 549,4 - 951,6 Z' + 223 d + 966 \Delta Z' - 70,3 \Delta d \quad r = 0,97 \quad (8)$$

Для ферросилиция:

$$D = 119,3 Z' - 29,6 d - 101,5 \Delta Z' - 34 \Delta d - 65,5 \quad r = 0,98 \quad (9)$$

$$T_{пл} = 38740 Z' - 5729 d - 36973 \Delta Z' - 649,4 \Delta d - 28375 \quad r = 0,97 \quad (10)$$

$$C = 20865 Z' - 1793,5 d - 20351 \Delta Z' + 2729 \Delta d - 18225 \quad r = 0,99 \quad (11)$$

$$Q = 33818 Z' + 826,4 d - 32862 \Delta Z' - 2105,4 \Delta d + 36801 \quad r = 0,99 \quad (12)$$

$$\rho = 759 - 758,6 Z' + 41,3 d + 729,4 \Delta Z' - 12,8 \Delta d \quad r = 0,99 \quad (13)$$

$$\lambda = 1343,6 - 1554 Z' + 162,2 d + 1559,4 \Delta Z' - 129,3 \Delta d \quad r = 0,99 \quad (14)$$

$$\sigma_B = 3732 Z' - 226,8 d - 3637,7 \Delta Z' - 118,4 \Delta d - 3540 \quad r = 0,99 \quad (15)$$

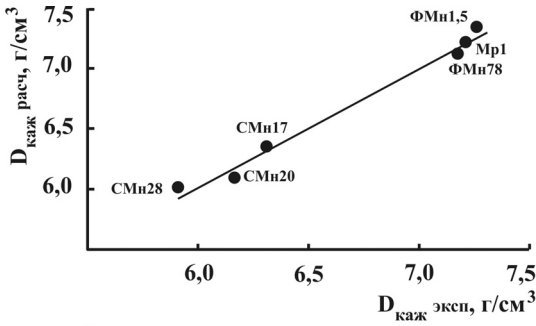
Коэффициенты корреляции между расчетными и экспериментальными значениями для этих уравнений находятся на уровне 0,90 и выше.

Сопоставление экспериментальных данных с расчетными по плотности, температуре плавления, теплоте плавления, теплопроводности, временному сопротивлению, температуропроводности, которые определялись по уравнениям (1,2,4,6–8), приведено на рис. 1–3.

Изложение основных результатов исследований. Содержание элементов и расчетные значения интегральных параметров ферромарганца приведены в табл. 1. Здесь представлены данные для ферромарганца электропечного (ФМн) и доменного (ФМнД). ДСТУ 3547–97 регламентирует также требования к ферромарганцу азотированному марок ФМнН–ПЛ, ФМнН–СП1 и ФМнН–СП2. Экспериментальные данные о физических и теплофизических свойствах такого ферромарганца до настоящего времени отсутствуют. Поэтому оценить их свойства по уравнениям (1–8) к настоящему моменту не представляется возможным. Это следует из того, что наличие экспериментальных данных позволит создать новые уравнения по вышеприведенной методике и затем спрогнозировать их свойства.

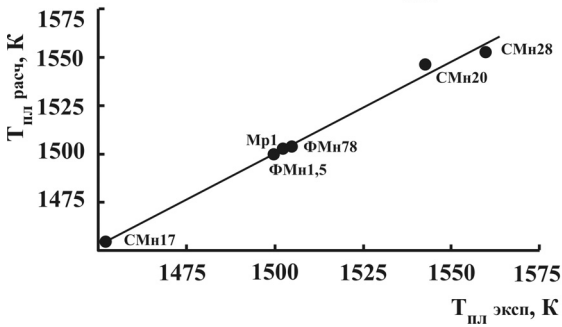
В табл. 1–6, 9,10 приведены данные о содержании элементов в указанных марках ферросплавов для трех химических составов, соответст-

вующих максимальному, среднему и минимальному значениям их нормативного содержания, (для более объективной оценки свойств в пределах марки).

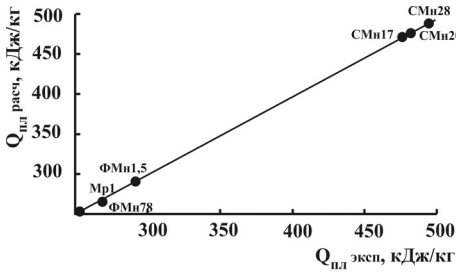


а

Рис.1. Зависимость расчетных данных от экспериментальных значений кажущейся плотности $D_{\text{каж}}$ (а) и температуры плавления $T_{\text{пл}}$ (б).

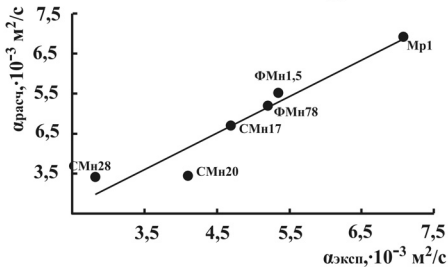


б



а

Рис.2. Зависимость расчетных данных от экспериментальных значений теплоты плавления $Q_{\text{пл}}$ (а) и коэффициента температуропроводности α (б).



б

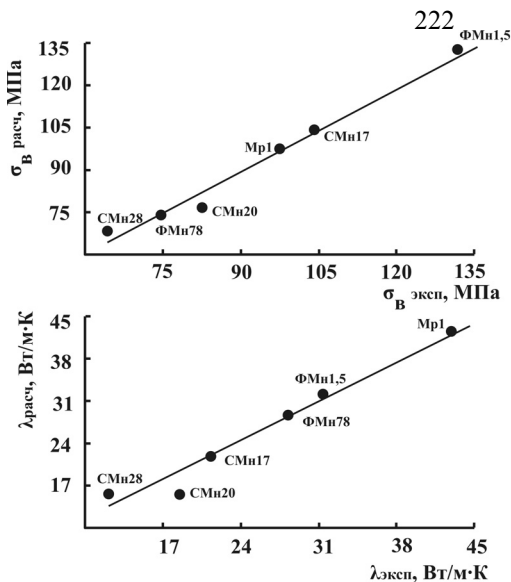


Рис.3. Зависимость расчетных данных от экспериментальных значений временного сопротивления σ_b (а) и теплопроводности λ (б).

В табл. 2 представлены физические и теплофизические свойства, указанных в табл.1 марок ферромарганца. Экспериментальные значения плотности, теплопроводности и температуры плавления этого ферросплава (поз.19 в табл.2),

исследованные в [6], находятся внутри интервала их расчетных значений или незначительно превышают их пределы по теплоте плавления и теплоемкости (для ФМн78 – поз.7–9 в табл.2) при колеблемости химсостава. Содержание элементов и расчетные значения интегральных параметров ферросиликомарганца приведены в табл.3 и 5. В табл.4 и 6 приведены физические и теплофизические свойства всего производимого марочного сортамента ферросиликомарганца, указанного в табл.3 и 5 соответственно. В табл.5 для ферросиликомарганца МнС25 по ГОСТ4756–91 содержание кремния предусмотрено свыше 25% (масс), а в ДСТУ3548–97 для этого элемента предусмотрено содержание в интервале от 25 до 35% (масс). Интервал экспериментальных значений свойств для ферросиликомарганца марки МнС17, приведенных в [7–10] (поз.13–16 в табл.6), находится внутри интервала их расчетных значений (поз.7–9 в табл.6) или для некоторых параметров несколько превышает их предельные значения при колеблемости химсостава.

Таблица 1. Содержание элементов в ферромарганце (ДСТУ 3547–97) и расчетные значения интегральных параметров

№ п/п	Марка ферросплава	Содержание элементов, % масс					Интегральные параметры			
		Mn	C	Si	P	S	Z^y	d	ΔZ^y	Δd
1	ФМн90	85,0	0,5	1,8	0,3	0,03	1,5523	2,8026	0,3562	-0,0520
2		90,0					1,4723	2,8028	0,2723	-0,0571
3		95,0					1,3818	2,8024	0,1778	-0,0629
4	ФМн88	85,0	2,0	3,0	0,4	0,03	1,6011	2,6252	0,4276	-0,1063
5		90,0					1,5283	2,6176	0,3510	-0,1190
6		95,0					1,4421	2,6111	0,2604	-0,1337

7	ФМн78	75,0	7,0	6,0	0,7	0,03	1,7466	2,2997	0,6378	-0,1098
8		78,5					1,7176	2,2931	0,6066	-0,1196
9		82,0					1,6855	2,2853	0,5722	-0,1306
10	ФМн70	65,0	7,0	6,0	0,7	0,03	1,8114	2,3124	0,7090	-0,0880
11		70,0					1,7823	2,3071	0,6767	-0,0980
12		75,0					1,7466	2,2997	0,6378	-0,1098
13	ФМнД75	70,1	7,0	6,0	0,4	0,03	1,7801	2,3079	0,6741	-0,0984
14		72,5			0,55		1,7645	2,3041	0,6571	-0,1038
15		75,0			0,7		1,7466	2,2997	0,6378	-0,1098
16	ФМнД70	65,0	7,0	6,0	0,35	0,03	1,8094	2,3135	0,7066	-0,0880
17		67,5			0,55		1,7969	2,3105	0,6927	-0,0930
18		70,0			0,7		1,7823	2,3071	0,6767	-0,0980

Таблица 2. Физические и теплофизические свойства ферромарганца

№ п/п	$D \times 10^3$, Кг/м ³	Тпл, К	Ст, Дж/кг×К	Сж, Дж/кг×К	Q, кДж/кг	λ , Вт/м×К	ρ , МОм×м	σ , МПа
1	7,09	1311	569	661	381	45,0	1,15	138,0
2	7,22	1419	592	728	328	40,4	1,69	131,0
3	7,38	1538	619	801	267	35,6	2,30	122,0
4	7,26	1451	634	765	323	31,7	1,62	141,0
5	7,42	1563	664	841	269	26,3	2,13	139,0
6	7,62	1689	699	927	204	20,3	2,70	138,0
7	6,97	1523	651	747	286	24,0	2,35	57,7
8	7,05	1580	668	788	262	20,7	2,57	60,8
9	7,15	1641	687	833	235	17,1	2,81	64,3
10	6,81	1388	612	648	335	32,4	1,84	49,5
11	6,88	1451	630	694	314	28,4	2,08	53,5
12	6,97	1523	651	747	286	24,0	2,35	57,7
13	6,88	1454	631	696	313	28,3	2,08	53,9
14	6,92	1487	640	720	300	26,3	2,21	55,7
15	6,97	1523	651	747	286	24,0	2,35	57,6
16	6,81	1390	613	650	334	32,4	1,85	49,9
17	6,84	1419	621	671	325	30,5	1,96	51,6
18	6,88	1451	630	694	314	28,4	2,08	53,5
19	7,14[6]	1553[6]	754[6]	—	251[6]	28,2[6]	—	—

Таблица 3. Рекомендуемые требования по содержанию элементов в ферросилико-марганце (ГОСТ4756–91) и расчетные значения интегральных параметров

№ п/п	Марка ферросплава	Содержание элемента, %масс.					Интегральные параметры			
		Mn	Si	C	P	S	Z ^y	d	ΔZ^y	Δd
1	FeMnSi12	60,0	10,0	3,5	0,35	0,03	1,8728	2,4616	0,7403	-0,0790
2		67,5	12,5				1,8353	2,4362	0,6992	-0,0876
3		75,0	15,0				1,7761	2,4068	0,6365	-0,1013
4	FeMnSi18	60,0	15,0	2,5	0,35	0,03	1,8836	2,4792	0,7433	-0,0677
5		67,5	17,5				1,8348	2,4545	0,6911	-0,0760
6		75,0	20,0				1,7656	2,4557	0,6186	-0,0590

7	FeMnSi18LP	60,0	15,0	2,5	0,15	0,03	1,8824	2,4802	0,7419	-0,0678
8		67,5	17,5				1,8338	2,4554	0,6899	-0,0762
9		75,0	20,0				1,7647	2,4266	0,6175	-0,0890
10	FeMnSi22HP	60,0	22,5	1,6	0,30	0,03	1,8667	2,4762	0,7215	-0,0490
11		67,5	25,0				1,8046	2,4523	0,6561	-0,0575
12		75,0	20,0				1,7619	2,4830	0,6051	-0,0794
13	FeMnSi22MP	60,0	20,0	1,6	0,15	0,03	1,8753	2,4962	0,7282	-0,0530
14		67,5	25,0				1,8040	2,4531	0,6554	-0,0570
15		75,0	22,5				1,7516	2,4633	0,5964	-0,0770
16	FeMnSi22LP	60,0	29,0	1,6	0,10	0,03	1,8751	2,4965	0,7280	-0,0530
17		67,5	25,0				1,8038	2,4533	0,6551	-0,0570
18		75,0	22,5				1,7514	2,4635	0,5961	-0,0770
19	FeMnSi25HP	60,0	20,0	1,0	0,30	0,03	1,8755	2,5353	0,7220	-0,0460
20		67,5	25,0				1,8025	2,4910	0,6476	-0,0497
21		75,0	22,5				1,7585	2,5031	0,5868	-0,0680
22	FeMnSi25MP	60,0	20,0	1,0	0,15	0,03	1,8746	2,5362	0,7209	-0,0460
23		67,5	25,0				1,8018	2,4919	0,6467	-0,0495
24		75,0	22,5				1,7478	2,5040	0,5859	-0,0678
25	FeMnSi25LP	60,0	20,0	1,0	0,10	0,03	1,8744	2,5364	0,7206	-0,0460
26		67,5	25,0				1,8016	2,4921	0,6465	-0,0496
27		75,0	22,5				1,7476	2,5043	0,5857	-0,0680
28	FeMnSi28	65,0	30,0	0,5	0,20	0,03	1,7843	2,4897	0,6291	-0,0300
29		70,0	27,5				1,7626	2,5041	0,6023	-0,0430
30		74,0	25,0				1,7412	2,5198	0,5764	-0,0540
31	FeMnSi28LP	65,0	30,0	0,5	0,10	0,03	1,7839	2,4903	0,6285	-0,0299
32		70,0	27,5				1,7628	2,5047	0,6024	-0,0420
33		74,0	25,0				1,7408	2,5204	0,5759	-0,0540
34	FeMnSi30HP	57,0	35,0	0,1	0,20	0,03	1,7898	2,4863	0,6388	-0,0030
35		62,5	31,5				1,7873	2,5081	0,6304	-0,0164
36		67,0	28,0				1,7812	2,5315	0,6188	-0,0289
37	FeMnSi30P	57,0	28,0	0,1	0,10	0,03	1,8468	2,5367	0,6908	-0,0150
38		62,5	35,0				1,7555	2,4838	0,6010	-0,0110
39		67,0	31,5				1,7535	2,5053	0,5937	-0,0240
40	FeM- nSi30HLP	57,0	28,0	0,1	0,05	0,03	1,8465	2,5370	0,6904	-0,0150
41		62,5	35,0				1,7553	2,4840	0,6007	-0,0110
42		67,0	31,5				1,7533	2,5056	0,5934	-0,0240

Таблица 4. Физические и теплофизические свойства ферросиликомарганца (ГОСТ4756–91)

№ п/п	$D \times 10^3$, Кг/м ³	Тпл, К	Сг, Дж/кг×К	Сж, Дж/кг×К	Q, кДж/кг	λ, Вт/м×К	ρ, МОМ×М	σ, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	6,61	1248	572	590	457	36,9	0,84	102,4
2	6,59	1377	597	670	436	27,8	1,36	99,0
3	6,67	1530	631	767	394	18,0	2,00	95,2
4	3,40	1281	562	604	498	32,7	0,91	102,0

5	6,41	1418	588	687	469	23,7	1,50	96,3
6	6,32	1529	592	733	445	18,7	2,15	70,7
7	6,40	1282	562	604	498	32,7	0,92	102,2
8	6,41	1418	589	688	468	23,7	1,49	96,5
9	6,50	1578	624	788	419	14,0	2,20	90,5
10	6,15	1374	556	639	522	25,7	1,37	83,4
11	6,19	1519	585	727	481	16,9	2,01	75,6
12	6,44	1538	608	766	447	16,6	1,98	99,7
13	6,21	1328	553	620	526	28,7	1,12	94,3
14	6,19	1519	585	727	481	16,9	2,01	75,7
15	6,39	1587	613	787	441	13,4	2,23	89,5
16	6,21	1328	553	620	526	28,7	1,12	94,4
17	6,19	1519	585	727	481	16,9	2,01	75,8
18	6,39	1587	613	788	441	13,4	2,23	89,5
19	6,17	1297	541	602	546	30,7	0,95	100,7
20	6,15	1491	573	710	501	18,7	1,87	80,7
21	6,34	1558	600	770	460	15,4	2,09	94,1
22	6,17	1297	541	603	546	30,7	0,95	100,8
23	6,15	1492	573	711	501	18,8	1,87	80,8
24	6,35	1559	600	770	460	15,4	2,09	94,2
25	6,17	1297	541	603	546	30,7	0,95	100,9
26	6,15	1492	573	711	501	18,7	1,87	80,9
27	6,34	1559	600	770	460	15,4	2,09	94,2
28	5,98	1536	563	716	509	16,5	2,18	59,5
29	6,10	1555	576	743	493	15,4	2,19	72,0
30	6,23	1567	588	764	476	15,0	2,17	85,7
31	5,98	1536	562	716	509	16,5	2,18	59,5
32	6,10	1555	576	742	493	15,4	2,18	73,2
33	6,22	1567	588	764	476	15,0	2,17	85,8
34	5,78	1525	539	681	528	18,0	2,31	33,4
35	5,88	1515	547	693	527	18,1	2,14	53,0
36	6,00	1501	556	703	522	18,8	1,97	71,7
37	5,89	1377	525	617	565	26,1	1,46	69,0
38	5,84	1591	555	727	506	14,1	2,57	35,5
39	5,95	1576	563	735	504	14,6	2,39	54,4
40	5,89	1376	525	617	565	26,1	1,46	69,0
41	5,84	1591	555	727	506	14,1	2,57	35,5
42	5,95	1576	563	735	504	14,6	2,39	54,5

Таблица 5 – Содержание элементов в ферросиликомарганце (ГОСТ4756–91 и ДСТУ 3548–97) и расчетные значения интегральных параметров

№ п/п	Марка ферросплава	Содержание элементов, % масс					Интегральные параметры			
		Si	Mn	C	P	S	Z ^y	d	ΔZ ^y	Δd
1	MnC25	35*)	60*)	0,5*)	0,25*)	0,03*)	1,7750*)	2,4580*)	0,6263*)	–
2		30*)					1,8180*)	2,4926*)	0,6660*)	–
3		26	60	0,5	0,15	0,02	1,8453	2,5228	0,6903	–0,0288
4	MnC22	21	65	1,0	0,10	0,02	1,8394	2,5260	0,6829	–0,0510
5		23			0,25		1,8220	2,5084	0,6772	–0,0488
6		25			0,35		1,8214	2,4928	0,6688	–0,0453
7	MnC17	16	65	2,5	0,10	0,02	1,8516	2,5701	0,7083	0,0266
8		18			0,30		1,8509	2,4528	0,7091	–0,0711
9		20			0,60		1,8468	2,4361	0,7066	–0,0684
10	MnC12	11	65	3,5	0,10	0,02	1,8488	2,5136	0,7132	–0,0323
11		13			0,30		1,8519	2,4343	0,7177	–0,0830
12		15			0,60		1,8538	2,4173	0,7211	–0,0803

*) только по ДСТУ 3548–97

Таблица 6 – Физические и теплофизические свойства ферросиликомарганца (ГОСТ4756–91 и ДСТУ 3548–97)

№ п/п	D×10 ³ , Кг/м ³	Тпл, К	Ст, Дж/кг×К	Сж, Дж/кг×К	Q, кДж/кг	λ, Вт/м×К	ρ, мОм×м	σ, мПа
1	5,85*)	1579*)	557*)	718*)	504*)	14,5*)	2,53*)	33,1*)
2	5,91*)	1472*)	546*)	672*)	531*)	20,2*)	1,93*)	57,7*)
3	5,99	1390	539	637	549	24,9	1,46	77,3
4	6,20	1378	558	653	525	25,7	1,30	98,1
5	6,15	1418	561	670	520	23,1	1,51	89,5
6	6,10	1457	564	686	514	20,7	1,73	79,8
7	5,85	1200	473	475	565	42,9	1,08	35,4
8	6,36	1393	580	681	480	25,1	1,41	93,3
9	6,31	1428	583	528	478	22,6	1,59	85,1
10	6,26	1223	522	651	497	41,2	1,02	62,5
11	6,54	1353	589	663	448	29,1	1,27	96,2
12	6,48	1384	590	694	451	26,6	1,42	89,2
13	6,21[7]	1373–1533[7]	717[7]	–	477[7]	21,6[7]	1,49[7]	107,2[7]
14	6,15[8]	1463[8]	502[8]	–	732[8]	56,3[8]	–	–
15	6,2[9]	1373–1533[9]	720[9]	–	480[9]	22[9]	–	–
16	–	–	–	–	–	–	3,1[10]	–

*) только по ДСТУ 3548–97

Содержание элементов и расчетные значения интегральных параметров марганца металлического приведены в табл.7, а его физические и теплофизические свойства в табл. 8. ГОСТ6008–90 регламентирует требования к марганцу азотированному электролитическому марки Мн92Н6 и электротермическому марок Мн87Н5, Мн89Н4 и Мн91Н2. В связи с аналогичной, как и для ферромарганца азотированного, ситуацией относительно марганца азотированного, его свойства будут оценены позднее.

Расчетные значения физических и теплофизических свойств электротермического Мн965 (ранее обозначался Мр1 по отмененному ГОСТу 6008–85 – поз.3 в табл.8) находятся в пределах или незначительно превышают их интервал экспериментальных значений (поз.5 и 6 в табл.8) при колеблемости химсостава.

Таблица 7. Содержание элементов в марганце металлическом (ГОСТ6008–90) и расчетные значения интегральных параметров

№ п/п	Марка ферросплава	Содержание элементов, % масс					Интегральные параметры			
		Mn	C	Si	P	S	Z ^y	d	ΔZ ^y	Δd
1	Мн998	99,8	0,04	–	0,003	0,03	1,2261	2,9317	0,0079	–0,004
2	Мн997	99,7	0,06	–	0,005	0,10	1,2302	2,9273	0,0131	–0,007
3	Мн965	96,5	0,10	0,8	0,05	0,05	1,3157	2,8910	0,1020	–0,024
4	Мн95	95	0,20	1,8	0,07	0,05	1,3752	2,8383	0,1700	–0,052

Таблица 8. Физические и теплофизические свойства марганца металлического (ГОСТ6008–90)

№ п/п	D×10 ³ , Кг/м ³	Тпл, К	Ст, Дж/кг×К	Сж, Дж/кг×К	Q, кДж/кг	λ, Вт/м×К	ρ, мОм×м	σ, МПа
1	7,35	1545	580	766	232	44,3	2,77	81,6
2	7,36	1544	582	767	232	44,2	2,76	83,0
3	7,60	1499	584	753	271	42,8	2,36	101,9
4	7,33	1511	605	781	283	37,9	2,19	122,3
5	7,24[7]	1493–1513[7]	–	754[7]	267[7]	43,2[7]	2,26[7]	100,3[7]
6	7,2–7,4[9]	1473–1513[9]	–	750[9]	270[9]	43[9]	–	–

Содержание элементов и расчетные значения интегральных параметров ферросилиция приведены в табл.9, а его физические и теплофизические свойства в табл.10.

Необходимо отметить, что расчетные значения температуры плавления и удельного электросопротивления ферросилиция, в целом, увеличиваются, а плотности и теплопроводности понижаются по мере увеличения содержания кремния в ферросплаве. При этом значения теплопроводности уменьшаются настолько, что для ФС92 (поз.21 и 22 в табл.9) она не может быть рассчитана по уравнению (14). Наличие экспериментальных

данных о физических и теплофизических свойствах этой марки ферросилиция позволит уточнить уравнение (14) и получить расчетные данные этого параметра.

Таблица 9. Содержание элементов в ферросилиции (ГОСТ1415–78 и ДСТУ4127:2002) и расчетные значения интегральных параметров

№ п/п	Марка ферросплава	Содержание элементов, % масс				Интегральные параметры			
		Si	C	Mn	Al	Z ^y	D	ΔZ ^y	Δd
1	ФС20	19,0	0,40	0,50	1,0	1,6335	2,5049	0,5247	-0,0740
2		21,0	0,60	0,75		1,6589	2,4761	0,5498	-0,0720
3		23,0	0,80	1,00		1,6793	2,4497	0,5728	-0,0690
4	ФС25	23,0	0,22	0,40	1,0	1,6599	2,4892	0,5480	-0,0600
5		25,0	0,40	0,60		1,6769	2,4635	0,5674	-0,0570
6		27,0	0,60	0,80		1,6903	2,4381	0,5834	-0,0540
7		29,0 ^{*)}	0,80 ^{*)}	1,0 ^{*)}		1,0 ^{*)}	1,7000 ^{*)}	2,4143 ^{*)}	0,5954 ^{*)}
8	ФС45	41,0	0,02	0,02	2,0	1,6606	2,4010	0,5605	-0,0150
9		44,0	0,06	0,25		1,6487	2,3840	0,5496	-0,0080
10		47,0	0,10	0,50		1,6336	2,3674	0,5355	-0,0030
11	ФС65	63,0	0,03	0,2	2,5	1,5018	2,2950	0,4099	0,0170
12		65,0	0,07	0,3		1,4838	2,2832	0,3924	0,0180
13		68,0	0,10	0,4		1,4551	2,2670	0,3644	0,0185
14	ФС75	74,0	0,03	0,08	2,5	1,3911	2,2402	0,3011	0,0200
15		77,0	0,07	0,15		1,3603	2,2226	0,2710	0,0184
16		80,0	0,10	0,30		1,3289	2,2055	0,2402	0,0160
17	ФС90	89,0	0,02	0,02	2,8	1,2274	2,1601	0,1412	0,0060
18		90,0	0,02	0,10		1,2164	2,1544	0,1303	0,0040
19		92,0	0,03	0,20		1,1944	2,1423	0,1085	0,0004
20	ФС92 ^{*)}	92,0	0,01	0,20	2,5	1,1936	2,1427	0,1061	0,0030
21		94,0				1,1711	2,1306	0,0840	-0,0012
22		95,0				1,1598	2,1245	0,0730	-0,0030

^{*)} только по ГОСТ1415–78

Таблица 10 – Физические и теплофизические свойства ферросилиция (ГОСТ1415–78 и ДСТУ4127:2002)

№ п/п	D×10 ³ , Кг/м ³	Тпл, К	Ст, Дж/кг×К	Q, кДж/кг	λ, Вт/м×К	ρ, мОм×м	σ, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
1	4,80	1320	549	926	34,6	4,68	99,2
2	5,70	1424	563	965	33,9	4,76	97,9
3	6,50	1515	577	1001	33,3	4,90	96,2
4	5,30	1446	629	858	30,1	3,08	103,8
5	6,00	1532	641	895	29,5	3,27	102,0

6	6,60	1605	650	938	29,1	3,64	99,5
7	7,18*)	1669*)	655*)	983*)	28,7*)	4,08*)	97,0*)
8	5,15	1486	669	1078	28,5	7,47	75,5
9	5,12	1522	691	1094	26,4	7,76	73,9
10	5,05	1552	710	1114	24,3	8,13	72,1
11	3,60	1492	700	1342	19,0	13,20	51,3
12	3,50	1505	701	1368	17,8	13,70	50,0
13	3,40	1522	704	1403	16,9	14,40	48,4
14	2,90	1536	710	1461	16,0	15,60	45,7
15	2,86	1557	706	1502	12,1	16,30	44,4
16	2,82	1579	703	1543	8,7	17,00	43,5
17	2,47	1576	653	1705	6,0	20,00	36,6
18	2,49	1587	652	1717	5,4	20,16	36,7
19	2,55	1609	646	1745	4,2	20,56	36,8
20	2,60	1665	685	1688	1,4	19,39	42,2
21	2,67	1687	679	1716	**)	19,79	42,3
22	2,71	1698	675	1731	**)	20,00	42,4
23	–	–	–	–	–	7,52[7]	–
24	4,9– 5,4[9]	1473– 1573[9]	670– 710[9]	1080[9]	24[9]	–	–
25	–	–	–	–	–	3,8[10]	–
26	5,1[11]	1300[11]	773[11]	819[11]	28,1[11]	–	–
27	3,66[6]	1480– 1593[6]	697[6]	1218[6]	14,1[6]	–	–
28	–	–	–	–	–	16,28[7]	–
29	2,8– 3,1[9]	1483– 1588[9]	710[9]	1480[9]	9[9]	–	–
30	–	–	–	–	–	88[10]	–

*) только по ГОСТ1415–78

***) не могут быть рассчитаны данной физико–химической моделью

Расчетные значения в табл. 10 для ферросилиция марок ФС45 (поз. 8–10), ФС65 (поз. 11–13) и ФС75 (поз. 14–16), в целом, можно признать приемлемыми в сравнении с приведенными в этой таблице экспериментальными данными (поз.23–26 для ферросилиция марок ФС45, поз.27 для ФС65, поз. 28–30 для ФС75 соответственно).

Заключение. Таким образом, указанные расчетные значения свойств стандартных марганец– и кремнийсодержащих ферросплавов, производимых в Украине и России, удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными и поэтому могут быть использованы в оценке эффективности их применения на основных этапах сталеплавильного передела.

1. *Физико-химическая* оценка свойств промышленных ферросплавов / В.П.Пиптюк, А.Ф.Петров, С.В.Греков и др. // Сб. научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск. – 2007. – Вып.14. – С.235–243.
2. *Приходько Э.В.* Методика определения параметров направленного межатомного взаимодействия в молекулярных и кристаллических соединениях // Металлофизика и новейшие технологии. – 1995. – Т.17. – №11. – С.54–62.
3. *Приходько Э.В.* Эффективность комплексного легирования сталей и сплавов // – К.: Наукова думка, 1995. – 296 с.
4. *Приходько Э.В., Петров А.Ф.* Роль направленного межатомного взаимодействия в формировании микронеоднородного строения металлических расплавов. // Изв. Вузов. Черная металлургия.– 1995. – №12. – С.5–12.
5. *Приходько Э.В., Петров А.Ф.* Физико-химические критерии для оценки степени микронеоднородности металлических расплавов. //Металлофизика и новейшие технологии. – 1998. – Т.20.– №7. – С.64–74.
6. *Отчет по НИР (№ госрегистрации 0102V001508) «Комплексный анализ тепло- массообменных и физико-химических процессов в системе «железоуглеродистый полупродукт – синтетический шлаковый расплав – твердая добавка» при концентрированном подводе к системе энергии и перемешивании расплава диспергируемым газом на АКОС типа «печь-ковш».* – 202 с.
7. *Изучение* свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали / В.С. Игнатъев, В.А. Вихлевщук, В.М. Черногрицкий и др. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1988. – №6. – С. 37 – 42.
8. Физико-химические характеристики марганцевых ферросплавов / В.И.Жучков, А.Л.Завьялов, А.С.Носков и др. // Известия ВУЗов, черная металлургия. – 1994.–№10.–С.9–10.
9. *Охотский В.Б.* Модели металлургических систем. // Системные технологии. Днепропетровск, 2006.–284с.
10. *Игнатъев В.С., Гальперн В.В.* Определение удельного сопротивления промышленных ферросплавов.// Металлургия и коксохимия. Электрометаллургия. –К.: Техніка, 1978.–Вып. №56.–С.49–51.
11. *Ефименко С.П., Пилюшенко В.Л., Смирнов А.Н.* Пульсационное перемешивание металлургических расплавов. – М.: Металлургия, 1989. –168с.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. Д.Н.Тогобицкой