

Г.А. РУМЯНЦЕВА, канд. техн. наук,
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук (БНТУ)

НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГАРА ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Анализ теории выплавки металлов и сплавов с применением индукционных тигельных печей повышенной частоты (ИТПЧ) показывает, что на величину угара элементов оказывает влияние достаточное большое число факторов [1, 2]. Это фракционный и химический состав шихты, режим ее подачи в тигель печи, конструктивные особенности конкретного агрегата, продолжительность плавки, состав и количество шлака, состояние и состав футеровки и др. Частично потери легирующих элементов обусловлены составом и состоянием футеровки печи. Так, при плавке специальных сталей с высоким содержанием марганца, никеля, титана, алюминия и со строго ограниченным содержанием кремния происходит насыщение сплава кремнием, восстанавливаемым из кислой футеровки, что недопустимо. При выплавке марганцовистых сплавов кислая футеровка быстро разрушается, так как закись марганца, реагируя с кремнеземом футеровки, образует легкоплавкий силикат марганца. Алюминий и титан восстанавливают кремний из футеровки. Сплавы с повышенным содержанием никеля и хрома, выплавляемые в кислой печи, загрязняются мелкодисперсными включениями кремнезема, что отрицательно сказывается на качестве литья.

С целью набора экспериментальных статистических данных для определения величины угара легирующих элементов при выплавке многокомпонентных высоколегированных железоуглеродистых сплавов специалистами НИЛ «ТТМП» в сотрудничестве с работниками частного производственного унитарного предприятия «Литье» была проведена серия опытных плавов чугуна ЖЧХ30 в индукционных печах повышенной частоты (4 плавки). Характеристика печи приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика печи YR–120

Номинальная мощность, кВт	120
Макс. производительность, кг/ч	200
Расход энергии, кВт·ч/т	580
Рабочая частота, кГц	1–5
Мин. загрузка, кг	40
Продолжительность непрерывной работы, ч	До нагрева охлаждающей воды выше 38 °С

В качестве шихтовых материалов применялись:

- сталь 3 (ГОСТ 4757-91);
- сталь 08пс (ГОСТ 4757-91);
- ферромарганец ФМн78 (ГОСТ 4757-91);
- ферросилиций Фс90 (ГОСТ 1415-93);
- феррохром ФХ800А (ГОСТ 4757-91);
- алюминий марки АВ87 (ГОСТ 295-98).

Перед началом плавки шихтовые материалы проходили входной контроль с целью определения истинного химического состава. Для этих целей применялся оптико-эмиссионный стационарный спектрометр FOUNDRY-MASTER UVR, изготовленный фирмой Worldwide Analytical Systems AG, Германия (зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений № РБ0311351407 и допущен к применению в Республике Беларусь с 25 сентября 2007 г.).

Шихтовка подбиралась с целью получения указанного сплава по верхним, нижним и средним пределам содержания легирующих элементов с целью определения влияния их концентраций на угар.

Последовательность плавки следующая. Вначале в тигель печи загружали феррохром и ферросилиций с добавлением стального лома, затем по мере расплавления шихты производили довалку стальным ломом. После полного расплавления шихты температуру расплава доводили до 1480–1490 °С и за 3–5 мин до окончания плавки подавали ферромарганец. Разливку производили в подогретый газовой горелкой до температуры 800 °С ковш, в который предварительно подавали алюминий и модификатор. Расплав разливали в песчаные формы. Для определения металлургического пригара ковш взвешивался до и после разливки чугуна, также были взвеше-

ны шлак и всплески (после остывания). Образец для химического анализа брали из прибыльной части отливки. Химический анализ проводился при использовании того же спектрометра FoundryMaster UVR для определения следующих элементов: C, Si, Mn, Cr, P, S.

Затем рассчитывался средний химический состав металлошихты и по результатам сравнения с химическим анализом определяли угары основных легирующих элементов. Результаты расчетов приведены в таблицах 2–5.

Угар железа определялся расчетным путем исходя из взвешенной массы шлака и определенных масс угаров химических элементов согласно таблицам 2–5 (в расчетах принимали, что 90 % железа окислялось по реакции $\text{Fe} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$). Результаты расчета угара в графическом виде представлены на рисунке 1.

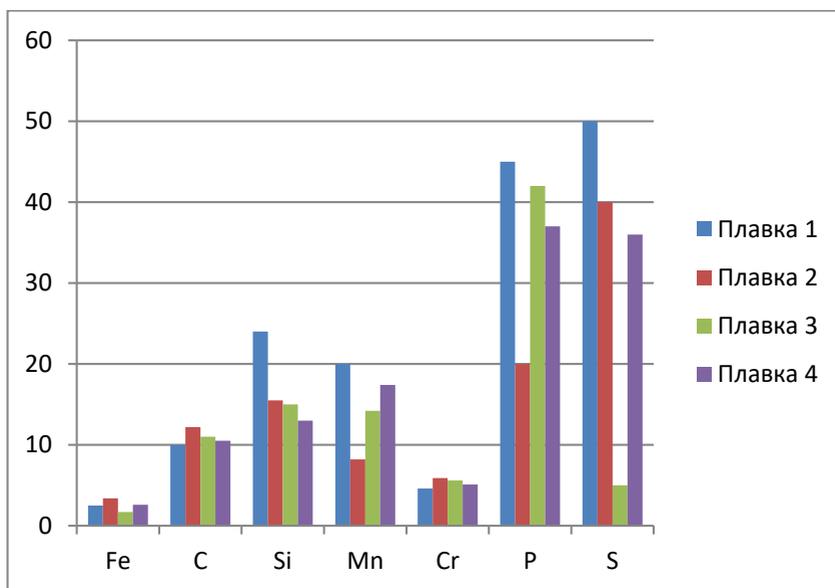


Рисунок 1 – Результаты расчетов угара основных химических элементов при выплавке ЖЧХ30 в индукционной печи повышенной частоты

Таблица 2 – Шихтовка и расчеты угаров основных легирующих элементов при выплавке ЖЧХ30 в индукционных печах повышенной частоты (плавка I)

Наименование материала	ГОСТ	Марка	C	Si	Mn	Ni	V	Mo	Cu	Cr	P	S	Al	Ti	прочие	Масса кг
Чугун заготовки		СЧ30	3,40	2,04	0,65	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,09	0,02	0,00	0,11		0
Сталь	4757-91	Ст.3	0,18	0,22	0,52	0,15			0,16	0,15	0,03	0,03				120,5
Возврат - "болото"		ЧХ30	3,00	1,00	0,60	0,05	0,04	0,01	0,10	28,00	0,05	0,02		0,03		0
Ферромарганец	4755-91	ФМн78	6,73	1,66	79,20						0,11	0,01				0,6
Ферромolibден	4759-91	ФМо60	0,10	1,00			0,20	0,02	0,80		0,04	0,03	8,00	28,00		0
Ферротитан	4761-91	Фт35С5	0,10	3,50												0
Феррохром	4757-91	ФХ-800А	7,52	0,44						72,00	0,02	0,05				72,8
Ферросилиций	1415-93	ФС90	0,10	90,00	0,30					0,20	0,03	0,02	3,50			0,8
Алюминий	295-98	АВ87	0,00	2,30					2,36				93,00		1,04	0,097
Нихром		4762-71	0,00	0,00	0,00	75,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,02	0,02	0,02			0,000
Модификатор																98,00
% в шихте			2,94	0,68	0,57	0,09	0,00	0,00	0,10	26,97	0,036	0,034	0,06	0,00	0,10	194,7
Масса шихты, кг			5,73	1,32	1,10	0,18	0,00	0,00	0,20	52,60	0,052	0,067	0,12	0,00	0,19	194,99
Угар элементов, %			10,0	24,0	20,0	2,0	10,0	2,0	2,0	4,6	45,0	90,0	90,0	45,0	5,0	79
Масса в расплаве, кг			5,16	1,00	0,88	0,18	0,00	0,00	0,19	50,18	0,03	0,03	0,01	0,00	0,18	187,95
Состав сплава			2,745	0,533	0,470	0,094	0,000	0,000	0,102	26,699	0,015	0,018	0,006	0,000	0,097	
Требуемый состав, %			1,6-3,5	0,5-1,5	<1,0	<0,2	<0,15	<1,0	<0,04	26-32	<0,1	<0,08	<0,1	0,1-0,3		
Измерение			2,7	0,52	0,46				26,8	0,015	0,017					

Шлак 8,8 кг.

Таблица 3 – Шихтовка и расчеты угаров основных легирующих элементов при выплавке ЖЧХ30 в индукционных печах повышенной частоты (плавка 2)

Наименование материала	ГОСТ	Марка	C	Si	Mn	Ni	V	Mo	Cu	Cr	P	S	Al	Ti	прочие	Масса кг
Лом стальной	4757-91	08пс	0,08	0,11	0,52	0,15			0,15	0,05	0,02	0,02				50,4
Сталь	4757-91	Ст.3	0,18	0,22	0,52	0,15			0,16	0,15	0,03	0,03				50,3
Возврат-болото ¹	ЧХ30	ЧХ30	3,00	1,00	0,60	0,05	0,04	0,01	0,10	28,00	0,05	0,02		0,03		0
Ферромарганец	4755-91	ФМН78	6,73	1,66	79,20						0,11	0,01				2
Ферромолибден	4759-91	ФМ060	0,10	1,00				60,00	0,50		0,05	0,10				0
Ферротитан	4761-91	ФТ135С5	0,10	3,50			0,20	0,02	0,80		0,04	0,03	8,00	28,00		0
Феррохром	4757-91	ФХ-800А	7,52	0,44						72,00	0,02	0,05				89,5
Ферросилиций	1415-93	ФС90	0,10	90,00	0,30					0,20	0,03	0,02	3,50			2,5
Алюминий	295-98	АВ87	0,00	2,30					2,36				93,00		1,04	0,097
Нихром	4762-71		0,00	0,00	0,00	75,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,02	0,02	0,02			0,000
Модификатор																98,00
% в шихте			3,59	1,46	1,08	0,08	0,00	0,00	0,08	33,10	0,024	0,035	0,09	0,00		194,77
Масса в шихте, кг			7,00	2,85	2,12	0,15	0,00	0,00	0,16	64,55	0,046	0,068	0,18	0,00		194,99
Угар элементов, %			17,2	15,5	8,2	2,0	10,0	2,0	2,0	5,9	20,0	40,0	90,0	45,0	5,0	9,5
Масса в расплаве, кг			6,14	2,40	1,94	0,15	0,00	0,00	0,16	60,74	0,04	0,04	0,02	0,00		185,50
Состав сплава			3,312	1,296	1,047	0,080	0,000	0,000	0,084	32,742	0,020	0,022	0,010	0,000	0,098	
Требуемый состав, %			1,6-3,5	0,5-1,5	<1,0	<0,2	<0,15	<1,0	<0,04	26-32	<0,1	<0,08	<0,1	0,1-0,3		
Измерение			3,220	1,260	1,020	0,080				32,690	0,020	0,020				

Шлак 11,8 кг.

Таблица 4 – Шихтовка и расчеты угаров основных легирующих элементов при выплавке ЖЧХ30 в индукционных печах повышенной частоты (плавка 3)

Наименование материала	ГОСТ	Марка	C	Si	Mn	Ni	V	Mo	Cu	Cr	P	S	Al	Ti	прочие	Масса кг
Чугун заготовки		СЧ20	3,40	2,04	0,65	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,09	0,02	0,00	0,11		0
Лом стальной	4757-91	08пс	0,08	0,11	0,52	0,15			0,15	0,05	0,02	0,02				107,25
Возврат - "болото"		ЧХ30	3,00	1,00	0,60	0,05	0,04	0,01	0,10	28,00	0,05	0,02		0,03		0
Ферромарганец	4755-91	ФМн78	6,73	1,66	79,20			60,00	0,50		0,11	0,01				1
Ферромолибден	4759-91	ФМО60	0,10	1,00							0,05	0,10				0
Ферролитан	4761-91	ФЛ35С5	0,10	3,50			0,20	0,02	0,80		0,04	0,03	8,00	28,00		0
Феррохром	4757-91	ФХ-800А	7,52	0,44						72,00	0,02	0,05				95
Ферросилиций	1415-93	ФС90	0,10	90,00	0,30					0,20	0,03	0,02	3,50			2
Алюминий	295-98	АВ87	0,00	2,30					2,36				93,00		1,04	0,103
Нихром	4762-71		0,00	0,00	0,00	75,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,02	0,02	0,02			0,000
Модификатор																
% в шихте			3,55	1,15	0,66	0,08	0,00	0,00	0,08	33,30	0,021	0,034	0,08	0,00		0,10
Масса в шихте, кг			7,30	2,35	1,36	0,16	0,00	0,00	0,16	68,46	0,042	0,069	0,17	0,00		205,25
Угар элементов, %			11,0	15,0	14,2	2,0	10,0	2,0	2,0	5,6	42,0	5,0	90,0	45,0		7,5
Масса в расплаве, кг			6,50	2,00	1,16	0,16	0,00	0,00	0,16	64,62	0,02	0,07	0,02	0,00		198,06
Состав сплава			3,280	1,011	0,587	0,080	0,000	0,000	0,081	32,629	0,012	0,033	0,008	0,000	0,097	
Требуемый состав, %			1,6-3,5	0,5-1,5	<1,0	<0,2	<0,15	<1,0	<0,04	26-32	<0,1	<0,08	<0,1	0,1-0,3		
Измерение			3,230	0,990	0,578					32,500	0,012	0,033				

Шлак 9,3 кг.

Таблица 5 – Шихтовка и расчеты угаров основных легирующих элементов при выплавке ЖЧХ30 в индукционных печах повышенной частоты (плавка 4)

Наименование материала	ГОСТ	Марка	C	Si	Mn	Ni	V	Mo	Cu	Cr	P	S	Al	Ti	прочие	Масса кг
Чугун заготовки		СЧ20	3,40	2,04	0,65	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,09	0,02	0,00	0,11		0
Лом стальной	4757-91	08пс	0,08	0,11	0,52	0,15			0,15	0,05	0,02	0,02				111,5
Возврат - "болото"		ЧХ30	3,00	1,00	0,60	0,05	0,04	0,01	0,10	28,00	0,05	0,02		0,03		0
Ферромарганец	4755-91	ФМн78	6,73	1,66	79,20						0,11	0,01				1
Ферромолибден	4759-91	ФМб60	0,10	1,00				60,00	0,50		0,05	0,10				0
Ферролитен	4761-91	ФЛ35С	0,10	3,50			0,20	0,02	0,80		0,04	0,03	8,00	28,00		0
Феррохром	4757-91	ФХ-800А	7,52	0,44						72,00	0,02	0,05				75
Ферросилиций	1415-93	ФС90	0,10	90,00	0,30					0,20	0,03	0,02	3,50			2
Алюминий	295-98	АВ87	0,00	2,30					2,36				93,00		1,04	0,095
Нихром	4762-71		0,00	0,00	0,00	75,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,02	0,02	0,02			0,000
Модификатор																98,00
% в шихте			3,06	1,20	0,73	0,09	0,00	0,00	0,09	28,48	0,021	0,032	0,08	0,00	0,10	0,190
Масса в шихте, кг			5,80	2,27	1,38	0,17	0,00	0,00	0,17	54,06	0,039	0,060	0,16	0,00	0,19	189,5
Угар элементов, %			10,5	13,0	17,4	2,0	10,0	2,0	2,0	5,1	37,0	36,0	90,0	45,0	5,0	7,3
Масса в расплаве, кг			5,19	1,98	1,14	0,16	0,00	0,00	0,17	51,30	0,02	0,04	0,02	0,00	0,18	182,49
Состав сплава			2,844	1,083	0,624	0,090	0,000	0,000	0,091	28,113	0,013	0,021	0,009	0,000	0,097	
Требуемый состав, %			1,6-3,5	0,5-1,5	<1,0	<0,2	<0,15	<1,0	<0,04	26-32	<0,1	<0,08	<0,1	0,1-0,3		
Измерение			2,830	1,060	0,610					27,890	0,013	0,021				

Шлак 9,05 кг.

Анализ таблиц 2–5 показывает:

- угар хрома практически неизменен и находится в пределах 4,6–5,9 %;

- угар углерода находится на уровне 10–12 % и практически не зависит от состава шихтовочных материалов;

- угар марганца составил от 8 до 20 % (чем больше марганца в шихте, тем меньше процентный угар), но по абсолютному значению практически неизменен (от 0,18 до 0,24 кг). На угар марганца в основном влияет время между его вводом и разливкой;

- угар кремния составляет от 13 до 24 %, но и как в случае с марганцем по абсолютному значению величина угара не сильно отличается (от 0,32 до 0,45 кг);

- угар железа незначителен и находится в пределах от 1,7 до 3,4 % (в среднем около 2,5 %). Повышенный угар в 3,4 % в плавке 2 объясняется использованием мелкопрофильной металлошихты;

- угар вредных примесей серы и фосфора находятся в среднем в пределах 40–45 %. Результат угара в плавке 3 серы (5 %) объясняется использованием замасленной металлошихты, внесшей дополнительное количество серы по отношению к расчетному значению.

Заключение. Для разработки ресурсосберегающих технологий выплавки высоколегированных сплавов в современных индукционных тигельных печах повышенной частоты необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования химической кинетики реакций в процессе плавки, определение взаимной химической активности химических элементов в сложнолегированных сплавах, исследования способов, дозировок и времени подачи металлошихты и ферросплавов в печь.

Литература

1. **Электрометаллургия** стали и ферросплавов / Д.Я. Поволоцкий [и др.] // М.: Metallurgy, 1974. – 551 с.

2. **Коган, Л.Б.** Поведение отдельных элементов при плавке синтетического чугуна из отходов динамной стали / Л. Б. Коган, А.А. Гайдуков // Литейное производство. – 1968. – № 9. – С. 4–5.