

2. Берштейн, М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. В 2т. : т. 2 / Под общей редакцией М.Л. Берштейна. – М.: Металлургия, 1968. – 576 с.

3. Луценко, В.А. Влияние параметров высокоскоростной термомеханической обработки на процессы окисления углеродистой стали / В.А. Луценко // Литье и металлургия. – 2005. – № 2. – С. 96–98.

4. Удот, А.Ю. Исследование путей повышения стойкости прошивных оправок производства ОАО «Завод Легмаш»: маг. диссертация: 1-42 80 01 / А.Ю. Удот. – Минск: Металлургия, 2012. – 166 с.

5. Окисление металлов; под ред. Бенара Ж. перев. с франц. – Металлургия, 1969. –Т. II. – 444 с.

6. Сорокин, Н.В. Изучение причин низкой стойкости прошивных оправок и разработка технологических рекомендаций по повышению их долговечности: маг. диссертация: 1-42 81 01 / Н.В. Сорокин. – Минск, 2016. – 67 с.

УДК 669.186.6

П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,
Г.А. РУМЯНЦЕВА, канд. техн. наук (БНТУ),
С.Л. ШЕНЕЦ (ГНУ ФТИ НАНБ)

ИССЛЕДОВАНИЯ УГАРА ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЧЕРНЫХ СПЛАВОВ В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

В продолжение проведенных работ [1–3] по определению угара легирующих элементов при выплавке черных сплавов в индукционных тигельных печах повышенной частоты были проведены дополнительные исследования в этом направлении. С этой целью были проведены опытно-промышленные плавки черных сплавов в печах различной емкости в разных научных организациях Республики Беларусь.

Плавки в филиале БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»

С целью определения влияния частоты печи на величину угара легирующих элементов были проведены опытные плавки чугуна ЧХ2 в индукционной тигельной печи ИЧТ-0,06/400 в условиях НИИЛ «Литейные технологии» филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт». Характеристики печи приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики ИЧТ-0,06/400

Наименование	Единица измерения	Величина
Емкость полезная	т	0,06
Мощность печи: - по электродвигателю питающего генератора - потребляемая установкой электропечи	кВт	50 76
Число фаз: - питающей сети - контурной цепи	Ед.	3 1
Номинальное напряжение: - питающей сети - контурной цепи	В	380/220 400
Частота тока: - питающей сети - контурной цепи	Гц	50 2400
Температура перегрева металла	°С	1600
Производительность	т/ч	0,055
Расход воды на охлаждение индуктора, конденсаторной батареи и преобразователя	м ³ /ч	2,63
Избыточное давление воды в индукторе	Атм.	0,12

Были проведены плавки жаростойкого чугуна ЧХ2 (ГОСТ 7169–75) с последующей разливкой в кокиль.

В качестве шихтовых материалов применялись:

- сталь 5кп (ГОСТ 7417–75);
- чугун СЧ20 (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.). Данные входного контроля приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Данные входного контроля шихтовых материалов

Наименование материала	ГОСТ	Марка	C	Si	Mn	Ni	V	Mo	Cu	Cr	P	S	Al	Ti	прочие
Чугун заготовки	4757-91	СЧ20	3,60	2,04	0,65	0,10	0,03	0,02	0,13	0,00	0,08	0,11	0,00	0,03	
Лом стальной	7417-75	5 кп	0,06	0,02	0,28	0,01		0,02	0,16	0,04	0,02	0,01			
Ферромарганец	4755-91	ФМн78	7,00	6,00	78,00						0,05	0,02			
Феррохром	4757-91	ФХ-800А	7,52	0,44						69,50	0,02	0,05	0,58	0,10	
Ферросилиций	1415-93	ФС90	0,10	90,00	0,30					0,20	0,03	0,02	3,50		
Алюминий	295-98	АВ87		2,30					2,36				93,00		

Опытные плавки проводились по инструкциям, утвержденным совместно представителями НИЛ ТТМП и НИИЛ «Литейные технологии». Технология плавки приведена ниже.

Плавка № 1. Вначале в нижнюю часть тигля печи загружали 5 кг стального лома для защиты тигля печи от механических разрушений при завалке (мелкая высечка стали 5кп). Затем загружали феррохром ФХ-800А (1,2 кг) и ферросилиций ФС90 (1 кг) с добавлением чугунного лома, затем по мере расплавления шихты производили довалку чугунным ломом (все в завалку и подвалку 38,5 кг). После полного расплавления шихты температуру расплава доводили до 1480–1490 °С и за 3–5 мин до окончания плавки подавали ферромарганец ФМн78 (0,15 кг). Разливку производили в подогретый газовой горелкой до температуры 800 °С ковш, в который предварительно подавали алюминий и модификатор. Расплав разливали в кокиль.

Плавка № 2. Основным отличием этой плавки от предыдущем была завалка ФХ-800А (1 кг) и ферросилиций ФС90 (1 кг) не на дно тигля в начале плавки, а уже в расплав.

Для определения металлургического пригара ковша взвешивался до и после разливки чугуна, также были взвешены шлак и всплески (собраны после остывания). Образец на химический анализ брали из прибыльной части отливки. Химический анализ проводился при использовании того же спектрометра FoundryMaster UVR. Химическому анализу подвергались следующие элементы: С, Si, Mn, Cr, P, S.

В таблицах MS EXCEL рассчитывался средний химический состав металлошихты и по результатам сравнения с химическим анализом определяли угары основных легирующих элементов. Результаты расчетов приведены в таблицах 3, 4.

Таблица 3 – Угар легирующих элементов в первой плавке

Наименование материала	ГОСТ	Марка	C	Si	Mn	Ni	V	Mo	Cu	Cr	P	S	Al	Ti	прочие	Масса кг
Чугун заготовки	4757-91	С420	3,80	2,04	0,60	0,11	0,03	0,01	0,14	0,01	0,08	0,11	0,00	0,03		38,5
Лом стальной	7417-75	5 кп	0,06	0,02	0,28	0,01			0,16	0,04	0,02	0,01				5
Ферромарганец	4755-91	ФМн78	7,00	6,00	78,00						0,05	0,02				0,15
Феррохром	4757-91	ФХ-800А	7,52	0,44						69,50	0,02	0,05	0,58	0,10		1,2
Ферросилиций	1415-93	ФС90	0,10	90,00	0,30					0,20	0,03	0,02	3,50			1
Алюминий	295-98	АВ87		2,30					2,36				93,00			0,050
Модификатор															98,00	0,050
% в шихте			3,41	3,70	0,79	0,10	0,03	0,01	0,14	1,83	0,070	0,095	0,19	0,02	0,11	45,85
Масса в шихте, кг			1,57	1,70	0,36	0,04	0,01	0,06	0,84	0,832	0,044	0,09	0,01	0,05	0,05	45,95
Угар элементов, %			0,39	0,00	21,0	0,0	19,0	22,0	0,85	0,73	10,0	0,0	89,0	15,0	0,0	0,0
Масса в раславе, кг			1,50	2,70	0,28	0,04	0,01	0,06	0,06	0,03	0,04	0,01	0,01	0,05	0,05	45,19
Состав сплава			3,323	3,77	0,64	0,095	0,022	0,008	0,136	1,622	0,06	0,09	0,03	0,02	0,10	
Требуемый состав, %			3-3,8	2-3	<1,0	<1	<0,15	<0,10	<0,04	1-2	<0,3	<0,12	<0,1	0		
Результаты химанализа			3,32	4,20	0,639	0,0953	0,0222	0,0077	0,136	1,62	0,0624	0,0919	0,0034	0,014		

Таблица 4 – Угар легирующих элементов во второй плавке

Наименование материала	ГОСТ	Марка	C	Si	Mn	Ni	V	Mo	Cu	Cr	P	S	Al	Ti	прочие	Масса кг
Чугун заготовки	4757-91	С420	3,80	2,04	0,60	0,11	0,03	0,01	0,14	0,01	0,08	0,11	0,00	0,03		38,5
Лом стальной	7417-75	5 кп	0,06	0,02	0,28	0,01			0,16	0,04	0,02	0,01				5
Ферромарганец	4755-91	ФМн78	7,00	6,00	78,00						0,05	0,02				0,15
Феррохром	4757-91	ФХ-800А	7,52	0,44						69,50	0,02	0,05	0,58	0,10		1
Ферросилиций	1415-93	ФС90	0,10	90,00	0,30					0,20	0,03	0,02	3,50			1
Алюминий	295-98	АВ87		2,30					2,36				93,00			0,050
Модификатор															98,00	0,050
% в шихте			3,39	3,72	0,80	0,10	0,03	0,01	0,14	1,54	0,070	0,095	0,19	0,02	0,11	45,65
Масса в шихте, кг			1,55	1,70	0,36	0,04	0,01	0,06	0,70	0,832	0,043	0,09	0,01	0,05	0,05	45,75
Угар элементов, %			7,0	0,0	16,7	3,0	28,0	21,0	3,0	2,5	12,0	0,0	74,0	44,0	0,0	3,1
Масса в раславе, кг			1,44	1,70	0,30	0,04	0,01	0,06	0,69	0,03	0,04	0,02	0,01	0,05	0,05	45,07
Состав сплава			3,204	3,77	0,674	0,096	0,018	0,009	0,140	1,521	0,06	0,10	0,043	0,013	0,10	
Требуемый состав, %			3-3,8	2-3	<1,0	<1	<0,15	<0,10	<0,04	1-2	<0,3	<0,12	<0,1	0		
Результаты химанализа			3,2	4,2	0,674	0,0965	0,0184	0,0085	0,14	1,52	0,0617	0,1	0,043	0,013		

Сопоставительный анализ таблиц 3 и 4 показывает:

– угары хрома в первой плавке существенно превосходят угары второй плавки, соответственно 10,5 % и 2,5 %, что объясняется завалкой ферросплавов в первой плавке в завалку, а во второй в раслав;

– угары марганца составляют соответственно 21 и 16,7 % и могут объясняться погрешностью временного интервала между вводом ферромарганца и сливом расплава;

– кремния в образце оказалось больше, чем в исходной шихте, вследствие протекания тигельной реакции (переход кремния из футеровки в расплав);

– угары углерода, ванадия, молибдена, меди находятся в сопоставимых диапазонах и различия могут объясняться химической сегрегацией данных элементов в образцах.

Плавки в ГНУ ФТИ НАНБ. Плавки проводились в «Лаборатории высоких давлений и специальных сплавов» на печи ИТПЭ-0,16ТГ, характеристики которой приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Основные характеристики печи ИТПЭ-0,16ТГ

Наименование	Единица измерения	Величина
Емкость полезная	т	0,16
Мощность печи:	кВт	170
Номинальное напряжение на входе	В	380
Число фаз: - питающей сети - контурной цепи	Ед.	3 1
Напряжение на выходе (действующее значение) - номинальное - диапазон изменений	В	800 200–800
Частота тока: - питающей сети - контурной цепи	Гц	50 4000–2400
Номинальный ток на выходе	А	300
Температура перегрева металла	°С	1600
Расход воды на охлаждение индуктора, конденсаторной батареи и преобразователя	м ³ /ч	3,8
Перепад давлений на входе и выходе	кгс/см ²	0,3

Плавка № 1. В печи проводилась плавка экспериментальной стали следующего химического состава (таблица 6).

Таблица 6 – Химический состав экспериментальной стали

Элемент	C	Si	Mn	Ni	V	Mo	Cu	Cr	P	S	Al	Ti
Содержание, %	0,35–0,55	1,2–1,6	2,3–2,8	1,2–1,6	0,2–0,3	0,4–0,6	<0,3	1,4–1,8	<0,03	0,03	<0,01	<0,1

В качестве шихтовых материалов применяли:

- возвратный стальной лом стали 5ХНМ (ГОСТ 5950–73);
- возвратный стальной лом 08кп (ГОСТ 4757–91);
- возвратный лом из чугуна СЧ20 (ГОСТ 1412–85);
- покупной лом категории Б8 (ГОСТ 2787–75);
- ферросилиций ФС45 (ГОСТ 1415–93);
- ферромолибден ФМо60 (ГОСТ 4759–91);
- ферромарганец ФМн95мет (ГОСТ 4755–91);
- феррованадий ФВд-40,50 (ГОСТ 27130–86).

Химический состав возвратного лома (сталь 5ХНМ, сталь 08кп и чугун СЧ20) и ферросплавов был известен. Лом категории Б8 являлся покупным. Согласно ГОСТ 2787–75, определяющему стандарты лома черных металлов, к категории лома Б8 относятся лом и отходы конструкционных сталей, легированных никелем и молибденом и их сочетание с хромом, кремнием марганцем и другими элементами кроме вольфрама. В связи с этим для точного определения состава металлозавалки и расчета угара легирующих элементов возникла необходимость в определении точного химического состава лома категории Б8. Для этого был использован лазерный спектрометр SciAps Z 200С+ находящийся в государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси». Результаты анализа показаны на рисунке 1.

После получения результатов химического состава лома была проведена опытная плавка в ИТПЭ-0,16ТГ. Технология плавки выбрана следующая. На дно тигля сначала загружался возврат стали 08кп, по мере его расплавления добавляли возврат стали 5ХНМ и лом Б8. После получения расплава добавляли ферросилиций. За 3–5 минут до разливки добавляли ферромолибден, ферромарганец и феррованадий.

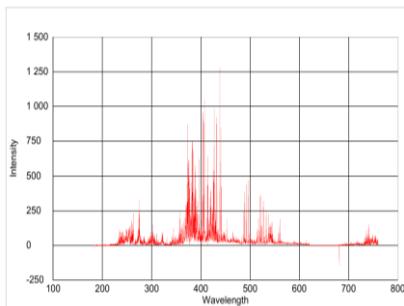
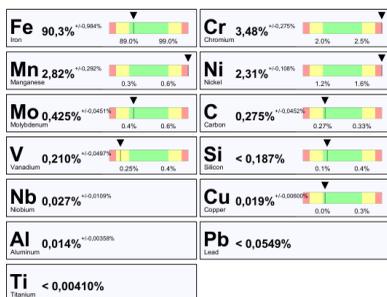


Рисунок 1 – Результаты спектрального анализа образца лома Б8 по данным спектрометра SciAps Z 200C+

После разливки из прибыльной части отливок брался образец для проведения спектрального анализа, результаты приведены на рисунке 2.

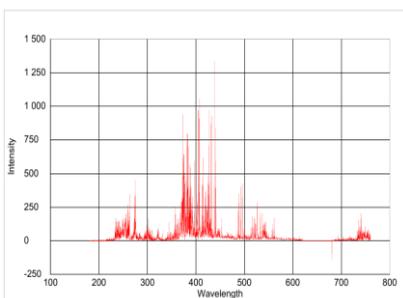


Рисунок 2 – Результаты спектрального анализа экспериментальной стали по данным спектрометра SciAps Z 200C+

Расчет угаров легированных элементов определялся методом подбора при помощи программы «Расчет шихты» и данных рисунков 2. Результаты представлены в таблице 7.

Как видно из таблицы 7 угар элементов составил: C – 14 %; Si – 3 %; Mn – 17,7 %; Ni – 4,8 %; V – 5,9 %; Mo – 3,9 %; Cu – 6 %; Cr – 3,2 %.

Таблица 7 – Результаты расчета угаров легированных элементов

Материал	ГОСТ	Марка	C	Si	Mn	Ni	V	Mo	Cu	Cr	P	S	Al	Ti	Масса, кг
Лом стальной	5950-73	5ХНМ	0,55	0,25	0,65	1,6	0,1	0,23	0	0,65	0,020	0,020	0	0	40
Лом стальной	2787-75	категория Б8	0,28	0,18	2,82	2,31	0,2	0,43	0	3,48	0,015	0,020	0	0	70
Лом стальной	4757-91	08КП	0,08	0,05	0,52	0,15			0,02	0,15	0,03	0,03			40
Чугун заготовки		СЧ20	3,40	2,04	0,65	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,08	0,02	0,00	0,11	10
Феррохром	4757-91	ФХ-800А	7,52	0,44						69,50	0,02	0,05	0,58	0,10	0
Ферросилиций	1415-93	ФС45	0,2	45	1	0	0	0	0,6	0,5	0,050	0,020	2	0,3	4,5
Ферромolibден	4759-91	ФМо60	0,10	1,00				60,00	0,30		0,05	0,10			1
Ферромарганец	4755-91	Мн95мет	0,2	0,2	95	0	0	0	0	0,050	0,020	0	0	0	2,6
Феррованадий	27130-86	ФВд-40,50	0,52	1,48	2,14		51,6		0,1		0,05	0,02	0,21		0,4
% в шихте			0,45	1,48	2,99	1,38	0,22	0,59	0,02	1,65	0,025	0,022	0,05	0,01	
Масса в шихте, кг			0,81	2,50	5,03	2,32	0,36	0,99	0,04	2,78	0,043	0,036	0,09	0,02	168,1
Угар элементов, %			14,0	3,0	17,7	4,8	5,9	3,9	6,0	3,2	7,0	5,0	95,0	45,0	
Масса в расплаве, кг			0,69	2,42	4,14	2,21	0,34	0,95	0,04	2,69	0,040	0,035	0,00	0,01	
ИТОГО, %			0,412	1,440	2,462	1,312	0,204	0,568	0,021	1,600	0,024	0,021	0,003	0,008	166,682
Требуемый состав, %			0,35-0,55	1,2-1,6	2,3-2,8	1,2-1,6	0,2-0,3	0,4-0,6	<0,3	1,4-1,8	<0,03	<0,03	<0,01	<0,1	
Показания анализатора			0,413	1,44	2,46	1,31	0,204	0,568	0,021	1,6	-	-	-	0,003	

Плавка № 2. Вторая плавка осуществлялась методом переплава возврата стали 20ХН3А и стали 40Х (25 ноября 2018 г.) в той же печи ИТПЭ-0,16ТГ. Перед загрузкой металлошихты в печь брался образец (возврат стали 20ХН3А и 40Х) для определения химического анализа. Анализ проводился при помощи оптико-эмиссионного стационарного спектрометра FOUNDRY-MASTER UVR.

Технология выплавки была выбрана следующей. На дно тигла осуществлялась завалка лома стали 40Х в количестве 25 кг. Затем добавляли 0,4 кг ФС90 (содержание кремния было 95 %) и сверху 63 кг возврата стали 20ХН3А. По мере расплавления выполняли 1-ю и 2-ю подвалки лома 20ХН3А соответственно в количестве 40 и 32 кг. После расплавления и доведения расплава до температуры 1480–1500 °С и 5 мин выдержки добавляли 0,3 кг ФМн88. Через 5 мин сливали металл. Из прибыльной части отливок вырезался образец для химического анализа (снова применялся спектрометр FOUNDRY-MASTER UVR). Результаты химических анализов, расчета шихты для выплавки и определения угара химических элементов приведены в таблице 8.

Как видно из таблицы 8 угар элементов составил: С – 15 %; Мн – 50 %; Ni – 3,5 %; Cr – 7 %.

Высокий угар марганца можно объяснить тем, что плавка проводилась методом переплава легированных отходов, а шихта изначально содержала марганец.

Таблица 8 – Результаты расчета угаров легирующих элементов

Наименование материала	ГОСТ	Марка	C	Si	Mn	Ni	V	Mo	Cu	Cr	P	S	Al	Ti	Масса кг
Возврат 40Х	4757-91	40Х	0,40	0,27	0,50	0,27	0,00	0,00	0,00	0,87	0,03	0,03	0,02	0,00	25
Возврат 20ХНЗА	4757-91	20ХНЗА	0,21	0,26	0,52	2,85	0,00	0,00	0,00	0,78	0,02	0,01	0,02	0,00	125
Ферромарганец	4755-91	ФМн88	2,00	3,00	90,00						0,10	0,02			0,3
Феррохром	4757-91	ФХ-800А	7,52	0,44						69,50	0,02	0,05	0,58	0,10	0
Ферросилиций	1415-93	ФС90(95)	0,10	95,00	0,30					0,20	0,03	0,02	3,50		0,4
Алюминий	295-98	АВ87		2,30					2,36				93,00		0,300
Модификатор															0,000
% в шихте			0,242	0,52	0,69	2,40	0,00	0,00	0,00	0,79	0,024	0,016	0,21	0,00	150,7
Масса шихты, кг			0,37	0,79	1,05	3,63	0,00	0,00	0,01	1,19	0,037	0,024	0,32	0,00	151,00
Угар элементов, %			15,0	7,8	31,0	3,3	0,0	0,0	0,0	7,0	5,0	10,0	90,0	0,0	3,1
Масса в расплаве, кг			0,31	0,73	0,51	3,50	0,00	0,00	0,01	1,11	0,03	0,02	0,03	0,00	148,41
		Состав сплава	0,21	0,49	0,346	2,36	0,00	0,00	0,00	0,75	0,023	0,015	0,02	0,00	
Требуемый состав, %			0,17-0,24	0,17-0,31	0,3-0,6	2,75-3,11	-	-	-	0,6-0,9	<0,025	<0,025	<0,1	0	
Показания анализатора			0,209	0,586	0,345	2,36	-	-	-	0,752	0,027	0,015	0,194	-	

Список литературы

1. Экспериментальное исследование угара легирующих элементов при выплавке хромистых чугунов в индукционных печах / Г.А. Румянцева [и др.] // *Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2016. – Вып. 37. – С.70–75.

2. Румянцева, Г.А. Новые экспериментальные исследования угара легирующих элементов при выплавке хромистых чугунов в индукционных печах повышенной частоты / Г.А. Румянцева, П.Э. Ратников // *Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2017. – Вып. 38. – С. 43–50.

3. Румянцева, Г.А. Анализ причин, вызывающих повышенный угар легирующих элементов при выплавке стали в индукционной печи / Г.А. Румянцева, П.Э. Ратников // *Наука – образованию, производству, экономике: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. (70-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ).* – Минск: БНТУ, 2017. – Т 1. – С. 360.