

Г.А. РУМЯНЦЕВА, канд. техн. наук,  
С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук,  
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,  
С.Л. ШЕНЕЦ (БНТУ)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГАРА ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ

При выплавке железоуглеродистых сплавов в индукционных тигельных печах угар элементов в значительной степени определяется качеством исходных материалов и технологией плавки. Качество шихтовых материалов в свою очередь определяется степенью окисленности и размерами кусков шихты.

Проблеме угара легирующих элементов при плавке стали и чугуна в индукционных тигельных печах повышенной частоты (ИТППЧ) в технической литературе уделяется недостаточно внимания. В то же время, принимая во внимание, что в машиностроительном и литейном производствах большая часть сплавов производится именно в ИТППЧ, суммарные потери легирующих элементов могут достигать весьма значительных объемов. По данным [1] в печах с основной футеровкой угар элементов составляет: вольфрама ~ 2 %, хрома, марганца и ванадия – 5–10 %, кремния – 10–15 %, титана – 25–35 %; в печах с кислой футеровкой: угар марганца составляет 10 %, угар вольфрама и молибдена ~ 2 %, хрома – до 5 %, кремний практически не угорает.

Результаты исследований равновесия марганца и кремния, влияния легирующих элементов и технологии легирования, процессов шлакообразования [2], интенсивности протекания реакций между одинаковыми и разными фазами в тигле индукционной печи не дают полного представления о процессах, происходящих при выплавке синтетических чугунов.

Угар Si зависит от нескольких факторов. При вводе карбюризатора в жидкий металл он выше в 1,4–1,5 раза, чем при вводе карбюризатора в завалку. При температурах до 1420–1450 °С кремний имеет большее сродство к кислороду, чем углерод и марганец, поэтому происходит избирательное окисление кремния. При более

высоких температурах, наоборот, углерод имеет большее сродство к кислороду, поэтому происходит преимущественный угар углерода. Это сопровождается восстановлением кремния углеродом из кремнезема футеровки и шлака, вследствие чего содержание его в процессе высокотемпературной выдержки чугуна в тигле печи не уменьшается, а, наоборот, увеличивается. При вводе ферросилиция в жидкий малоуглеродистый чугун степень усвоения кремния составляет ~ 85 %.

Угар Mn для в большинстве случаев не превышает 20 % и зависит от способа ввода ферромарганца и температуры нагрева, но почти не зависит от времени выдержки. При вводе ферромарганца в жидкий металл одновременно с ферросилицием и боем электродов он усваивается полнее, чем при вводе в завалку.

Угар Cr в жидком чугуне определяется температурой и при 1470 °C составляет 5–6 %.

Максимальное содержание серы в чугунах, выплавленных из стальной стружки, составляет 0,055 масс.%, а для большинства плавок не превышает 0,03 масс.%. При выдержке жидкого чугуна в печи количество серы почти не изменяется, а при нагреве выше 1450 °C несколько понижается. Содержание фосфора при индукционной плавке практически не изменяется, поэтому при выплавке его из стального лома и стружки оно не превышает 0,03–0,04 %.

Скорость нагрева металла в печах промышленной частоты составляет ~10 °C/мин, а средней частоты – 30 °C/мин.

С целью определения угара химических элементов при выплавке хромистых чугунов была проведена опытная плавка в индукционной печи повышенной частоты YR-120-IGBT (емкостью в 250 кг по железоуглеродистым сплавам) в условиях частного производственного унитарного предприятия «Литье». Характеристики печи YR-120-IGBT приведены в таблице 1.

В ходе эксперимента проводилась плавка хромистого чугуна ЖЧХЗ с последующей разливкой в формы. Технология плавки следующая: вначале в тигель печи загружали феррохром и ферросилиций с добавлением 50 % чушкового чугуна и стального лома; по мере расплавления шихты производили довалку чушек чугуна; после полного расплавления шихты температуру расплава доводили до 1480–1490 °C и за 10–15 мин до окончания плавки подавали ферромарганец. Разливку производили в подогретый газовой горел-

кой до температуры 800 °С ковш, в который предварительно подавали алюминий и модификатор. Образец на химический анализ брали из прибыльной части отливки. Химический анализ проводился в лаборатории с помощью спектрометра FoundryMaster UVR фирмы «Worldwide Analytical Systems AG» (зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений № РБ0311351407 и допущен к применению в Республике Беларусь с 25 сентября 2007 г.)

Таблица 1 – Характеристика печи YR – 120

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

Для выбора и расчета компонентов шихты была разработана расчетная программа «Расчет шихтовки» (в среде Microsoft EXCEL), позволяющая рассчитывать химический состав завалки в зависимости от используемых компонентов. Эта программа используется и при определении угара химических элементов.

Методика определения угара следующая. С помощью программы «Расчет шихтовки» определялся средний химический состав металлозавалки (так называемый расчет с нулевым угаром – таблица 2), затем отбирали образец на химический анализ (таблица 3) и вновь с использованием программы «Расчет шихтовки» методом подбора угара элементов добивались совпадения химического состава элементов с показаниями химического анализа (таблица 4). Полученные методом подбора значения угара элементов соответствовали реальным значениям.

В данной плавке в качестве шихтовых материалов использовали чугун чушковый СЧ20 в количестве 169 кг (масса чушки 20–25 кг), лом стальной марки 08пс в количестве 15 кг, феррохром ФХ850А – 6,5 кг, ферросилиций ФС45 – 6 кг, ферромарганец ФМн78 – 0,3 кг, алюминий – 0,098 кг, модификатор, МИЕ – 0,2 кг. Плавка длилась

Таблица 2 – Пример расчета химического состава сплава с нулевым угаром (состав завалки)

| Наименование материала | ГОСТ    | Марка  | C    | Si    | Mn    | Ni   | V     | Mo   | Cu    | Cr    | P     | S     | Al    | Ti   | Прочие | Масса, кг |
|------------------------|---------|--------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|-----------|
| Чугун заготовки        | 4757-91 | 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 |        | 169       |
| Лом стальной           |         | 08КП   | 0,08 | 0,05  | 0,52  | 0,15 |       |      | 0,16  | 0,15  | 0,03  | 0,03  |       |      |        | 15        |
| Возврат – «болото»     |         | ЧХ3    | 2,90 | 2,85  | 0,65  | 0,11 | 0,04  | 0,01 | 0,10  | 2,50  | 0,08  | 0,02  |       | 0,03 |        | 0         |
| Ферромарганец          | 4755-91 | ФМн78  | 7,00 | 6,00  | 78,00 |      |       |      |       |       | 0,05  | 0,02  |       |      |        | 0,3       |
| Феррохром              | 4757-91 | ФХ-850 | 8,35 | 1,81  |       |      |       |      |       | 72,00 | 0,03  | 0,05  | 0,58  | 0,10 |        | 6         |
| Ферросилиций           | 1415-93 | ФС45   | 0,10 | 44,70 | 0,32  |      |       |      |       | 0,29  | 0,03  | 0,00  | 0,71  |      |        | 6,5       |
| Алюминий               | 295-98  | АВ87   | 0,00 | 2,30  |       |      |       |      | 2,36  |       |       |       | 93,00 |      | 1,04   | 0,098     |
| Чугун ЧХ30             | 4762-71 | ЧХ30   | 3,40 | 1,50  | 0,70  | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 30,00 | 0,02  | 0,02  | 0,02  |      |        | 0,00      |
| Модификатор            |         |        |      |       |       |      |       |      |       |       |       |       |       |      |        | 98,00     |
| % в шихте              |         |        | 3,19 | 3,29  | 0,73  | 0,01 | 0,03  | 0,00 | 0,01  | 2,21  | 0,081 | 0,021 | 0,09  | 0,10 | 0,10   | 196,8     |
| Масса в шихте, кг      |         |        | 6,29 | 6,49  | 1,43  | 0,02 | 0,05  | 0,00 | 0,03  | 4,36  | 0,161 | 0,041 | 0,17  | 0,19 | 0,19   | 197,1     |
| Угар элементов, %      |         |        | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0    | 0,0       |
| Масса в расплаве, кг   |         |        | 6,29 | 6,49  | 1,43  | 0,02 | 0,05  | 0,00 | 0,03  | 4,36  | 0,16  | 0,04  | 0,17  | 0,19 | 0,19   | 195,32    |
| Состав сплава          |         |        | 3,22 | 3,32  | 0,73  | 0,01 | 0,03  | 0,00 | 0,01  | 2,23  | 0,08  | 0,02  | 0,09  | 0,10 | 0,10   | 197,1     |
| Требуемый состав, %    |         |        | 3–   | 2,8–  | <1,0  | <0,2 | <0,15 | <1,0 | <0,04 | 2–3   | <0,3  | <0,12 | <0,1  | 0    |        |           |
|                        |         |        | 3,8  | 3,8   |       |      |       |      |       |       |       |       |       |      |        |           |

Таблица 3 – Химический состав пробы

| Химический элемент | C    | Si   | Cr   | Mn   | Ni   | Cu  | Mo   | V    | S    | P    |
|--------------------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| Химический элемент | 3,03 | 3,09 | 2,27 | 0,65 | 0,11 | 0,1 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,05 |
| %                  |      |      |      |      |      |     |      |      |      |      |

Таблица 4 – Определение угара элементов методом подбора

| Наименование материала   | ГОСТ    | Марка  | C    | Si    | Mn    | Ni   | V    | Mo   | Cu   | Cr    | P    | S    | Al    | Ti   | Про-<br>чие | Масса,<br>кг |
|--|---------|--------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------------|--------------|
| Чугун заготовки  | 4757-91 | 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 |             | 169          |
| Лом стальной   | 4757-91 | 08КП   | 0,08 | 0,05  | 0,52  | 0,15 |      |      | 0,16 | 0,15  | 0,03 | 0,03 |       |      |             | 15           |
| Возврат – «болото»   |         | ЧХ3    | 2,90 | 2,85  | 0,65  | 0,11 | 0,04 | 0,01 | 0,10 | 2,50  | 0,08 | 0,02 |       | 0,03 |             | 0            |
| Ферромарганец  | 4755-91 | ФМн78  | 7,00 | 6,00  | 78,00 |      |      |      |      |       | 0,05 | 0,02 |       |      |             | 0,3          |
| Феррохром  | 4757-91 | ФХ-850 | 8,35 | 1,81  |       |      |      |      |      | 72,00 | 0,03 | 0,05 | 0,58  | 0,10 |             | 6            |
| Ферросилиций   | 1415-93 | ФС45   | 0,10 | 44,70 | 0,32  |      |      |      |      | 0,29  | 0,03 | 0,00 | 0,71  |      |             | 6,5          |
| Алюминий   | 295-98  | АВ87   | 0,00 | 2,30  |       |      |      |      | 2,36 |       |      |      | 93,00 |      | 1,04        | 0,098        |
| Чугун ЧХ30   | 4762-71 | ЧХ30   | 3,40 | 1,50  | 0,70  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 30,00 | 0,02 | 0,02 | 0,02  |      |             | 0,00         |
| Модификатор  |         |        |      |       |       |      |      |      |      |       |      |      |       |      |             | 0,00         |
| % в шихте  |         |        |      |       |       |      |      |      |      |       |      |      |       |      |             |              |
| Масса в шихте, кг  |         |        |      |       |       |      |      |      |      |       |      |      |       |      |             |              |
| Угар элементов, %  |         |        |      |       |       |      |      |      |      |       |      |      |       |      |             |              |
| Масса в расплаве, кг   |         |        |      |       |       |      |      |      |      |       |      |      |       |      |             |              |
| Состав сплава  |         |        |      |       |       |      |      |      |      |       |      |      |       |      |             |              |
| 3,03 3,09 0,65 0,01 0,03 0,00 0,01 2,25 0,05 0,02 0,01 0,10 0,09 |         |        |      |       |       |      |      |      |      |       |      |      |       |      |             |              |
| Требуемый состав, %  |         |        |      |       |       |      |      |      |      |       |      |      |       |      |             |              |
| 3– 2,8– 3,8 3,8 <1,0 <0,2 <0,15 <1,0 <0,04 2–3 <0,3 <0,12 <0,1 0 |         |        |      |       |       |      |      |      |      |       |      |      |       |      |             |              |

1 ч 5 мин. Угар элементов составил: С – 6,5 %; Si – 7,5 %; Mn – 12 %; P – 30 %; S – 25 %.

Анализ полученных результатов показывает, что фактические потери легирующих отличаются от данных [1] и по некоторым позициям их превышают. Одной из возможных причин, например, повышенного угара кремния может быть начальная окисленность шихты либо значительная продолжительность контакта расплава с атмосферой при перемешивании в процессе плавки. Следовательно, необходимы дополнительные исследования с целью выявления действительных причин повышенного угара и корректировки существующих технологий плавки стали и чугуна в индукционных тигельных печах повышенной частоты.

### Литература

1. **Электрометаллургия** стали и ферросплавов / Д.Я. Поволоцкий [и др.] // М.: Металлургия, 1974. – 551 с.
2. **Шумихин, В.С.** Синтетический чугун / В.С. Шумихин, П.П. Лузан, М.В. Жельнис. – Киев: Наукова думка, 1971. – 159 с.