

УДК 621.74

Иванова В.А.

ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ЛИТЕЙНОГО КОКСА, ВЛИЯЮЩИЕ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЧУГУНА

Аннотация: Проведены исследования по выявлению характеристик литейного кокса, оказывающих влияние на свойства выплавляемого чугуна.

Литейный кокс является источником целого ряда элементов, которые неизбежно попадают в продукты плавки. К таким элементам относятся не только углерод и сера, но и кремний, марганец, фосфор, кальций и др. Особый интерес представляют такие элементы, как кремний, способствующий графитизации чугуна, наибольшее количество которого в золе кокса, и фосфор, являющийся вредной примесью для чугуна.

Экспериментальные исследования показали, что с ростом зольности кокса увеличивается количество кремния в чугуне. С увеличением реакционной способности кокса содержание кремния в расплаве понижается, что связано с расходом оксида кремния кокса на карбидообразование. При этом примерно 50 % всего диоксида кремния золы кокса расходуется на восстановление кремния через SiC и лишь около 30 % – через газовую фазу SiO.

Установлено, что восстановление фосфора в чугун возможно при участии углерода чугуна, что приводит к снижению его содержания в металле. Литейный кокс является одним из источников фосфора при плавке чугуна в вагранке, а содержание фосфора в литейном коксе является характеристикой, влияющей на содержание фосфора в выплавляемом чугуне.

Экспериментально установлено, что высокое содержание углерода в литейном коксе способствует формированию большего числа колоний с большим содержанием графита. Параметры фосфидной эвтектики соотносятся с содержанием фосфора в чугуне. Соответственно средний диаметр ячеек сетки фосфидной эвтектики имеет наименьшее значение для чугуна, выплавленного на партии литейного кокса с меньшей зольностью. Меньшее содержание фосфора в чугуне, содержащем большее количество углерода, согласуется с повышенным содержанием углерода в литейном коксе.

Ключевые слова: литейный кокс, литейный чугун, зольность, содержание фосфора, структура чугуна.

Управление качеством продукции как деятельность неразрывно связано с установлением требований к качеству этой продукции (рис. 1).

Требования к качеству литейного кокса зависят от жизненного цикла продукции. Модель этапов жизненного цикла литейного кокса, построенная с применением методологии функционального моделирования IDEF0 (рис. 2) свидетельствует о том, что требования к качеству литейного кокса на этапе применения формируются не только с учетом технологии плавки, но и требований к получаемым продуктам плавки, в частности, выплавляемого чугуна. Эти требования могут отличаться от показателей качества литейного кокса, которые содержатся в нормативной документации, например, в ГОСТ 3340-88 «Кокс литейный каменноугольный. Технические условия».

Таким образом, необходимо установить характеристики качества литейного кокса, обеспечивающие выполнение требований к чугуну ваграночной плавки. В этой связи проведем

исследования по выявлению характеристик литейного кокса, оказывающих влияние на свойства выплавляемого чугуна, учитывая, что на свойства литейного чугуна влияют все составляющие шихты и технологические параметры плавки.

Химический состав выплавляемого чугуна формируется постепенно при стекании по коксовой насадке. При этом происходят различные химические реакции между составляющими кокса и жидким расплавом.

На содержание углерода в чугуне оказывает влияние содержание углерода в коксе. Известно, что степень науглероживания чугуна зависит от расхода кокса (табл. 1), который, в свою очередь, зависит от зольности: чем больше золы в коксе, тем меньше углерода содержится в чугуне (10 % золы в коксе – 3,2-3,3 % углерода в чугуне; 15 % золы – 3 % углерода; 20 % золы – 2,8 % углерода) [1].



Рис. 1. Взаимосвязь понятий в области управления качеством

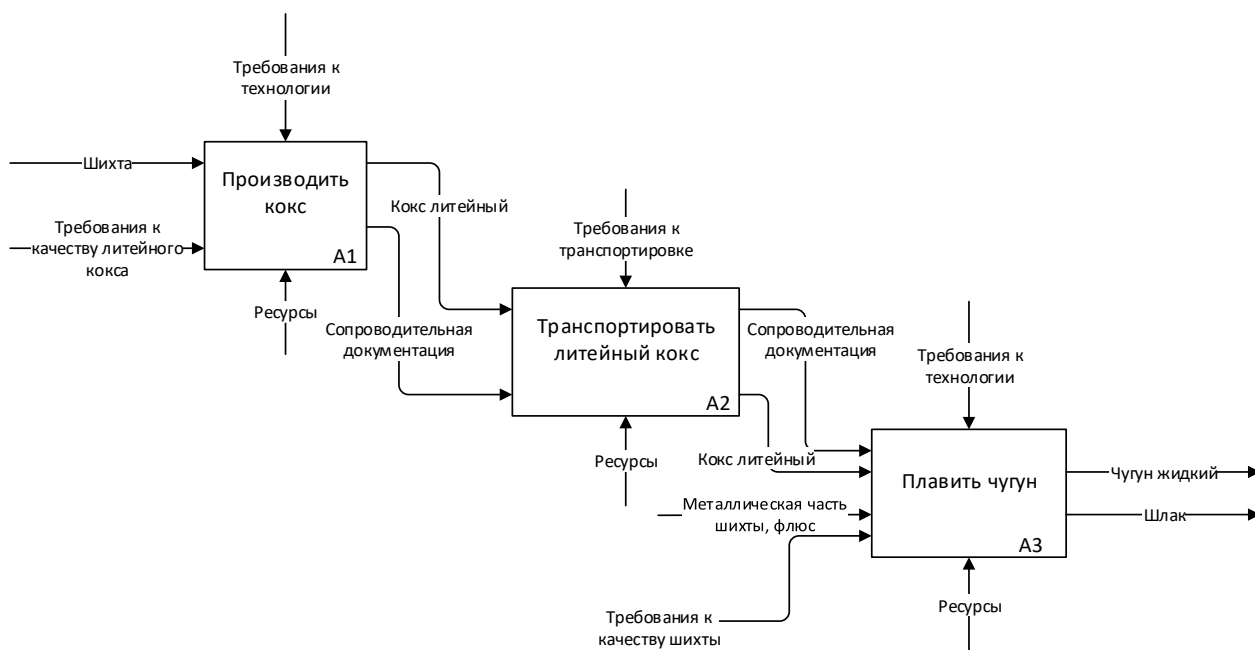


Рис. 2. Модель этапов жизненного цикла литейного кокса

Таблица 1

Зависимость коэффициента науглероживания (К) от расхода кокса и удельного расхода воздуха [2]

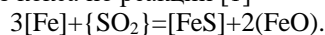
Расход кокса от металлозавалки (%)	Удельный расход воздуха, м ³ /м ² ·мин		
	100-120	140-160	180-200
9	1,3	1,1	0,9
10	1,4	1,2	1,0
12	1,5	1,3	1,1
15	1,7	1,5	1,3
20	1,9	1,7	1,5

Очевидно (см. табл. 1), что на содержание углерода в чугуне влияет не только зольность кокса, но и влажность, количество летучих веществ, т.е. совокупность показателей, которые отражаются на доле углерода в коксе.

Количество углерода в чугуне при разных условиях работы вагранки, может значительно меняться в зависимости от состава шихты. Если шихта содержит незначительное количество стального лома, то насыщение углеродом будет минимальным, если же шихта содержит высокий процент стального лома, то количество углерода в чугуне значительно возрастет. Капля жидкой стали содержит 0,2-0,45 % углерода и, стекая по кускам раскаленного кокса, интенсивно поглощает углерод. В результате его содержание повышается до 2,0-2,5 % [1, 3].

Наряду с науглероживанием чугуна в вагранке идут и процессы окисления углерода оксидами железа, скорость которых зависит от температуры. Общее содержание углерода в чугуне зависит от скоростей протекания этих реакций и повышается с увеличением температуры выплавляемого чугуна [3].

В процессе плавки чугуна насыщается также и серой из кокса по реакции [1]



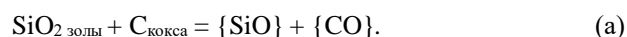
Процессы перехода серы и углерода в чугун происходят и в горне [3-5]. Кроме того, в горне протекают реакции восстановления железа, марганца, кремния. Процесс восстановления оксидов металлов в горне идет настолько эффективно, что при достаточной высоте горна весь металл, окислившийся в зонах подогрева, плавления и перегрева, может быть восстановлен [6]. В основе механизма перехода углерода в чугун в горне лежит молекулярная диффузия углерода в чугун – науглероживание чугуна увеличивается при повышении коэффициента диффузии, времени пребывания чугуна в контакте с коксом, а также увеличении поверхности соприкосновения раскаленного кокса с расплавленным чугуном [1, 3]. Науглероживание неподвижной жидкой массы чугуна в горне вагранки протекает значительно медленнее, и содержание углерода здесь дополнительно повышается на 0,3-0,5 % [3].

Литейный кокс является источником целого ряда элементов, которые неизбежно попадают в продукты плавки. К таким элементам относятся не только углерод и сера, но и кремний, марганец, фосфор, кальций и др. Особый интерес представляют такие элементы, как кремний, способствующий графитизации чугуна, наибольшее количество которого в золе кокса, и фосфор, являющийся вредной примесью для чугуна.

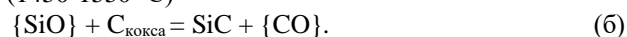
Известно, что диоксид кремния SiO_2 в золе кокса составляет не менее 50 %, а кремний, в свою очередь способствующий процессу графитизации, оказывает большое влияние на структуру и свойства

чугуна. Так как определенная доля кремния неизбежно вносится с коксом в плавильный агрегат, особое внимание необходимо уделить исследованию механизма восстановления кремния непосредственно из кокса.

Кремний является трудновосстановимым оксидом с высокой теплотой диссоциации. В связи с этим восстановление кремния протекает при высоких температурах и сопровождается значительным расходом тепла [7]. В вагранке наиболее благоприятные условия для восстановления кремния наблюдаются в зоне перегрева чуть выше уровня фурм. В этой зоне температура продуктов плавки может достигать 1500 – 1670 °С [8, 9]. Ранее были проведены исследования процессов, происходящих в коксе при термообработке [9]. Результаты исследований показали, что термообработка кокса сопровождается газификацией диоксида кремния золы по реакции

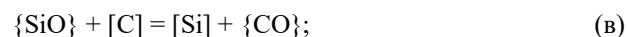


Интенсивность реакции газификации SiO_2 кокса возрастает с повышением зольности кокса в интервале температур 1350-1550 °С. Наряду с процессом газификации протекает процесс карбидообразования на поверхности кокса по реакции (1450-1550 °С)



В этой связи были проведены две серии экспериментов:

исследование восстановления кремния из газообразного SiO по реакции



исследование восстановления кремния из кокса через соединение SiC по реакции



Исследования проводились с металлургическим коксом (K_d) и со спецкоксами (K_1 , K_2), полученными на базе некоксуемых углей и отличающихся высокой реакционной способностью, что позволило установить влияние свойств кокса на содержание кремния в чугуне (табл. 2).

В табл. 3 приведены результаты исследований по восстановлению кремния из его газообразного оксида по реакции (в). Как видно из данных табл. 3, с ростом зольности кокса увеличивается количество выделяющегося в газовую фазу оксида кремния по реакции (а). Соответственно растет и переход кремния из газовой фазы в сплав. С увеличением же реакционной способности кокса содержание кремния понижается, что может быть связано с расходом оксида кремния на карбидообразование по реакции (б). С повышением зольности кокса количество кремния, восстановленного из кокса при фильтрации чугуна, также увеличивается. Это связано с повышением интенсивности карбидообразования на

поверхности кокса по реакции (б), что способствует росту содержания кремния в чугуне.

Таблица 2

Характеристика доменного кокса и спецкокса

Показатели	K _д	K ₁	K ₂
Технический анализ, %			
W _a	0,30	1,20	1,60
A ^d	14,00	14,20	19,30
V ^{daf}	1,58	3,29	2,98
S _s ^d	0,58	0,38	0,32
Пористость, %	45,80	33,00	24,40
Реакционная способность, мл/г*с	0,62	8,40	9,10
Структурная прочность, %	82,00	70,00	69,70
Содержание в золе, %			
SiO ₂	50,50 26,32	57,01	53,48
Al ₂ O ₃	11,60	21,25	22,05
Fe ₂ O ₃	4,40	7,24	7,83
CaO	1,80	2,76	2,68
MgO		1,77	1,84

Таблица 3

Анализ восстановления кремния из кокса в передельный чугун по схемам {SiO} → [Si] и SiC⁰_к → [Si]

Кокс	A ^d , %	Реакционная способность, мл/г*с	Прирост кремния в сплаве Fe-C, %	m _{SiO2} кокса, гр	Количество восстановленного кремния по схеме SiC ⁰ _к → [Si] (г), % (мас.)	Количество восстановленного кремния по схеме {SiO} → [Si] (в), % (мас.)
K _д	14,00	0,62	0,241	2,524	0,95	0,29
K ₁	14,28	8,40	0,165	3,659	1,05	0,22
K ₂	19,30	9,10	0,210	4,781	1,20	0,17

Для установления доли восстановленного кремния из золы кокса по различным схемам были проведены расчеты по определению количества диоксида кремния золы, израсходованного на восстановление кремния из карбида кремния SiC по реакции (г) и из газовой фазы SiO по реакции (в) (см. таб. 3). Данные этой таблицы показывают, что примерно 50 % всего диоксида кремния золы кокса расходуется на восстановление кремния через SiC и лишь около 30 % – через газовую фазу SiO. Так как процессы восстановления кремния в реальных условиях протекают одновременно, они вносят свою долю в суммарное содержание кремния в чугуне.

По данным [9], угар кремния при выплавке чугуна в коксовой вагранке составляет 10-25 % при холодном дутье и 15-25 % при горячем дутье (кислый процесс). Вероятно, угар кремния в действительности превышает эти значения за счет процессов восстановления кремния из золы кокса.

Таким образом, такие характеристики литейного кокса, как зольность и реакционная

способность оказывают влияние на содержание кремния в чугуне.

Традиционно считают, что фосфор вредная примесь, способствующая появлению брака в отливках [4, 10]. В то же время фосфор является графитизирующим элементом [5] и улучшает литейные свойства чугуна. Например, добавка фосфора до 1 % в железо, насыщенное углеродом, сопровождается снижением кинематической вязкости [11-13] и поверхностного натяжения чугуна (σ), что способствует повышению жидкотекучести. Причем величина поверхностного натяжения тем меньше, чем больше концентрация углерода. Кроме того, фосфор в коксе влияет и на химический состав выплавленного чугуна. Присутствие фосфора замедляет переход кремния из газовой фазы в жидкий металл. Наиболее существенно влияние начальных концентраций фосфора – до 0,35 %.

Считают, что фосфор попадает в вагранку с металлической частью шихты (табл. 4). Однако соединения фосфора содержатся и в коксе, и во

флюсах.

В коксе фосфор присутствует в виде фосфатов кальция и алюминия в золе, и его содержание зависит от содержания фосфора в исходных углях [14].

В известняках фосфор может находиться в виде соединений $Ca_3(PO_4)_2$ и $Ca_3(PO)_4$, и его содержание зависит от месторождения (табл. 5) [2, 14]. Мел и

мрамор имеют состав идентичный известняку, доломит содержит ~ 0,023 % P_2O_5 , в плакиковом шпате фосфора не более 0,3 %, в апатитонефелиновой руде фосфора примерно 4-5 % [2].

Таблица 4

Содержание фосфора в шихте ваграночной плавки	
Наименование компонента	Содержание фосфора, %, не более
Литейные чугуны (ГОСТ 4832-95 «Чугун литейный. Технические условия»)	0,08 (класс А) 0,12 (класс Б) 0,3 (класс В) от 0,3 до ≤ 0,7 (класс Г) от 0,7 до ≤ 1,2 (класс Д)
Литейные передельные чугуны (ГОСТ 805-95 «Чугун передельный. Технические условия»)	0,08 (класс А) 0,12 (класс Б) 0,3 (класс В)
Ферросилиций (ГОСТ 1415-93 «Ферросилиций. Технические требования и условия поставки»)	0,05
Ферромарганец (ГОСТ 4755-91 «Ферромарганец. Технические требования и условия поставки»)	от 0,01 до ≤ 0,5 (высокоуглеродистый) от 0,2 до ≤ 0,35 (среднеуглеродистый) от 0,15 до ≤ 0,3 (малоуглеродистый)
Феррофосфор	14-18 % (ЧМТУ 3774-52) 20-25 % (ТУ МХП 3825-52)
Лом чугунный и/или стальной	В зависимости от марки сплава

Таблица 5

Содержание фосфора в известняках месторождений России [14]

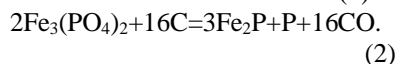
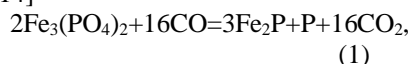
Наименование месторождения	Массовая доля фосфора, %
Агаповское	0,015
Гурьевское	0,015
Новостроевское	0,001
Новостроевское доломитизированное	0,005
Тургорьякское	0,08

Исследования химического состава чугунов ваграночной плавки Ярославского электровозоремонтного завода филиала «Желдорремаш», соответствующих требованиям ГОСТ 28186-89 «Колодки тормозные для моторвагонного подвижного состава. Технические условия» и ОСТ 32.194-2002 «Колодки тормозные чугунные для вагонов. Технические условия», позволили установить наличие тесной корреляционной связи между содержанием фосфора и углерода в чугуне – коэффициенты корреляции составили -0,77 и -0,78 для чугунов по ГОСТ 28186-89 «Колодки тормозные для моторвагонного подвижного состава. Технические условия» и ОСТ 32.194-2002 «Колодки тормозные чугунные для вагонов. Технические условия» соответственно.

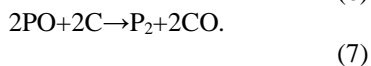
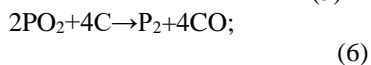
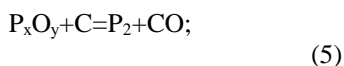
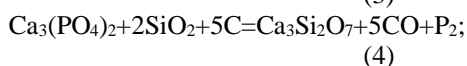
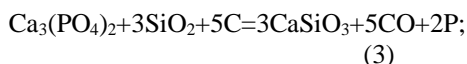
Для объяснения полученной зависимости исследуем механизм восстановления фосфора при плавке чугуна в вагранке.

В вагранке во взаимодействии находятся

следующие фазы: металл (чугун), шлак, газ и кокс. Поэтому конечный состав чугуна по фосфору будет зависеть от реакций взаимодействия между этими фазами (рис. 3, цифры в скобках соответствуют химическим реакциям). Фосфиды железа (Fe_2P и FeP) металлической части шихты растворяются в процессе плавки в металле, а фосфаты железа ($Fe_3(PO_4)_2$) могут восстанавливаться уже при 800-900 °С по реакциям [14]

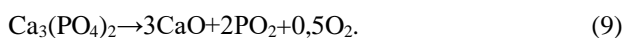
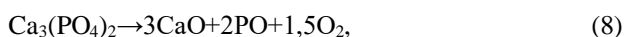


Газификация фосфатов кальция ($Ca_3(PO_4)_2$) и алюминия из золы кокса возможна уже при 500 °С [14]. Поэтому восстановление фосфора из кокса в чугун будет происходить через газовую фазу. Возможный механизм газификации фосфатов кальция в присутствии кремнезема в золе кокса представлен уравнениями [2, 14]:



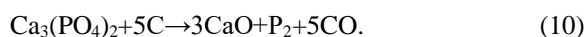
Реакции (5)-(7) могут происходить как с участием углерода кокса, так и с участием углерода, растворенного в чугуне.

Фосфиды кальция, содержащиеся во флюсах, при нагреве могут разлагаться с образованием газообразных реагентов PO и PO₂ по реакциям [14]:



Далее газообразные продукты разложения фосфида кальция реагируют с углеродом кокса по реакциям (6) и (7).

В процессе плавки в шлак фосфор попадает главным образом из флюсов. При пересчете на P₂O₅ в шлаке содержится 0,1-0,5 % фосфора [2]. В окислительной зоне при температуре 1200-1500 °С фосфаты шлака активно восстанавливаются углеродом кокса по реакции [14]



Восстановление фосфора из шлака по реакции (10) возможно также в горне вагранки с участием углерода, растворенного в чугуне.

Таким образом, литейный кокс является одним из источников фосфора при плавке чугуна в вагранке, а содержание фосфора в литейном коксе представляет собой характеристику, влияющую на содержание фосфора в выплавляемом чугуне.

Таким образом, литейный кокс является одним из источников фосфора при плавке чугуна в вагранке, а содержание фосфора в литейном коксе представляет собой характеристику, влияющую на содержание фосфора в выплавляемом чугуне.

Исходные шихтовые материалы оказывают влияние на наследственные свойства расплавов, в том числе чугунов [15, 16], и после модифицирования. Под понятием наследственности в машиностроении традиционно понимают связь между свойствами исходных шихтовых материалов, свойствами отливок и получаемых деталей [16, 17]. Например, известно,

что углерод кокса в процессе плавки является одним из источников центров кристаллизации [18, 19].

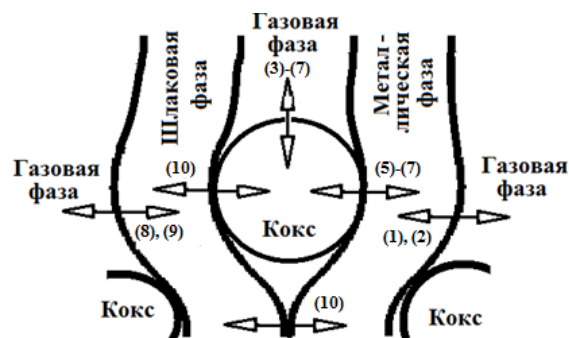


Рис. 3 Схема взаимодействия между фазами в вагранке

Исследования проводили на примере технологического процесса изготовления отливок колодки тормозной вагонной из серого чугуна в соответствии с требованиями ГОСТ 28186-89 «Колодки тормозные для моторвагонного подвижного состава. Технические условия» (Ярославский электровозоремонтный завод). Непосредственная заливка расплава из вагранки в литейную форму позволила установить влияние свойств кокса на характеристики чугуна при условии стабильности технологического процесса.

Для исследований были выбраны образцы серого чугуна, выплавленного с использованием в шихте литейного каменноугольного кокса марки КЛ-1. Образцы взяты из четырех партий: 1-я, 2-я и 3-я партии соответствовали требованиям ГОСТ 3340-88 «Кокс литейный каменноугольный. Технические условия», а кокс 4 партии – ТУ 0761-027-00187852-10 «Кокс литейный каменноугольный. Технические условия» (табл. 6). Литейный кокс 1-й партии отличается наибольшей зольностью и наименьшей прочностью, кокс 3-й партии содержит наименьшее количество серы и влаги, кокс 4-й партии – наиболее прочный и низкзольный, но содержит максимальное количество серы. Средние значения химического состава и твердости чугуна представлены в табл. 7. Как видно из данных табл. 6 и 7, с уменьшением зольности (с увеличением доли углерода) литейного кокса наблюдается повышение содержания углерода в чугуне. Кроме того, в 4-й партии литейного кокса, как и в чугуне, выплавленном с использованием в шихте этого кокса, массовая доля серы является наибольшей.

Таблица 6

Показатели качества литейного кокса* различных партий

Условное обозначение партии кокса	Массовая доля общей влаги в рабочем состоянии W _{t,r} ^r , %	Зольность A ^d , %	Массовая доля общей серы S _{t,d} ^d , %	Показатель прочности M ₄₀ , %	Массовая доля кусков размером менее нижнего предела, %

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

1	4,8	12,0	0,48	73,2/17,28	5,9
2	4,8	11,8	0,48	73,3/17,08	5,9
3	4,5	11,7	0,44	73,3/16,64	5,9
4	4,8	11,6	0,60	73,8/17	5,8

*Данные сертификатов качества на партии литейного кокса.

Таблица 7

Химический состав и твердость чугуна, выплавленного на различных партиях литейного кокса

Обозначение партии кокса	Массовая доля элементов в чугуне, %					Твердость, НВ
	C	Si	Mn	P	S	
1	2,89	1,74	0,61	1,43	0,07	241...255
2	2,90	1,92	0,70	1,23	0,07	229...241
3	2,98	1,30	0,45	1,40	0,07	255...269
4	3,12	1,90	0,62	1,12	0,08	229...241

Чугун, выплавленный с применением литейного кокса 3-й партии, содержит наименьшее количество кремния и марганца, однако обладает максимальной твердостью. Химический состав этого чугуна не согласуется с его твердостью, что может быть обусловлено различиями в структуре.

Графитные включения структуры чугуна, выплавленного с применением различных партий литейного кокса, оценивали в соответствии с требованиями ГОСТ 3443-87 «Отливки из чугуна с

различной формой графита. Методы определения структуры» при увеличении $\times 100$. Статистические данные были получены при исследовании 16-ти образцов серого чугуна (по четыре образца чугуна соответственно для каждой партии литейного кокса) по десяти изображениям каждого микрошлифа. Результаты статистического анализа оценки характеристик графитных включений приведены в табл. 8, 9.

Таблица 8

Размеры и количество включений графита в структуре чугуна*

Партия кокса	Размеры включений, мкм	Количество включений, %
1	ПГд45 (преобладает), ПГд90	ПГ6, ПГ10 (преобладает)
2	ПГд45, ПГд90	ПГ10 (преобладает), ПГ12
3	ПГд45	ПГ6 (преобладает), ПГ10
4	ПГд90	ПГ12 (преобладает), ПГ10

* Условные обозначения в таблице соответствуют ГОСТ 3443-87: ПГд – обозначение размера и цифровое значение средней длины включений пластинчатого графита (мкм); ПГ – пластинчатый графит и цифровое значение средней площади (%), занятой графитом на микрошлифе.

Таблица 9

Результаты количественного анализа включений графита

Партия литейного кокса	Число колоний*	Удельный вес ядер в колониях $W_{як}$, %	Содержание графита Γ , %
1	13	17,6...23,5	7,1...10,3
2	13	16,8...19,7	9,5...12,1
3	12	24,9...26,7	6,7...8,9
4	15	12,6...19,3	10,9...13,2

* Округлено до целого среднее арифметическое число колоний по 10-ти изображениям для каждого образца.

Результаты оценки формы и размеров включений графита в образцах чугуна свидетельствуют о том, что для всех образцов характерно наличие завихренного пластинчатого графита (ПГф2) небольшой длины от 45 до 90 мкм, который распределен колониями (ПГр3). Наибольшее количество включений графита наибольшей длины содержит чугун, выплавленный также на 4-й партии литейного кокса, для которого характерна пониженная зольность (наибольшее содержание углерода) (табл. 10). Металлическая основа всех

образцов чугунов характеризуется одинаковыми параметрами цементита (Ц 2, Цп 2000) и различными формами перлита. Образцы чугуна, плавка которого осуществлялась на 3-й и 4-й партиях кокса, имеют наибольшие различия по содержанию пластинчатого перлита: 96 и 92 % соответственно. Это указывает на то, что высокое содержание углерода в литейном коксе (4-я партия) способствует формированию большего числа колоний с большим содержанием графита (таблица 9). Фосфидная эвтектика (ФЭ) во всех образцах чугуна имеет одинаковое строение

(ФЭЗ) и занимает одну и ту же площадь микрошлифа (ФЭп2000). Параметры фосфидной эвтектики соотносятся с содержанием фосфора в чугуне. В чугуне, выплавленном на 4-й партии кокса, массовая доля фосфора имеет наименьшее значение, а в чугунах, выплавленных на 1-й и 2-й партиях кокса, – наибольшее. Соответственно фосфидная эвтектика представлена в виде разорванной сетки с наименьшим из представленных образцов значением среднего диаметра ячеек сетки для 4-й партии литейного кокса, а для 1-й и 2-й партий кокса – с наибольшим значением. Меньшее содержание фосфора в чугуне, содержащем большее количество углерода,

согласуется с повышенным содержанием углерода в литейном коксе.

Таким образом, анализ структуры чугуна, полученного при плавке с использованием в шихте различных партий литейного кокса, позволил установить влияние не только на химический состав чугуна, но и на его структуру таких свойств литейного кокса, как содержание золы, серы, влажность. Это влияние объясняется тем, что сумма значений этих показателей определяет долю углерода в литейном коксе, участвующего в формировании графитных включений в чугуне.

Таблица 10

Значения параметров структурных составляющих серого чугуна в зависимости от партии литейного кокса

Параметры структурных составляющих серого чугуна*	Обозначение партии литейного кокса			
	1	2	3	4
Форма ПГ	ПГф2	ПГф2	ПГф2	ПГф2
Среднее значение размера ПГ, мкм	ПГд 55	ПГд 65	ПГд 45	ПГд 90
Среднее количество ПГ, %	ПГ 9	ПГ 11	ПГ 7	ПГ 12
Среднее число колоний ПГ	13	13	12	15
Средний удельный вес ядер в колониях, %	20,9	17,6	26,6	15,3
Площадь перлита, %	П94	П93	П96	П92
Средняя дисперсность перлита**	ПД 0,8	ПД 0,5	ПД 1,0	ПД 0,6
Распределение по образцам (ФЭ)***	ФЭр3 (100%)	ФЭр2 (50%) ФЭр3 (50%)	ФЭр2 (25%) ФЭр3 (75%)	ФЭр2 (75%) ФЭр3 (25%)
Средний диаметр ячеек сетки (ФЭ), мкм	ФЭд 650	ФЭд 590	ФЭд 650	ФЭд 530

* Условные обозначения в соответствии с ГОСТ 3443-87: ПГ – графит пластинчатый; ПГф – форма включений; ПГд – обозначение размера и цифровое значение средней длины включений пластинчатого графита (мкм); ПГ – пластинчатый графит и цифровое значение средней площади (%), занятой графитом на микрошлифе; П – перлит и цифровое значение средней площади (%), занятой перлитом на микрошлифе; ПД – дисперсность перлита и цифровое значение среднего расстояния между пластинами цементита (мкм); ФЭр – распределение фосфидной эвтектики; ФЭд – диаметр ячеек сетки фосфидной эвтектики и цифровое значение среднего диаметра ячеек сетки (мкм)

** увеличение $\times 500$.

*** увеличение $\times 50$.

Список литературы

1. Грачев В.А., Черный А.А. Современные методы плавки чугуна. – Саратов: Приволжское книжное издательство, 1973. – 342 с.
2. Леви М.А., Мариенбах Л. М Основы теории металлургических процессов и технология плавки литейных сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. – 496 с.
3. Сухарчук Ю.С., Юдкин А.К. Плавка чугуна в вагранках: учебник для профессионального обучения рабочих на производстве. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 176 с.

4. Липницкий, А.М. Плавка чугуна и сплавов цветных металлов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 192 с.

5. Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении: учеб. пособие для машиностроительных вузов по специальности «Машины и технология литейного производства». – М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.

6. Долотов Г.П., Кондаков, Е.А. Печи и сушила литейного производства: учебник для металлургических техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.

7. Metallurgia чугуна / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Поквиснев, Ю.С. Юсфин. – М.: Metallurgia, 1978. – 480 с.
8. Развитие теории и практики металлургических технологий. Том. 1. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных печах малого диаметра: монография / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев. – М.:Теплотехник, 2010. – 379 с.
9. Габерцеттель А.И., Коростиленко П.А. Плавка и разливка чугуна. - 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1980. – 104 с. – (Б-чка литейщика).
10. Исследование влияния химического состава на усадку и жидкотекучесть чугуна, применяемого для изготовления массивных отливок втулок судовых дизелей большой мощности / И. К. Кульбовский, С. В. Карелин, Е. В. Попов, Д. А. Илюшкин, Д. А. Туркин // Литейщик России. – 2008. – № 3. – С. 19-23.
11. Термодинамические свойства расплавов системы железо-марганец-фосфор / А. И. Зайцев, Ж.В. Доброхотова, А.Д. Литвина, Б.М. Могутнов // Неорганические материалы. – 1995. – Т. 31. – № 9. – С. 1164-1173.
12. Бельтюков А. Л., Ладынов В. И. Вязкость расплавов системы Fe-P в области 5-25 ат. % P / Расплавы. – 2009. – № 4. – С. 27-33.
13. Вязкость расплавов железо-бор и железо-фосфор / О. И. Островский, В. М. Вьюнов, В.А. Григорян // Журнал физической химии. – 1982. – Т. 56. – № 1. – С. 23-26.
14. Популях, Л. А. Исследование поведения фосфора в доменной печи с целью получения чугунов с пониженным содержанием примесных элементов: дис. канд. техн. наук: 05.16.02 / Популях Лариса Алексевна. – М., 2009. – 145 с.
15. Никитин В. И., Никитин К. В. Наследственность в литых сплавах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 476 с.
16. Писаренко Л. В., Лукашевич С. Ф. О наследственности чугунов // Литье и металлургия. - 2002. – № 2. – С. 55-57.
17. Никитин В. И. К истории развития проблемы наследственности в сплавах // Литейное производство. – 2000. – № 5. – С. 20-22.
18. Образование центров кристаллизации графита в расплаве промышленного чугуна / И.К. Кульбовский, А.Н. Поддубный, Р.А. Богданов // Литейное производство. – 2008. – № 6. – С. 11-14.
19. Закирничная М. М. Образование фуллеренов в углеродистых сталях и чугунах при кристаллизации и термических воздействиях: дис. д-ра техн. наук: 05.02.01 / Закирничная Марина Михайловна. – Уфа, 2001. – 244 с.

Сведения об авторах

Иванова Валерия Анатольевна - заведующая кафедрой технологии материалов, стандартизации и метрологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент, Ярославль, Россия. E-mail: ivanova-waleriya@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

QUALITY REQUIREMENTS FOR CUPOLA COKE, WHICH AFFECT THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CAST IRON

Ivanova Valeria Anatolyevna - Head of the Department of Materials Technology, Standardization and Metrology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Technical University", Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Yaroslavl, Russia. E-mail: ivanova-waleriya@mail.ru

Abstract. Research was conducted to identify the characteristics of cupola coke, which affect the properties of foundry-iron.

Cupola coke is the source of many of elements that inevitably make it into the products of smelting. Such elements include not only carbon and sulfur, but many others as well, such as silicon, manganese, phosphorus, calcium, etc. The following elements present a particular interest: silicon, which contributes to the graphitization of foundry-iron, of which the largest amount is in coke ash content, and phosphorus, which is a detrimental impurity for foundry-iron.

Experimental research has shown that with increasing instantaneous ash content, the amount of silicon in the foundry-iron increases. With an increase in the reactivity of coke, the silicon content in the liquid-alloy decreases, which is related to the consumption of coke silicon oxide for carbide formation. At the same time, approximately 50% of the total coke ash content's silicone dioxide is spent for the silicon reclamation through SiC and only about 30% through the gas phase of SiO.

It has been established that the reclamation of phosphorus to foundry-iron is possible with the usage of foundry-iron carbon, which leads to a decrease in its content in the metal. Cupola coke is one of the sources of phosphorus in the cupola smelting of iron, and the phosphorus content in the cupola coke is a characteristic that affects the phosphorus content in the foundry-iron produced.

Experimental research has shown that a high content of carbon in cupola coke contributes to the formation of a larger number of colonies with a high content of graphite. The parameters of the phosphide eutectic are correlated with the phosphorus content

in the foundry-iron. Accordingly, the average diameter of the cells of the phosphide eutectic mesh is the smallest for foundry-iron smelted in a batch of cupola coke with lower instantaneous ash content. A lower phosphorus content in foundry-iron, which has a higher content of carbon, is consistent with an increased carbon content in the cupola coke.

Keywords: *cupola coke, foundry-iron, instantaneous ash content, phosphorous content, cast iron structure*

Ссылка на статью:

Иванова В.А. Требования к качеству литейного кокса, влияющие на структуру и свойства чугуна// Теория и технология металлургического производства. 2018. №4(27). С. 12-20.

Ivanova V.A. Quality requirements for cupola coke, which affect the structure and properties of foundry-iron. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2018, vol. 27, no. 4, pp.12-20.