5. Пат. 23081 Япония. Стойкий к воздействиям атмосферных условий стальной лист для сверхглубокой вытяжки / Симидзу Миэнс, Мацукара Калимэо. Заявл. 5.06.62. Опубл. 16.10.64.
6. А.с. 1532606. Сталь / Грушко П.Ф., Жолоб В.М., Жовтяк А.В. и др. Заявл. 28.05.87. Опубл. 30.12.89. Бюл. № 48.
7. Голованенко С.А. // Сталь. 1980. № 12. С. 1052, 1053.
8. Кудрявцева Л.Н., Переверзева Е.Г., Демакова А.В. // Металловедение и термообработка металлов. 1969. № 6. С. 184 – 195.
9. Харлашин П.С., Шумилов М.А., Якушечкин Е.И. Влияние мышьяка на свойства металлических систем и качество стали. – К.: Вища школа, 1991. – 343 с.
10. Шумилов М.А., Кудрявцева Л.Н., Матвиенко Л.В., Аврамова З.В. // Изв. АН СССР. Металлы. 1984. № 5. С. 104 – 108.

© 2014 г. П.С. Харлашин, В.И. Бондарь
Поступила 15 июля 2013 г.

THE INFLUENCE OF ARSENIC ON THE RESISTANCE OF LOW-CARBON AND LOW-ALLOYED STEELS AGAINST ATMOSPHERIC CORROSION. PART 1

P.S. Kharlashin, Dr. Eng., Professor

V.I. Bondar, Cand. Eng., Assist. Professor

Pryazovskyi State Technical University (Mariupol', Donetsk Region, Ukraine)

E-MAIL: azov@online.ua

Abstract. The analysis of bibliographic data about the influence of arsenic on corrosion resistance of low-carbon low-alloyed steels has been carried out. The authors have revealed the reasons and proposed the mechanism which explains the influence of arsenic on oxidation resistance of steels, their stability against the oxidization in the conditions of atmospheric corrosion and in sea water.

Keywords: steel, arsenic, oxidation resistance, atmospheric corrosion, sea water.

REFERENCES

1. Shlyafner A.M., Georgiev M.I., Kondrat'ev V.Yu. etc. *Korroziionnostojkaja nizkolegirovannaja stal'*. Certificate of authorship USSR № 602593, 1976.
2. *Stroitel'naya stal'*. CNIChermet, Zhdanov. Met. zavod "Azovstal". Certificate of authorship USSR № 440439, 1972.
3. Shneerov Ya.A., Vihlevshhuk V.A., Storozhenko A.S. etc. *Stal'*. Certificate of authorship USSR № 899703, 1980.
4. Centre National de Recherches. *Stal' i ee primenenie*. Patent № 693728. Bel'giya, 1970.
5. Simidzu Mijens, Macukara Kalimjeo. *Stoykiy k vozdeystviyam atmosfernih usloviy stal'noy list dlya sverhglubokoy vityazhki*. Patent № 23081. Yaponiya, 1964.
6. Grushko P.F., Zholob V.M., Zhovtyak A.V. etc. *Stal'*. Certificate of authorship USSR № 1532606, 1987.
7. Golovanenko S.A. *Stal'*. 1980. № 12. Pp. 1052, 1053.
8. Kudryavceva L.N., Pereverzeva E.G., Demakova A.V. *Metallovedenie i termoobrabotka metallov*. 1969. № 6. Pp. 184 – 195.
9. Harlashin P.S., Shumilov M.A., Yakushechkin E.I. *Vliyaniye mysh'yaka na svoystva metallicheskih sistem i kachestvo stali*. Kiev: Vishha shkola, 1991. 343 p.
10. Shumilov M.A., Kudryavtseva L.N., Matvienko L.V., Avramova Z.V. *Izv. AN SSSR. Metall.* 1984. № 5. Pp. 104 – 108.

Received July 15, 2013

УДК 621.745.34:662.665

АНАЛИЗ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КОКСОВУЮ ИЛИ УГОЛЬНУЮ ТОПЛИВНУЮ НАСАДКУ В ШАХТНЫХ ПЕЧАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА (ВАГРАНКАХ)*

А.В. Феоктистов, доцент, к.т.н.

О.Г. Модзелевская, ст. преподаватель

Сибирский государственный индустриальный университет (Новокузнецк, Россия)

Аннотация. Проведен анализ сил, действующих на коксовую или угольную топливную насадку в вагранках при замене кокса на антрацит и тощие угли. Полученные данные позволяют предварительно по размеру и форме кусков шихты оценить вероятный прогноз поведения ваграночной плавки. Сделан вывод о том, что при переходе на антрацит и тощие угли для увеличения силы трения шихты о стенки необходимо тщательно подготавливать шихту до получения минимальных размеров кусков 0,07 – 0,08 м, что резко снижает угол зацепления и, следовательно, угол внутреннего трения и увеличивает коэффициент бокового давления на стенки шахты.

Ключевые слова: вагранка, кокс, антрацит, тощие угли, столб шихты, угол внутреннего трения.

E-MAIL: umu@sibsiu.ru

К перспективным направлениям повышения эффективности металлургического производства

можно отнести создание новых агрегатов и процессов, обеспечивающих использование и рециклинг металлосодержащих отходов [1]. Изучение закономерности механизма процессов в таких агрегатах обеспечивает развитие теории и разработку техно-

* Работа выполнена согласно заданию № 2014/213 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России.

логических положений для альтернативной металлургии.

Так, при замене кокса, используемого в ваграночном процессе в качестве топлива, на антрацит и тощие угли необходимо решить проблему стойкости топливной насадки под влиянием давления вышележащих слоев шихты, что приводит к задаче анализа сил, действующих на столб шихты в период плавки.

За основу анализа возьмем выражение для активно-го веса столба шихты (ΔF), действующего на холостую колошу:

$$\Delta F = F_{\text{ш}} - F_{\text{тр}} - \Delta F_{\text{г}} + F_{\text{к}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{ш}}$ – полный вес столба шихты на уровне холостой колоши, Н; $F_{\text{тр}}$ – сила трения шихты о стенки шахты, Н; $\Delta F_{\text{г}}$ – сила подъема шихты за счет падения давления газового потока, Н; $F_{\text{к}}$ – сила всплывания кокса в горне печи за счет разности плотностей жидкого металла и кусков топлива, Н.

Рассмотрим каждую составляющую уравнения (1). Так, величину $F_{\text{ш}}$ найдем из соотношения

$$F_{\text{ш}} = \sigma_1 S_{\text{п}} = \bar{\rho}_{\text{ш}} g (H_{\text{п}} - H_{\text{хк}}) \pi D^2 / 4, \quad (2)$$

где $\sigma_1 = \bar{\rho}_{\text{ш}} g (H_{\text{п}} - H_{\text{хк}})$ – вертикальное давление шихты на холостую колошу, Н/м²; $\bar{\rho}_{\text{ш}}$ – насыпная плотность шихты, кг/м³; $H_{\text{п}}$ и $H_{\text{хк}}$ – полезная высота печи и высота холостой колоши, м; $S_{\text{п}}$ – площадь горизонтального сечения печи, м²; $g = 9,81$ – гравитационное ускорение, м/с²; D – диаметр шахты печи, м.

Силу трения шихты о стенки шахты определим из выражения

$$F_{\text{тр}} = \sigma_2 S_6 = [0,5 \bar{\rho}_{\text{ш}} g (H_{\text{п}} - H_{\text{хк}}) (H_{\text{п}} - H_{\text{хк}}) \pi D n], \quad (3)$$

в котором $\sigma_2 = 0,5 \bar{\rho}_{\text{ш}} g (H_{\text{п}} - H_{\text{хк}}) n$ – среднее боковое давление на стенку шахты, Н/м²; n – условный коэффициент бокового давления; $S_6 = (H_{\text{п}} - H_{\text{хк}}) \pi D$ – боковая поверхность шахты, м².

Величину $\Delta F_{\text{г}}$ находим из уравнения

$$\Delta F_{\text{г}} = (\Delta p_{\text{гш}} + \Delta p_{\text{гхк}}) S_{\text{п}}, \quad (4)$$

где $\Delta p_{\text{гш}}$ – падение давления газового потока в слое шихты высотой $(H_{\text{п}} - H_{\text{хк}})$, Н/м²; $\Delta p_{\text{гхк}}$ – падение давления газового потока в слое топлива высотой $H_{\text{хк}}$, Н/м².

Параметры $\Delta p_{\text{гш}}$ и $\Delta p_{\text{гхк}}$ рассчитываются по формулам, приведенным в работе [2].

На высоте холостой колоши сила ($\Delta F_{\text{гхк}} = \Delta p_{\text{гхк}} S_{\text{п}}$) сопротивления слоя топлива газовому потоку прижимает топливную колошу к нижней поверхности слоя шихты, т.е. увеличивает силу давления шихты на слой топлива холостой колоши. Сила $\Delta F_{\text{гш}} = \Delta p_{\text{гш}} S_{\text{п}}$, наоборот, уменьшает силу давления шихты на слой топливной колоши.

Сила $F_{\text{к}}$ рассчитывается по формуле

$$F_{\text{к}} = (\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{т}}) g H_{\text{г}} (1 - \varepsilon_{\text{т}}) S_{\text{п}}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{м}}$ и $\rho_{\text{т}}$ – плотности жидкого чугуна и куска топлива, кг/м³; $\varepsilon_{\text{т}}$ – порозность слоя топлива; $H_{\text{г}}$ – высота горна, м.

Оценочные расчеты показывают [3], что параметры $\Delta F_{\text{г}}$ и $F_{\text{к}}$ практически компенсируют друг друга и в первом приближении ими можно пренебречь в выражении (1), тогда

$$\begin{aligned} \Delta F = F_{\text{ш}} - F_{\text{тр}} &= \bar{\rho}_{\text{ш}} g H \frac{\pi D^2}{4} - \frac{1}{2} \bar{\rho}_{\text{ш}} g H n H \pi D = \\ &= \frac{\pi}{2} \bar{\rho}_{\text{ш}} g D \left(\frac{D}{2} - n H \right); \end{aligned} \quad (6)$$

здесь $\bar{\rho}_{\text{ш}}$ – средняя плотность шихты; $H = H_{\text{п}} - H_{\text{хк}}$.

В производственных условиях часто возникают ситуации, когда часть топливной насадки выгорает, а шихта не опускается вниз, между верхней поверхностью топливной насадки и низом слоя шихты образуется просвет. Это означает, что в выражении (6) параметр ΔF равен нулю, что позволяет из данного выражения определить критическое значение коэффициента n бокового давления:

$$\frac{D}{2} - n H = 0, \quad n = \frac{D}{2(H_{\text{п}} - H_{\text{хк}})}. \quad (7)$$

Для вагранок имеем $H_{\text{п}} = 4,345\sqrt{D}$, $H_{\text{хк}} = 1,165\sqrt{D}$ [2].

После подставки последних соотношений в выражение (7) получим

$$n = \frac{\sqrt{D}}{6,36} = 0,157\sqrt{D}. \quad (8)$$

Коэффициент бокового давления для шероховатых стенок шахты определяется по формуле [3]

$$n = \left[1 + 2f^2 + \sqrt{1 + f^2} \left(\sqrt{f^2 - f_0} - f \right) \right]^{-1}, \quad (9)$$

в которой f_0 – коэффициент трения шихты о стенки шахты печи; $f = \text{tg}\varphi$ – коэффициент внутреннего трения шихты; φ – угол внутреннего трения.

Значение угла внутреннего трения крупных частиц неправильной формы представляется в виде суммы [4]

$$\varphi = \varphi_{\text{т}} + \varphi_3 + \varphi_{\text{с}}, \quad (10)$$

где $\varphi_{\text{т}}$ – угол трения частиц друг о друга при их скольжении; φ_3 – угол зацепления – сопротивления, оказываемого частицами при их выходе из положения равновесия; $\varphi_{\text{с}}$ – угол сопротивления срезу частиц и их раздроблению.

Угол φ_T зависит от шероховатости частиц, φ_3 – от формы и размера куска шихты, порозности (ϵ) слоя; φ_c – от прочности материала частиц на срез.

Угол внутреннего трения изменяется в широких пределах: $30^\circ \leq \varphi \leq 75^\circ$ [4], что соответствует изменению коэффициента внутреннего трения в пределах $0,577 \leq f_0 \leq 3,722$. Меньшие значения f_0 соответствуют мелким кускам с формой, близкой к шарообразной, с большой порозностью слоя ($\epsilon \geq 0,5$). Большие значения f_0 соответствуют крупным кускам шихты произвольной неправильной (в классическом смысле) формы с порозностью слоя $\epsilon \leq 0,3$, т.е. с плотной упаковкой.

Как правило, для шероховатых стенок $f_0 = 0,267$ [3, 4], что соответствует углу $\varphi_0 = 15^\circ$. Расчет по уравнению (9) дает значения n , лежащих в пределах $0,775 \leq n \leq 0,035$. Следует отметить, что с ростом угла φ растет и угол φ_0 , но предельное значение угла трения φ_0 стремится к 30° , что дает $f_0 = 0,577$ и соответствует минимальному значению $n = 0,035$.

Шихта в печах подвисает за счет расклинивающего действия мостов из кусков шихты, когда размер составляющих шихты не соответствует диаметру вагранки. При расклинивании резко повышается коэффициент бокового давления до $n = 1$. В этом случае давления верхних слоев шихты недостаточно для разрушения распорного моста, стенка шахты не гладкая, а имеет значительную шероховатость с коэффициентом трения пары шихта–стенка, лежащих в интервале $0,267 \leq f_0 \leq 0,577$.

Так как коэффициент n по выражению (9) в основном определяется коэффициентом f внутреннего трения шихты, т.е. размером ее кусков и их формой, то соотношение (8) также передает взаимосвязь между средним размером кусков шихты ($\bar{d}$) и коэффициентом его формы (A) и диаметром вагранки (D):

$$\bar{d}A = k\sqrt{D}, \quad (11)$$

где $A = S_T/S_0$ (здесь S_T и S_0 – поверхность куска шихты и поверхность эквивалентного шара, имеющего объем, равный объему куска шихты); k – коэффициент пропорциональности.

Для шара имеем $A = 1$. Чем значительней поверхность куска отличается от поверхности эквивалентного шара, тем выше величина A . Практика ваграночной плавки показывает, чтобы избежать «зависания» шихты, между параметрами $\bar{d}$ и A должна соблюдаться гиперболическая зависимость типа (11) при $D = \text{const}$. С увеличением размера $\bar{d}$ форма куска должна приближаться к шарообразной, т.е. $A \rightarrow 1$ и наоборот.

Коэффициент k в уравнении (11) можно определить для условий плавки на эталонной вагранке с эталонной шихтой. В качестве последней нужно выбрать шихту из стандартного чушкового чугуна со следующими параметрами одной чушки: масса $M_T = 16$ кг, размер $550 \times 90 \times 50$ мм, площадь поверхности $S_T = 0,116$ м²,

насыпная масса слоя $\bar{\rho}_T = 2300$ кг/м³, порозность слоя $\epsilon = 0,67$ [2]. Произведем расчет коэффициента формы такой чушки:

$$A = \frac{S_T}{S_0} = 1,329; \quad S_0 = \pi^{1/3} \left(6 \frac{M_T}{\rho_{\text{ч}}} \right)^{2/3} = 0,0865 \text{ м}^2;$$

$$\bar{d} = \left[6 \frac{M_T}{\pi \rho_{\text{ч}}} \right]^{1/3} = 0,166 \text{ м}; \quad \bar{d}A = 0,2206 \text{ м};$$

здесь $\rho_{\text{ч}} = 6,9 \cdot 10^3$ кг/м³ – плотность чугуна.

Технологически устойчивая плавка на шихте с такими показателями, как показывает цеховая практика, возможна на вагранке с минимальным диаметром в свету $D = 1,1$ м ($D = 2l = 2 \cdot 550 = 1100$ мм). После подстановки приведенных выше параметров в уравнение (11) определяем $k = 0,21$, тогда

$$\bar{d} = \frac{0,21}{A} \sqrt{D}. \quad (12)$$

В таблице приведены расчетные значения параметров $\bar{d}$ и M_T , где масса элемента шихты рассчитывалась из соотношения $M_T = \frac{\pi}{6} \bar{d}^3 \rho_{\text{ч}} = 3,61 \cdot 10^3 \cdot \bar{d}^3$ кг.

Для всех значений A средние размеры кусков шихты $\bar{d}$ приведены к эквивалентному диаметру шара. Для $A > 1,329$ максимальный линейный размер (l) элемента шихты не должен превышать половины внутреннего диаметра вагранки, т.е. $l < 0,5D$.

При плавке в вагранках стандартной высоты при замене кокса, используемого в качестве топлива, на антрацит или тощие угли встает вопрос о стойкости углей под давлением металлической шихты. Существующие вагранки имеют четкое соотношение между высотой H_n и внутренним диаметром D печи [2]: $H_n = (4,2 \div 4,345) \sqrt{D}$. Куски металлической шихты, обычно применяемой для выплавки чугуна, имеют большие размеры: $\bar{d} > 0,1$ м. Ваграночная шихта состоит из чушкового чугуна, боя изложниц, стального и чугунного лома, она разнородна по размеру и форме кусков. Как правило, для ваграночной шихты коэффициент формы куска $A > 1,4$. Для засыпок, состоящих из таких частиц, угол внутреннего трения в основном определяется их зацеплением и достигает максимальных значений $\varphi = 70 \div 72^\circ$, что соответствует коэффициенту внутреннего трения $f = \text{tg} \varphi = 2,74 \div 3,08$ [4]. Шихта в шахте печи при таком значении f движется практически как единое твердое тело по стержневому типу. Угол трения шихты о стенки шахты при таком движении равен $\varphi_0 = 30^\circ$, коэффициент трения $f_0 = \text{tg} \varphi = 0,577$. Коэффициент бокового давления, рассчитанный по формуле (9), дает значения $n = 0,05 \div 0,063$.

Для неподготовленной шихты с размером кусков $\bar{d} = 0,07 \div 0,08$ м угол внутреннего трения уменьшается до $\varphi = 64 \div 65^\circ$. Такой угол характерен для засыпки из

Значение параметров $\bar{d}$, M_T и A для вагранок нормального ряда

Параметр		Значения параметра для вагранок диаметра D , м						Форма элемента шихты
		0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,1	
$A = 1,00$	$\bar{d}$, м	0,20	0,22	0,24	0,26	0,275	0,304	Шар
	M_T , кг	29,0	38,4	50,0	61,0	74,0	101,0	
$A = 1,24$	$\bar{d}$, м	0,160	0,177	0,193	0,207	0,220	0,245	Куб, бой изложниц
	M_T , кг	16,0	21,0	27,5	32,0	38,4	53,2	
$A = 1,329$	$\bar{d}$, м	0,150	0,166	0,180	0,194	0,206	0,230	Стандартная чушка
	M_T , кг	12,1	16,0	21,0	26,4	31,5	44,0	
$A = 1,50$	$\bar{d}$, м	0,133	0,147	0,160	0,170	0,182	0,203	Скрап, литники, лом
	M_T , кг	8,5	11,5	14,8	17,7	21,8	30,0	
$A = 2,00$	$\bar{d}$, м	0,10	0,11	0,12	0,13	0,137	0,15	Решетки, изделия коробчатой формы
	M_T , кг	3,6	4,8	6,2	7,9	9,3	12,2	

остроугольных кусков горной породы с аналогичными значениями $\bar{d}$ [4].

Расчет по формуле (9) при $\phi = 65^\circ$, коэффициенте внутреннего трения $f = 2,14$, коэффициенте трения $f_0 = 0,577$ дает значение $n = 0,1$. Следует подчеркнуть, что пределы изменения коэффициента n колеблются от нуля до единицы. При $n = 0$ шихта движется по стержневому типу и не оказывает давления на стенки шахты. При $n = 1$ шихта аналогична ньютоновской жидкости и оказывает одинаковое давление на боковую стенку шахты и на нижние горизонтальные слои. Для реальной ваграночной шихты параметр n имеет значение в пределах $0,05 \leq n \leq 0,1$; $n = 0,05$ соответствует обычной неподготовленной крупногабаритной шихте с $A \geq 1,4$; $n = 0,1$ соответствует хорошо подготовленной шихте с $\bar{d} < 0,1$ м, $1,0 \leq A \leq 1,4$.

При использовании существующих вагранок в случае перехода с кокса на уголь в качестве топлива внутренний диаметр и высота $H_{\text{п}}$ остаются неизменными. Для реализации такой замены предварительно необходимо оценить соотношение сил $F_{\text{тр}}/F_{\text{ш}}$ в выражении (6).

В выражении (6) неизвестна величина $\bar{\rho}_{\text{ш}}$, которая будет различна для топливных колош из кокса и угля; ее можно рассчитать в каждом конкретном случае, используя следующую методику. При среднем расходе кокса $K = 14\%$ на 100 кг металлической шихты добавляется 14 кг топлива. Объем металла в слое шихты составит $V_{\text{м}} = \frac{100}{\rho_{\text{м}}(1-\varepsilon_{\text{м}})} = \frac{100}{6,9 \cdot 10^3 \cdot (1-0,6)} = 36,23 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, где $\rho_{\text{м}} = 6,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность кусков металлозавалки; $\varepsilon_{\text{м}}$ – порозность слоя металлической колоши. Объем кокса в слое шихты находим из выражения $V_{\text{т}} = \frac{14}{\bar{\rho}_{\text{к}}(1-\varepsilon_{\text{к}})} = \frac{14}{1,0 \cdot 10^3 \cdot (1-0,5)} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, где $\rho_{\text{к}} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность кокса; $\varepsilon_{\text{к}} = 0,5$ – порозность слоя кокса.

Среднюю насыпную плотность слоя металлической шихты и кокса определим как

$$\bar{\rho}_{\text{м}} = \frac{\rho_{\text{м}}(1-\varepsilon_{\text{м}})V_{\text{м}} + \rho_{\text{к}}(1-\varepsilon_{\text{к}})V_{\text{к}}}{V_{\text{м}} + V_{\text{к}}} = 1,755 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

При среднем расходе антрацита $A = 18\%$ и плотности угля $\rho_{\text{у}} = 1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ расчет по вышеприведенной методике дает значение средней насыпной плотности шихты (металл + уголь) $\bar{\rho}_{\text{ш}} = 1,837 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Преобразуем выражение (6) с учетом того, что $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $H = H_{\text{п}} - H_{\text{хк}} = 4,345\sqrt{D} - 1,165\sqrt{D} = 3,18\sqrt{D}$ [2]. В результате имеем

$$\Delta F = 97,95 \bar{\rho}_{\text{ш}} D^{3/2} \left(0,25D - 1,59D^{1/2}n \right).$$

Для действующих вагранок при $D = 1,0$ м, $\bar{\rho}_{\text{ш}} = 1,755 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $n = 0,05$ (плавка на коксе) получаем $\Delta F_{\text{к}} = 29,31 \cdot 10^3 \text{ Н}$. Для хорошо подготовленной шихты (плавка на угле) при $D = 1,0$ м, $\bar{\rho}_{\text{ш}} = 1,837 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $n = 0,1$ получаем $\Delta F_{\text{у}} = 16,37 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

Отношение $\Delta F_{\text{к}}/\Delta F_{\text{у}} = 0,558$, т.е. нагрузка на холостую колошу при плавке на угле с хорошо подготовленной шихтой уменьшается практически наполовину для вагранок с $D = 1,0$ м и $H_{\text{п}} = 4,345\sqrt{D}$.

При определении полезной высоты вагранки для плавки на неподготовленной шихте с $\bar{d} > 0,1$ м, $A > 1,4$, $n = 0,05$ при переходе с кокса, используемого в качестве топлива, на угли возникают проблемы следующего порядка. Угли крошатся, истираются в процессе опускания по шахте и при горении, поэтому дутье необходимо подогревать до $400 \div 500 \text{ }^\circ\text{C}$, так как с подогревом дутья скорость газификации мелких частиц угля резко возрастает [5] за счет интенсификации реакции $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO} + \text{Q}$ и они сгорают в верхних горизонтах холостой колоши.

Оставшиеся крупные куски топлива за счет меньшей удельной поверхности реагирования образуют каркас

холостой колоши, который держит давление верхних слоев шихты. Так как холостая колоша при использовании в качестве топлива антрацита (тощих углей) просаживается за счет измельчения и разрушения части кусков топлива, то расход топлива необходимо увеличить на 25 – 30 % по отношению к расходу при плавке на коксе, что составит 17 – 19 % от металлозавалки. Так, если плавка на коксе ведется при расходе топлива 14 %, то при переходе на антрацит расход топлива составит 17,5 – 18,2 %. Холостая колоша останется на прежнем уровне, что обеспечит более высокую температуру выпускаемого чугуна с более высокими механическими свойствами за счет более высокой теплотворной способности антрацита (или тощих углей), их меньшей зольности и меньшего содержания серы. Холостая колоша при использовании угля более плотная, трудно продуваемая, поэтому давление дутья нужно увеличить в 1,1 – 1,15 раза в сравнении с плавкой на коксе.

Каменные угли марок А и ТК для ваграночной плавки с 2005 г. используются на Новокузнецком предприятии ЗАО «Изолит». До 2005 г. плавка велась исключительно на коксе. Печь переплавляет доменный шлак на минеральную вату для теплоизоляционных изделий. Вагранка имеет два загрузочных отверстия на высоте $H_{\text{п}} = 3,5$ м и $H_{\text{п}} = 5,5$ м, ее внутренний диаметр D равен 1250 мм. По отношению к диаметру полезная высота вагранки составляет $H_{\text{п}} = 3,5$ м = $3,2\sqrt{D}$ и $H_{\text{п}} = 5,5$ м = $4,9\sqrt{D}$. Вагранка оборудована рекуператором «труба в трубе», позволяющим подогреть дутье до 420 °С. Расход угля составляет 18 % от шлаковой завалки. Для увеличения высоты рекуператора до 10 м, а следовательно и увеличения интенсивности подогрева воздуха, загрузочное отверстие шихты в 2007 г. перенесли на нижний ярус с высотой $H = 3,5$ м ($H_{\text{п}} = 3,2\sqrt{D}$). Уменьшение высоты столба шихты позволило получить более высокую температуру колошниковых газов (900 – 1000 °С) и, следовательно, устойчивое держание факела горения при входе в нижнюю часть рекуператора.

Практическая реализация замены кокса на антрацит (тощие угли) на предприятии ЗАО «Изолит» позволяет определить полезную высоту печи и при выплавке чугуна.

При плавке на антраците слой загрузочных материалов (шлака) при расположении загрузочного окна на высоте $H_{\text{п}} = 5,5$ м = $4,9\sqrt{D}$ не разрушает топливную насадку, которая имеет конечную высоту после просадки $H_{\text{хк}} = 1,165\sqrt{D}$. Тем более устойчивость технологии плавки будет обеспечена и на вагранке классической высоты $H_{\text{п}} = 4,345\sqrt{D}$.

Для того, чтобы решить поставленную задачу, необходимо определить среднюю насыпную плотность шихты ($\bar{\rho}_{\text{шл}}$), состоящую из доменного шлака и угля. Объем шлака в слое шихты и топлива составит $V_{\text{шл}} = \frac{100}{\rho_{\text{шл}}(1-\varepsilon_{\text{шл}})}$, объем угля в слое шихты и топлива при расходе антрацита 18 % от массы шлака определим

так: $V_{\text{у}} = \frac{18}{\rho_{\text{у}}(1-\varepsilon_{\text{у}})}$; здесь $\rho_{\text{шл}}$ и $\rho_{\text{у}}$ – плотности куска шлака и угля, кг/м³; $\varepsilon_{\text{шл}}$ и $\varepsilon_{\text{у}}$ – порозности слоя шлака и угля.

Средняя насыпная плотность слоя шлака и угля определяется по формуле $\bar{\rho}_{\text{шл}} = \frac{100+18}{V_{\text{шл}}+V_{\text{у}}}$, расчет по которой при $\rho_{\text{шл}} = 2,74 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{\text{у}} = 1,2 \cdot 10^3$ кг/м³, $\varepsilon_{\text{шл}} = 0,5$, $\varepsilon_{\text{у}} = 0,4$ дает значение $\bar{\rho}_{\text{шл}} = 1,204 \cdot 10^3$ кг/м³.

Давление столба шихты, состоящей из шлака и угля, на топливную насадку составит $P_{\text{шл}} = \bar{\rho}_{\text{шл}}gH_{\text{шл}}$, а давление столба шихты, состоящей из металла и угля, составит $P_{\text{м}} = \bar{\rho}_{\text{м}}gH_{\text{м}}$. Из очевидного равенства $P_{\text{шл}} = P_{\text{м}}$ находим

$$H_{\text{м}} = \frac{\bar{\rho}_{\text{шл}}}{\bar{\rho}_{\text{м}}} H_{\text{шл}}.$$

Для классической вагранки со значениями $H_{\text{п}} = 4,345\sqrt{D}$, $H_{\text{шл}} = H = 3,18\sqrt{D}$ при $H_{\text{хк}} = 1,165\sqrt{D}$ получаем

$$H_{\text{м}} = \frac{1,204 \cdot 10^3}{1,837 \cdot 10^3} \cdot 3,18\sqrt{D} = 2,084\sqrt{D}.$$

Полезная высота печи с учетом высоты холостой колоши равна

$$H_{\text{п}} = H_{\text{м}} + H_{\text{хк}} = 2,08\sqrt{D} + 1,165\sqrt{D} = 3,249\sqrt{D}.$$

Выводы. Данные аналитических расчетов геометрических и физико-механических параметров столба загружаемых в печь материалов позволяют предварительно по размеру и форме кусков шихты оценить вероятный прогноз поведения ваграночной плавки. При замене используемого в качестве топлива кокса на угли (антрацит, тощие угли) на действующих вагранках $H_{\text{п}} = 4,345\sqrt{D}$ для увеличения силы трения шихты о стенки шахты необходимо тщательно подготавливать шихту до получения минимальных размеров кусков $\bar{d} = 0,07 - 0,08$ м, что резко снижает угол зацепления, а следовательно угол внутреннего трения, и увеличивает коэффициент бокового давления на стенки шахты. При переходе от кокса к использованию в качестве топлива антрацита или тощих углей на неподготовленной шихте высота вагранки уменьшается и составляет $H_{\text{п}} = 3,249\sqrt{D}$ вместо $H_{\text{п}} = 4,345\sqrt{D}$. Давление дутья увеличивается в 1,1 – 1,15 раза, поэтому обязателен его подогрев в рекуператоре «труба в трубе» до 400 – 450 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kessler K. // Stahl u. Eisen 125 (2005). № 2. P. 21 – 24.
2. Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Бедарев С.А. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных печах малого диаметра. – М.: Теплотехник, 2010. – 379 с.

3. Доменное производство. Справочное издание. В 2-х т. Т.1. Подготовка руд и доменный процесс / Под ред. Е.Ф. Вегмана. – М.: Metallurgia, 1989. – 496 с.
 4. Грунтоведение / Под ред. Е.А. Сергеева. – М.: изд. МГУ, 1971. – 595 с.

5. Чуханов З.Ф. Некоторые проблемы топлива и энергетики. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 478 с.

© 2014 г. А.В. Феоктистов, О.Г. Модзелевская
 Поступила 3 февраля 2014 г.

THE ANALYSIS OF THE FORCES ACTING ON A COKE PACKING OR COAL FUEL NOZZLE INTO SMALL DIAMETER SHAFT FURNACES (CUPOLA)

A.V. Feoktistov, Cand. Eng., Assist. Professor
O.G. Modzelevskaya, Senior Lecturer

Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Kemerovo region, Russia)

E-MAIL: umu@sibsiu.ru

Abstract. The article presents the analysis of the forces acting on a coke packing or coal fuel nozzle into the cupola by replacing coke with anthracite and lean coal. The obtained data allow estimating preliminarily in size and shape of burden pieces a probable forecast of cupola melting behavior. The conclusion is that by the transition to the marks of coals to increase the frictional force on the wall of charge, the charge itself must be carefully carve into minimum pieces, which reduces drastically the angle of the engagement and consequently the angle of internal friction coefficient increases as well as the pressure on the side wall of the shaft.

Keywords: cupola, coke, anthracite, lean coal, post charge, angle of internal friction.

REFERENCES

1. Kessler K. Stahl u. Eisen 125 (2005). № 2. Pp. 21 – 24.
2. Selyanin I.F., Feoktistov A.V., Bedarev S.A. *Teoriya i praktika intensivifikatsii tehnologicheskogo protsessa v shaktnikh pechakh malogo diametra* (Theory and practice of process intensification in the blast furnaces of small diameter). Moscow: Teplotekhnika, 2010. 379 p.
3. *Domennoe proizvodstvo. Spravochnoye izdanie. V 2-h t. T. 1. Podgotovka rud i domenny protsess* Pod red. E.F. Vegmana. (Blast Furnaces. Reference book. In 2 volumes. Vol.1. Preparation of ores and metallurgical process). Moscow: Metallurgiya, 1989. 496 p.
4. *Gruntovedeniye*. Pod red. E.A. Sergeeva. (Soil management) Moscow: izd. MGU, 1971. 595 p.
5. Чуханов З.Ф. *Nekotoriye problemi topliva i energetiki*. (Some problems of Fuel and Energy). Moscow: Isd-vo AN SSSR, 1961. 478 p.

Received February 3, 2013

УДК 621.791.92:621.771.07

ВЛИЯНИЕ ВВЕДЕНИЯ В ШИХТУ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ СИСТЕМЫ С–Si–Mn–Cr–V–Mo УГЛЕРОДФТОРСОДЕРЖАЮЩЕЙ ДОБАВКИ И НИКЕЛЯ

Н.А. Козырев, д.т.н., профессор
Д.А. Титов, магистрант
С.Н. Старовацкая, к.т.н., доцент
О.Е. Козырева, соискатель
В.М. Шурупов, ст. преподаватель

Сибирский государственный индустриальный университет (Новокузнецк, Россия)

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования влияния введения в шихту для производства порошковой проволоки типа ПП-Нп-25Х5ФМС углеродфторсодержащей добавки (отходов металлургического производства) и порошкообразного никеля. Введение в состав шихты для производства проволоки системы С–Si–Mn–Cr–V–Mo углеродфторсодержащей добавки и никеля позволяет значительно снизить уровень загрязненности окисными неметаллическими включениями наплавляемого металла, измельчению зерна, а также способствует снижению объемной доли остаточного аустенита в наплавленном слое и образованию мелкодисперсных карбидов. Полученные результаты позволяют прогнозировать повышение термической стойкости прокатных валков при использовании изготовленной проволоки.

Ключевые слова: наплавка, порошковая проволока, карбиды, карбиды хрома, прокатные валки, наплавленный металл.

E-MAIL: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

На металлургических предприятиях России широко используется наплавка прокатных валков для их восстановления и повышения стойкости. Несмотря на широкий спектр используемых систем для наплав-

ки, широкое распространение получили две системы: С–Si–Mn–Cr–W–V и С–Si–Mn–Cr–V–Mo.

Первая система представлена порошковой проволокой типа ПП-Нп-35В9Х3СФ, содержащей до 10 %