

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.162.1

Ковальчик Р.В.¹, Томаш А.А.², Семакова В.Б.³

СНИЖЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ ЧУГУНА ЗА СЧЁТ ВЫБОРА МЕТОДОМ ГАУССА – ЗЕЙДЕЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА УГОЛЬНОЙ ШИХТЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОКСА

Произведен выбор оптимального состава угольных шихт при производстве кокса, позволяющий повысить его качество по показателю CSR и снизить себестоимость чугуна в доменном цехе. Для поиска оптимальных вариантов состава угольных шихт применён метод Гаусса – Зейделя.

Снижение энергетических затрат при производстве чугуна – необходимое условие получения конкурентоспособной продукции металлургической промышленности. Основным видом топлива доменной плавки, расход которого практически на 50 % определяет себестоимость чугуна, является кокс. Значительное влияние на производительность доменной печи и удельный расход кокса оказывает его качество и, прежде всего, реакционная способность CRI и горячая прочность CSR, наиболее полно характеризующие поведение кокса в доменной печи [1, 2]. В свою очередь, показатели CRI и CSR практически полностью зависят от состава угольной шихты при производстве кокса [3]. Коксующиеся угли марок К и КО, способствующие повышению качества кокса, значительно дороже газовых Г и слабоспекающихся С, введение которых в шихту приводит к нежелательному увеличению реакционной способности CRI и снижению горячей прочности CSR кокса. Таким образом, изменение состава угольной шихты оказывает влияние на экономические показатели доменной плавки в двух взаимно-противоположных направлениях. С одной стороны, введение в состав угольной шихты относительно дешёвых углей марок Г и С снижает стоимость кокса и, соответственно, себестоимость чугуна. С другой стороны, следствием использования газовых и слабоспекающихся углей является ухудшение качества кокса, снижение производительности доменных печей, увеличение удельного расхода кокса и, соответственно, повышение себестоимости чугуна. Применение более дорогих марок углей К и КО оказывает противоположное влияние: увеличивает стоимость кокса, но снижает затраты непосредственно при выплавке чугуна.

Целью исследований является оптимизация состава угольной шихты для производства кокса, обеспечивающая минимальную себестоимость чугуна и превышение экономии, достигаемой при выплавке чугуна за счёт повышения качества кокса, над увеличением его стоимости.

Анализ влияния состава угольной шихты на показатели реакционной способности CRI и горячей прочности кокса CSR производили на основе статистической математической модели, полученной в работе [3].

$$\begin{aligned} \text{CRI} = & 76,48 \cdot \Gamma + 45,35 \cdot \text{Ж} + 20,83 \cdot \text{К} + 13,28 \cdot \text{КО} + 213,078 \cdot \text{С} - 164,97 \cdot \Gamma \cdot \text{Ж} - \\ & - 21,93 \cdot \Gamma \cdot \text{К} - 15,93 \cdot \Gamma \cdot \text{КО} + 53,92 \cdot \Gamma \cdot \text{С} + 26,65 \cdot \text{Ж} \cdot \text{К} + 70,06 \cdot \text{Ж} \cdot \text{КО} - \\ & - 440,15 \cdot \text{Ж} \cdot \text{С} - 4,25 \cdot \text{К} \cdot \text{КО} - 26,04 \cdot \text{К} \cdot \text{С} - 149,02 \cdot \text{КО} \cdot \text{С}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Г, Ж, К, КО и С – доля в шихте газовых, жирных, коксующихся, коксовых отошённых и спекающихся углей, д.ед.

$$\Gamma + \text{Ж} + \text{К} + \text{КО} + \text{С} = 1. \quad (2)$$

$$\text{CSR} = - 1,70 \text{CRI} + 101,85. \quad (3)$$

¹ПГТУ, аспирант

²ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

³ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

В результате статистического анализа показателей работы доменных печей ОАО «МК «Азовсталь» в период с августа 2005 по март 2008 г. на коксе различного качества установлено влияние горячей прочности CSR на его удельный расход и производительность. Увеличение CSR на 1 % снижает удельный расход кокса на 1,0 % и повышает производительность на 1,4 %.

В качестве базы для сравнения выбрана угольная шихта второго блока коксохимического производства ОАО «МК «Азовсталь» в июле 2008 г., включающая: 29 % газовых углей, 28 % жирных, 25 % коксующихся, 12 % коксовых отощённых и 6 % спекающихся. Расчётный показатель CSR кокса для неё составил 42,14 %. Цена 1 т кокса из такой шихты – 1551,82 грн. Удельный расход кокса в базовый период составил 514 кг/т чугуна, себестоимость чугуна – 2554,74 грн./т.

Для определения целесообразности применения различных вариантов угольных шихт выполнены сравнительные расчёты себестоимости чугуна, выплавленного с использованием кокса, полученного из базовой угольной шихты и других различных расчётных вариантов состава углей для коксования. Расчёт включал:

- определение показателя CSR для кокса из расчётной угольной шихты по формулам (1, 3);
- сравнительный расчёт цены угольной шихты на 1 т кокса в базовом и расчётном вариантах с учётом фактического расхода углей 1460 кг/т кокса;
- определение расчётной стоимости 1 т кокса сложением базовой стоимости и разности цен угольной шихты в расчётном и базовом вариантах;
- определение удельного расхода кокса на выплавку 1 т чугуна и производительности доменных печей для расчётного варианта с использованием полученных коэффициентов влияния показателя горячей прочности кокса CSR на удельный расход кокса (1,0 %/%) и производительность (1,4 %/%)
- вычисление себестоимости чугуна с учётом изменения в расчётном варианте в сравнении с базовым стоимости кокса, его удельного расхода и условно-постоянных расходов на выплавку чугуна, зависящих от производительности доменной печи.

Ниже приведен расчёт показателей доменной плавки, горячей прочности, стоимости кокса и себестоимости 1 т чугуна для следующего варианта угольной шихты: газовые угли – 20 %, жирные угли – 40 %, коксующиеся – 30 %, коксовые отощённые – 7 % и спекающиеся – 3 %. Расчётный показатель CSR кокса из такой шихты по формулам (1, 3) составляет 47,68 % против 42,14 % в базовом периоде. Расчёт стоимости угольной шихты для базового и расчётного варианта приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Стоимость угольной шихты в базовом и расчётном периодах, грн.

Марки углей	Цена, грн./т	базовый вариант			расчётный вариант		
		%	кг/т	затраты, грн.	%	кг/т	затраты, грн.
Газовые Г	810,05	29	423,4	342,98	20	292	236,53
Жирные Ж	1167,31	28	408,8	477,20	40	584	681,71
Коксующиеся К	1225,26	25	365,0	447,22	30	438	536,66
Коксовые отощённые КО	1312,67	12	175,2	229,98	7	102,2	134,15
Спекающиеся КС + ОС	1131,31	6	87,6	99,10	3	43,8	49,55
Итого		100	1460,0	1596,47	100	1460,0	1638,61
Разность стоимости							+ 42,14

Стоимость 1 т кокса при расчётном составе угольной шихты возрастёт на 42,14 грн. В сравнении с базовым периодом за счёт сокращения доли относительно дешёвых газовых углей и увеличения расхода более дорогих марок углей Ж и К и составит 1551,82 + 42,14 = 1593,96 грн. В расчётный период удельный расход кокса составит:

$$514 \cdot [1 - (47,68 - 42,14) \cdot 1,0/100] = 485,5 \text{ кг/т чугуна.}$$

Производительность доменных печей возрастёт на

$$1,4 \cdot (47,68 - 42,14) = 7,8 \text{ \%}$$

Изменение себестоимости чугуна с учётом снижения удельного расхода кокса и повышения производительности доменных печей рассчитано в табл. 2. Остальные статьи затрат приняты неизменными.

Себестоимость 1 т чугуна после изменения состава угольной шихты снизится на 833,28 – 806,85 = 26,43 грн. и составит 2554,74 – 26,43 = 2528,31 грн/т. Снижение себестоимости может быть достигнуто, несмотря на увеличение стоимости 1 т кокса на 42,14 грн., за счёт ожидаемого снижения удельного расхода кокса при повышении его горячей прочности. Таким образом, расчётный вариант состава угольной шихты более рациональный, чем базовый, так как обеспечивает более низкую себестоимость чугуна.

Таблица 2 – Изменение затрат на выплавку 1 т чугуна

Статья затрат	Базовый вариант			Расчётный вариант		
	Цена, грн	Расход на 1 т	Затраты, грн/т	Цена, грн	Расход на 1 т	Затраты, грн/т
Кокс, т/т	1551,82	0,514	797,64	1593,96	0,4855	773,91
Условно постоянные расходы, грн.	–	100	43,87	–	107,8	40,71
Доменный газ, 1000 м ³	– 5,00	1,645	– 8,22	– 5,00	1,554	– 7,77
Итого	–	–	833,28	–	–	806,85

Поиск оптимального состава угольной шихты для коксования, обеспечивающего минимальную себестоимость чугуна, производили методом Гаусса – Зейделя [4]. Оптимум по этому методу определяют поочерёдным варьированием каждого фактора при фиксированных значениях других. Для определения рациональных составов угольных шихт были приняты следующие ограничения. Содержание спекающихся углей С принимали равным 10, 5, 3 и 0 %. Для каждого уровня расхода спекающихся углей ограничивали общий расход газовых и жирных углей (Г + Ж): 60, 50, 40, 30 и 20 %. Это соответственно определяло суммарную долю углей марок К + КО. Так при расходе спекающихся углей С = 3 % и общем расходе газовых и жирных углей Г + Ж = 60 % доля коксующихся и коксовых отощённых углей постоянно составляла К + КО = 37 %. Таким образом было реализовано 20 планов оптимизации. В качестве двух меняющихся факторов применяли содержание в шихте газовых Г и коксующихся К углей. Значения факторов Г и К меняли с шагом 5 %. Так как суммы Г + Ж и К + КО оставались постоянными, увеличение на каждые 5 % содержания в шихте углей Г или К автоматически снижало содержание углей Ж и КО на те же 5 %. Для каждого нового состава угольной шихты повторяли расчёт горячей прочности кокса CSR и себестоимости чугуна по предложенной выше методике. На рис. 1 показан один из 20 реализованных планов оптимизации при фиксированных значениях С = 3 %, Г + Ж = 37 %, К + КО = 60 %. Начальными произвольно выбраны условия (0-й расчёт): Г = 30 %, Ж = 30 %, К = 20 %, КО = 17 %, С = 3 %. При таком составе угольной шихты горячая прочность кокса составит CSR = 45,66 %, а себестоимость чугуна – 2526,27 грн./т. Уменьшение доли коксующихся углей до 15 % с одновременным увеличением до 22 % доли углей марки КО при постоянном соотношении количества углей Г и Ж (расчёт № 1) сопровождается снижением CSR кокса до 45,35 % и увеличением себестоимости чугуна до 2532,08 грн.

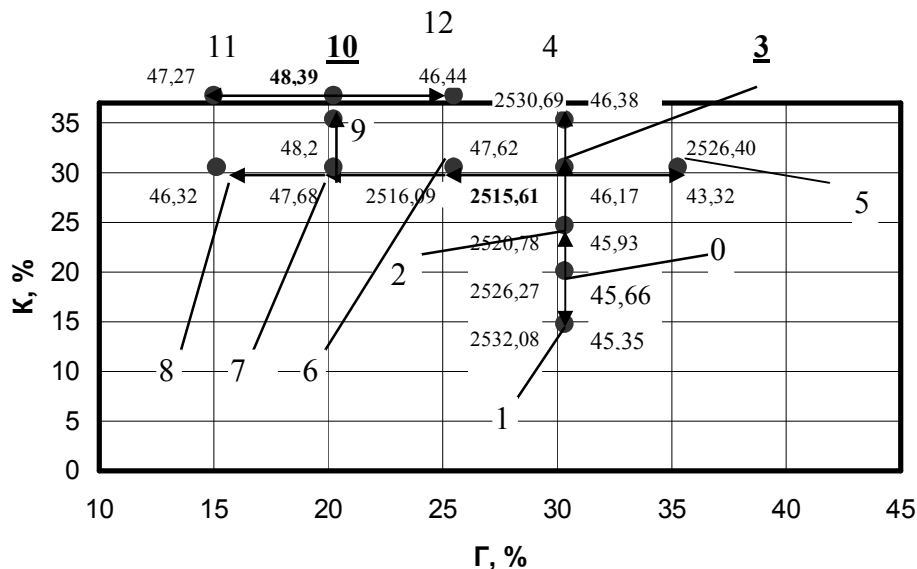


Рис. 1 – План поиска оптимального состава угольной шихты при С = 3 %, Г + Ж = 60 %. Числа у точек: 0 – 12 – порядковые номера расчётов; 45,35 – 48,39 – CSR кокса, %; 2515,61 – 2532,08 – себестоимость чугуна, грн./т

Поэтому было выбрано противоположное направление изменения фактора К (расчёты № 2 – 4). После ухудшения значения параметра оптимизации – себестоимости чугуна в расчёте № 4 вернулись к условиям расчёта № 3 (30 % углей марки К и 17 % углей марки КО), обеспечивающим более низкую себестоимость чугуна, и перешли к варьированию второго фактора. Изменения второго фактора также продолжают до тех пор, пока параметр оптимизации стремится к оптимуму. После ухудшения значения параметра оптимизации необходимо вернуться к условиям предыдущего расчё-

та и возобновить изменения первого фактора. Процедура повторяется до достижения оптимального значения параметра оптимизации, в нашем случае минимальной себестоимости чугуна, или границы факторного поля. Оптимальные условия в плане на рис. достигнуты в расчёте № 3 при составе шихты Г – 30 %, Ж – 30 %, К – 30 %, КО – 7 %, С – 3 %. Минимальная себестоимость чугуна составила 2515,61 грн./т при CSR = 46,17 %. При этом максимальная горячая прочность кокса CSR = 48,39 % достигается при других условиях расчёта № 10 (Г – 20 %, Ж – 40 %, К – 37 %, КО – 0 %, С – 3 %). Однако из-за высокой стоимости угольной шихты и кокса экономия, достигаемая непосредственно в доменном производстве, оказывается меньше дополнительных затрат на стадии получения кокса.

Аналогично выполнен анализ других 19 планов. Рекомендуемые составы угольной шихты, обеспечивающие снижение себестоимости чугуна, представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Рекомендуемые составы угольной шихты, при которых можно ожидать снижения себестоимости чугуна

Состав угольной шихты, %					CSR, %	Цена кокса, грн./т	Расход кокса, кг/т	Производство, %	Себестоимость чугуна, грн/т
Г	Ж	К	КО	ОС+КС					
25	35	30	5	5	46,64	1562,82	491	106,3	2521,93
20	40	35	0	5	47,98	1622,76	484	108,2	2539,66
15	5	0	75	5	54,76	1737,90	449,1	117,7	2532,06
15	5	20	55	5	51,95	1712,40	463,6	113,7	2546,47
30	30	30	7	3	46,17	1541,80	493,3	105,7	2515,61
20	10	15	52	3	49,25	1676,77	477,5	110,0	2554,30
20	0	0	77	3	57,01	1717,14	437,5	120,8	2502,05
15	5	0	77	3	57,40	1743,22	435,6	121,4	2509,92
35	25	30	10	0	47,38	1523,66	487,1	107,3	2496,64
25	35	40	0	0	50,07	1644,00	473,2	111,1	2531,36
30	20	30	20	0	47,0	1571,00	489,0	106,8	2522,98
25	5	30	40	0	52,60	1639,49	460,2	114,7	2506,89
20	0	5	75	0	61,80	1718,70	412,9	127,5	2458,98

Наименьшая себестоимость чугуна достигается при исключении из состава угольной шихты слабоспекающихся углей. В случае введения их в шихту, содержание таких углей должно быть минимальным. Оптимальный состав угольной шихты, обеспечивающий минимальную себестоимость чугуна 2459 грн., включает 20 % газовых углей, 5 % коксующихся и 75 % коксовых отощённых. При этом показатель прочности кокса CSR достигнет 61,8 %. С учётом дефицитности и высокой стоимости углей марки КО представляет интерес состав из 35 % газовых углей, 25 % жирных, 30 % коксующихся и 10 % коксовых отощённых. При умеренном увеличении горячей прочности кокса до 47,38 % снижение себестоимости чугуна достигается за счёт уменьшения стоимости кокса.

Выводы

1. При оптимальном составе угольной шихты коксохимического производства снижение затрат на стадии выплавки чугуна за счёт увеличения качества кокса превышает увеличение его стоимости из-за использования дорогих марок угля. Оптимальному составу угольной шихты соответствует минимальная себестоимость чугуна.
2. Предложено 13 рациональных составов угольных шихт для производства кокса, обеспечивающих повышение горячей прочности CSR кокса с 42,14 до 46,17 – 61,8 % и снижение себестоимости чугуна с 2554,74 до 2458,98 – 2546,47 грн./т.
3. Для повышения горячей прочности кокса содержание спекающихся углей марок ОС и КС в угольной шихте не должно превышать 5 %.

Перечень ссылок

1. Ковальчик Р.В. Изменение интенсивности доменной плавки при использовании кокса с различной горячей прочностью / Р.В. Ковальчик, А.А. Томаш, Ю.А. Зинченко // Металл и литьё Украины. – 2008. – № 7 – 8. – С. 27 – 30.
2. Ковальчик Р.В. Теоретическая оценка влияния горячей прочности кокса CSR на его удельный расход в доменной плавке / Р.В. Ковальчик, А.А. Томаш // Вісник ПДТУ. – Вып. 18. – 2008. – С. 15 – 18.
3. Влияние реакционной способности и «горячей» прочности кокса на технико-экономические показатели доменной плавки в условиях ОАО «МК «Азовсталь» / А.А. Томаш, В.П. Тарасов, Р.В. Ковальчик и др. // Вісник ПДТУ. – Вып. 17. – 2007. – С. 9 – 13.
4. Ковшов В.Н. Оптимизация доменного процесса / В.Н. Ковшов, В.А. Петренко, В.И. Верещак. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 1997. – 108 с.

Рецензент: В.П. Тарасов
д-р техн. наук, проф.

Статья поступила 24.03.2009