

УДК 669.162.26: 669.184.244.66

Сущенко А.В.<sup>1</sup>, Томаш М.А.<sup>2</sup>, Томаш А.А.<sup>3</sup>

### **ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В ЧУГУНЕ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ДОМЕННОГО И КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕССОВ**

*Выполнен анализ влияния содержания кремния в чугуна на расход топливно-энергетических ресурсов при выплавке чугуна и конвертерной стали с учётом затрат тепла на обжиг извести. В основу метода исследования положены расчёты изменения статей тепловых балансов доменной и конвертерной плавки при увеличении содержания кремния в чугуна на 1 кг/т (0,1 %). Установлено увеличение топливно-энергетических затрат на каждой стадии металлургического производства при повышении содержания кремния в чугуна.*

Наибольшие резервы скрытой тепловой энергии для кислородно-конвертерного процесса несёт растворённый в чугуна углерод. Но технологические факторы управления содержанием углерода в чугуна практически отсутствуют. Поэтому при решении задачи оптимизации состава передельного чугуна больше всего внимания уделяют содержанию в нём кремния. Мнения разных авторов о рациональном содержании кремния в чугуна не совпадают. Не вызывает сомнений факт увеличения затрат теплоты на выплавку чугуна при повышении содержания в нём кремния [1]. По данным [2] увеличение содержания кремния в чугуна на каждые 0,1 % требует дополнительных затрат теплоты 22 МДж/т. В то же время окисление кремния чугуна в кислородном конвертере обеспечивает дополнительное выделение тепла при выплавке стали, особенно в начальный период плавки. Авторы [3, 4] показывают, что увеличение содержания кремния в чугуна на 0,1 % позволяет снизить его расход на 5,4 – 7,5 кг/т стали. В книге [4] описывается технология выплавки конвертерной стали в США из чугуна с содержанием Si 1,5 % и увеличенным расходом лома до 29 – 34 %. В то же время авторы статьи [5], ссылаясь на зарубежный опыт, показывают, что оптимальное содержание кремния в передельном чугуна составляет 0,3 – 0,4 %. Таким образом, окончательного мнения о влиянии содержания кремния в чугуна на сталеплавильный процесс не сложилось. Наиболее признанной можно считать позицию [2], согласно которой повышение содержания кремния в чугуна увеличивает затраты тепла на выплавку чугуна, но приносит дополнительное тепло в сталеплавильный процесс в количестве 19,8 МДж/т чугуна на каждые 0,1 % [Si]. Тем не менее, в общем тепловом балансе системы доменная печь – кислородный конвертер увеличение содержания кремния в чугуна ведёт к перерасходу тепловой энергии на 2,94 МДж/т стали на каждые 0,1 % [Si].

Известные количественные оценки влияния содержания кремния в чугуна на энергоёмкость выплавки стали являются весьма приблизительными, так как учитывают лишь отдельные статьи расхода и поступления тепловой энергии: расход тепла на диссоциацию оксида кремния в доменной печи, выделение теплоты при сгорании кремния чугуна в кислородном конвертере и потери тепловой энергии с дополнительным конвертерным шлаком.

Целью анализа является уточнение влияния содержания кремния в чугуна на затраты тепловой энергии в системе доменная печь – конвертер при выплавке чугуна и стали.

В основу анализа положен расчёт изменений статей теплового баланса доменной (табл. 1) и кислородно-конвертерной (табл. 2) плавки при увеличении содержания кремния в чугуна на 0,1 % (1 кг/т). Наибольшее увеличение затрат тепловой энергии на выплавку 1 т чугуна требует диссоциация SiO<sub>2</sub> (статья 1, табл. 1). Второй по величине статьёй дополнительного расхода тепла на выплавку чугуна является изменение его физического нагрева (ст. 3).

<sup>1</sup>ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

<sup>2</sup>ПГТУ, студент

<sup>3</sup>ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

Таблица 1 – Изменение расхода теплоты на выплавку 1 т чугуна при увеличении содержания кремния на 0,1 % (1 кг/т чугуна)

№	Статьи	На 1 кг Si в чугуне	
		МДж	%
<b>Увеличение расхода теплоты</b>			
1	Диссоциация SiO <sub>2</sub> до Si по реакции SiO <sub>2</sub> +2C=Si+2CO, Q <sub>дис</sub> = 870,76 МДж/кмоль. 28 – молярная масса кремния, кг/кмоль	870,76/28 = = 31,1	38,54
2	Физическое тепло дополнительного колошникового газа (t = 250 °С):		
2.1	- продукта восстановления Si: 2·22,4/28 = 1,6 м <sup>3</sup> , где 22,4 - объём 1 кмоль газа (н.у.), м <sup>3</sup> . 1,535 – теплоёмкость колошникового газа, кДж/(м <sup>3</sup> ·°С)	1,6·1,535* *250/1000=0,6	0,74
2.2	-продукта газификации углерода, не растворившегося в чугуне: 0,244·22,4/12 = 0,46 м <sup>3</sup> , где 12 - молярная масса углерода, кг/кмоль	0,46·1,535* *250/1000=0,2	0,25
2.3	-уменьшения выхода газа из-за снижения расхода известняка при CaO/SiO <sub>2</sub> шлака 1,25: 1,25·(60/28)·(22,4/56) = 1,07 м <sup>3</sup> , где 60 и 56 – молярные массы SiO <sub>2</sub> и CaO, кг/кмоль. 1,826 - теплоёмкость CO <sub>2</sub> , кДж/(м <sup>3</sup> ·°С)	-1,07·1,826* *250/1000 = = -0,5	-0,62
	Всего тепла дополнительного колошникового газа	<b>0,3</b>	<b>0,37</b>
3	Увеличение нагрева чугуна на 28,6 °С. 0,85 – средняя теплоёмкость чугуна и стали, кДж/(кг·°С) [6]	28,6·0,85 = = 24,3	30,11
4	Увеличение потерь тепла в систему охлаждения (7 % от суммы статей 1- 4, 6, 7): 31,1+0,3+24,3-9,0-8,5 = 38,2 МДж	38,2·7/93 = = 2,9	3,59
5	Потенциальное химическое тепло колошникового газа (K <sub>с</sub> = 65 %) – 35 % от суммы статей 1 – 7: 31,1+0,3+24,3+2,9-9,0-8,5 = 41,1 МДж	41,1·35/65= = 22,1	27,39
	<b>Сумма</b>	<b>80,7</b>	<b>100,00</b>
<b>Уменьшение расхода теплоты</b>			
6	За счёт уменьшения выхода шлака с энтальпией 1,871 МДж/кг [6] на (1+1,25)·(60/28) = 4,82 кг	1,871·4,82= = 9,0	20,79
7	На разложение известняка при сокращении расхода на 1,25* (60/28)·(100/56) = 4,78 кг, где 100 – молярная масса CaCO <sub>3</sub> . 177,8 – затраты тепла на разложение 1 кмоль CaCO <sub>3</sub> , МДж	177,8·4,78/100= = 8,5	19,63
8	Уменьшение потенциального тепла [С], растворённого в чугуне (0,244 кг). 400,4 – теплота полного сгорания С, МДж/кмоль	(400,4/12)* *0,244 = 8,1	18,71
9	Использование теплоты сгорания колошникового газа (80 % статьи 5)	0,8·22,1= 17,7	40,87
	<b>Сумма</b>	<b>43,3</b>	<b>100,00</b>
	Увеличение расхода теплоты на выплавку 1 т чугуна	<b>37,4</b>	

Увеличение температуры чугуна на каждые 10 °С повышает содержание в нём кремния на 0,035 % [6]. Для увеличения содержания Si в чугуне на 0,1 % необходимо повысить его температуру на 10·0,1/0,035 = 28,6 °С. Наряду с увеличением затрат тепла наблюдается сокращение некоторых расходных статей теплового баланса доменной плавки при повышении содержания кремния в чугуне: за счёт уменьшения выхода шлака при восстановлении 1 кг кремния в металл (ст. 6) и сокращения расхода сырого известняка на офлюсование восстановившегося SiO<sub>2</sub> (ст. 7). Повышение содержания в чугуне Si, элемента, препятствующего образованию карбидов, на каждые 0,1 % приводит к снижению содержания углерода в сплаве на 0,0244 % (0,244 кг/т чугуна) [6]. Это отражается в изменении теплового баланса доменной плавки уменьшением потенциального тепла углерода, растворённого в чугуне (ст. 8). Восстановление дополнительного 1 кг Si и газификация не растворившегося в чугуне 0,244 кг углерода увеличивает выход колошникового газа с температурой 200 – 300 °С и количества уносимой им теплоты.

Таблица 2 – Изменение расхода теплоты на выплавку 1 т стали в конвертере при удельном расходе чугуна 0,86 т/т и увеличении содержания кремния в чугуне на 0,1 %

№	Статьи	На 1 кг Si в чугуне		На 1 т стали	
		МДж	%	МДж	%
<b>Дополнительный приход теплоты</b>					
1	Окисление кремния $Si+O_2=SiO_2+870,76$ МДж/кмоль	$870,76/28 = 31,1$	<b>48,29</b>	<b>26,7</b>	<b>48,28</b>
2	Повышение температуры чугуна на $24,8^{\circ}C$	$24,8 \cdot 0,85 = 21,1$	<b>32,76</b>	<b>18,1</b>	<b>32,73</b>
3	Дополнительная теплота шлакообразования [7]	<b>2,1</b>	<b>3,26</b>	<b>1,8</b>	<b>3,25</b>
4	Тепло окисления Fe с переходом оксидов в шлак с $CaO/SiO_2 = 3,0$ : $(1+3,0) \cdot (60/28) \cdot (20/80) = 2,14$ кг. 3,7; 5,1 – теплота окисления Fe до FeO и Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , МДж/кг оксида	$(0,7 \cdot 2,14 \cdot 3,7 + 0,3 \cdot 2,14 \cdot 5,1) = 8,8$	<b>13,66</b>	<b>7,6</b>	<b>13,74</b>
5	Уменьшение физического тепла газа за счёт уменьшения [C], растворённого в чугуне, ( $0,46$ м <sup>3</sup> , $t=1680^{\circ}C$ ). 1,617 – теплоёмкость конвертерного газа, кДж/(м <sup>3</sup> ·°C)	$0,46 \cdot 1,617 \cdot 1680/1000 = 1,3$	<b>2,03</b>	<b>1,1</b>	<b>2,00</b>
<b>Сумма</b>		<b>64,4</b>	<b>100,00</b>	<b>55,3</b>	<b>100,00</b>
<b>Дополнительный расход теплоты</b>					
6	Увеличение расхода тепла со шлаком ( $t=1680^{\circ}C$ ): $(1+3,0) \cdot (60/28) \cdot (100/80) = 10,7$ кг. 1,2 – теплоёмкость шлака, кДж/(кг·°C)	$10,7 \cdot 1,2 \cdot 1680 : 1000 = 21,6$	<b>32,24</b>	<b>18,6</b>	<b>32,24</b>
7	Недополученное тепло [C] чугуна (0,244 кг) при окислении 85 % до CO и 15 % до CO <sub>2</sub> . 117,8 – теплота окисления C до CO, кДж/моль	$(0,15 \cdot 400,4 + 0,85 \cdot 117,8) \cdot 0,244/12 = 3,2$	<b>4,78</b>	<b>2,8</b>	<b>4,84</b>
8	Потери тепла в конвертере (1,5 % от суммы статей 1 – 7 [7])	$(64,4 - 21,6 - 3,2) \cdot 1,5/100 = 0,6$	<b>0,90</b>	<b>0,5</b>	<b>0,87</b>
9	Обжиг извести в ИОЦ с расходом природного газа (ПГ) 0,19 м <sup>3</sup> /кг извести. Дополнительный расход CaO: $3,0 \cdot 60/28 = 6,42$ кг. 34 – теплота сгорания ПГ, МДж/м <sup>3</sup>	$6,42 \cdot 0,19 \cdot 34 = 41,6$	<b>62,08</b>	<b>35,8</b>	<b>62,05</b>
<b>Сумма</b>		<b>67,0</b>	<b>100,00</b>	<b>57,7</b>	<b>100,00</b>
Увеличение расхода теплоты на выплавку 1 т стали с учётом обжига извести		<b>2,6</b>		<b>2,4</b>	
Общее увеличение расхода тепла на металлургическом предприятии на 1 т стали		<b>40,0</b>		<b>34,6</b>	

Снижение выхода колошникового газа за счёт сокращения расхода сырого известняка не компенсирует увеличения его объёма при восстановлении кремния и газификации углерода (ст. 2). Увеличение потерь тепла в систему охлаждения принято в количестве 7 % от дополнительного расхода теплоты (ст. 4). Неиспользованная химическая энергия доменного газа рассчитана с учётом коэффициента использования углерода  $K_C = 100 \cdot (Q_{CO_2} + Q_{CO}) / (Q_{CO_2} + 3,39Q_{CO}) = 65$  %, где  $Q_{CO_2}$  и  $Q_{CO}$  – тепло окисления углерода до CO<sub>2</sub> и CO, МДж (ст. 5). Принято, что 80 % доменного газа используется металлургическим предприятием в качестве топлива (ст. 9). В соответствии со статьями 1 – 4 теплового баланса (табл. 1) повышение содержания кремния в чугуне на каждые 0,1 % сопровождается увеличением удельного расхода кокса на 5,92 кг/т чугуна или на 1,2 %, что полностью соответствует современным представлениям [1] и подтверждает корректность выполненного анализа. Его результаты являются полностью прогнозируемыми: повышение содержания Si в чугуне на 0,1 % приводит к перерасходу топливно-энергетических ресурсов в доменной плавке на 37,4 МДж/т сплава.

Основными статьями дополнительного прихода теплоты в конвертерной плавке (табл. 2) при повышении содержания кремния в чугуна является его окисление (ст. 1) и увеличение энthalпии чугуна (ст. 2). Из опыта работы отечественных металлургических предприятий принято, что потери тепла при транспортировке чугуна составляют 13 % и его температура перед конвертером увеличивается на  $0,87 \cdot 28,6 = 24,8$  °C/kg [Si]. При расчёте теплоты окисления дополнительного железа (ст. 4) принято, что 30 % Fe окисляется до Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а 70 % - до FeO при содержании оксидов железа в шлаке 20 %. Наряду с дополнительными затратами тепла со шлаком (ст. 6) учтено снижение поступления теплоты из-за сокращения количества углерода в чугуна (ст. 7) и сокращение потерь физического тепла с отходящими газами (ст. 5). При удельном расходе чугуна 860 кг/т стали дополнительный приход тепла непосредственно в конвертерную плавку составит 33,4 МДж/т стали на каждые 0,1 % Si в чугуна. Однако, с учетом затрат тепла на обжиг дополнительной извести, необходимой для обеспечения требуемой основности шлака, указанный приход теплоты нивелируется и даже становится отрицательным. В условиях ОАО "МК "Азовсталь" для обжига 1 т извести во вращающихся печах известково-обжигательного цеха (ИОЦ) расходуется 190 м<sup>3</sup> природного газа. В этом случае дополнительные затраты тепловой энергии на выплавку 1 т стали составят 2,4 МДж. Общее увеличение расхода тепловой энергии на предприятии в системе доменная печь – конвертер – ИОЦ при повышении содержания кремния в чугуна на каждые 0,1 % составляет 34,6 МДж/т стали.

Таким образом, с точки зрения энерго-ресурсосбережения при производстве чугуна и стали на металлургическом предприятии необходимо стремиться к минимально возможному содержанию кремния в чугуна. Последнее определяется технологическими условиями доменного и конвертерного процессов: стабильностью теплового состояния горна, недопущения аварийного похолодания и закосления доменной печи, условиями шлакообразования и рафинирования стали в конвертере, температурным режимом выплавки стали.

#### *Выводы*

1. Увеличение содержания кремния в чугуна повышает топливно-энергетические затраты на каждой стадии металлургического производства. Повышение [Si] чугуна на 0,1 % приводит к увеличению расхода тепла в доменном производстве на 37,4 МДж/т чугуна, в конвертерном производстве с учётом затрат теплоты на обжиг извести – на 2,4 МДж/т стали. Общее увеличение затрат тепла на производство 1 т стали на предприятии составляет 34,6 МДж.
2. Для минимизации расхода топливно-энергетических ресурсов при производстве стали на металлургическом предприятии необходимо стремиться к минимально возможному содержанию кремния в чугуна, которое определяется технологическими условиями получения, транспортировки, внепечной обработки чугуна и выплавки стали. В современных условиях работы отечественных металлургических комбинатов эта величина составляет 0,40 – 0,50 %.

#### *Перечень ссылок*

1. *Товаровский И.Г.* Анализ показателей и процессов доменной плавки / *И.Г. Товаровский, В.В. Севернюк, В.П. Лялюк.* – Днепропетровск: Пороги, 2000. – 420 с.
2. *Буторина И.В.* Основы устойчивого развития металлургической отрасли / *И.В. Буторина.* – Донецк: Каштан, 2005. – 332 с.
3. *Баптизманский В.И.* Тепловая работа кислородных конвертеров / *В.И. Баптизманский, Б.М. Бойченко, В.П. Черевко.* – М.: Металлургия, 1988. – 174 с.
4. *Старов Р.В.* Производство стали в конвертерах / *Р.В. Старов, В.А. Нагорский.* – К.: Техника, 1987. – 167 с.
5. *Афонин С.З.* Перспективы развития новых процессов конвертерного производства стали / *С.З. Афонин, П.И. Югов, В.М. Журавлёв* // *Сталь.* – 1987. – № 11. – С. 29 – 31.
6. Доменное производство: Справочник в 2 т. – Т.1. Подготовка руд и доменный процесс. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.
7. *Якушев А.М.* Справочник конвертерщика / *А.М. Якушев.* – Свердловск: Металлургия, 1990. – 288 с.

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 12.01.2009