

А. Л. Чайка, А. Г. Чернятевич, А. А. Сохацкий, А. А. Москалина, Т. С. Голуб,
Л. С. Молчанов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В ЧУГУНЕ И ЕГО ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМЫ «ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ-КОНВЕРТЕР»

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

Целью работы является исследование энергоемкости металлопродукции в системе «доменная печь – кислородный конвертер» при освоении пылеугольного топлива (ПУТ) в доменном производстве. Одним из параметров, характеризующим термодинамические показатели доменной плавки, является содержание кремния в жидком чугуна. Выполнено исследование влияния содержания кремния в чугуна и его температуры на показатели работы и термодинамические показатели выплавки стали в технологической цепи «доменный – кислородно-конвертерный цех» при освоении пылеугольного топлива в доменном цехе. Рассчитаны предельные минимальные и максимальные значения изменения производительности и расхода кокса, и эксергетических показателей при изменении содержания кремния в чугуна. Установлено, что уменьшение содержания кремния и температуры чугуна в доменной печи позволяет уменьшить потери эксергии, увеличить эксергетические КПД, сохранить на постоянном уровне или улучшить экологические показатели. Однако уменьшение температуры чугуна может привести к существенным расстройкам в работе доменной печи. Показано, что наибольшее влияние в технологической системе «доменный – кислородно-конвертерный цех» оказывает содержания кремния в чугуна, уменьшение которого способствует увеличению эксергетических КПД, уменьшению эксергетических потерь и улучшению экологических показателей. Температура чугуна на эксергетические и экологические показатели в системе «доменный – кислородно-конвертерный цех» оказывает незначительное влияние, однако, уменьшение температуры чугуна может привести к существенным расстройкам в работе комплекса «доменная печь – кислородный конвертер».

Ключевые слова: доменная печь, кислородный конвертер, ПУТ, содержание кремния в чугуна, температура чугуна, эксергетические и экологические показатели

Состояние вопроса. Особенность работы энерготехнологического комплекса «доменная печь – кислородный конвертер» заключается в необходимости одновременного учета большого количества потребителей и источников энергии различного потенциала и различной физико-химической природы.

Основную долю энергии (до ~90%) в технологической цепи «доменная печь – кислородный конвертер» потребляет доменная печь с ее развитой инфраструктурой: коксохимическим, агломерационным и энергетическим производствами [1, 2]. Поэтому производство чугуна в

данной технологической цепи энергопотребления является определяющим звеном в ресурсосбережении.

Изолированное рассмотрение использования энергии по агрегатам (доменная печь, кислородный конвертер) без учета их энерготехнологических связей не обеспечивает достижения рациональных решений и получения глобального экономического оптимума при выплавке стали. Актуальной задачей является уменьшение энергоемкости металлопродукции в системе «доменная печь – кислородный конвертер» при освоении пылеугольного топлива (ПУТ) в доменном производстве. Это связано с тем, что при освоении ПУТ происходят изменения в тепловой работе доменной печи, в частности изменение температуры чугуна и содержания в нем кремния.

Целью работы является исследование энергоемкости металлопродукции в системе «доменная печь – кислородный конвертер» при освоении пылеугольного топлива (ПУТ) в доменном производстве.

Изложение основных результатов исследования. Исследования, приведенные в статье, выполнены по фактическим среднегодовым данным работы доменного и кислородно-конвертерного цехов одного из передовых металлургических предприятий полного цикла Украины при освоении на нем ПУТ в доменном производстве.

Составление эксергетических балансов комплекса «доменная печь – кислородный конвертер» выполнялось с использованием модернизированных методик в условиях применения ПУТ применительно к существующим условиям работы [3-12]. Составление эксергетических балансов в технологической цепи «доменная печь – кислородный конвертер» выполнено поэтапно, отдельно для доменного и кислородно-конвертерного цехов, а затем выполнен их синтез и составлен эксергетический баланс системы «доменная печь – кислородный конвертер».

Доменный цех включает 4 доменные печи суммарным полезным объемом 6953 м³, выплавляющие передельный чугун со следующим среднегодовым химическим составом: С = 4,35%, Si = 0,74%, Mn = 0,14%, S = 0,016%, P = 0,069% и средней температурой чугуна на желобе 1490⁰С. Конвертерный цех включает в себя 2 конвертера емкостью по 350 т каждый, перерабатывающие этот чугун.

Изложение основных материалов исследования.

Эксергетический баланс доменного цеха. Расчеты влияния содержания кремния при изменении его содержания в чугуне от 0,74% до 0,34% и температурах чугуна на выпуске 1420 и 1490⁰С соответственно на эксергетические показатели доменного цеха выполнены в двух вариантах (таблица 1).

В первом варианте оценка влияния содержания кремния на производительность и расход кокса выполнена с использованием

теплоэнергетической модели И.Д. Семикина [13, 14], а во втором – с использованием данных И.Г. Товаровского и Е.Ф. Вегмана [15, 16].

Таблица 1 – Прогнозные эксергетические показатели доменного цеха при изменении температуры и содержания кремния в чугуна*

Температура чугуна	⁰ С	1490	1420
Содержание кремния в чугуна	%	0,74-0,34	0,74-0,34
Технико-экономические показатели:			
производительность печи	т/час	<u>458 – 465</u> 458 – 480	<u>469 – 476</u> 469 – 492
расход кокса	кг/т	<u>496 – 492</u> 496 – 472	<u>492 – 487</u> 492 – 468
расход природного газа	м ³ /т	<u>35 – 34</u> 35 – 35	<u>34 – 33</u> 34 – 34
расход ПУТ	кг/т	<u>39 – 38</u> 39 – 39	<u>38 – 37</u> 38 – 38
расход условного топлива	кг/т	<u>581 – 575</u> 581 – 557	<u>574 – 568</u> 574 – 551
Эксергетический баланс:			
Приход эксергии (МДж/т чугуна):			
термическая** эксергия дутья	МДж/т	<u>1498 – 1477</u> 1498 – 1429	<u>1463 – 1443</u> 1463 – 1394
термическая** эксергия природного газа	МДж/т	<u>1456 – 1434</u> 1456 – 1434	<u>1422 – 1400</u> 1422 – 1400
Химические эксергии:			
кокса	МДж/т	<u>16255 – 16105</u> 16255 – 15465	<u>16110 – 15960</u> 16110 – 15333
ПУТ	МДж/т	<u>1217 – 1200</u> 1217 – 1200	<u>1190 – 1172</u> 1190 – 1172
ЖРС	МДж/т	<u>473 – 473</u> 473 – 473	<u>473 – 473</u> 473 – 473
известняка	МДж/т	<u>6 – 6</u> 6 – 6	<u>6 – 6</u> 6 – 6
Всего приход эксергии	МДж/т	<u>20905 – 20695</u> 20905 – 20007	<u>20663 – 20455</u> 20663 – 19780
Эксергия продуктов плавки (МДж/т чугуна):			
Термические эксергии**:			
чугун	МДж/т	<u>8998 – 8910</u> 8998 – 8910	<u>8950 – 8862</u> 8950 – 8862
шлак	МДж/т	<u>788 – 788</u> 788 – 788	<u>758 – 758</u> 758 – 758
колошниковый газ	МДж/т	<u>7270 – 7190</u> 7270 – 7190	<u>7175 – 7095</u> 7175 – 7095
колошниковая пыль	МДж/т	<u>476 – 476</u> 476 – 476	<u>476 – 476</u> 476 – 476

<i>(продолжение таблицы 1)</i>			
Всего выход эксергии	МДж/т	$\frac{17533 - 17365}{17533 - 17365}$	$\frac{17358 - 17190}{17358 - 17190}$
Потери эксергии	МДж/т	$\frac{3370 - 3330}{3370 - 2643}$	$\frac{3305 - 3266}{3305 - 2590}$
Эксергетические КПД:			
термодинамическое совершенство доменного процесса	%	$\frac{83,9 - 83,9}{83,9 - 86,8}$	$\frac{84,0 - 84,0}{84,0 - 86,9}$
технологический КПД	%	$\frac{43,0 - 43,1}{43,0 - 44,5}$	$\frac{43,3 - 43,3}{43,3 - 44,8}$
обобщенный КПД производства чугуна	%	$\frac{55,8 - 55,9}{55,8 - 57,8}$	$\frac{56,2 - 56,3}{56,2 - 58,2}$
Экологические показатели:			
экологоемкость	доли	$\frac{0,06 - 0,07}{0,06 - 0,07}$	$\frac{0,06 - 0,06}{0,06 - 0,06}$
ресурсоемкость	доли	$\frac{1,30 - 1,31}{1,30 - 1,26}$	$\frac{1,30 - 1,30}{1,30 - 1,26}$
коэффициент экологичности	доли	$\frac{0,72 - 0,72}{0,72 - 0,74}$	$\frac{0,72 - 0,72}{0,72 - 0,74}$

* числитель – с использованием теплоэнергетической модели И.Д. Семикина, знаменатель – с использованием данных И.Г. Товаровского и Е.Ф. Вегмана;

** сумма физической и химической эксергий.

В первом варианте расчета с использованием теплоэнергетической модели И.Д. Семикина при уменьшении содержания кремния в чугуне на 0,1% при прочих равных условиях учитывалось, что производительность печи увеличивается на $\sim 0,3 \div 0,4\%$, а расход кокса уменьшается на $\sim 0,2 \div 0,3\%$. Во втором варианте расчета с использованием данных И.Г. Товаровского и Е.Ф. Вегмана при уменьшении содержания кремния в чугуне на 0,1% производительность печи увеличивается на $\sim 1,2\%$, а расход кокса уменьшается $\sim 1,2\%$. По данным других источников уменьшение содержания кремния в чугуне на 0,1% приводит к увеличению производительности печи на 0,4-0,8% и уменьшению расхода кокса на 0,5-1,0% [17-19]. Следовательно, рассмотренные варианты расчета учитывают предельные минимальные и максимальные значения изменения производительности и расхода кокса, и эксергетических показателей при изменении содержания кремния в чугуне.

По результатам выполненных расчетов показано, что уменьшение содержания кремния в чугуне на 0,1% приводит к:

- увеличению производительности печи на $\sim 0,3 \div 1,2\%$;
- уменьшению расхода кокса, условного топлива и суммарного топлива на $\sim 0,2 \div 1,2\%$;
- увеличению термодинамического совершенства доменного процесса на $\sim 0 \div 0,7\%$;

- увеличению технологического КПД и обобщенного КПД производства чугуна на $\sim 0 \div 0,5\%$;
- сохранению экологоемкости;
- уменьшению ресурсоемкости и увеличению коэффициента экологичности на $\sim 0 \div 0,8\%$.

Уменьшение температуры чугуна на 50°C приводит к:

- увеличению термодинамического совершенства доменного процесса на $\sim 0,1\%$;
- увеличению технологического КПД на $\sim 0,2\%$;
- увеличению обобщенного КПД производства чугуна на $\sim 0,3\%$;
- сохранению на постоянном уровне экологических показателей.

Обобщение полученных результатов эксергетического анализа влияния содержания кремния в чугуне и температуры чугуна на эксергетические показатели доменного цеха показывают, что уменьшение содержания кремния и температуры чугуна в доменной печи позволяет уменьшить потери эксергии, увеличить эксергетические КПД, сохранить на постоянном уровне или улучшить экологические показатели. Однако уменьшение температуры чугуна может привести к существенным расстройствам в работе доменной печи.

Эксергетический баланс кислородно-конвертерного цеха. Влияние изменения содержания кремния в чугуне от $0,74\%$ до $0,34\%$ с температурой чугуна на выпуске из доменной печи 1420°C и 1490°C соответственно на эксергетические показатели кислородно-конвертерного цеха приведены в таблице 2. Принято, что температура чугуна при заливке в конвертер уменьшается на $\sim 100^{\circ}\text{C}$, что соответствует практике отечественного сталеплавильного производства и связано с тепловыми потерями при его транспортировке [20].

Эксергетический анализ конвертерных плавов показал, что уменьшение содержания кремния в чугуне на $0,1\%$ и уменьшение температуры чугуна на 50°C в условиях компенсации разницы тепла изменением соотношения шихтовых материалов (т.е. при уменьшении температуры и содержания кремния в нем производят увеличение его доли в завалке) практически не сопровождается изменениями в приходе и выходе эксергии, однако такие изменения приводят к уменьшению величины эксергетических потерь процесса конвертирования на $8-15\%$ и $5-9\%$ соответственно.

По результатам выполненных прогнозных расчетов эксергетических показателей установлено, что уменьшение содержания кремния в чугуне приводит к увеличению показателей термодинамического совершенства и технологического КПД процесса конвертирования, а также коэффициента экологичности. При этом показатели экологоемкости и ресурсоемкости незначительно уменьшаются. Уменьшение температуры чугуна на 50°C

практически не отражается на изменении показателей эксергетических КПД и экологических показателей.

Таблица 2. Эксергетический баланс конвертерного цеха

Температура чугуна	на выпуске ДП	$^{\circ}\text{C}$	1490	1420
	перед заливкой в конвертер	$^{\circ}\text{C}$	1390	1320
Содержание кремния в чугуне		%	0,74 – 0,34	0,74 – 0,34
Доля чугуна в конвертере		%	85,4 – 86,6	88,5 – 89,8
Эксергетический баланс				
Приход эксергии (МДж/т стали):				
чугун		МДж/т	7622 – 7662	7853 – 7898
миксерный шлак		МДж/т	2 – 2	2 – 2
кислород		МДж/т	18 – 17	19 – 18
Химические эксергии:				
лом		МДж/т	1747 – 1570	1546 – 1359
известь		МДж/т	130 – 70	132 – 68
плавиковый шпат		МДж/т	3 – 3	3 – 3
футеровка		МДж/т	5 – 5	5 – 5
Всего приход эксергии		МДж/т	9527 – 9329	9560 – 9353
Эксергия продуктов плавки (МДж/т стали):				
сталь		МДж/т	7945 – 7937	7953 – 7945
шлак		МДж/т	258 – 155	272 – 148
отходящие газы		МДж/т	827 – 852	845 – 882
окислы железа пыли		МДж/т	20 – 18	20 – 18
корольки шлака		МДж/т	81 – 72	81 – 72
выносы		МДж/т	81 – 72	81 – 72
Всего выход эксергии		МДж/т	9212 – 9106	9252 – 9137
Потери эксергии		МДж/т	315 – 223	308 – 216
Эксергетические КПД:				
термодинамическое совершенство конвертерного процесса		%	96,7 – 97,7	96,8 – 97,7
технологический КПД		%	83,4 – 85,1	83,2 – 84,9
Экологические показатели:				
экологоемкость		доли	0,15 – 0,14	0,15 – 0,14
ресурсоемкость		доли	1,20 – 1,17	1,20 – 1,18
коэффициент экологичности		доли	0,71 – 0,73	0,70 – 0,73

Эксергетический баланс комплекса «доменная печь – кислородный конвертер». С использованием составленных эксергетических балансов доменного и конвертерного цехов выполнен их синтез и составлен эксергетический баланс системы «доменная печь – кислородный конвертер» в двух вариантах, с использованием полученных результатов по теплоэнергетической модели И.Д. Семикина и данных

И.Г. Товаровского и Е.Ф. Вегмана. Результаты расчетов эксергетического баланса системы «доменная печь – кислородный конвертер» приведены в таблице 3.

Таблица 3. Эксергетический баланс системы «доменный – кислородно-конвертерный цех»*

Температура чугуна, °С	выпуск из ДП	1490	1420
	загрузка в конвертер	1390	1320
Содержание кремния в чугуне, %		0,74 – 0,34	0,74 – 0,34
Приход термической эксергии**, МДж/т стали:			
дутье		1280 – 1280	1295 – 1295
		1280 – 1238	1295 – 1250
природный газ		<u>1243 – 1243</u>	<u>1260 – 1260</u>
		1243 – 1243	1260 – 1260
кокс		<u>13882 – 13955</u>	<u>14260 – 14325</u>
		13882 – 13400	14260 – 13760
ПУТ		<u>1040 – 1040</u>	<u>1052 – 1052</u>
		1040 – 1040	1052 – 1052
ЖРС		<u>404 – 410</u>	<u>419 – 425</u>
		404 – 412	419 – 425
известняк		<u>5 – 5</u>	<u>5 – 5</u>
		5 – 5	5 – 5
миксерный шлак		<u>2 – 2</u>	<u>2 – 2</u>
		2 – 2	2 – 2
кислород		<u>18 – 17</u>	<u>19 – 18</u>
		18 – 17	19 – 18
лом		<u>1747 – 1570</u>	<u>1545 – 1360</u>
		1747 – 1570	1545 – 1360
известь		<u>130 – 70</u>	<u>132 – 68</u>
		130 – 70	132 – 68
плавиковый шпат		<u>3 – 3</u>	<u>3 – 3</u>
		3 – 3	3 – 3
футеровка		<u>5 – 5</u>	<u>5 – 5</u>
		5 – 5	5 – 5
Всего приход эксергии		<u>19760 – 19597</u>	<u>19995 – 19815</u>
		19760 – 19002	19995 – 19208
Термическая эксергия продуктов плавки**, МДж/т стали:			
доменный шлак		<u>673 – 683</u>	<u>671 – 680</u>
		673 – 683	671 – 680
доменный газ		<u>6210 – 6230</u>	<u>6351 – 6367</u>
		6210 – 6230	6351 – 6367
пыль в доменном газе		<u>407 – 412</u>	<u>421 – 427</u>
		407 – 412	421 – 427
сталь		<u>7945 – 7937</u>	<u>7953 – 7945</u>
		7945 – 7937	7953 – 7945

<i>Продолжение таблицы 3</i>		
конвертерный шлак	<u>258 – 155</u> 258 – 155	<u>272 – 148</u> 272 – 148
отходящие газы	<u>827 – 852</u> 827 – 852	<u>845 – 882</u> 845 – 882
окислы железа пыли	<u>20 – 18</u> 20 – 18	<u>20 – 18</u> 20 – 18
корольки шлака	<u>81 – 72</u> 81 – 72	<u>81 – 72</u> 81 – 72
выносы	<u>81 – 72</u> 81 – 72	<u>81 – 72</u> 81 – 72
Всего выход эксергии	<u>16500 – 16430</u> 16500 – 16430	<u>16695 – 16610</u> 16695 – 16610
Потери эксергии	<u>3260 – 3167</u> 3260 – 2570	<u>3300 – 3205</u> 3300 – 2600
Эксергетические КПД, %:		
термодинамическое совершенство	<u>83,5 – 83,8</u> 83,5 – 86,5	<u>83,5 – 83,8</u> 83,5 – 86,5
технологический КПД	<u>40,2 – 40,5</u> 40,2 – 41,8	<u>39,8 – 40,1</u> 39,8 – 41,4
Экологические показатели, доли***:		
экологоемкость	<u>0,17 – 0,16</u> 0,17 – 0,16	<u>0,17 – 0,16</u> 0,17 – 0,16
ресурсоемкость	<u>1,40 – 1,38</u> 1,40 – 1,34	<u>1,40 – 1,38</u> 1,40 – 1,34
коэффициент экологичности	<u>0,60 – 0,61</u> 0,60 – 0,63	<u>0,60 – 0,61</u> 0,60 – 0,63

* числитель – с использованием теплоэнергетической модели И.Д. Семикина, знаменатель – с использованием данных И.Г. Товаровского и Е.Ф. Вегмана;

** сумма физической и химической эксергии;

*** за единицу полезной продукции принята сумма термических эксергий стали и колошниковога газа.

Эксергетический анализ влияния содержания кремния на эксергетические показатели системы «доменная печь – кислородный конвертер» показал, что уменьшение содержания кремния в чугуна на 0,1% приводит к:

- уменьшению расхода эксергии на ~0,1-0,2%;
- уменьшению потерь эксергии на ~0,5-6%;
- увеличению эксергетического и технологического КПД на ~0,1-0,8%;
- сохранению экологоемкости;
- уменьшению ресурсоемкости и увеличению коэффициента экологичности на ~1,0%.

Уменьшение температуры чугуна на 50⁰С приводит к:

- увеличению выхода эксергии на $\sim 0,9\%$ в основном за счет увеличения химической эксергии колошникового газа на тонну стали;
- увеличению потерь эксергии на $\sim 1,0\%$;
- сохранению термодинамического совершенства;
- незначительному уменьшению технологического КПД на $\sim 0,3\%$;
- сохранению экологоемкости, ресурсоемкости и коэффициента экологичности.

Анализ эксергетических балансов системы «доменный – кислородно-конвертерный цех» показал, что среди двух факторов содержания кремния в чугуне и температуры чугуна наибольшее влияние оказывает содержание кремния в чугуне, уменьшение которого способствует уменьшению расхода энергетических ресурсов и эксергетических потерь, увеличению производства и улучшению экологических показателей. Температура чугуна на эксергетические и экологические показатели в системе «доменный – кислородно-конвертерный цех» оказывает незначительное влияние, однако, уменьшение температуры чугуна может привести к существенным расстройством в работе комплекса «доменная печь – кислородный конвертер».

Для улучшения экологичности работы комплекса «доменная печь – кислородный конвертер» целесообразны мероприятия по уменьшению величины потерь тепла чугуна при транспортировке и по рациональному использованию энергии отходящих газов и воды систем охлаждения.

Стратегически важным для улучшения энергоэффективности работы комплекса «доменный – кислородно-конвертерный цех» в условиях применения ПУТ в доменном производстве является уменьшение содержания кремния в чугуне до уровня, не допускающего расстройств тепловой работы печи.

Заключение. По результатам работы адаптирована и модернизирована методика эксергетического анализа энергоиспользования системы «доменная печь – кислородный конвертер» к современным условиям применения ПУТ, позволяющая в единицах эксергии оценить эффективность влияния технологических, шихтовых, организационных и иных мероприятий на ее функционирование.

Стратегически важным для улучшения энергоэффективности работы комплекса «доменный – кислородно-конвертерный цех» в условиях применения ПУТ в доменном производстве является уменьшение содержания кремния в чугуне до уровня, не допускающего расстройств тепловой работы печи.

Анализ эксергетического баланса комплекса «доменная печь – кислородный конвертер» показал, что:

- уменьшение содержания кремния в чугуне на $0,1\%$ приводит к уменьшению потерь эксергии на 18-180 МДж/т стали, что эквивалентно

уменьшению расхода условного топлива на 0,5-6,0 кг/т стали, увеличению производства чугуна на $\sim 0,3 \div 1,2\%$;

- увеличение температуры чугуна на 50⁰С в доменной печи приводит к уменьшению эксергетических потерь на 26-29 МДж/т стали, что эквивалентно уменьшению расхода условного топлива на 0,9-1,0 кг/т стали.

В кислородно-конвертерных плавках уменьшение содержания кремния в чугуне на 0,1% и снижение температуры чугуна на 50 °С в условиях компенсации разницы тепла изменением соотношения шихтовых материалов (т.е. при снижении температуры и содержания кремния в нем производят увеличение его доли в завалке) практически не сопровождается изменениями в приходе и выходе эксергии, однако такие изменения приводят к снижению величины эксергетических потерь процесса конвертирования на 8-15% и 5-9% соответственно.\

Библиографический список

1. *К вопросу* об энергетической оценке современной технологии черной металлургии / Лякишев Н.П., Николаев А.В. // *Металлы*. – 2001. – №5. – С. 8-18.
2. *Домна* в энергетическом измерении / А.В. Бородулин, А.Д. Горбунов, В.И. Романенко, С.П. Сущев. – Днепродзержинск: ДГДУ, 2006. – 542 с.
3. *Эксергетический анализ* работы доменной печи на комбинированном дутье / А.В. Бородулин, О.И. Варивода, А.Ф. Ковтун, Б.М. Хенкин // *Деп. в Черметинформ.* 30.11.89. № 5296 – 4М89. 46 с. РЖМеталлургия. 1990. ЗВ178 Деп.
4. *Бродянский В.М.*, Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. Под ред. Бродянского В.М. – М.: Энергоиздат, 1988. – 288 с.
5. *Айзатулов Р.С.*, Бородулин А.В., Ковтун А.Ф. Методика эксергетического анализа кислородно-конвертерной плавки. ИЧМ, 1989, 37 с. Деп. рукопись в Черметинформации, 30.11.89, №5297 – ЧМ89.
6. *Бородулин А.В.*, Кобеза И.И., Рехтин Н.Е. и др. Анализ и оптимизация энергоиспользования в комплексе доменная печь – конвертер // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1992. – № 2. – С. 56-58.
7. *Эксергетический анализ* доменной плавки при применении различных видов топлива / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, А.А. Сохацкий, А.А. Москалина // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2012. – Вып. 26. – С. 35-41.
8. *Эксергетический анализ* энергоэффективности применения пылеугольного топлива в доменном производстве / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, А.А. Москалина // *Экология и промышленность*. – 2014. – № 2. – С. 87-94.
9. *Эксергетический анализ* доменной плавки с использованием пылеугольного топлива / А.Л. Чайка, А.А. Сохацкий, А.А. Москалина // *Известия ВУЗов. Черная Металлургия*. – 2014. – № 4. – С. 68-70.

10. *Анализ энергоэффективности применения ПУТ в доменном производстве с использованием эксергетического метода исследования* / А.Л. Чайка, В.И. Большаков, А.А. Сохацкий, А.А. Москалина, В.Ю. Шостак // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2014. – Вып. 28. – С. 32-46.
11. *Исследование влияния химического состава пылеугольного топлива на тепловые и эксергетические показатели доменной плавки* / А.Л. Чайка, А. А. Сохацкий, А.А. Москалина, Б.В. Корнилов, К.С. Цюпа, В.Ю. Шостак // *Экология и промышленность*. – 2017. – № 3-4. – С. 76-84.
12. *Кияшко Т.С., Семькин С.И., Бородулин А.В. Исследование энергетического состояния конвертерной ванны, Сборник докладов международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии»* – Екатеринбург: УрФУ, 2012 – С. 266-272.
13. *Полный энергетический баланс доменной плавки с применением ПУТ в условиях Украины* / А.Л. Чайка, А.А. Сохацкий, А.А. Москалина, Б.В. Корнилов, В.Ю. Шостак, К.С. Цюпа, Р.В. Авдеев // *Теория и практика металлургии*. – 2017. – № 3-4. – С. 5-9.
14. *А. с. № 73905 Украины. Методика расчета. Полный энергетический баланс доменной плавки* / Бородулин А.В., Чайка А.Л., Сохацкий А.А., Москалина А.А. Заявл. № 73841 15.05.17. Регистр. 25.09.17.
15. *Металлургия чугуна: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп.* / Под редакцией Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
16. *Товаровский И. Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки* – Днепропетровск: Журфонд, 2015. – 912 с.
17. *Условия доменной плавки с низким содержанием кремния в чугуне* / С.В. Филатов, И.Ф. Курунов, Л.А. Смирнов, В.А. Кобелев, О.П. Онорин // *Сталь*. – 2013. – №8. – С. 7-10.
18. *Остроухов М.Я., Шпарбер Л.Я. Справочник мастера-доменщика*. – М.: Металлургия, 1976. – 304 с.
19. *Волков В.П., Шпарбер Л.Я., Гусаров А.К. Технолог-доменщик: справочник*. – М.: Металлургия, 1986. – 263 с.
20. *Маслов В.А., Дубовкина М.Ю., Хлестова О.А. Использование математических моделей снижения температуры чугуна с целью определения выхода углеродсодержащих отходов* / *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. – 2011. – Вып. 22. – С. 41-44.

Reference

1. *K voprosu ob energeticheskoy otsenke sovremennoy tekhnologii chernoy metallurgii* / Lyakishev N.P., Nikolayev A.V. // *Metally*. – 2001. – №5. – С. 8-18.
2. *Domna v energeticheskom izmerenii* / A.V. Borodulin, A.D. Gorbunov, V.I. Romanenko, S.P. Sushchev. – Dneprodzerzhinsk: DGDU, 2006. – 542 s.
3. *Eksergeticheskiy analiz raboty domЕННОY pechi na kombinirovannom dut'ye* / A.V. Borodulin, O.I. Varivoda, A.F. Kovtun, B.M. Khenkin // *Dep. v Chermetinform*. 30.11.89. № 5296 – 4М89. 46 s. RZHMetallurgiya. 1990. 3V178 Dep.

4. *Brodyanskiy V.M., Fratsher V., Mikhalek K.* Eksergeticheskiy metod i yego prilozheniya. Pod red. Brodyanskogo V.M. – M.: Energoizdat, 1988. – 288 s.
5. *Ayzatulov R.S., Borodulin A.V., Kovtun A.F.* Metodika eksergeticheskogo analiza kislorodno-konverternoy plavki. ICHM, 1989, 37 s. Dep. rukopis' v Chermetinformatsii, 30.11.89, №5297 – CHM89.
6. *Borodulin A.V., Kobeza I.I., Rekhtin H.Ye. i dr.* Analiz i optimizatsiya energoispol'zovaniya v komplekse domennaya pech' – konverter // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 1992. – № 2. – S. 56-58.
7. *Eksergeticheskiy analiz domennoy plavki pri primenenii razlichnykh vidov topliva / V.I. Bol'shakov, A.L. Chayka, A.A. Sokhatskiy, A.A. Moskalina // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. – 2012. – Vyp. 26. – S. 35-41.*
8. *Eksergeticheskiy analiz energoeffektivnosti primeneniya pyleugol'nogo topliva v domennom proizvodstve / V.I. Bol'shakov, A.L. Chayka, A.A. Moskalina // Ekologiya i promyshlennost'. – 2014. – № 2. – S. 87-94.*
9. *Eksergeticheskiy analiz domennoy plavki s ispol'zovaniyem pyleugol'nogo topliva / A.L. Chayka, A.A. Sokhatskiy, A.A. Moskalina // Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya. – 2014. – № 4. – S. 68-70.*
10. *Analiz energoeffektivnosti primeneniya PUT v domennom proizvodstve s ispol'zovaniyem eksergeticheskogo metoda issledovaniya / A.L. Chayka, V.I. Bol'shakov, A.A. Sokhatskiy, A.A. Moskalina, V.YU. Shostak // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. – 2014. – Vyp. 28. – S. 32-46.*
11. *Issledovaniye vliyaniya khimicheskogo sostava pyleugol'nogo topliva na teplovyye i eksergeticheskiye pokazateli domennoy plavki / A.L. Chayka, A. A. Sokhatskiy, A.A. Moskalina, B.V. Kornilov, K.S. Tsyupa, V.YU. Shostak // Ekologiya i promyshlennost'. – 2017. – № 3-4. – S. 76-84.*
12. *Kiyashko T.S., Semykin S.I., Borodulin A.V.* Issledovaniye energeticheskogo sostoyaniya konverternoy vanny, Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Teoriya i praktika teplovykh protsessov v metallurgii» – Yekaterinburg: UrFU, 2012 – S. 266-272.
13. *Polnyy energeticheskiy balans domennoy plavki s primeneniyem PUT v usloviyakh Ukrainy / A.L. Chayka, A.A. Sokhatskiy, A.A. Moskalina, B.V. Kornilov, V.YU. Shostak, K.S. Tsyupa, R.V. Avdeyev // Teoriya i praktika metallurgii. – 2017. – № 3-4. – S. 5-9.*
14. *A. s. № 73905 Ukrainy.* Metodika rascheta. Polnyy energeticheskiy balans domennoy plavki / Borodulin A.V., Chayka A.L., Sokhatskiy A.A., Moskalina A.A. Zayavl. № 73841 15.05.17. Registr. 25.09.17.
15. *Metallurgiya chuguna: Uchebnik dlya vuzov. 3-ye izd., pererab. i dop. / Pod redaktsiyey YU.S. Yusfina. – M.: IKTS «Akademkniga», 2004. – 774 s.*
16. *Tovarovskiy I. G.* Poznaniye protsessov i razvitiye tekhnologii domennoy plavki – Dnepropetrovsk: Zhurfond, 2015. – 912 s.
17. *Usloviya domennoy plavki s nizkim soderzhaniyem kremniya v chugune / S.V. Filatov, I.F. Kurunov, L.A. Smirnov, V.A. Kobelev, O.P. Onorin // Stal'. – 2013. – №8. – S. 7-10.*
18. *Ostroukhov M.YA., Shparber L.YA.* Spravochnik mastera-domenshchika. – M.: Metallurgiya, 1976. – 304 s.
19. *Volkov V.P., Shparber L.YA., Gusarov A.K.* Tekhnolog-domenshchik: spravochnik. – M.: Metallurgiya, 1986. – 263 s.

20. Maslov V.A., Dubovkina M.YU., Khlestova O.A. Ispol'zovaniye matematicheskikh modeley snizheniya temperatury chuguna s tsel'yu opredeleniya vykhoda uglerodsoderzhashchikh otkhodov / Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki. – 2011. – Вып. 22. – S. 41-44.

О. Л. Чайка, А. Г. Чернятевич, О. А. Сохацкий, А. О. Москалина, Т. С. Голуб, Л. С. Молчанов

Дослідження впливу вмісту кремнію в чавуні та його температури на ексергетичні показники системи «доменна піч-конвертер»

Метою роботи є дослідження енергоемності металопродукції в системі «доменна піч - кисневий конвертер» при освоєнні пиловугільного палива (ПВП) в доменному виробництві. Одним з параметрів, що характеризують термодинамічні показники доменної плавки, є вміст кремнію в рідкому чавуні. Виконано дослідження впливу вмісту кремнію в чавуні і його температури на показники роботи і термодинамічні показники виплавки стали в технологічному ланцюгу «доменний - киснево-конвертерний цех» при освоєнні пиловугільного палива в доменному цеху. Розраховані граничні мінімальні і максимальні значення зміни продуктивності і витрати коксу, і ексергетичної показників при зміні вмісту кремнію в чавуні. Встановлено, що зменшення вмісту кремнію і температури чавуну в доменній печі дозволяє зменшити втрати ексергії, збільшити ексергетичної ККД, зберегти на постійному рівні або поліпшити екологічні показники. Однак зменшення температури чавуну може привести до суттєвих розладів в роботі доменної печі. Показано, що найбільший вплив в технологічній системі «доменний - киснево-конвертерний цех» надає змісту кремнію в чавуні, зменшення якого сприяє збільшенню ексергетичної ККД, зменшення ексергетичної втрат і поліпшенню екологічних показників. Температура чавуну на ексергетичної і екологічні показники в системі «доменний - киснево-конвертерний цех» має незначний вплив, однак, зменшення температури чавуну може привести до суттєвих розладів в роботі комплексу «доменна піч - кисневий конвертер».

Ключові слова: доменна піч, кисневий конвертер, ПВП, вміст кремнію в чавуні, температура чавуну, ексергетичної і екологічні показники.

A. L. Chaika, A. G. Cherniatevych, A. A. Sokhatsky, A. A. Moskalina, T. S. Golub, L. S. Molchanov

Investigation of the effect of silicon content in iron and its temperature on exergy indicators of the blast furnace-converter system

The aim of the work is to study the energy intensity of metal products in the "blast furnace - oxygen converter" system during the development of pulverized coal (PCF) in the blast furnace production. One of the parameters characterizing the thermodynamic indicators of blast-furnace smelting is the silicon content in liquid iron. A study was made of the effect of silicon content in iron and its temperature on the performance and thermodynamic indicators of steel production in the blast furnace – oxygen converter shop chain during the development of pulverized coal in the blast furnace. The

calculated minimum and maximum values of changes in productivity and consumption of coke, and exergy indicators with a change in the silicon content in the iron. It is established that a decrease in the silicon content and the temperature of iron in a blast furnace can reduce the loss of exergy, increase the exergy efficiency, maintain a constant level or improve environmental performance. However, reducing the temperature of the iron can lead to significant disturbances in the operation of the blast furnace. It is shown that silicon content in cast iron has the greatest impact in the blast furnace-oxygen shop technological system, a decrease of which contributes to an increase in exergy efficiency, a decrease in exergy losses and an improvement in environmental indicators. The temperature of the cast iron on the exergy and environmental indicators in the "blast furnace - oxygen converter shop" system has a minor effect, however, a decrease in the temperature of the iron can lead to significant disturbances in the operation of the "blast furnace - oxygen converter" complex.

Keywords: blast furnace, oxygen converter, PUT, silicon content in cast iron, cast iron temperature, exergy and environmental indicators.

*Статья поступила в редакцию сборника 31.10.2018 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)
Рецензенты: д.т.н., проф.А.О.Еремин; к.т.н. А.Е.Меркулов*