

6. Сігарьов Є.М. Оцінка потужності перемішування у розплаві з обертовою фурмою / Є.М.Сігарьов, М.К.Сігарьов, Д.С.Кочмола // Збірник наукових праць Дніпровського технічного університету: (технічні науки). – Кам'янське: ДДТУ. – 2017. – Вип. 2(31). – С.9-15.
7. Сігарьов Є.М. Формування відкритої зони на міжфазовій границі при ковшовому рафінуванні розплаву / Є.М.Сігарьов, Д.С.Кочмола, М.К.Сігарьов // Збірник наукових праць Дніпровського технічного університету: (технічні науки). – Кам'янське: ДДТУ. – 2018. – Вип. 1(32). – С.3-8.
8. Барботажная зона в жидкой ванне при перемещении газовой струи / Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Сигарев Н.К., Зарандия С.А. // Металургия: збірник наукових праць Запорізької державної інженерної академії. – 2013. – Вип. 2(30). – С.35-41.

Надійшла до редколегії 03.12.2018.

УДК 669.162

DOI 10.31319/2519-2884.33.2018.189

КРЯЧКО Г.Ю., к.т.н., доцент
КУЗНЕЦОВ М.С.*, здобувач
ПОЛСТАЄВ В.П., к.т.н., доцент
СЕМЕНЧА С.М., бакалавр

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське
*ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат»

ПРО УМОВИ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ ПЕРЕРОБНОГО ЧАВУНУ ВИЗНАЧЕНОЇ ЯКОСТІ

Вступ. Розвиток виробництва сталі за маршрутом «доменна піч – кисневий конвертер» поєднаний з одержанням якісного переробного чавуну. У відомій мірі виплавка сталі в конвертері залежить від температури чавуну, вмісту в ньому кремнію і сірки. Низький фізичний нагрів чавуну змушує компенсувати охолодження металу додатковими витратами заліза і кисню. Підвищений вміст кремнію в чавуні призводить до збільшення виходу шлаку в конвертері і зниженню стійкості футерівки.

Технологія виплавки чавуну з підвищеним вмістом сірки і наступною позапічною десульфуріацією має поширення, оскільки сприяє підвищенню результативності і ефективності домЕННОЇ плавки. Але наступна десульфуріація сірчанистого чавуну в свою чергу потребує матеріальних і енергетичних витрат, оскільки умови боротьби з сіркою в конвертерній плавці ускладнені у порівнянні з домЕННОЮ внаслідок окислювальної атмосфери і високого вмісту FeO в шлаку.

Окремо слід зазначити, що і температура і склад чавуну залежать від умов домЕННОЇ плавки і впливають на кінцеві показники роботи печі. Так, наприклад, відомо [1], що зменшення вмісту Si в чавуні на 0,1% призводить до збільшення продуктивності печі і зниження питомої витрати коксу на 0,6-1,2% в залежності від рівня вмісту кремнію. На противагу кремнію збільшення вмісту сірки в чавуні, яке допускає послаблення технологічних вимог щодо десульфуріації чавуну, супроводжується зростанням продуктивності і економією коксу на 1% на кожні додаткові 0,01% сірки.

Внаслідок вище згаданих міркувань пошук дієвих управляючих впливів на вміст кремнію і сірки, а також на температуру чавуну не втратив актуальності до теперішнього часу. Перешкодами для пошуку і відпрацювання управляючих дій служать визначені протиріччя в підходах до встановлення факторів, що визначають ті чи інші кількісні показники властивостей чавуну.

Для прикладу можна навести протилежні дані про зв'язок між основністю шлаку і вмістом кремнію в чавуні. За даними роботи [2] вміст Si в чавуні зі зростанням основ-

ності збільшується. За даними С.К.Трекало, наведеними в роботі А.Д.Готліба [3,с.303], ступінь відновлення кремнію зі збільшенням основності шлаку (CaO/SiO_2) зменшується. До такого ж висновку прийшов автор дослідження [4] з тим зауваженням, що вміст кремнію в чавуні пов'язаний не з основністю кінцевого шлаку, а з основністю пустої породи. Слушним є також міркування про те, що основність кінцевого шлаку не визначає відновлення кремнезему в горні, а навпаки, сама визначається цим відновленням.

У дослідженні, що базується на аналізі роботи доменної печі №7 Новолипецького металургійного комбінату [5], повідомляється про зворотній зв'язок вмісту кремнію в чавуні і основності шлаку. Там же перераховуються фактори, які на думку дослідників також створюють умови отримання чавуну з низьким вмістом кремнію. До таких факторів віднесені сировинні і експлуатаційні – якість шихтових матеріалів, режими завантаження, газодуттьовий і тепловий. Зокрема стверджується, що виплавка чавуну зі зниженим вмістом кремнію була досягнута не тільки завдяки зміні шлакового режиму, але й внаслідок зростання інтенсивності плавки. Нажаль, даних, що ілюструють останнє твердження, автори [5] не наводять.

Постановка задачі. Метою роботи, викладеної нижче, є дослідження впливу експлуатаційних умов доменної плавки на якість переробного чавуну. Новий підхід в оцінці впливу експлуатаційних факторів полягає у відокремленні трьох груп чинників: режимів роботи, стану стовпа матеріалів та безпосередньо самої доменної печі.

Результати роботи. *Об'єкт дослідження.* В якості досліджуваної використали доменну піч Дніпровського металургійного комбінату об'ємом 1500 м^3 з діаметром горна $8,4 \text{ м}$. В період досліджень піч працювала на коксі і пиловугільному паливі із імпортового вугілля та на двокомпонентній залізорудній сировині, що складалася з місцевого агломерату і обкотишів Північного гірничозбагачувального комбінату з вмістом заліза $63,2\%$. Дані про сировинні умови і показники роботи печі наведено в табл.1.

Таблиця 1 – Техніко-економічні показники роботи доменної печі ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» об'ємом 1500 м^3

1	2
Витрата, кг/т чавуну:	
агломерату	1498
обкотишів	284
вапняку	10
коксу	417
ПВП	157
Кокс, %	
сірка	0,54
зола	11,5
CSR	54,5
ПВП, %	
сірка	0,26
зола	7,6
ЛР	21,2
Агломерат, %	
Fe	53,2
P	0,027
S	0,036
основність:	
CaO/SiO_2	1,386
$\text{CaO}+\text{MgO}/\text{SiO}_2$	1,534
Дуття:	
витрата, $\text{м}^3/\text{хв}$	2915
вміст кисню, %	25,2
надмірний тиск, кПа	253
температура, $^{\circ}\text{C}$	1017

Продовження таблиці 1

Колошниковий газ:	
надмірний тиск, кПа	130
температура, °С	340
склад, %:	
CO ₂	17,9
CO	27,3
H ₂	3,7
Чавун:	
вміст, %	
Si	0,72
Mn	0,08
S	0,025
P	0,062
температура, °С	1458
Шлак:	
вміст, %	
CaO	45,46
SiO ₂	41,91
MgO	5,33
Al ₂ O ₃	6,03
S	0,98
MnO	0,12
FeO	0,52
основність:	
CaO/SiO ₂	1,09
CaO+MgO/SiO ₂	1,21
вихід, кг/т чавуну	408

Тривалість періоду дослідження – з серпня 2017 року по січень 2018 включно. Для аналізу відібрано масив даних зі 158 одиничних періодів без розривів у часі (за винятком діб з простоями і ходом печі на збавленому дутті). Тривалість одного періоду – одна доба.

Шлаковий режим. Перш за все розглянули зв'язки вмісту кремнію і сірки, а також коефіцієнтів їх розподілу між шлаком і чавуном з основністю шлаку CaO/SiO_2 , найбільш вживаним показником властивостей шлакового розплаву. Із рис.1 видно, що між модулем CaO/SiO_2 і коефіцієнтом розподілу кремнію (L_{Si} , рис.1, а) існує дуже слабкий (за шкалою Чеддока) зв'язок, причому зі зростанням основності існує тенденція до збільшення L_{Si} . У відповідності з показаним на рис.1, а встановлено помірний зв'язок ($R=0,319$) між основністю і вмістом кремнію в металі (рис.1, в). Тенденція зменшення величини $[\text{Si}]$ зі збільшенням основності відчутна, що відповідає усталеним поглядам на відновлення кремнію в доменному процесі [3, 5].

Як і слід було очікувати, отримано помітний зв'язок хімічного складу шлаку з коефіцієнтом розподілу сірки (рис.1, б) і вмістом останньої в металі (рис.1, г), причому між L_{S} і основністю зв'язок був більш тісним, ніж між $[\text{S}]$ і CaO/SiO_2 .

Тепловий режим. В якості критеріїв фізичного нагріву горна використали температуру чавуну та тепловий індекс печі, запропонований Ю.С.Юсфіним. Встановлено помітний зв'язок ($R=0,505-0,607$) з температурою чавуну і показниками, що свідчать про вміст кремнію і сірки в чавуні, а також про розподіл їх між шлаком і чавуном (рис.2). У відповідності до відомих даних про вплив нагріву горна на поведінку домішок чавуну в доменному процесі коефіцієнти розподілу кремнію і сірки змінювались в протилежних напрямках (рис.2, а, б). Різниця полягає також у відмінності впливів нагріву на зміну концентрацій домішок. Зокрема зниження температури чавуну з 1500 до 1400°С супроводжувалось зменшенням вмісту кремнію з 0,89 до 0,47 % або приблизно у два рази. Таке ж зниження температури призвело в середньому до зростання вмісту сірки з 0,013 до 0,042%, тобто в три рази.

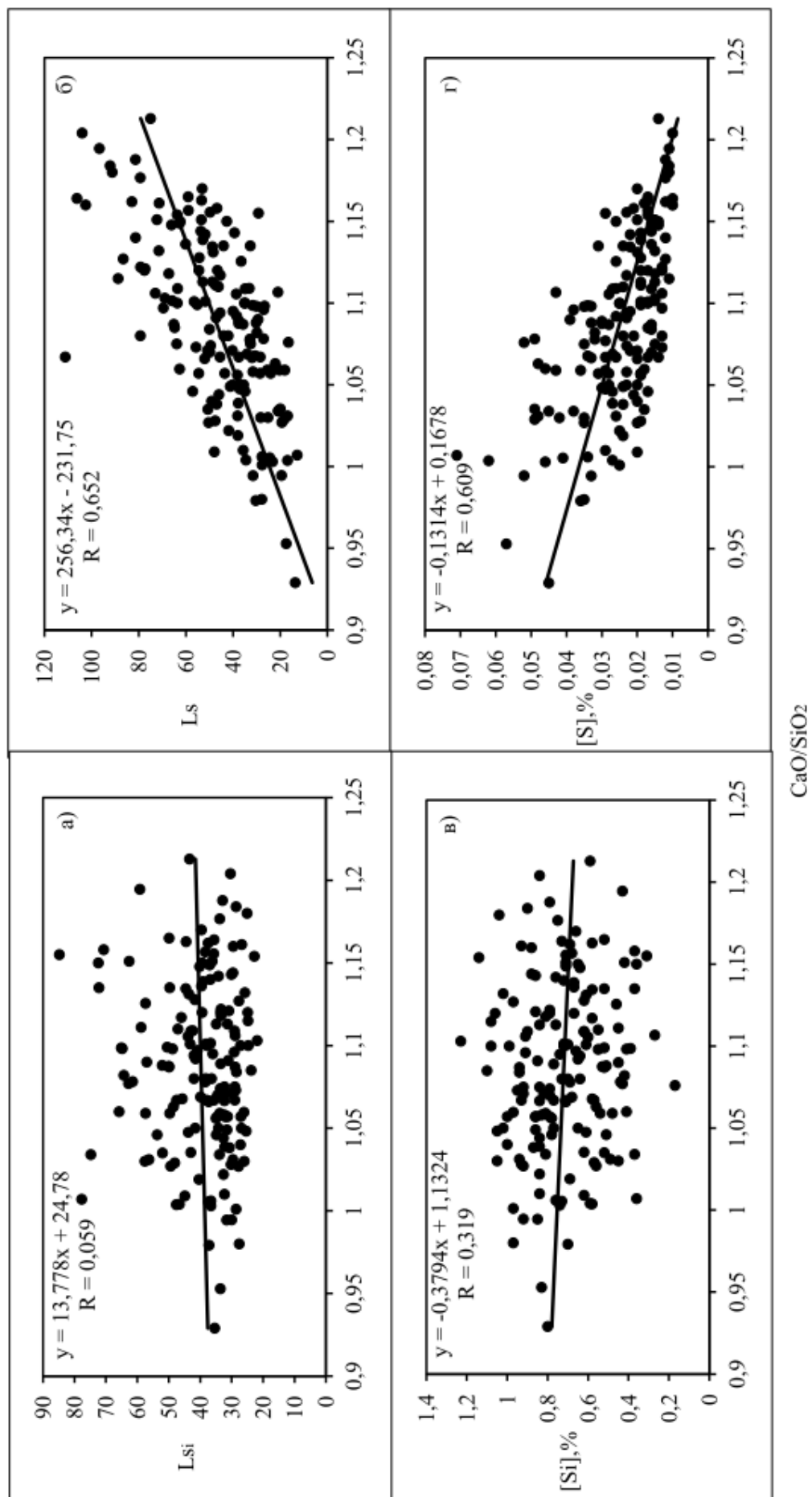
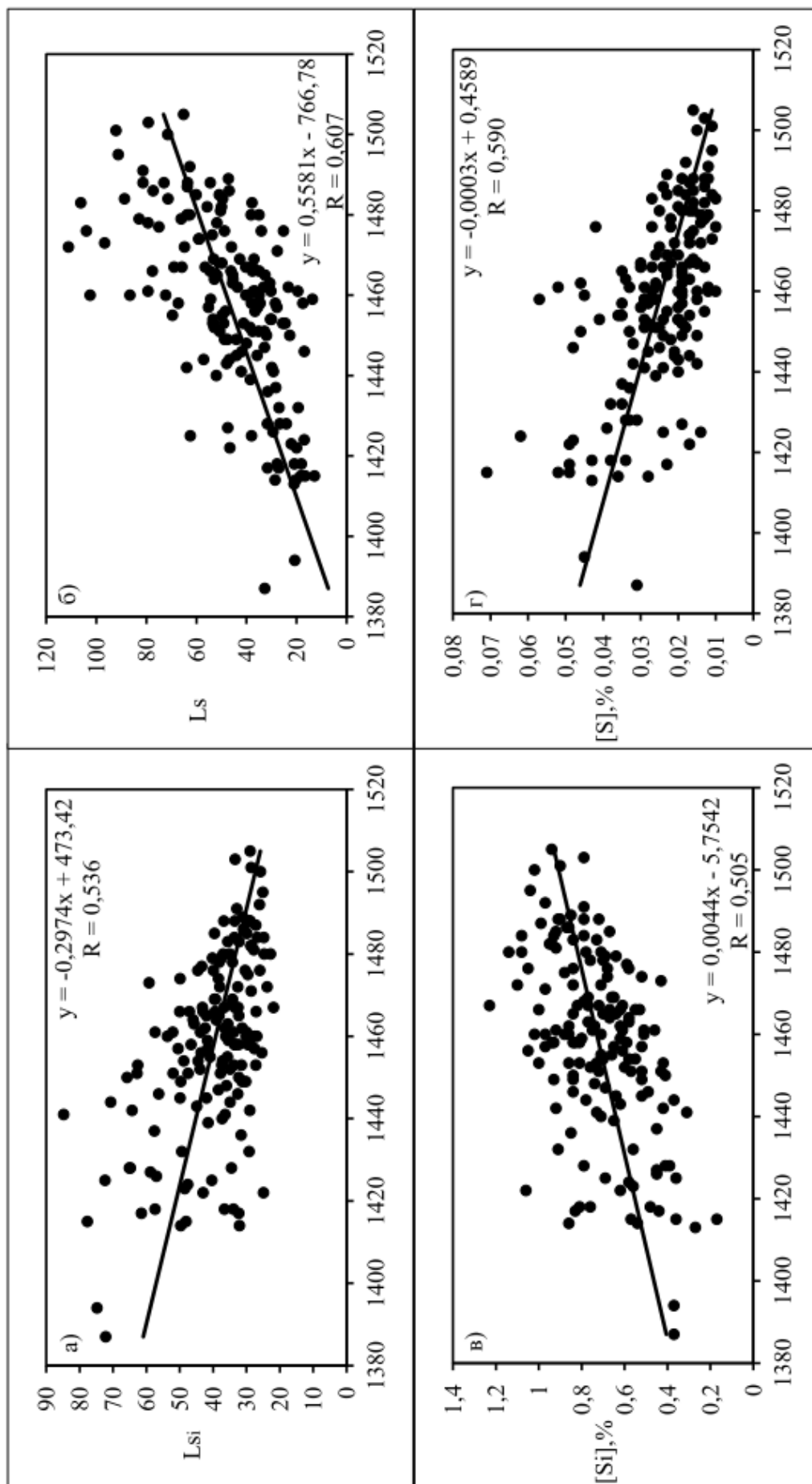


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнтів розподілу кремнію (а) і сірки (б), вмісту кремнію (в) і сірки (г) в чавуні від основності шлаку



Температура чавуну, °С

Рисунок 2 – Залежність коефіцієнтів розподілу кремнію (а) і сірки (б), вмісту кремнію (в) і сірки (г) в чавуні від температури чавуну

Таким чином при розробці оптимальної для конкретних умов технології плавки слід зважати на різницю в поведінці контрольованих домішок чавуну при зміні нагріву горна, а саме вміст сірки в чавуні змінюється швидше, ніж вміст кремнію.

В кожному конкретному випадку в залежності від умов десульфурації та десіліконізації чавуну слід встановлювати раціональний тепловий режим, за якого підтримується бажаний рівень вмісту сірки і кремнію і за якого досягаються певні переваги в доменному процесі і в подальшій переробці рідкого чавуну. Так, наприклад, при нагріві горна, що забезпечував температуру чавуну в середньому 1460°C, коефіцієнти розподілу кремнію і сірки між шлаком і чавуном близькі за величиною (біля 40 одиниць, рис.2, а, б).

Що стосується зв'язків показників поведінки кремнію і сірки з тепловим індексом печі, то отримано значно менший рівень тісноти зв'язків, ніж між температурою металу і вказаними показниками. Так для залежності $[Si]=f(T_{ПП})$ R склало лише 0,235, а для $[S]=f(T_{ПП})$ – 0,362.

Для перевірки твердження [5] про те, що підвищення теоретичної температури горіння і температури газів з фурмених вогнищ, а також зниження інтенсивності плавки при підвищеному нагріві печі сприяють відновленню кремнію і збільшенню його вмісту в чавуні, проаналізували зв'язок згаданих показників. Аналіз показав, що міркування авторів роботи [5] не позбавлені підстав. Хоча зв'язок між теоретичною температурою і вмістом кремнію в металі дуже слабкий ($R=0,079$), все ж виявлено тенденцію збільшення $[Si]$ зі зростанням $T_{теор}$.

Аналіз впливу інтенсивності роботи печі на склад чавуну показав наявність помірного зв'язку ($R=0,348$) між інтенсивністю горіння палива за сумарним вуглецем і вмістом кремнію в металі (рис.3). Вказане явище в роботі [5] пояснюють скороченням тривалості перебування в зоні високих температур коксу, що потрапляє у фурмені вогнища. Внаслідок зменшується кількість утвореного монооксида кремнію, від чого знижується ступінь відновлення кремнію і перехід останнього в чавун. На наш погляд, крім вказаного вище впливу слід зважати на зростання процесів прямого відновлення заліза при підвищенні інтенсивності плавки, що в свою чергу обумовлює додаткові витрати тепла і погіршення умов відновлення кремнію.

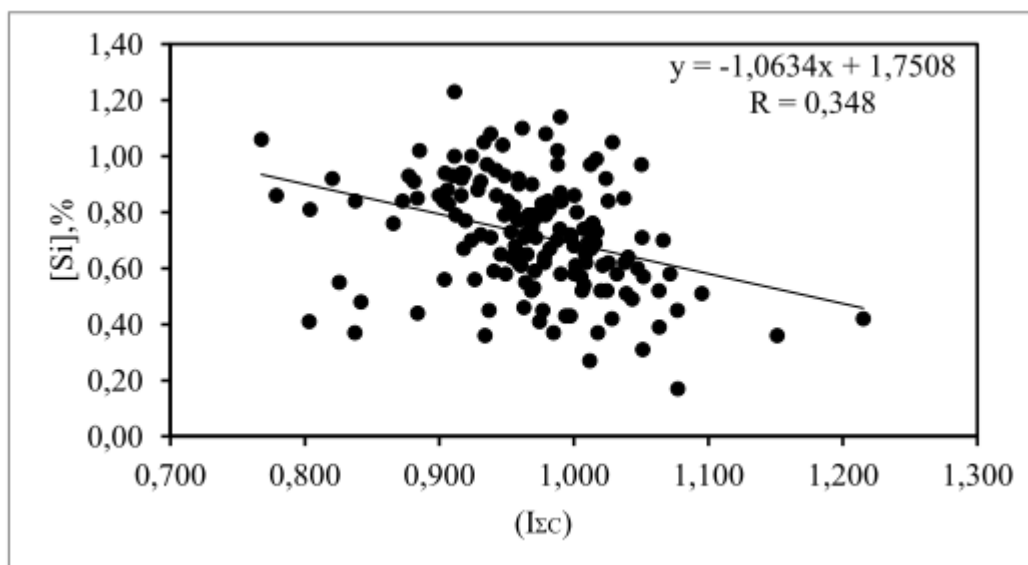


Рисунок 3 – Залежність вмісту кремнію у чавуні від інтенсивності горіння палива за сумарним вуглецем ($L_{\Sigma C}$)

Стан доменної печі. На якість чавуну, зокрема на вміст в ньому сірки, можуть впливати не тільки загальновідомі фактори, але й такі, що підлягають вивченню, зокрема стан огороження робочого простору печі і стан стовпа шихтових матеріалів. Як і в роботі [6], дослідили динаміку зміни вмісту сірки в часі (рис.4). У досліджуваному загальному періоді встановлено періодичність пульсацій вмісту сірки в металі, причому період пульсацій за тривалістю виявився більшим, ніж встановлено раніше. Якщо для печей об'ємом від 1000 до 2700 м³ при вдуванні природного газу період пульсацій коливався від 3 до 7 діб [6], то в нашому випадку він становив за максимальним середньодобовим вмістом S від 8 до 11 діб, за усередненим рівнем – 11 діб.

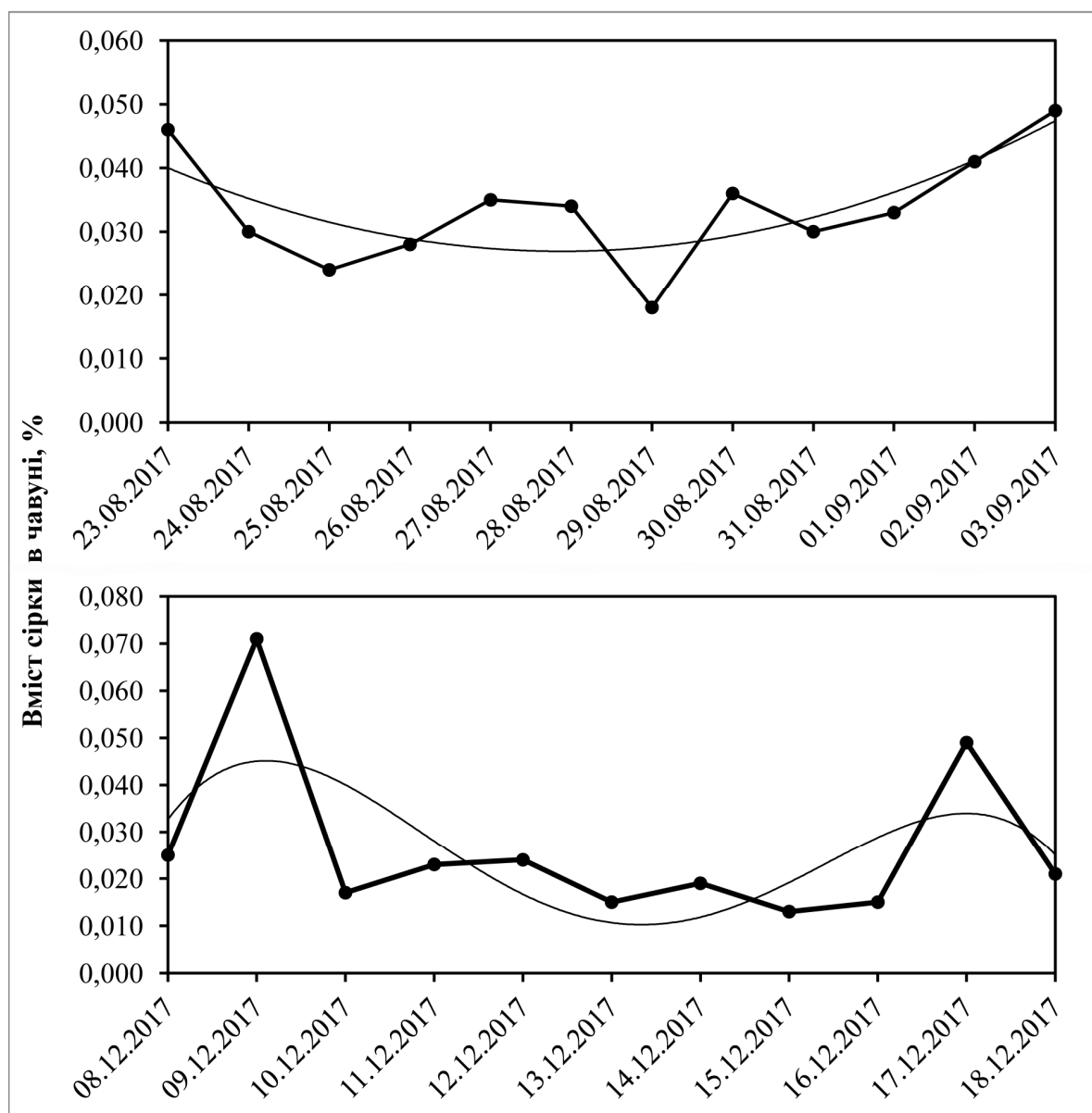


Рисунок 4 – Зміна середньодобового (ламана лінія) і середнього рівня (крива лінія) вмісту сірки у чавуні на досліджуваній печі об'ємом 1500 м³

Автори [6] пояснюють пульсації середнього рівня вмісту сірки в чавуні періодичним сповзанням гарнісажу, який сам по собі містить сірки більше, ніж шихта і сприяє охолодженню горна через необхідність додаткових витрат тепла на його розплавлення.

На наш погляд, крім цієї причини може бути і інша, а саме періодичне надходження в металоприймач «сміттєвих» залишків коксового тотерману, коксового дрібняку, графітової спелі разом з неспаленим пиловугільним паливом, тощо. Слід зазначити, що і перше і друге пояснення потребують подальшого вивчення, оскільки дієве прогнозування «пиків» вмісту сірки в чавуні має значення для подальшої переробки.

Висновки.

1. У зв'язку з тим, що основність кінцевого шлаку в певній мірі залежить від ступеня відновлення кремнію, вплив на вміст кремнію в чавуні зміною шлакового режиму має обмежені можливості. Навпаки зміна шлакового режиму, перш за все основності, дієво позначається на процесі переходу сірки в шлак.

2. При розробці оптимальної для визначених умов технології плавки слід врахувати різницю в поведінці кремнію і сірки при зміні нагріву горна, а саме вміст сірки в чавуні змінюється швидше, ніж вміст кремнію. Тому в залежності від можливостей подальшої переробки чавуну слід встановлювати такий тепловий режим печі, за якого підтримуються бажані рівні вмісту сірки і кремнію, що в свою чергу дає певні переваги в доменному процесі і в подальшій переробці.

3. Встановлено існування зворотного зв'язку між інтенсивністю плавки і вмістом кремнію в чавуні. Крім відомого пояснення цього явища, а саме скороченням часу перебування коксу в зоні високих температур, при збільшенні інтенсивності слід зважати на зростання ендотермічних процесів прямого відновлення, що погіршує відновлення кремнію.

4. Підтверджено існування пульсацій середнього рівня вмісту сірки в чавуні, виявлених раніше при роботі печей з вдуванням природного газу. Суттєвою відмінністю наших спостережень є те, що в досліджуваних умовах при вдуванні пиловугільного палива період пульсацій виявився суттєво довшим – до 8-11 діб проти 3-7. Оскільки дієве прогнозування «пиків» вмісту сірки в чавуні має значення для подальшої переробки, питання потребує подальшого вивчення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Волков Ю.П., Шкарбер Л.Я., Гусаров А.К. Технолог – доменщик: справочное и методическое руководство. М.:Металлургия,1986. 263с.
2. Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Степаненко Д.А. Физико-химические основы выбора состава доменной шихты с целью направленного формирования продуктов плавки: коллективный труд второго Международного симпозиума «Познание процессов и развития технологии доменной плавки / под. ред. И.Г.Товаровского. Дніпро: «Журфонд»,2016. С.286-321.
3. Готлиб А.Д. Доменный процесс. М.:Металлургия,1966. 503с.
4. Коотц Т. Регулирование содержания кремния в чугуна. *Черные металлы*. 1975. №9. С.12-17.
5. Филатов С.В., Курунов И.Ф., Смирнов Л.А., Кобелев В.А., Онорин О.П. Условия доменной плавки с низким содержанием кремния в чугуна. *Сталь*, 2013. №8. С.7-10.
6. Ефименко С.П., Мачикин В.И., Лифенко Н.Т. Внепечное рафинирование металла в газлифтах. М.: Металлургия,1986. 263с.

Надійшла до редколегії 16.10.2018.