

## МЕТАЛУРГІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.1

УДК.669.162

М.С. Кузнецов<sup>1</sup>, здобувач, maks\_kuznetcov82@mail.ruЄ.М. Сігарьов<sup>2</sup>, д.т.н., професор, en\_sigarev@ua.fmГ.Ю. Крячко<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, nauka\_m4m@ukr.net<sup>1</sup> Металургійне виробництво ПАТ «Дніпровський коксохімічний завод», м. Кам'янське<sup>2</sup> Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## МАКРОСТРУКТУРА ЗЛАМУ ПРОБ ДОМЕННОГО ШЛАКУ ПРИ ВИПЛАВЦІ ЧАВУНУ З ВДУВАННЯМ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

Досліджено макроструктуру зламу проб доменного шлаку при виплавці переробного чавуну з вдуванням пиловугільного палива на трьох доменних печах об'ємом 1500 і 1386 м<sup>3</sup> (2 агрегати). Діапазон зміни основності досліджених проб шлаку (CaO/SiO<sub>2</sub>) становив 0,98—1,30; відповідні пробам температури чавуну і вміст в ньому кремнію коливались в межах 1324—1510 °С і 0,13—1,17 %. Для ідентифікації проб шлаку стану доменної печі в конкретних умовах експлуатації проби за основністю розділили на п'ять груп від кислих ( $B_1 < 1,0$ ) до високоосновних ( $B_1 > 1,25$ ). Чавуни за фізичним нагрівом розділили на три групи: холодні (<1400 °С); прогріті (1400—1480 °С); гарячі (>1480 °С). За хімічним нагрівом поділ здійснили також на три групи: холодні (<0,5 % Si); прогріті (0,5—0,8); гарячі (>0,8). Загальним для колишнього шлакового режиму і нового, обумовленого використанням коксу і ПВП з обмеженою кількістю сірки, є однаковий вигляд поверхні зламу кислих і низькоосновних шлаків — при нормальному нагріві злам склоподібний, блискучий, темного кольору. При похолоданні скловидність і блиск зламу таких шлаків зникає — відкол стає каменеподібним сірим або чорним з деякою відмінністю в утворенні макропор у масиві проби. Загальним для проб шлаку з  $B_1 > 1,1$  є зменшення склоподібної аморфної частини зі збільшенням модулю основності. Відмінністю для таких шлаків у порівнянні з відомими для плавки в інших сировинних умовах є відсутність чіткого розмежування прошарків у зламі проб, особливо помітне для половинчастих шлаків. Встановлено, що на макроструктуру проб шлаку крім основності  $B_1$  і нагріву печі впливає величина глиноземно-магнезійного модулю; цю обставину слід враховувати при оперативному контролі ходу доменної печі за зовнішніми проявами. Встановлено також, що відхилення основності у бік кислих або високоосновних шлаків супроводжувалося поглинанням частинок вугільного пилу шлаковим розплавом. Розглянуто представницькі властивості проб щодо текучості і десульфуруючої здатності відповідних шлаків.

**Ключові слова:** макроструктура, злам проби, доменний шлак, властивості, виплавка чавуну, нагрів, основність, пиловугільне паливо.

*The macrostructure of blast furnace slag cross section samples during melting of pig iron with pulverized coal fuel injection on three blast furnaces with a volume of 1500 and 1386 m<sup>3</sup> (2 units) was studied. The range of changes in the basicity of the studied slag samples (CaO/SiO<sub>2</sub>) was 0.98—1.30; corresponding to the temperature samples of cast iron and its silicon content ranged from 1324—1510 °C and 0.13—1.17 %. To identify blast furnace slag samples in specific operating conditions, the samples were basically divided into five groups from acidic ( $B_1 < 1,0$ ) to highly basic ( $B_1 > 1,25$ ). By its physical heating characteristics the cast iron was divided into 3 groups: cold (<1400 °C); heated (1400—1480 °C); hot (>1480 °C). According to chemical heating, the division was also carried out into three groups: cold (<0.5 % Si); heated (0.5—0.8); hot (> 0.8). The look of cross section surface of acidic and low-basic slag is the same for former slag regime and the new, due to the use of coke and pulverized fuel with limited sulfur; in conditions of normal heating the cross section is vitreous, shiny dark color. When cooled, the vitreous and luster of cross section of such slags disappears — the chip becomes stone-like gray or black with some difference in the formation of macropores in the*

sample mass. Common for slag samples with  $B_1 > 1,1$  is a decrease in the vitreous amorphous part with increasing modulus of basicity. The difference for such slags in comparison with those known for melting in other raw material conditions is the lack of clear delimitation of layers in the cross section of the samples, especially noticeable for half-slags. It is established that the macrostructure of slag samples apart from the main  $B_1$  and furnace heating is influenced by the magnitude of the alumina-magnesium modulus; this fact should be taken into account in the operational control of the blast furnace for external conditions. It was also found that the deviation of the basicity towards acidic or highly basic slags was accompanied by the absorption of coal dust particles by slag melt. The properties of samples in terms of fluidity and desulfurizing ability of corresponding slags are considered.

**Keywords:** macrostructure, cross section sample, blast furnace slag, properties, pig iron smelting, heating, basicity, pulverized coal fuel.

### Постановка проблеми

Відомо, що реалізація доменного процесу характеризується рядом зовнішніх проявів, за якими технологи судять про хід і стан процесів виплавки чавуну. Серед важливих ознак, що дають оперативну візуальну інформацію про хід доменної печі є зовнішній вигляд зламу застиглих проб доменного шлаку. Ця інформація дозволяє технологам мати певну уяву про стан печі і властивості продуктів плавки до надходження лабораторних аналізів на комп'ютер пульта управління піччо.

Актуальним на сьогодні є те, яким чином змінилася морфологія поверхні зламу проб шлаку при повсюдному впровадженні технології плавки з використанням пиловугільного палива (ПВП).

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

За час, що минув після появи публікацій стосовно особливостей макроструктури зламу проб доменного шлаку [1, с.113; 2, с.250; 3, с.169], відбулися суттєві зміни в технології виплавки чавуну, викликані переходом з вдування природного газу на використання ПВП в якості заміниacza коксу. Пошук засобів для компенсації негативного впливу ПВП на деякі сторони доменного процесу призвів до покращення якості, як залізородних матеріалів так і коксу, що в свою чергу змінило шлаковий режим.

Крім того, незважаючи на застереження про те, що слід розрізнявати хімічно гарячі і фізично холодні чавуни від фізично гарячих і хімічно холодних [1] довгий час внаслідок не регулярного вимірювання температури чавуну на випуску задовольнялися оцінюванням нагріву перш за все за вмістом кремнію в металі [2]. В сучасних умовах вимірювання температури чавуну на кожному випуску є сталою практикою, яка дозволяє кількісно відрізнати фізичний і хімічний нагрів металу.

У відповідності з відомою інформацією схеми макроструктури діаметрального зламу напівсфероподібної проби шлаку мають вигляд, представлений на рис. 1. Згідно з цими схемами, перехід від кислих (рис. 1, а) до основних шлаків відбувається зі збільшенням каменеподібної частини і відповідно зі зменшенням склоподібної аж до самого її зникнення (рис. 1, г).

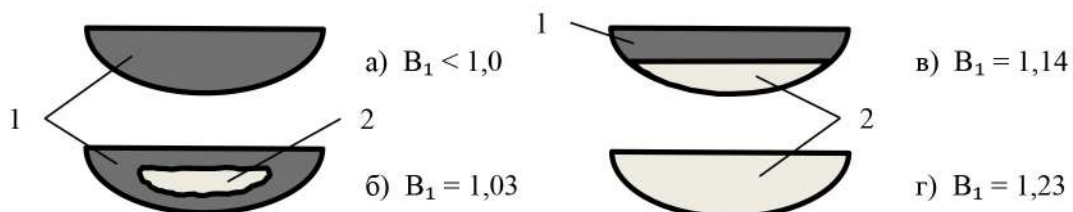


Рис. 1. Схеми зламу проб шлаку різного хімічного складу: за даними [2] (а, в, г) і [3] (б): 1 — склоподібна частина, 2 — тяж каменеподібна;  $B_1$  — основність шлаку  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$

При визначенні властивостей шлаку важливим є встановлення його реальної температури на випуску. Зазвичай беруть до уваги деякий перегрів шлаку відносно температури чавуну,

температуру якого визначають за виміром термопарою. Часто величину цього перегріву приймають у 50 °С [4, с.12].

В той же час існують дані, встановлені при систематичних вимірах температури чавуну, верхнього і нижнього шлаків [5, с.79], які свідчать про перегрів верхнього шлаку вище температури чавуну на 40—70 °С при умові, що температура нижнього шлаку або дорівнювала температурі чавуну, або на 10—20 °С була нижче її. В сучасних умовах у зв'язку зі зменшенням відносного виходу шлаку і у зв'язку з іншими чинниками застосовується практика випуску тільки нижнього шлаку. Про близькість значень температур чавуну і шлаку свідчать дані вимірів на доменних печах заводу Chiba (Японія) об'ємом 5000 м<sup>3</sup> [6] і 1500 м<sup>3</sup> [7], проведених Інститутом чорної металургії НАН України. В досліджуваній період роботи доменної печі об'ємом 1500 м<sup>3</sup> діапазон значень температури чавунів склав 1451—1485 °С, а для відповідних випусків шлаку 1453—1487 °С. За весь період експериментальних вимірів температура шлакового розплаву в середньому перевищувала температуру чавуну на 2,8 °С.

Тому в нашому дослідженні при визначенні орієнтовної температури було прийнято перегрів шлаку у порівнянні з чавуном на 3 °С за умови відбору проби шлаку при нормальному ході печі.

Крім того, для кожної відібраної проби шлаку визначали температуру хорошої текучості шлаку  $t_{\text{ХТ}}$ , за даними В.Г. Воскобойнікова і співробітників [3, с.168]:

$$T_{\text{ХТ}} = 1480 + 4,6(\text{Al}_2\text{O}_3 - 6) + 8(10 - \text{MgO}) - 150(\text{V}_1 - 1) - 16\text{MnO} - 8\text{FeO}.$$

де  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$  вміст оксидів шлаку, %.

Температуру хорошої текучості визначали для тих проб шлаку, хімічний склад яких відповідав наступним межам, рекомендованих [3, с.168]: 6—18 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 5—10 %  $\text{MgO}$ ; 0—3 %  $\text{MnO}$ ; 0—1 %  $\text{FeO}$ ;  $\text{V}_1 = 1,0—1,2$ .

#### Формування мети дослідження

Метою роботи є визначення змін у макроструктурі поверхні зламу проб шлаку доменної плавки з використанням ПВП і дослідження зв'язку різновидів шлаку з нагрівом і складом переробного чавуну.

#### Виклад основного матеріалу

Починаючи з 07.11 по 09.12.2017 року включно на трьох доменних печах об'ємом 1500 м<sup>3</sup> (А) і по 1386 м<sup>3</sup> (Б і В) було відібрано для аналізу макроструктури 30 проб шлаку, з яких надалі було відібрано 10 найбільш представницьких і менш зруйнованих при розбитті (табл. 1). Принцип відбору полягав у урізноманітненні фізичного нагріву продуктів плавки, діапазон зміни якого за температурою чавуну склав 186 °С. Проби відливали у піщану ложкаподібну форму.

Таблиця 1. Характеристика проб продуктів плавки на печах А, Б, В

№ проби	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Піч	Б	Б	В	А	А	В	В	А	В	А
Дата	07.11 .17	07.11 .17	10.11 .17	12.11 .17	14.11 .17	19.11 .17	24.11 .17	24.11 .17	27.11 .17	09.12 .17
<b>Чавун:</b>										
Температура °С:	1484	1510	1448	1377	1428	1470	1324	1430	1467	1401
Склад, %										
Si	1,17	1,11	0,94	0,31	0,31	1,01	0,13	0,35	1,06	0,43
Mn	0,094	0,093	0,085	0,063	0,058	0,085	0,06	0,065	0,078	0,07
S	0,010	0,011	0,010	0,028	0,029	0,011	0,056	0,029	0,017	0,068
P	0,067	0,069	0,057	0,062	0,055	0,056	0,058	0,061	0,058	0,067
<b>Шлак:</b>										
$t_0$ —орієнтовна температура, °С	1487	1513	1451	1380	1431	1473	1327	1433	1470	1404
$t_{\text{ХТ}}$ —температура хорошої текучості	н.в.*	н.в.*	1488	1493	1495	1487	1489	1510	1495	н.в.*

Продовження таблиці 1

$\Delta t = t_0 - t_{\text{хр}} \text{ } ^\circ\text{C}$	н.в.*	н.в.*	-37	-113	-64	-14	-162	-77	-25	н.в.*
Склад, %										
CaO	49.7	50.3	46.8	48.5	46.4	46.7	46.6	45.0	47.5	43.3
SiO <sub>2</sub>	38.8	38.6	40.9	42.1	42.2	40.3	41.4	44.9	42.0	44.2
MgO	5.80	5.70	5.70	4.06	4.83	5.50	4.5	4.75	4.10	4.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.00	6.30	5.90	5.15	5.22	5.80	4.6	5.21	5.60	6.10
S	0.98	0.98	1.14	0.98	0.99	1.08	0.89	0.90	1.03	0.84
MnO	0.10	0.10	0.10	0.17	0.16	0.10	0.13	0.145	0.10	0.19
Fe	0.76	0.23	0.29	0.48	0.43	0.27	0.33	0.58	0.31	0.45
FeO	0.98	0.30	0.38	0.62	0.56	0.35	0.42	0.75	0.39	0.58
K <sub>2</sub> O	0,20	0,20	0,31	0,29	0,40	0,34	0,37	0,47	0,32	0,45
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,38	0,35	0,36	0,50	0,36	0,56	0,44	0,59	0,45
CaO/SiO <sub>2</sub>	1,28	1,30	1,14	1,15	1,10	1,16	1,13	1,00	1,13	0,98
(CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>	1,43	1,45	1,28	1,25	1,21	1,30	1,23	1,11	1,23	1,08

\*н.в. не визначалось

Для ідентифікації проб шлаку стану доменної печі нами запропонована наступна класифікація різновидів шлакового розплаву і нагріву чавуну за температурою і вмістом в ньому кремнію (табл. 2), яка в значній мірі відповідає усталеним поглядам.

Таблиця 2. Класифікація шлаків і різновидів нагріву чавуну на випуску із доменної печі

Основність шлаку $B_1 = \text{CaO/SiO}_2$		Показники			
		Нагрів чавуну			
визначення	діапазон зміни	фізичний, $^\circ\text{C}$		хімічний, % Si	
		визначення	діапазон зміни	визначення	діапазон зміни
кислий	<1,0	холодний	<1400	холодний	<0,5
низкоосновний	1,0–1,1	прогрітий	1400–1450	прогрітий	0,5–0,8
половинчастий	1,1–1,2	гарячий	>1480	гарячий	>0,8
основний	1,2–1,25				
високоосновний	>1,25				

На рис. 2 і 3 представлені фотознімки фрагментів проб застиглої шлаку, що являли собою приблизно четверту частину цілої проби. Вертикальною рисою показано умовний центр проби.

У досліджених пробах високоосновних шлаків рис. 2 а, б (проби №1 і №2) не спостерігалось розшарування на два прошарки, притаманне половинчастим і основним шлакам [2]. Відкол каменеподібний блискучий, колір білий або кремовий світлий. В масі шлаку спостерігається утворення комірок правильної сферичної форми з вкрапленнями вугільного пилу (проба №1). Внаслідок швидкої кристалізації високоосновні шлаки затримують корольки чавуну — на це вказують з однієї сторони завищений вміст Fe і FeO в пробі №1, з другої — виявлені в пробі №2 корольки діаметром до 10 мм.

Половинчасті шлаки з  $B_1 = 1,13 \div 1,14$  (проби №3 і №9) відповідають прогрітим фізично і «перегрітим» за вмістом кремнію чавунам. Однак макроструктура зламу цих проб суттєво відрізняється (рис. 2 в, г). Злам проби №3 (рис. 2, в) приблизно наполовину каменеподібний білий з сіруватим відтінком, наполовину склоподібний, блискучий, чорний. Злам проби №9 (рис. 2, г) за винятком поверхневого шару майже увесь склоподібний, не зважаючи на те, що продукти плавки мали підвищений нагрів і вміст кремнію в металі у порівнянні з продуктами плавки, віднесеними до проби №3. Вочевидь на морфологію зламу проб розглянутих шлаків впливала величина глиноземно-магнезійного модулю. Для проби №3 відношення  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$  склало 1,04, тоді як для проби №9 воно склало 1,37.

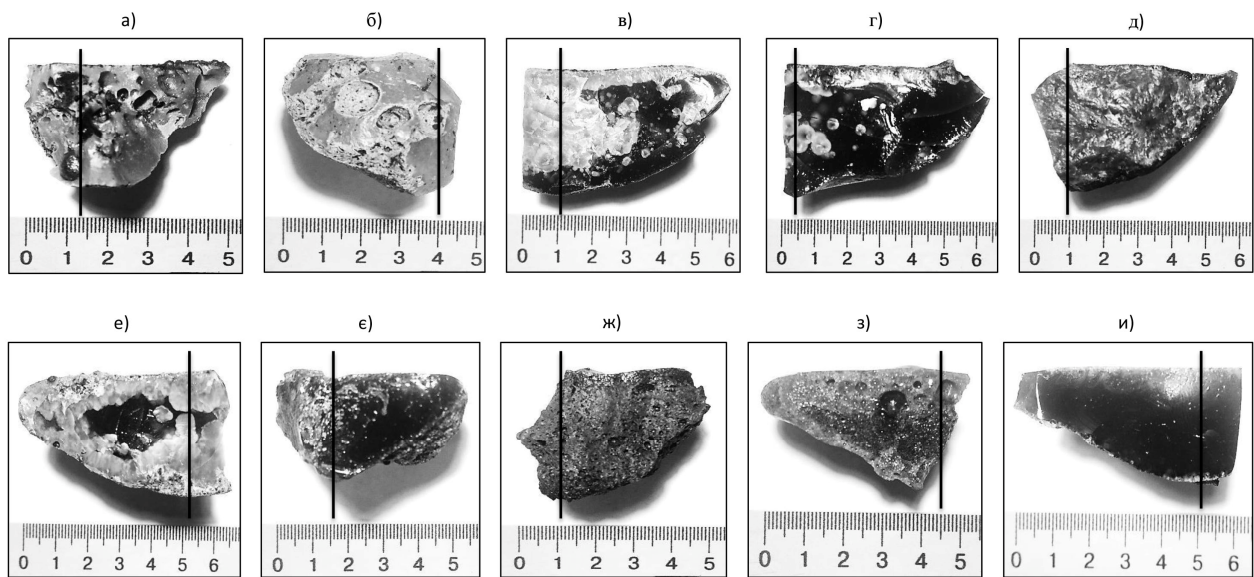


Рис. 2. Макроструктура зламу фрагментів проб застиглого шлаку переробного чавуну в залежності від його основності  $B_1$ , теплового стану печі і глиноземно магнезійного модулю. Пояснення в тексті

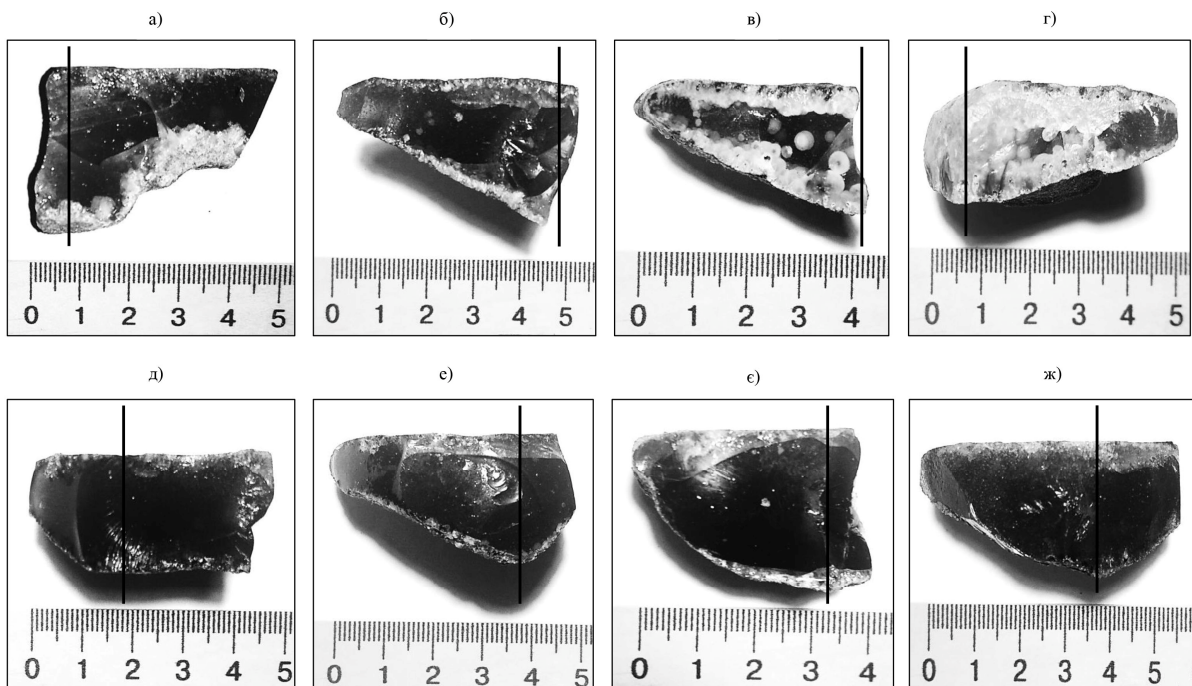


Рис. 3. Макроструктура зламу фрагментів проб застиглого шлаку переробного чавуну, відібраних в послідовності суміжних випусків продуктів плавки при розігріві печі (від а до г) і його зниженні (від г до ж)

Наступні дві проби половинчастих шлаків (№4 і №6) також приблизно однакової основності за модулем  $B_1$  мають суттєві відмінності (рис. 2 д, е). Злам проби №4 (рис. 2, д) камене-подібний, матовий коричневого кольору відповідає холодному чавуну з температурою 1377 °С

і вмістом кремнію 0,31 %. Коричневий колір зламу обумовлено підвищеним вмістом FeO в шлаку (0,62 %) проти 0,35 % в шлаку проби №6. Злам проби №6 відповідає характеристикам проб прогрітих половинчастих шлаків — містить і каменеподібну матову складову і склоподібну частину (рис. 2, е).

Проба №5 шлаку з  $V_1 = 1,10$  відповідала задовільно фізично прогрітому чавуну з низьким вмістом кремнію. Зовнішній вигляд цієї проби показаний на рис. 2, е — на дві третини площі злам склоподібний, в центрі скупчення каменеподібних білих зародків.

Фізично і хімічно холодному чавуну (проба №7) відповідав половинчастий шлак ( $V_1 = 1,13$ ) з каменеподібним зламом сірого кольору з ніздрюватою крупнопористою макроструктурою (рис. 2, ж). Така макроструктура була обумовлена підвищеною в'язкістю холодного шлаку, яка заважала виділенню бульбашок газу із його розплаву. Орієнтовна температура нижнього шлаку для цієї проби була на 162 °C нижче температури хорошої текучості, що є ознакою суттєвих ускладнень дренажу у коксовій насадці горна.

Якщо раніше [2] у пробі кислого шлаку ( $V_1 = 0,98$ ) при виплавці хімічно холодного чавуну  $[Si] = 0,29$  % спостерігалось розшарування проби на два прошарки — нижній щільний і верхній ніздрюватий, то у випадку утворення більш основного шлаку (проби №7) макроструктура зламу була однорідною — ніздрюватість розподілялася рівномірно по всьому об'єму проби.

Наступна пара проб шлаку для порівняння (№8 і №10) відноситься до кислих шлаків приблизно однакової основності за  $V_1$ . Ці проби відповідають чавунам зі зниженим вмістом кремнію, але мають відмінності у фізичному нагріві і величині глиноземно-магнезійного модулю. Проблема №8, віднесена до металу з температурою 1430 °C, мала відношення  $Al_2O_3/MgO = 1,10$ . Поверхня відколу цієї проби мала каменеподібну, блискучу, жовту структуру зі ніздрюватим прошарком біля поверхні (рис. 2, з). Злам проби №10, взятої при виплавці чавуну з температурою 1401 °C зі шлаком з глиноземно-магнезійним модулем 1,42, являв собою склоподібну блискучу поверхню темносірого кольору (рис. 2, и).

Друга серія шлаків (табл. 3, рис. 3) для аналізу була відібрана на ДП А 06.01.2018 р. Особливістю відбору було збереження послідовності випусків продуктів плавки при розігріві печі (проби №13 і №14) і його зниженні (проби №15 і №16). Встановлено, що у досліджених умовах при виплавці фізично і хімічно прогрітого переробного чавуну на кислих ( $V_1 < 1,0$ ) і низькоосновних ( $V_1 = 1,0 \div 1,1$ ) шлаках злам проб скловидний, темний з блискучою поверхнею (проби №11, №12, №15, №18; рис. 3, а, б, д, ж).

Плавка фізично і хімічно прогрітих та перегрітих чавунів на половинчастих шлаках ( $V_1 = 1,12 \div 1,13$ ) визначається зламом проб шлаку двоїстого характеру: аморфна склоподібна маса концентрується не на поверхні проби, як у випадку [2, с. 250], а в її середині. Причому кількість склоподібної маси по мірі перегріву продуктів плавки зменшується (проби №13 і №14; рис. 3, в, г). Каменеподібна складова таких проб білого кольору, має форму сфероподібних скупчень, іноді сфероподібні утворення спостерігаються вкрапленнями у склоподібній частині проби (проба №13; рис. 3, в).

В табл. 4 приведено усереднені дані десульфуруючої здатності шлаків, представлені дослідженими пробами. Як і слід було очікувати, найбільша десульфуруюча здатність спостерігалася у високоосновних шлаках, що забезпечували утворення фізично і хімічно гарячих низькосірчаних чавунів (проби №1 і №2). Для половинчастих шлаків другої групи, незважаючи на значне зниження основності (13,3 %) у порівнянні зі шлаками першої групи, спостерігався суттєвий рівень знесірчення ( $L_S = 74$ ) завдяки високому нагріву продуктів плавки.

Зниження коефіцієнту розподілу сірки для більш основних половинчастих шлаків у порівнянні зі шлаками другої групи було обумовлено зниженням нагріву розплавів на 4,4 %. Достатньо високий рівень знесірчення ( $L_S = 41$ ;  $[S] = 0,019$ ) було досягнуто при утворенні низькоосновних шлаків четвертої групи, при нормальному нагріві розплавів. П'ятій групі кислих шлаків при холодному ході печі відповідали найгірші показники десульфурації в робочому просторі печі.

Таблиця 3. Характеристика продуктів плавки на суміжних випусках ДП А 06.01.2018 р.

№ проби	№ випуску	Чавун				Шлак							Температура, °C	орієнтована температура, °C	
		Склад, %				Склад, %									
		Si	Mn	S	P	температура, °C	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	MnO	FeO	CaO/SiO <sub>2</sub>			
1	36523	0,86	0,09	0,018	0,061	1470	4,10	5,60	0,9	0,10	0,31	1,10	1473	1506	-33
2	36524	0,82	0,08	0,014	0,058	1458	4,10	5,20	0,6	0,10	0,44	1,05	1461	1511	-50
3	36525	0,94	0,08	0,010	0,051	1474	4,20	5,30	0,7	0,10	0,33	1,12	1477	1501	-24
4	36526	0,99	0,09	0,011	0,055	1495	4,10	5,20	0,7	0,10	0,31	1,13	1498	1500	-2
5	36527	0,69	0,07	0,018	0,054	1484	4,20	5,40	0,7	0,10	0,37	1,07	1487	1507	-20
6	36528	0,57	0,07	0,024	0,052	1462	4,00	5,30	0,7	0,10	0,38	1,06	1465	1511	-16
7	36529	0,83	0,07	0,018	0,054	1463	4,11	5,95	0,8	0,12	0,50	1,02	1466	1519	-53
8	36530	0,74	0,07	0,023	0,053	1468	4,01	5,50	0,7	0,10	0,48	1,01	1471	1506	-35

Таблиця 4. Усереднені дані про відповідність якості чавуну дослідженим пробам шлаків різної основності

№ проб	Різновид шлаку за основністю ( $CaO/SiO_2$ )	№ групи шлаку	Характеристика чавуну				
			Визначення ступеню нагріву	Температура, °C	Склад, %		$L_S$
					Si	S	
1,2	Високоосновні (1,29)	I	Фізично і хімічно гарячий	1497	1,44	0,010	94
13,14	Половинчасті (1,12)	II	Фізично і хімічно гарячий	1484	0,96	0,010	74
3÷7,9	Половинчасті (1,14)	III	Задовільно фізично і нормально хімічно прогрітий	1419	0,63	0,025	60
12,16÷18	Низькоосновні (1,04)	IV	Фізично і хімічно прогрітий	1467	0,74	0,019	41
8,10	Кислі (0,99)	V	Задовільно фізично і хімічно холодний	1415	0,39	0,048	22

### Висновки

Досліджено зміну морфології поверхні зламу проб доменного шлаку при виплавці переробного чавуну з вдуванням пиловугільного палива у порівнянні з пробами при колишньому шлаковому режимі, характерному для плавки на коксі з підвищеним вмістом сірки із вдуванням природного газу. Поряд зі загальним для проб шлаку для колишніх і нових умов експлуатації печей, а саме зменшенням склоподібної аморфної частини проби зі збільшенням основності шлаку, виявлено зникнення чіткого розмежування прошарків на поверхні зламу проб.

Встановлено, що на макроструктуру зламу проб шлаку крім відношення  $CaO/SiO_2$  і нагріву печі впливає величина глиноземно-магнезійного модулю з її зростанням збільшується склоподібна частина відколу проби.

Встановлено також, що відхилення основності у бік кислих або високоосновних шлаків супроводжувалося поглинанням частинок вугільного пилу шлаковим розплавом. Виявлені зміни поверхні зламу шлакових проб слід враховувати при оперативному контролі за ходом доменного процесу.

### Список використаної літератури

1. Жеребин Б.Н. Практика ведения доменной печи. М.: Metallurgiya, 1980.
2. Плискановский С.Т., Полтавец В.В. Оборудование и эксплуатация доменных печей. Днепропетровск: Пороги, 2004. 495 с.
3. Бабарькин Н.Н. Теория и технология доменного процесса: Учебное пособие; Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 257 с.
4. Кочержинская Ю.В. Прогнозирование структуры и свойств конечных доменных шлаков: автореф. дис. ... канд.техн.наук : Магнитогорск. МГМИ им.Г.И.Носова. 2004. 19 с.
5. Товаровский И.Г. Доменная плавки в мощных печах / И.Г.Товаровский, Р.Д. Каменев, Г.Б.Рабинович // Metallurgiya. 1968. 116 с.
6. Suqiura M., Otani Y., Nai Shima, Omoto N., Continious Temperature Measurement of Liquid Iron and Slaq Tappeq from a Blast Furnace S/CE *Journal of Control Measurement and System Integration* May 2014. Vol. 7. 3. P. 147–151.
7. Степаненко Д.А., Цюпа Н.А, Белькова А.Н., Скачко А.С. Аналитическое и экспериментальное исследование теплофизических свойств расплавов доменных шлаков в условиях работы доменных печей Украины *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2018. Вып. 32. С. 137–150.



## MACROSTRUCTURE OF CROSS SECTION OF BLAST-FURNACE SLAG SAMPLES IN IRON MELTING WITH DUST-COAL FUEL INJECTION

Kuznetsov M., Siharev Ye., Kryachko H.

### Abstract

The macrostructure of blast furnace slag cross section samples during melting of pig iron with pulverized coal fuel injection on three blast furnaces with a volume of 1500 and 1386 m<sup>3</sup> (2 units) was studied. The range of changes in the basicity of the studied slag samples (CaO/SiO<sub>2</sub>) was 0.98—1.30; corresponding to the temperature samples of cast iron and its silicon content ranged from 1324—1510 °C and 0.13—1.17 %. To identify blast furnace slag samples in specific operating conditions, the samples were basically divided into five groups from acidic (B1<1,0) to highly basic (B1>1,25). By its physical heating characteristics the cast iron was divided into 3 groups: cold (<1400 °C); heated (1400—1480 °C); hot (>1480 °C). According to chemical heating, the division was also carried out into three groups: cold (<0.5% Si); heated (0.5—0.8) hot (> 0.8). The look of cross section surface of acidic and low-basic slag is the same for former slag regime and the new, due to the use of coke and pulverized fuel with limited sulfur; in conditions of normal heating the cross section is vitreous, shiny dark color. When cooled, the vitreous and luster of cross section of such slags disappears — the chip becomes stone-like gray or black with some difference in the formation of macropores in the sample mass. Common for slag samples with B1>1,1 is a decrease in the vitreous amorphous part with increasing modulus of basicity. The difference for such slags in comparison with those known for melting in other raw material conditions is the lack of clear delimitation of layers in the cross section of the samples, especially noticeable for half-slags. It is established that the macrostructure of slag samples apart from the main B1 and furnace heating is influenced by the magnitude of the alumina-magnesium modulus; this fact should be taken into account in the operational control of the blast furnace for external conditions. It was also found that the deviation of the basicity towards acidic or highly basic slags was accompanied by the absorption of coal dust particles by slag melt. The properties of samples in terms of fluidity and desulfurizing ability of corresponding slags are considered.

### References

- [1] Zhrebina B.N. (1980) Практика ведения доменной печи. Praktika vedeniya domennoi pechi [*The practice of blast furnace operation*]. Moscow: Metallurgy [in Russian].
- [2] Pliskanovsky, S.T., & Poltavets V.V. (2004). Oborudovanie i ekspluatatsiia domennyh pechei [*Equipment and operation of blast furnaces*] Dnepropetrovsk: Publishing house: Porogi [in Ukrainian].
- [3] Babarykin N.N. (2009) Teoriia i tehnologiia domennogo protsessa [*Theory and technology of the blast furnace process*]. Textbook; Magnitogorsk: GOU VPO "MGU" [in Russian].
- [4] Kocherzhinskaya Yu.V. (2004) Prognozirovanie struktury i svoystv konechnykh domennyh shlakov [Prediction of the structure and properties of final blast-furnace slags]. *Candidate's thesis*. Magnitogorsk. MGMI named after G.I. Nosov. [in Ukrainian].
- [5] Tovarovsky, I.G., Kamenev, R.D. & Rabinovich, G.B. (1968) Domennye plavki v moshchnykh pechakh [*Blast furnace in powerful furnaces*], Metallurgy.
- [6] Sujiura M., Otani Y., Nai Shima, & Omoto N., Continuous Temperature Measurement of Liquid Iron and Slag Tappeq from a Blast Furnace S/CE *Journal of Control Measurement and System Integration* May 2014. Vol. 7, № 3. P.147–151.
- [7] Stepanenko, D.A., & Tsiupa, N.A., & Belkova A.N. (2018) & Skachko A.S. Analiticheskoe i eksperimentalnoe issledovanie teplofizicheskikh svoystv rasplavov domennyh shlakov v usloviiah raboty domennyh pechei Ukraine [Analytical and experimental study of thermophysical properties of melts of blast-furnace slags in the conditions of operation of blast furnaces in Ukraine] *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy* 2018. Issue. 32. P.137–150. [in Ukrainian].