

9. On the effects of cutting speed and cooling methodologies in grooving operation of various tempers of β -titanium alloy / Machai C., Iqbal A., Biermann D., Upmeier T., Schumann S. // Journal of Materials Processing Technology. 2013. Vol. 213, Issue 7. P. 1027–1037. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.021
10. Wear performance of (nc-ALTiN)/(a-Si3N4) coating and (nc-AlCrN)/(a-Si3N4) coating in high-speed machining of titanium alloys under dry and minimum quantity lubrication (MQL) conditions / Liu Z., An Q., Xu J., Chen M., Han S. // Wear. 2013. Vol. 305, Issue 1-2. P. 249–259. doi: 10.1016/j.wear.2013.02.001
11. Shyha I., Gariani S., Bhatti M. Investigation of Cutting Tools and Working Conditions Effects when Cutting Ti-6al-4V using Vegetable Oil-Based Cutting Fluids // Procedia Engineering. 2015. Vol. 132. P. 577–584. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.535
12. Characterisation of Aloe Vera as a Cutting Fluid / Hartono P., Pratikto, Suprpto A., Irawan Y. S. // Modern Machinery Science Journal. 2017.
13. Komposisi Kimia Gel Lidah Buaya (Aloe vera L.). Ministry of Health of Republic of Indonesia, 1992.

На двох промислових доменних печах досліджені шлаковий режим і нагрів чавуну при переході на вдування пилувугільного палива. Негативним наслідком зміненого шлакового режиму було зниження фізичного нагріву чавуну. Досліджено вплив змін у складі шлаків на в'язкість розплавів. Вивчено вплив характеристик шлакового режиму – в'язкості, основності і стехіометрії на нагрів чавуну. Суттєвий вплив шлаку на нагрів металу свідчить про необхідність врахування цього впливу при управлінні доменною плавкою і наступній переробці чавуну в сталь

Ключові слова: доменна піч, шлаковий режим, в'язкість, основність, шлак, нагрів чавуну

На двух промышленных доменных печах исследованы шлаковый режим и нагрев чугуна при переходе на вдувание пылеугольного топлива. Отрицательным следствием измененного шлакового режима явилось снижение физического нагрева чугуна. Исследовано влияние изменений в составе шлаков на вязкость расплавов. Изучено влияние характеристик шлакового режима – вязкости, основности и стехиометрии на нагрев чугуна. Существенное влияние шлака на нагрев металла свидетельствует о необходимости учета этого влияния при управлении доменной плавкой и последующем переделе чугуна в сталь

Ключевые слова: доменная печь, шлаковый режим, вязкость, основность, шлак, нагрев чугуна

УДК 669.162

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.122970

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ДОМЕННОГО ШЛАКА НА НАГРЕВ ЧУГУНА ПРИ ВДУВАНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

М. С. Кузнецов
Аспирант*

Г. Ю. Крячко
Кандидат технических наук, доцент*
E mail: krachkogennadij@gmail.com

В. П. Полетаев
Кандидат технических наук, доцент*
E mail: poletaevvladimir@gmail.com

Н. Н. Валуева
Кандидат филологических наук, доцент
Кафедра перевода**
E-mail: valuyevaN@ukr.net

*Кафедра металлургии черных металлов**
**Днепропетровский государственный
технический университет
ул. Днепропетровская, 2, г. Каменское,
Украина, 51918

1. Введение

Переход доменных печей в Украине на вдувание пылеугольного топлива (ПУТ), как правило, сопровождался изменением шлакового режима. Зачастую это изменение характеризовалось снижением основности шлака как по

отношению CaO/SiO_2 (C/S), так и по $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ (C+M)/S. Снижением основности шлака предполагалось компенсировать отрицательное влияние ПУТ на проницаемость коксовой насадки в зоне стекания расплавов. В результате, как было показано в работе [1], произошёл сдвиг шлакового режима в сторону образования

половинчатых шлаков, при этом снизилась температура выпускаемого чугуна. Известно, что это снижение создаёт определённые проблемы при дальнейшей конвертерной переработке жидкого чугуна. Половинчатые шлаки $C/S=1,1-1,2$ получили своё название по специфике застывания пробы, состоящей в изломе из двух частей: характерной для кислых – стекловидной ($C/S < 1,1$) и характерной для основных – камневидной ($C/S > 1,2$). До перехода на вдувание ПУТ работа на высокосернистом донецком коксе требовала формирования основных шлаков. Поэтому изучению свойств половинчатых шлаков, обладающих меньшей серопоглощительной способностью, внимания уделялось мало. Если же при переходе на вдувание ПУТ приходилось работать на основных шлаках, физический нагрев чугуна на выпуске не снижался. Однако для обеспечения нормальной работы горна и сохранения ровного хода печи требовалось увеличение числа промывок и расхода промывочных материалов до 32 кг/т чугуна [3].

При анализе изменений шлакового режима доменной печи объёмом 1386 м³ Днепровского металлургического комбината (ДМК, Украина) было показано, что переход на половинчатые шлаки в связи с вдуванием ПУТ сопровождался понижением температур плавления шлаковых расплавов [1]. Результаты исследования не противоречили известным положениям о влиянии основности на указанную выше характеристику шлака. В то же время с использованием диаграммы вязкости тройной системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ (C-S-A), было установлено уменьшение вязкости шлака при снижении основности шлака. Это, в известной, мере противоречило установившимся взглядам на зависимость текучести шлака от его основности. Учитывая значительное влияние шлаковых расплавов на выплавку чугуна, возникла необходимость изучения причин этого явления. Следует признать, что проблема обеспечения рационального шлакового режима при переходе печей на вдувание ПУТ существует и поиск путей ее решения актуален.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В последнее десятилетие глинозёму и магнезии, занимающим, как правило, третью и четвертую по массе строчки в составе доменных шлаков, уделяется достаточно много внимания [3–8]. Хотя Al_2O_3 и MgO не являются шлаковыми «тяжеловесами», такими как CaO и SiO_2 , влияние первых на вязкость расплавов и термический уровень доменного процесса не подлежит сомнению.

В работе [3] показано, что независимо от содержания FeO при одной и той же основности $(C+M)/S$ вязкость шлака зависит от содержания в нём глинозёма. Было установлено существенное снижение вязкости расплавов при уменьшении концентрации Al_2O_3 с 15 до 5 % в широком диапазоне изменения основности, причём минимум вязкости снижался в сторону меньшего значения $(C+M)/S$. О температурном уровне процесса при среднем глинозёмно-магнезиальном модуле 1,5 можно судить по усреднённой температуре шлака 1590 °С. Такой шлак, формально относящийся по усреднённому индексу $C/S=1,11$ к половинчатому, обеспечит высокий физический нагрев чугуна. Формально потому, что половинчатые известково-силикатные шлаки Украины имеют иной минералогический состав первичных кристаллических фаз.

Сотрудниками исследовательского подразделения фирмы China Steel Corporation (CSC, Тайвань) установлено, что нижняя температура ликвидуса и лучшая стабильность вязкости лежат в области $MgO=5,4\%$, $Al_2O_3=10-15\%$, $TiO_2=0,5\%$ и $C/S=1,2$ [4]. Было показано, что температура ликвидуса снижалась с уменьшением концентрации MgO , а вязкость шлака не зависела от содержания MgO в диапазоне 5–9 % при $C/S=1,2$ и $Al_2O_3=15\%$. Поэтому было принято решение снизить в шлаках доменных печей CSC концентрацию магнезии с 6,5 до 5,4 %. Это позволило уменьшить выход шлака. Модуль Al_2O_3/MgO при этом повысился с 2,2±2,3 до 2,7. Высокий термический уровень процесса обеспечивался повышенным уровнем основности C/S в пределах 1,18–1,20, температура чугуна на выпуске составила 1495–1504 °С. Принимая во внимание результаты исследования [3], можно полагать, что высокому нагреву чугуна способствовал также вязкий глинозёмистый шлак. Формально шлак CSC относится к верхнему пределу половинчатых шлаков.

Авторы работы [5] на основе изучения свойств промышленных и синтетических глинозёмистых шлаков предложили статистическую модель для оценки вязкости шлаков по содержанию четырёх основных его компонентов:

$$V=0,005+0,0262[SiO_2]+0,0184[Al_2O_3]-0,0172[CaO]-0,0244[MgO].$$

Судя по коэффициентам при составляющих шлака, наибольшее значение для определения вязкости расплава должен иметь SiO_2 , наименьшее CaO . Промежуточные места в такой ранжировке занимают MgO и Al_2O_3 . Построение модели отвечает установившимся взглядам – увеличение в шлаке содержания оксидов комплексообразующих компонентов (SiO_2 , Al_2O_3) повышает вязкость шлака. Увеличение содержания в шлаке CaO и MgO , продуцирующих анионы кислорода, разрушает кремнекислородные комплексы и снижает вязкость шлака. Однако приведённая выше модель, как и все статистические модели, имеет «привязку» к конкретным условиям плавки и не учитывает значение глинозёмно-магнезиального модуля, с изменением которого разжижающее влияние MgO может не проявляться [4].

В то же время разработка моделей является перспективным направлением, поскольку экспериментальное определение вязкости шлака требует как высокотемпературного оборудования, так и больших затрат времени [6].

Группа японских исследователей с использованием радиационного пирометра получила не совсем обычные данные о температурах чугуна и шлака на выпуске продуктов плавки [7]. Согласно замеру пирометром, температура чугуна на некоторых выпусках достигала и даже превышала 1550 °С, тогда как температура шлака при этом была на 20–30 °С ниже. При пониженном нагреве 1400–1470 °С температура расплавов была одинаковой. Следует заметить, что в рассмотренной работе нет данных о химическом составе шлаков. Принято считать, что слой шлака, находящийся выше слоя чугуна и ближе к фурменным очагам, прогрет больше, чем чугун. Следует бы выяснить, какими факторами обусловлена необычная разница температур расплавов – большей глубиной горна, развитием прямого жидкофазного восстановления или другими факторами.

Индийские специалисты [8] считают целесообразной работу печей с «короткими» шлаками, с небольшой разницей между температурой начала пластической деформации кусков железорудного сырья (ST) и температурой подвижной жидкости расплава (FT). В конкретных сырьевых условиях, когда концентрация глинозёма в шлаках колеблется в пределах 18–21 %, а отношение Al_2O_3/MgO составляет 1,9–2,8, минимальная разница FT-ST наблюдается при содержании MgO в шлаке 4,6–8,6 % и основности $C/S=1,12$. Эта разница в размере 93–98 °C возрастает примерно в два раза при снижении основности либо при увеличении содержания MgO в шлаке до 10 %. Заслуживает внимания тот факт, что несмотря на значительную разницу в составе сырья и химического состава шлаков практически на всех континентах индекс C/S поддерживается в узком диапазоне 1,10–1,20.

В работе [9] утверждается, что с увеличением содержания MgO в агломерате интервалы размягчения и плавления увеличиваются. Это сдвигает и утолщает пластичную зону доменной печи.

Таким образом, анализ современной информации по исследуемому вопросу показал следующее:

1. Отсутствуют данные о влиянии существенных изменений шлакового режима на вязкость шлаков. Очевидно, что при высоком качестве шихтовых материалов перевод печей на вдувание пылеугольного топлива не вызвал заметных изменений в составе шлака.

2. Нет обобщений о том, как и каким образом свойства шлаков влияют на физический и химический нагрев чугуна.

3. У авторов рассмотренных выше работ нет единого мнения о роли магнезии в формировании свойств первичного, промежуточного и конечного шлаков. Вероятно, это вызвано существенными различиями свойств проплавленного сырья и широким диапазоном колеблемости глинозема и магнезии в шлаках.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования являлось определение изменения вязкости шлаков при переходе с вдувания природного газа на вдувание пылеугольного топлива и определение влияния изменения шлакового режима на нагрев чугуна. Это даст возможность установления рационального шлакового режима, обеспечивающего заданные параметры химического и физического нагревов чугуна.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определить, в какой мере переход на половинчатые шлаки повлиял на вязкость расплавов;
- оценить влияние изменений вязкости шлака на нагрев чугуна;
- установить связь между основностью и стехиометрией шлака с физическим нагревом металла;
- оценить влияние магнезии в шлаке на температуру чугуна.

4. Методика исследования влияния шлакового режима на вязкость доменного шлака и температуру чугуна

Отбор массивов производственных данных о шлаковом режиме и других показателях процесса произведен

при переходе двух доменных печей ДМК с вдувания природного газа на использование ПУТ. Продолжительность единичного периода составила одни календарные сутки. Сутки с простоями печей исключались из рассмотрения. Длительность периодов сравнения указана далее в тексте.

Доменная печь «А» в сравнении с типовой (полезный объём 1513 м³) отличалась большей высотой горна 4 м и мёртвого слоя 1,4 м против 3,2 и 0,765 м соответственно. На печи установлено 20 воздушных фурм. Размеры доменной печи «В» также отличались от типового проекта (полезный объём 1386 м³) высотой горна 3,4 м против 3,2 и высотой зумфа – 1,1 против 0,45 м. На последнем капитальном ремонте количество воздушных фурм было увеличено с 16 до 18.

В исследованных периодах печь «А» работала на коксе с горячей прочностью CSR в пределах 59–64 %, печь «В» – на коксе с показателем CSR до 57 %. На печи «А» использовали местный агломерат (100 %) с содержанием железа 54–57 %, а на «В» – местный агломерат (~70 %) и криворожские окатыши (~30 %).

Оценка вязкости шлаков исследуемых периодов производилась с помощью трёхосной диаграммы CaO–SiO₂–Al₂O₃ (C–S–A), известной под названием диаграммы Мак-Кефери. Влияние на вязкость четвёртого по массе и значению компонента шлака MgO учитывали по справочному изданию [10].

Оценка свойств реальных доменных шлаков с использованием системы C–S–A–M так же не лишена недостатков, так как не учитывает всего состава шлаков. Поэтому в качестве критерия химических свойств шлака использовали показатель стехиометрии ρ – один из расчётных параметров модели упорядоченной структуры оксидных расплавов, разработанной в Институте чёрной металлургии НАН Украины Э. В. Приходько. Показатель стехиометрии рассчитывали по отношению чисел катионов (K) к числу анионов (A) [11]:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^m M_{K_i}}{\sum_{i=1}^m M_{A_i}}, \quad (1)$$

где

$$M_{K_i} = \frac{C_i X_i}{X_i m_{K_i} + Y_i m_{K_i}}, \quad M_{A_i} = \frac{C_i Y_i}{X_i m_{A_i} + Y_i m_{A_i}},$$

где M_{K_i} , M_{A_i} – мольные доли катионов и анионов в их катионной и анионной подрешётках; C_i – весовой процент содержания оксида или сульфида в шлаке; m_A , m_K – атомная масса аниона или катиона; X_i , Y_i – число катионов и анионов в химической формуле оксида с номером i ; m – количество оксидов в системе.

5. Результаты исследования влияния переходных параметров шлакового режима на вязкость шлака и температуру чугуна

В качестве базовых (табл. 1) приняты периоды работы печей либо с минимальным средним расходом ПУТ (ДП А), либо без вдувания угля (ДП В). Кроме расхода восстановителей на плавку представлены характеристики шлака и температуры чугуна.

Таблица 1

Показатели работы доменных печей Днепровского металлургического комбината с вдуванием природного газа и пылеугольного топлива

Печи	А			В		
	Периоды	І базовый 01.01– 31.01.2015	ІІ опытный 08.08– 31.08.2015	ІІІ опытный 01.12– 20.12.2015	І базовый 06.06– 30.06.2004	ІІ опытный 01.01– 31.01.2014
Производительность, %	100,0	108,3	110,8	100,0	108,9	124,9
Расход восстановителей кг(м³)/т чугуна:						
кокс	475	389	436	501	559	400
кокосый орех	0	16	32	0	0	0
антрацит	0	0	0	0	17	0
природный газ	6	4	0	73	12	0,8
ПУТ	112	135	140	0	0	156
Содержание в шлаке, %:						
CaO	45,48	45,20	45,15	48,3	47,6	45,5
SiO ₂	39,16	40,92	41,15	40,22	39,4	40,5
Al ₂ O ₃	7,59	6,22	6,25	5,1	6,49	6,31
MgO	5,71	6,18	5,18	5,3	5,0	6,1
MgO/(CaO+SiO ₂)	0,067	0,071	0,060	0,060	0,057	0,071
Al ₂ O ₃ /MgO	1,33	1,01	1,21	0,96	1,30	1,03
CaO/SiO ₂	1,16	1,10	1,10	1,20	1,21	1,12
(CaO+MgO)/SiO ₂	1,31	1,26	1,22	1,33	1,34	1,27
Температура чугуна, °С	1462	1451	1439	Н.д.	1479	1450

На фрагменты трёхосных диаграмм вязкости шлаков системы С–S–А нанесли точки расчётных составов реальных шлаков исследуемых периодов І и ІІ для ДП А и І и ІІІ для ДП В (рис. 1–4).

На рис. 1, 2 сопоставлены группы фигуративных точек, отвечающих составам шлаков ДП А в январе и августе 2015 г., отличающихся основностью С/S. Изокомы на участках диаграмм отвечают фиксированным температурам 1400 (рис. 1) и 1500 °С (рис. 2).

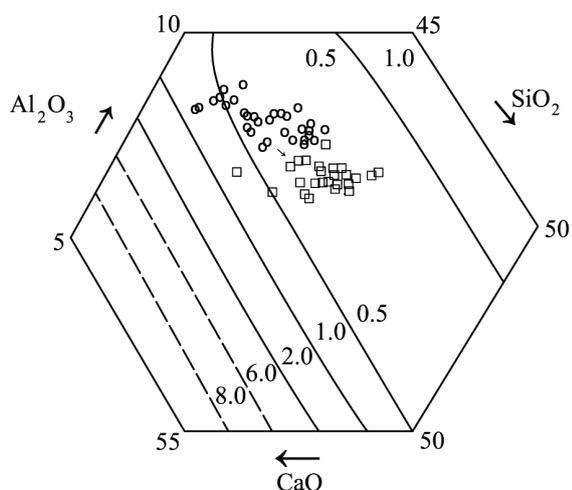


Рис. 1. Участок диаграммы вязкости шлаков системы С–А–S при температуре 1400 °С с нанесением фигуративных точек, отвечающих составам шлаков ДП А: о – шлаки основностью 1,16; □ – шлаки основностью 1,10; цифры у изоком – вязкость, Па·с; стрелкой указано смещение шлаков

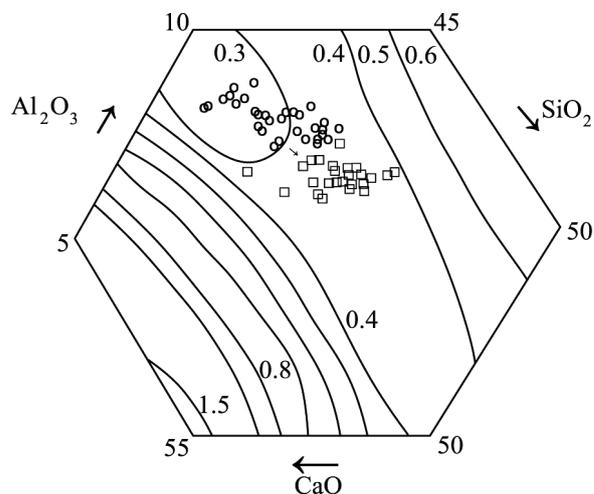


Рис. 2. Участок диаграммы вязкости шлаков системы С–А–S при температуре 1500 °С с нанесением фигуративных точек, отвечающих составам шлаков ДП А: обозначения те же, что и на рис. 1

Графическая информация, приведенная на рис. 3, 4, относится к периодам работы ДП В в июне 2004 г. (с вдуванием природного газа) и мае 2015 г. (с вдуванием ПУТ).

Обычно температурой начала активного дренажа расплавов считают 1400 °С. Используя данные диаграмм С–S–А для указанной температуры (рис. 1, 3), сделана попытка оценить влияние вязкости шлаков на нагрев чугуна. Анализ показал, что, несмотря на определенные допущения, удалось установить достаточно тесную связь между вязкостью шлака и содержанием в нем кремния ($R^2=0,20+0,82$). Согласно полученным данным,

увеличение вязкости шлака на 0,1 Па·с сопровождалось повышением концентрации кремния в чугуна на 0,08–0,1%. Теснота связи между температурой чугуна и вязкостью шлака оказалась низкой ($R^2=0,07\pm 0,21$), однако тенденция роста температуры с повышением вязкости имела место.

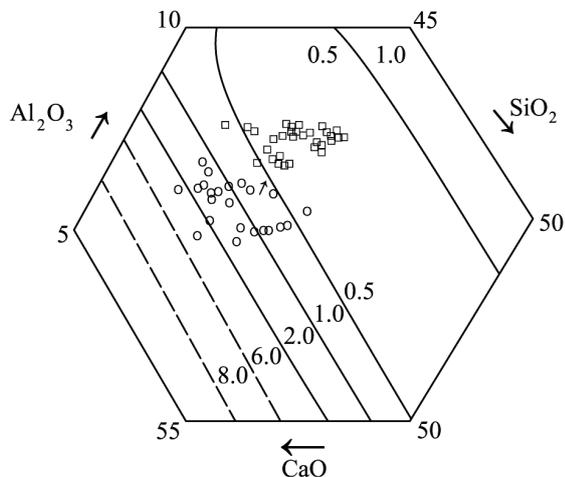


Рис. 3. Участок диаграммы вязкости шлаков системы С–А–S при температуре 1400 °С с нанесением фигуративных точек, отвечающих составам шлаков ДП В: о – шлаки основностью 1,20; □ – шлаки основностью 1,12; остальные обозначения те же, что и на рис. 1

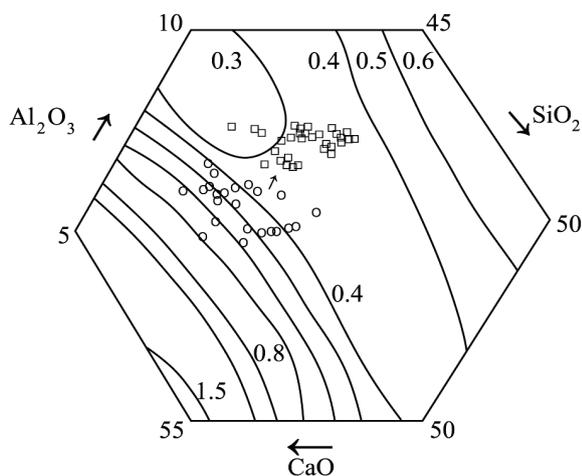


Рис. 4. Участок диаграммы вязкости шлаков системы С–А–S при температуре 1500 °С с нанесением фигуративных точек, отвечающих составам шлаков ДП В: обозначения те же, что и на рис. 3

Достоинством показателя стехиометрии ρ является отсутствие необходимости перехода от состава реального шлака к малокомпонентным упрощённым системам. Поскольку показатели основности шлака по существу представляют собой упрощённые показатели стехиометрии, то между теми и другими должна существовать тесная связь.

Это подтверждается данными рис. 5, на котором сопоставлены данные, относящиеся к периодам работы доменной печи «В» с вдуванием природного газа и измельченного угля.

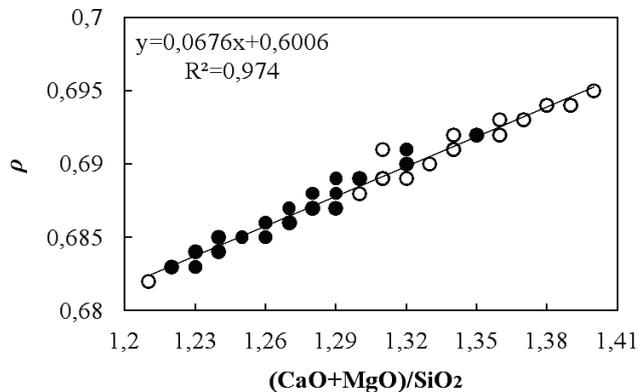


Рис. 5. Зависимость между показателем стехиометрии и основности шлака в периоды с вдуванием природного газа (о), пылеугольного топлива (●) на доменной печи В (периоды I и III, табл. 1)

Учитывая то, что одной из важных функций шлака является поддержание необходимой температуры чугуна в печи и на выпуске, то связь между физическим нагревом металла и показателями, отражающими его свойства для конкретных условий плавки, имела место (рис. 6, 7). Характерно, что зависимость температуры чугуна от модуля основности (рис. 6) была теснее, чем показателя стехиометрии ρ (рис. 7).

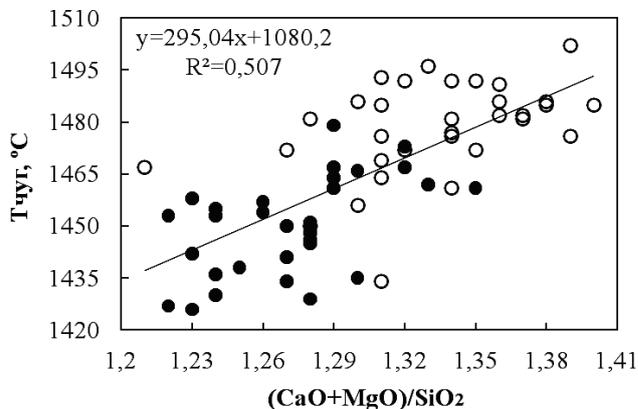


Рис. 6. Связь температуры чугуна с основностью шлака в периоды с вдуванием природного газа (о) и пылеугольного топлива (●) на доменной печи В (периоды I и III табл. 1)

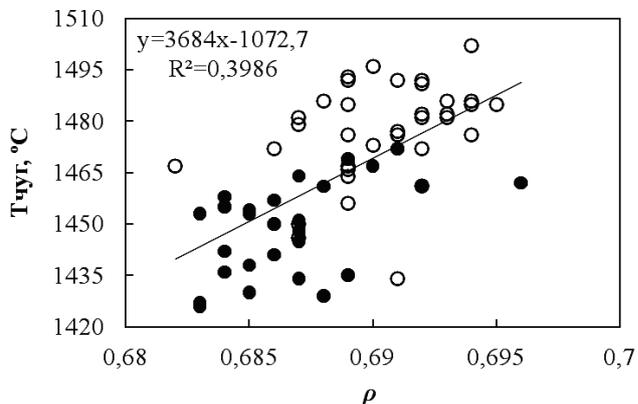


Рис. 7. Зависимость температуры чугуна от показателя стехиометрии шлака ρ : остальные значения те же, что и на рис. 6

Очевидно, что для полноценной оценки свойств расплава совместно с показателем ρ следует рассматривать и другие среднестатистические параметры, характеризующие индивидуальность шлака. Этими параметрами являются химический эквивалент системы Δe , межъядерное расстояние катион – анион d и особенность катионной подрешётки $tg\alpha_k$ [11].

Для выяснения влияния магнезии на температуру выпускаемого чугуна рассмотрели следующие зависимости нагрева металла (табл. 2).

обратившись к расчётным характеристикам шлака, учитывающим изменение содержаний Al_2O_3 (элемента тройной системы C–S–A) и MgO – четвертого компонента расплава (табл. 1). Так, возрастанию вязкости шлаков на ДП А соответствовали уменьшение в среднем модуля $Al_2O_3/MgO(A/M)$ с 1,33 до 1,01 и несущественное увеличение отношения $MgO/(CaO+SiO_2)(M/(C+S))$ с 0,067 до 0,071. Небольшое увеличение глинозёмно-магнезимального модуля A/M на ДП В в периоде III по сравнению с периодом I с 0,96 до 1,03, но существенное возрастание параметра M/(C+S) с 0,060 до 0,071 привело к снижению вязкости шлаков.

Таблица 2

Данные о влиянии параметров шлакового режима на температуру выпускаемого чугуна (°C)

Печь	Период	Параметр шлакового режима	Уравнение регрессии	Корреляционное отношение R^2	Среднее за период значение A/M
А	I	MgO, %	$y = -2,3487x + 1475,5$	0,0268	1,33
		$MgO/(CaO+SiO_2)$	$y = -203,77x + 1475,9$	0,0310	
		Al_2O_3/MgO	$y = 11,42x + 1446,5$	0,0611	
	II	MgO, %	$y = 7,595x + 1404,1$	0,0945	1,01
		$MgO/(CaO+SiO_2)$	$y = 581,44x + 1409,3$	0,0855	
		Al_2O_3/MgO	$y = -38,225x + 1490$	0,0668	
В	II	MgO, %	$y = 1,491x + 1471,6$	0,0026	1,30
		$MgO/(CaO+SiO_2)$	$y = 115,89x + 1472,4$	0,0023	
		Al_2O_3/MgO	$y = -44,014x + 1496,1$	0,0762	
	III	MgO, %	$y = 8,9354x + 1395,8$	0,1033	1,03
		$MgO/(CaO+SiO_2)$	$y = 714,24x + 1399,5$	0,1056	
		Al_2O_3/MgO	$y = 4,332x + 1473,4$	0,0012	

В табл. 2 в качестве аргументов X использованы параметры шлакового режима, отражающие долю магнезии в составе шлака и ее соотношение с основными компонентами, а также с глинозёмом. Эти параметры представляют собой абсолютное (MgO) и относительное $MgO/(CaO+SiO_2)$ содержание магнезии в шлаке, а также глинозёмно-магнезимальный модуль Al_2O_3/MgO . В качестве зависимой переменной Y использован физический нагрев чугуна, более конкретно, его температура на выпуске.

6. Обсуждение результатов исследования влияния параметров шлакового режима на вязкость шлака и температуру чугуна

Из представленной на рис. 1 графической информации видно, что при 1400 °C снижение основности шлаков с 1,16 до 1,10 на ДП А практически не изменило вязкость расплавов. Обе группы шлаков разместились в основном, в области, ограниченной изокомой 0,5 Па·с.

На рис. 2, отражающем состояние тех же шлаков, но при фиксированной температуре 1500 °C, хорошо видно смещение менее основных шлаков (C/S=1,10) из области, ограниченной изокомой 0,3 Па·с в область с вязкостью 0,4 Па·с.

Напротив, на ДП В снижение модуля C/S с 1,20 до 1,12 сопровождалось существенным снижением вязкости как при температуре 1400 °C (рис. 3), так и при температуре 1500 °C (рис. 4). Объяснить это различие можно

Зависимость химического нагрева чугуна от вязкости шлаков, установленную с помощью диаграмм системы C–S–A, можно объяснить следующим. Вязкий шлак промежуточного состава, с одной стороны, приносит в высокотемпературную зону больше тепла.

С другой стороны, из-за пониженной текучести вязкого шлака увеличивается время контакта шлака с восстановительной средой. Оба обстоятельства способствуют усилению восстановления кремния. Статистическая оценка связи между вязкостью шлака и содержания в нем кремния показала прямую зависимость последнего от вязкости расплава.

Для выяснения влияния основности на вязкость синтетических шлаков четырёхкомпонентной системы CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO(C–S–A–M) по данным работы [10] построено семейство кривых зависимости вязкости η от изменения модуля CaO/SiO₂ при постоянном содержании глинозёма в количестве 7 % и магнезии 5 % от массы пробы (рис. 8). Полученные данные свидетельствуют о существовании экстремумов на кривых $\eta = f(CaO/SiO_2)$, относящихся к диапазону изменения основности 1,0–1,2 единиц. Видно, что с понижением температуры экстремум появлялся резче и при температуре 1300 °C сдвигался в сторону меньшей основности. Удаление основности от экстремума, как при понижении основности, так и при её повышении, сопровождалось возрастанием вязкости шлаков. Более существенно вязкость росла при повышении основности, что находится в соответствии со взглядами на природу коротких и длинных шлаков.

В диапазоне изменения основности 1,1–1,2 при температурах 1400 и 1500 °C вязкость расплавов системы C–S–A–M была практически одинаковой. Можно полагать, что влияние пятого или шестого компонента в реальном шлаке указанного диапазона основности может изменить текучесть шлака в ту или другую сторону.

Поскольку вязкость шлака зависит от основности, влияние последней на нагрев чугуна проявляется с достаточной теснотой связи (рис. 6). Обусловлено это несколькими факторами. Во-первых, от основности зависит вязкость всех разновидностей шлака в рабочем

пространстве печи – первичного, промежуточного и конечного. Во-вторых, с основностью связано количество нерасплавленных шлаковых остатков в межкусковых пустотах кокса. В-третьих, от вязкости слоя шлака в горне зависит скорость опускания и прогрева капель металла.

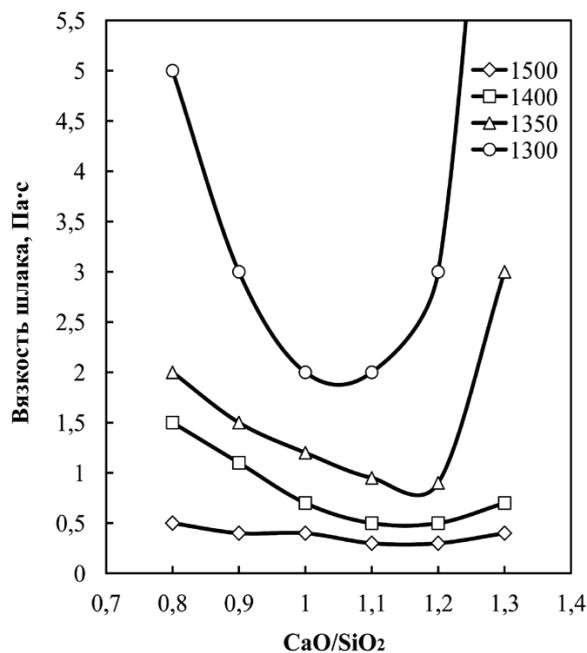


Рис. 8. Влияние основности и температуры синтетических доменных шлаков на их вязкость по данным работы [10]

Согласно полученным данным, уменьшение критерия стехиометрии ρ на 0,01 единицы сопровождается снижением температуры чугуна в среднем на 36 °С. Уменьшение показателя $(CaO+MgO)/SiO_2$ на 0,1 единицы приводит к снижению температуры чугуна на 30 °С. Разумеется, что такое падение нагрева чугуна отразится на тепловом балансе конвертерного передела.

Из табл. 1 видно, что на обеих печах переход на шлаки меньшей основности даже в узких пределах образования половинчатых шлаков сопровождался снижением температуры чугуна.

Данные, приведенные в табл. 2 свидетельствуют о том, что ни магнезия, ни глинозём, не определяют нагрев чугуна, однако некоторое влияние последних прослеживается в зависимости от их соотношения. В периоды без вдувания ПУТ при соотношении А/М в пределах 1,30–1,35 величина R^2 для зависимости $t_q = f(A/M)$ заметно больше соответствующего критерия для зависимостей $t_q = f(M)$; $f(M/(C+S))$. Это свидетельствует, что при таких условиях глинозём оказывает на нагрев большее влияние, чем MgO. Если же отношение А/М близко к единице, то более ощутимое влияние на температуру металла оказывает магнезия, что хорошо видно из сопоставления корреляционных отношений для связей между переменными в периоды II (печь А) и III (печь В).

Таким образом, в настоящей работе предприняты попытки оценить влияние изменения шлакового режима на вязкость шлака и вязкости шлака на нагрев чугу-

на. Кроме того, установлены связи между основностью и стехиометрией шлака с физическим нагревом металла. Оценено также влияние магнезии в шлаке на температуру чугуна. Учет шлакового влияния на нагрев передельного чугуна необходим не только для контроля и управления доменным процессом, но и для прогнозирования изменений в тепловом балансе конвертерного передела.

К недостаткам настоящего исследования следует отнести незавершенность оценивания влияния вязкости шлака на физический нагрев чугуна с использованием системы С–А–S. Это обусловлено как ограничениями в использовании указанной системы, так и получением надежных, усредненных за выпуск, данных о температуре чугуна.

Результаты приведенной выше работы ориентированы на применение в доменном производстве, сырьевые условия которого определяют формирование известково-силикатных шлаков. Разумеется, что оценка физического и химического нагрева чугуна необходима на интегрированных предприятиях, где используется маршрут «доменная печь-установка доводки чугуна-кислородный конвертер».

В заключение необходимо отметить, что подход к решению проблемы энергетического взаимодействия агрегатов этого маршрута должен быть универсальным, независимо от состава шлаков.

Материалы настоящего исследования являются продолжением работ, начатых ранее [1], в дальнейшем исследования будут продолжены и расширены. Следует признать, что проблема обеспечения рационального шлакового режима при переходе доменных печей Украины на вдувание ПУТ существует и необходим поиск путей ее решения.

7. Выводы

1. Установлено изменение характеристик шлакового режима и нагрева чугуна, обусловленного переходом на вдувание пылеугольного топлива со снижением основности шлака с 1,16 до 1,10 и с 1,20 до 1,12 единиц. Показано, что в зависимости от индивидуального влияния глинозема и магнезии в составе шлака, а также от их соотношения, уменьшение основности может сопровождаться как повышением, так и снижением вязкости.

2. Установлена зависимость между вязкостью шлака при температуре 1400 °С и химическим нагревом чугуна на выпуске. Увеличение вязкости шлака на 0,1 Па·с сопровождалось повышением концентрации кремния в чугуне на 0,08–0,1 %.

3. Установлена связь физического нагрева металла с основностью и стехиометрией шлака. Уменьшение основности $(CaO+MgO)/SiO_2$ на 0,1 единицы приводило к снижению температуры чугуна на 30 °С. Уменьшение критерия стехиометрии шлака ρ на 0,01 единицы сопровождалось снижением температуры чугуна в среднем на 36 °С.

4. Показано, что в рассмотренном диапазоне составов шлака $(CaO+MgO)/SiO_2$ в пределах 1,22–1,31 (ДП А) и 1,27–1,34 (ДП В) влияние магнезии на нагрев чугуна ограничено. Слабое влияние MgO на физический нагрев металла проявляется при величине глиноземно-магнезиального модуля, близкой к единице.

References

1. Slag changing properties and cast iron heating while natural gas and pulverized coal blowing in the hearth of the blast-furnace / Kuznetsov M. S., Kryachko G. Yu., Lebed Yu. K., Valuyeva N. N. // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2016. Issue 4. P. 3–7.
2. Development of blast furnace melting technology without using natural gas with pulverized coal injection / Zamuraev V. M., Popov V. E., Ivlev V. P., Khrapko A. V., Didevich A. V., Tyutyunnik Yu. M. // *Metallurgical and mining industry*. 2010. Issue 5. P. 14–16.
3. Muller J., Erwee M. Blast Furnace Control using Slag Viscosities and Liquidus Temperatures with Phase Equilibria Calculations. Southern African Pyrometallurgy, Johannesburg, 2011. P. 309–326.
4. Shiau J.-S., Liu S.-H., Ho C.-K. Effect of Magnesium and Aluminum Oxides on Fluidity of Final Blast Furnace Slag and Its Application // *MATERIALS TRANSACTIONS*. 2012. Vol. 53, Issue 8. P. 1449–1455. doi: 10.2320/matertrans.m2012170
5. Viscosities of Iron Blast Furnace Slags / Chen M., Zhang D., Kou M., Zhao B. // *ISIJ International*. 2014. Vol. 54, Issue 9. P. 2025–2030. doi: 10.2355/isijinternational.54.2025
6. Ghosh D., Krishnamurthy V. A., Sankaranarayanan S. R. Application of optical basicity to viscosity of high alumina blast furnace slags // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2010. Vol. 46, Issue 1. P. 41–49. doi: 10.2298/jmmb1001041g
7. Continuous Temperature Measurement of Liquid Iron and Slag Tapped from a Blast Furnace / Sugiura M., Otani Y., Nakashima M., Omoto N. // *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*. 2014. Vol. 7, Issue 3. P. 147–151. doi: 10.9746/jcmsi.7.147
8. Suthar M. S., Patel I. J., Zinzala P. Analysis of Slag Flow in Blast Furnace during the Extraction of Iron // *International Journal of Engineering Development and Research*. 2015. Vol. 3, Issue 3.
9. Effect of MgO content in sinter on the softening–melting behavior of mixed burden made from chromium-bearing vanadium – titanium magnetite / Liu Z., Chu M., Wang H., Zhao W., Xue X. // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2016. Vol. 23, Issue 1. P. 25–32. doi: 10.1007/s12613-016-1207-2
10. Properties of liquid blast-furnace slags / Voskoboinikov V. G., Dunaev N. Ye., Mikhalevich A. G., Kukhtin T. I., Shtengel-Miner S. V. M. Moscow: Metallurgy, 1975. 184 p.
11. Prediction of physico-chemical properties of slag ESR based on the model of interatomic interaction / Togobitskaya D. N., Stovpchenko A. P., Lisova L. A., Polishko A. A., Stepanenko D. A. // *Modern electrometallurgy*. 2016. Issue 4. P. 16–21.