

Д. Т. Н. Д. Н. Тогобицкая, К. Т. Н. А. Ф. Хамхотко, Н. А. Циватая,
К. Т. Н. Д. А. Степаненко

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАНУ, г. Днепропетровск, Украина

УДК 669.162.275.2:669.162.212

КОРРОЗИОННАЯ АКТИВНОСТЬ ЩЕЛОЧЕСОДЕРЖАЩИХ ШЛАКОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ОГНЕУПОРНОЙ ФУТЕРОВКЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Рассмотрены механизм и характер разрушения огнеупорных материалов футеровки доменной печи под воздействием щелочесодержащих шлаков. Представлен анализ коррозионной активности щелочесодержащих шлаков по отношению к огнеупорной футеровке доменной печи и предложены физико-химические критерии и модели оценки агрессивного воздействия щелочесодержащих шлаков.

Ключевые слова: огнеупорная футеровка, щелочи, шлак, доменная печь, вязкость, поверхностное натяжение.

Продолжительность эксплуатации доменной печи между ремонтами зависит в основном от срока службы ее огнеупорной кладки, которая подвергается воздействию ряда физических и химических факторов (давление столба шихтовых материалов, химическое воздействие чугуна, шлака, газовой фазы и др.), в том числе воздействию соединений щелочных металлов [1].

Каждый час из шихты доменной печи в восходящие газы выделяются сотни килограммов щелочей [2]. Часть из них насыщает футеровку, влияет на поведение цинка, цинковых соединений, углерода и в значительной степени изменяет физико-механические свойства и фазовый состав огнеупоров. Щелочные соединения (оксиды, карбонаты, хлориды, сульфаты, сульфиты и др.) с 810 °С начинают реагировать в газообразном состоянии в нейтральной или окислительной среде с шамотными огнеупорами с образованием щелочных алюмосиликатов. При этом происходит увеличение объема до 45 %, что приводит к возникновению напряжений и скалыванию новообразований. Открытая пористость насыщенной щелочами части алюмосиликатного огнеупора уменьшается до 2,5 % [3].

Взаимодействие щелочей с огнеупорной футеровкой происходит в несколько стадий: образование паров щелочесодержащих соединений, их проникновение внутрь огнеупоров, конденсация, насыщение пор, реакция расплава с газовой средой печи. При наличии в огнеупоре SiO_2 (в муллитовом зерне или в связке) образуются щелочные соединения.

Как показано в работе [2], в рабочей зоне огнеупора после службы в шахте доменной печи присутствуют лейцит $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$, калиофи-

лит $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, нефелин $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, участки геленита $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, анортита $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, β -глинозем трех видов ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$), виллемит $2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$, сфалерит ZnS , акмит $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$, сандин $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$, а также карбонаты калия и натрия, сульфиды кальция, железа и др. При этом количество щелочных алюмосиликатов по высоте шахты и глубине кладки колеблется в широких пределах. Пробы огнеупора, отобранные из средней части шахты, в меньшей мере насыщены легкоплавкими компонентами расплава по сравнению с огнеупорами из нижней части шахты.

При высоких температурах щелочные соединения могут восстанавливаться до чистых металлов, которые при взаимодействии с газами образуют карбонаты, бикарбонаты, цианиды. Часть из них уходит с газами, оставшаяся часть реагирует с огнеупорами. В результате химической коррозии углеродистой футеровки металлоприемника в ней формируется хрупкий слой (рыхлая зона), насыщенный щелочами в комбинации с соединениями цинка. Этот слой под горячей поверхностью (изотерма 800 °С) повышает напряжения в углеродистой футеровке, приводящие к ее разрушению [4].

Износ огнеупорного материала в нижней части доменной печи происходит вследствие химического взаимодействия его со шлаком (шлакоразъедания), из-за образования легкоплавких соединений растворения огнеупоров. Стойкость огнеупора против шлакоразъедания называется шлакоустойчивостью. Шлакоразъедание является наиболее распространенным видом разрушения футеровки доменной печи (около 70 % случаев) [5].

Механизм и характер разрушения огнеупорных материалов кладки доменной печи в значительной мере зависят от глубины проникновения щелочей в массу огнеупора, а эта задача к настоящему времени изучена далеко не достаточно. Результаты исследований механизма разрушения огнеупоров из-за воздействия на них щелочей, проведенных с целью определения возможности увеличения срока службы футеровки, показали, что в огнеупорной кладке из алюмосиликатных изделий средней и нижней частей шахты, а также в зоне фурм калий конденсируется не только на поверхности пор и трещин, но и проникает внутрь изделия, где содержание K_2O достигает 15 % [6].

Коррозионному воздействию шлака на огнеупор предшествует смачивание, прилипание и пропитка огнеупора этим шлаком. Глубина проникновения шлака в пористый огнеупор определяется из уравнения [7]

$$x = \sqrt{k\tau} \quad (1)$$

или после расшифровки константы скорости k

$$x = \sqrt{\frac{0,0981\sigma\cos\theta}{2\eta r\tau}}, \quad (2)$$

где x — глубина пропитки, мм; k — константа скорости пропитки; τ — время воздействия расплава, с; r — радиус пор, м; σ — поверхностное натяжение шлака, Н/м; θ — угол смачивания огнеупора шлаком, град; η — вязкость расплава, Па·с.

При изменении температуры наиболее существенно изменяются вязкость и краевой угол смачивания. Изменение поверхностного натяжения пропитывающего расплава и размера пор огнеупора невелики и не могут существенно изменить скорость пропитки. С изменением основности шлаков вязкость также изменяется более существенно, чем поверхностное натяжение. Так, по данным С. И. Полея с соавторами [8, с. 550–557] с увеличением доли SiO_2 в шлаке с 20 до 35 % поверхностное натяжение уменьшилось всего на 15 %, а вязкость увеличилась в несколько раз.

Наиболее часто наблюдаемое шлакоразъедание огнеупоров — результат воздействия двух процессов: коррозии — чисто химического взаимодействия огнеупора и шлака — и эрозии — механического истирания футеровки движущимся шлаком или твердыми частицами. Эти процессы интенсифицируют один другого. Эрозия увеличивает поверхность взаимодействия огнеупора и шлака. Но самое главное заключается в том, что эрозия способствует смыванию с поверхности огнеупора верхней пленки шлака. Пленка насыщена огнеупором, поэтому относительно слабо реагирует с ним и играет роль защитного слоя. Если бы не было эрозии, то процесс шлакоразъедания остановился бы сравнительно быстро. С другой

стороны, наличие коррозии сильно разрыхляет огнеупор, вследствие чего ускоряется эрозия [9]. Шлакоразъедание зависит от ряда факторов: состава огнеупора и его структуры (плотности, пористости, газопроницаемости); состава и свойств (прежде всего вязкости) шлака; условий воздействия шлака (статическое, динамическое). При воздействии вязких шлаковых расплавов процесс растворения огнеупора лимитируется скоростью диффузии и в неподвижном шлаке соответствует закону Нернста [9]:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{D}{\delta} S(C_n - C_\tau). \quad (3)$$

После подстановки коэффициента диффузии по формуле Эйнштейна [9]

$$D = \frac{RT}{6\pi r N \eta} \quad (4)$$

получаем выражение для скорости изменения концентрации огнеупора в шлаке

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{R}{6\pi N} \frac{ST}{r\eta} \frac{C_n - C_\tau}{\delta}, \quad (5)$$

где $\frac{dC}{d\tau}$ — скорость растворения огнеупора, кг/с;

R — газовая постоянная, Н·м/(кмоль·К); N — число Авогадро, 1/кмоль; S — поверхность огнеупора (включая поры и другие неровности), смоченная расплавленным шлаком, м²; T — абсолютная температура, К; r — радиус диффундирующих частиц огнеупора и шлака, м; η — вязкость шлака, Па·с; C_n — концентрация насыщения шлака растворившимся огнеупором при данной температуре, кг/м³; C_τ — концентрация огнеупора в шлаке в момент времени τ , кг/м³; δ — толщина диффузионного слоя, т. е. пленки шлака на огнеупоре, в которой концентрация падает от C_n до $C = 0$ м.

Этой формулой не представляется возможным пользоваться для непосредственного вычисления скорости растворения огнеупора в шлаке, так как не поддаются прямому определению величины S , r и δ , но она позволяет анализировать все факторы, влияющие на процесс разъедания огнеупора.

Основным фактором, существенно влияющим на процесс шлакоразъедания, является температура. Кроме того, что температура входит в числитель, она резко (в логарифмической зависимости) влияет на изменение вязкости, а также существенно изменяет величину C_n . Практически повышение температуры на 10–20 °С может усилить процесс шлакоразъедания на 20 % и более.

Важнейшими факторами, определяющими интенсивность шлакоразъедания, являются составы огнеупора и шлака, которые определяют величину C_n . Для близких по составу огнеупора и шлака значение C_n мало, насыщение наступает

быстро, и шлакоразъедание невелико. Чем больше расходятся по своей химической природе огнеупор и шлак, тем меньше шлакоустойчивость огнеупора по отношению к данному шлаку. Отсюда возникло известное правило подбора огнеупоров в металлургии, согласно которому для кислого шлака подбирают кислый огнеупор, а для основного — основной. Увеличение в шлаке количества того или иного оксида вызывает повышение или понижение агрессивности шлака по отношению к огнеупору конкретного состава.

Для сравнительной оценки влияния состава шлаков на их агрессивность по отношению к огнеупорам предложены формулы в виде различных соотношений оксидов аналогично основности шлаков [9]. Так, глубину шлакоразъедания K_{1500} , мм, шамотного огнеупора состава: 60–70 % SiO_2 ; 30–40 % Al_2O_3 при 1500 °C в работе [9] предложено оценивать по формуле

$$K_{1500} = 1,8 \frac{7\text{CaO} + 4\text{MgO} + 4\text{FeO} + 3\text{MnO}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 + 0,5\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2,5\text{P}_2\text{O}_5}, \quad (6)$$

где CaO, MgO, Al_2O_3 и др. — содержание оксидов в шлаке, мас. %.

Непосредственное определение глубины разъедания по формуле (6) весьма условно, так как в ней не учитывается структура огнеупора. Коэффициенты в формуле позволяют лишь сравнить влияние отдельных оксидов на износ шамотных огнеупоров.

Влияние содержания в шлаке щелочей (Na_2O и K_2O) на активность взаимодействия с шамотными огнеупорами в значительной мере зависит от степени связанности их в силикаты. В работе [9] предложена формула для относительной оценки $K_{\text{отн}}$ активности щелочных шлаков при взаимодействии с алюмосиликатными огнеупорами:

$$K_{\text{отн}} = \frac{R_2\text{O} + \text{RO}}{R_2\text{O}_3 + \text{RO}_2 + R_2\text{O}_5 + \text{щелочные силикаты}}, \quad (7)$$

где $R_2\text{O}$ — свободные щелочи.

Большой интерес представляет оценка А. Н. Шешинцевым [9] активности взаимодействия огнеупора со шлаком, дающая ионную трактовку процесса. На основании его работы дана формула для определения влияния поверхностного натяжения шлака и его вязкости на глубину проникновения x в пористый огнеупор:

$$x = \sqrt{\frac{9,81 \cdot 10^{-2} \sigma \cos \alpha}{2\eta}} r_n \tau, \quad (8)$$

где σ — поверхностное натяжение шлака, Н/м; α — угол смачивания, град; η — вязкость расплава, Н·с/м²; r_n — радиус пор, м; τ — время воздействия расплава, с.

Описанные уравнениями (6) и (7) критерии трактуют расплавы шлаков как механическую

смесь исходных компонентов шихты без учета характеристик межатомного взаимодействия и роли структуры расплавов в формировании их свойств. Кроме того, использование этих критериев ограничено применением для отдельных огнеупоров в узком диапазоне составов.

Подход к описанию структуры оксидных систем с позиций теории направленной химической связи [10] позволяет оценить взаимодействие шлаков с огнеупорами на качественно новой основе. Структура шлака рассматривается как химически единая система, основными интегральными параметрами, характеризующими межатомное взаимодействие в оксидном расплаве, являются: Z^Y — химический эквивалент, d — структурный фактор, $\text{tg}\alpha$ — катионная характеристика.

Интегральные параметры позволяют «свернуть» информацию о любом составе шлака и огнеупора независимо от сочетания компонентов в составе и их соотношения в виде, удобном для решения задач прогнозирования. Взаимодействие шлаков с огнеупорами может быть охарактеризовано сочетанием соответствующих параметров, например в виде разностных параметров ΔZ^Y , Δd , $\Delta \text{tg}\alpha$ [11]:

$$\Delta Z^Y = \Delta Z^Y_{\text{огнеупора}} - \Delta Z^Y_{\text{шлака}}, \quad (9)$$

$$\Delta d = \Delta d_{\text{огнеупора}} - \Delta d_{\text{шлака}}, \quad (10)$$

$$\Delta \text{tg}\alpha = \Delta \text{tg}\alpha_{\text{огнеупора}} - \Delta \text{tg}\alpha_{\text{шлака}}. \quad (11)$$

Для оценки агрессивности доменных шлаков по отношению к различным огнеупорам с учетом их химического состава, пористости и температуры эксплуатации, а также состава шлака получено уравнение ($R = 0,8$ %, $\mu = 7,5$, $S = 32$ %) [5]:

$$\lg K = -5,126 + 2,234 \Delta d + 4,059 \Delta Z^Y + 73,443 \Delta \text{tg}\alpha + 0,0356 P + 0,0042 T, \quad (12)$$

где K — константа скорости пропитки за 30 мин выдержки, 10^{-7} см²/с; ΔZ^Y , Δd , $\Delta \text{tg}\alpha$ — разностные параметры огнеупора и шлака; P — открытая пористость огнеупора, %; T — температура эксплуатации огнеупора, °C; R — коэффициент корреляции; μ — критерий надежности; S — остаточное среднеквадратичное отклонение, %.

Уравнение (12) позволяет с удовлетворительной для практики точностью получить сравнительную оценку стойкости огнеупоров различного состава и пористости к корродирующему воздействию доменных шлаков при высоких температурах в реально существующем диапазоне изменения состава шлаков.

Таким образом коррозионная активность шлака по отношению к огнеупорам обусловлена его свойствами, которые, в свою очередь, зависят от химического состава шлака. При этом немало-

важное значение имеют также состав огнеупоров и их свойства (пористость, плотность, газопроницаемость, огнеупорность, смачиваемость шлаками и др.). Так, углеродосодержащие огнеупоры или оксидные огнеупоры, пропитанные углеродосодержащим веществом [5], практически не смачиваются шлаками и слабо взаимодействуют с ними. Поэтому их используют наряду с высокоглиноземистыми огнеупорами при футеровке металлоприемника в нижней части шахты доменной печи.

В реальных условиях доменного производства материалы для футеровки и динамические условия взаимодействия футеровки со шлаками остаются неизменными. В этой связи с точки зрения увеличения длительности кампании и безопасности эксплуатации доменной печи актуальной является проблема оценки коррозионной активности щелочесодержащих доменных шлаков.

Выше было показано (формулы (2), (5), (8), (12)), что коррозионная активность шлаков по отношению к огнеупорам определяется их свойствами: прежде всего вязкостью η , а также поверхностным натяжением σ и краевым углом θ смачивания по отношению к огнеупорам. В то же время кинетические условия взаимодействия доменного шлака с чугуном (десульфурация) также определяются свойствами шлакового расплава, такими как вязкость и поверхностное натяжение. При уменьшении вязкости шлака возрастает диффузионная подвижность и, следовательно, растет скорость взаимодействия с контактирующими фазами, в том числе усиливается десульфурация чугуна, однако возрастает и коррозионный износ огнеупоров.

Исследованиями разных авторов выявлено существенное разжижающее действие щелочных оксидов на конечные и особенно первичные железосодержащие доменные шлаки. Наиболее эффективно снижают вязкость и температуру плавления первые порции щелочных оксидов в доменных шлаках. Особенно сильно это происходит при добавке до 0,5 %, немного медленнее при добавке от 0,5 до 3 %, затем разжижающее действие несколько снижается. Оксид натрия оказывает более сильное разжижающее воздействие на шлаки различной основности, чем оксид калия, что может быть объяснено различием размеров ионных радиусов натрия (0,098 нм) и калия (0,133 нм) [12].

В доменной практике стремятся поддерживать вязкость конечного шлака в интервале 0,2–0,5 Па·с. При этом оптимальная величина вязкости 0,3 Па·с [5]. Превышение вязкости более 0,5 Па·с существенно замедляет диффузионную подвижность шлакового расплава и взаимодейст-

вие в нем. Серопоглощительная способность шлака снижается и, следовательно, возрастает содержание серы в чугуне. С другой стороны, снижение вязкости до 0,2 Па·с и ниже значительно увеличивает диффузионную подвижность и коррозионную активность шлака, что приводит к усиленному износу футеровки, особенно при накоплении в печи щелочей, как следует из данных [1, 2].

В работах В. Н. Андропова, С. В. Нестеренко [13], Н. И. Чернова, Л. А. Сафиной [14] показано влияние поверхностного натяжения доменных шлаков на условия контакта взаимодействующих фаз и скорость их взаимодействия. В частности, щелочи снижают поверхностное натяжение шлаков, а серопоглощительная способность шлаков увеличивается при уменьшении их поверхностного натяжения, что подчеркивает диффузионный характер взаимодействия в шлаковом расплаве. Для повышения серопоглощительного потенциала доменных шлаков необходимо увеличить их основность, что способствует увеличению поверхностного натяжения, а это, в свою очередь, не только ухудшает условия десульфурации, но и повышает адгезию шлака к огнеупору и глубину пропитки шлаком огнеупора, т.е. усиливает коррозионную активность шлака и износ футеровки.

Увеличение основности шлака ухудшает также условие перехода щелочей в шлак, так как для увеличения выхода щелочей с печи необходима наводка кислых шлаков. Происходит накопление щелочных соединений в рабочем пространстве печи и усиление их воздействия на шихтовые материалы и огнеупорную футеровку. Изложенное свидетельствует о важности прогноза свойств щелочесодержащих доменных шлаков как для оптимизации качества чугуна, так и для повышения стойкости огнеупорной футеровки.

Используя подход к описанию структуры шлаков на основе параметров межатомного взаимодействия, представленный в работе [10], и исходные данные о вязкости щелочесодержащих синтетических и натуральных доменных шлаков предприятий Украины, нами получена более точная модель для прогнозирования вязкости конечных доменных шлаков, включающая физико-химические критерии, отображающие влияние щелочей ($R^2 = 0,76$):

$$\log \eta = 33,76612 - 109,385\rho + 77,89968\rho^2 - 0,0296K + 8,09583(1000/T), \quad (13)$$

где ρ — показатель стехиометрии расплава, равный отношению количества катионов к количеству анионов; $K = \% K_2O \cdot \log(d\Delta Zm)$; d — среднестатистическое межъядерное расстояние; ΔZm — параметр, учитывающий неравновесность катионной подрешетки.

Аналогично разработана модель для прогнозирования поверхностного натяжения доменных шлаков ($T = 1550^\circ\text{C}$), включающая параметры межатомного взаимодействия и содержание щелочей в шлаке ($R^2 = 0,956$):

$$\sigma = (-375,93\Delta e^2 - 1882\Delta e - 1861,6)(2,3 \cdot \% \text{K}_2\text{O}), \quad (14)$$

где Δe — количество электронов, локализуемых в направлении связи катион — анион.

За основу приняты экспериментальные данные [13], охватывающие диапазон составов реальных шлаков предприятий Украины в температурном диапазоне, который соответствует реальным условиям доменной плавки.

Одним из путей повышения стойкости футеровки горна и лещади, кроме уменьшения агрессивного воздействия металлургических расплавов на огнеупорную футеровку доменной печи и принятия соответствующих конструктивных решений, является применение для этих зон углеродистых огнеупорных материалов.

В последние годы для футеровки доменных печей успешно применяют углеродистые и особенно карбидкремниевые огнеупоры. Карбидкремниевые огнеупоры в сравнении с другими доменными огнеупорами имеют преимущества: повышенную устойчивость к щелочам, высокие термостойкость и теплопроводность, наименьший размер пор. Это не значит, что карбидкремниевые изделия вытесняют все другие огнеупоры из нижнего строения доменной печи. Перспективным считается сочетание карбидкремниевых огнеупоров с графитовыми [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продолжительность кампании доменных печей зависит в значительной мере от срока службы огнеупорной кладки, которая подвергается в печи воздействию ряда физических и химических факторов (давление столба шихтовых материалов, химическое воздействие чугуна, шлака, газовой фазы и др.), в том числе и воздействию соединенных щелочных металлов.

Коррозионная активность шлакового расплава по отношению к огнеупорам определяется его свойствами: вязкостью, смачивающей способностью, поверхностным натяжением. При этом роль вязкости является решающей.

Точность прогнозирования физико-химических свойств шлакового расплава в значительной степени определяется соответствием модельного представления их структуры. «Свертка» информации о составе шлака и огнеупора с использованием интегральных модельных физико-химических параметров, характеризующих межатомное взаимодействие, позволяет с удовлетворительной для практических целей точностью прогнозировать

результаты этого взаимодействия в системе огнеупор — шлак.

Библиографический список

1. **Корякова, О. Ф.** Совершенствование технологии доменной плавки с целью уменьшения отрицательного влияния щелочей и цинка / О. Ф. Корякова, В. В. Щепанский, А. А. Парцевский // *Черная металлургия*. — 1980. — Вып. 15. — С. 13–33.
2. **Питак, Н. В.** Основные причины износа огнеупоров в шахте доменной печи и пути повышения их стойкости / Н. В. Питак // *Огнеупоры*. — 1980. — № 4. — С. 41–45.
3. **Воронов, Г. В.** Огнеупорные материалы и изделия в промышленных печах и объектах вспомогательного назначения : учеб. пособие / Г. В. Воронов, В. А. Старцев. — Екатеринбург : УГТУ — УПИ, 2006. — 286 с.
4. **Терентьев, В. Л.** Выбор футеровки лещади и горна ДП № 4 ММК / В. Л. Терентьев, В. Г. Овсянников, А. Н. Никифоров [и др.] // *Черная металлургия*. — 2004. — № 10. — С. 42–45.
5. **Приходько, Э. В.** Коррозионная активность шлаков по отношению к огнеупорам и свойства доменных шлаков / Э. В. Приходько, А. Ф. Хамхотко, Д. Н. Тогобицкая [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2006. — № 1. — С. 16–21.
6. **Можаренко, Н. М.** Уменьшение вредного влияния щелочных металлов в доменной плавке / Н. М. Можаренко, А. С. Нестеров, А. Д. Джигота [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы в черной металлургии* : сб. науч. тр. — Днепропетровск : ИЧМ НАН Украины. — 2005. — Вып. 11. — С. 14–20.
7. **Стрелов, К. К.** Структура и свойства огнеупоров / К. К. Стрелов. — М. : Металлургия, 1982. — 208 с.
8. **Попель, С. И.** Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах / С. И. Попель, М. А. Шерстобитов, Б. В. Царевский. — Нальчик : Кабардино-Балкарское книжное издательство, 1965.
9. **Залкинд, Я. И.** Огнеупоры и шлаки в металлургии / Я. И. Залкинд, Ю. В. Троянkin. — М. : Металлургиздат, 1964. — 288 с.
10. **Приходько, Э. В.** Металлохимия многокомпонентных систем / Э. В. Приходько. — М. : Металлургия, 1995. — 320 с.
11. **Приходько, Э. В.** Методика физико-химического моделирования результатов процессов на границе раздела твердых и жидких фаз / Э. В. Приходько, В. Ф. Мороз // *Неорганические материалы*. — 2002. — Т. 38, № 5. — С. 616–621.
12. **Хамхотко, А. Ф.** Роль щелочей в формировании свойств доменных шлаков / А. Ф. Хамхотко, Д. Н. Тогобицкая, П. И. Оторвин [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. науч. тр. ИЧМ. — 2006. — Вып. 13. — С. 225–230.
13. **Нестеренко, С. В.** Физические свойства металлургических шлаков : справочное издание / С. В. Нестеренко, Н. А. Овчинников, В. М. Хоменко. — Донецк : Донеччина, 2001. — 224 с.
14. **Сафина, Л. А.** Влияние состава, вязкости, поверхностного натяжения доменного шлака на его обескисляющую способность / Л. А. Сафина, Н. И. Чернов // *Изв. АН СССР. Металлы*. — 1979. — № 1. — С. 44–48. ■

Получено 13.02.13

© Д. Н. Тогобицкая, А. Ф. Хамхотко,
Н. А. Циватая, Д. А. Степаненко, 2013 г.