

Д. А. Степаненко, Н. А. Цюпа, А. И. Белькова, А. С. Скачко

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСПЛАВОВ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ УКРАИНЫ

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

Аннотация. Целью работы является установление закономерностей влияния химического состава доменных шлаков на теплофизические свойства их расплавов, что является актуальным для обеспечения высоких технико-экономических показателей работы доменной печи. Выполнены экспериментальные исследования температуры расплавов чугуна и шлака на их выпуске из доменной печи объемом 1500 м^3 . Показано, что температуры чугуна и шлака имеют практически одинаковые значения и изменяются в диапазоне $1451\div 1487^\circ\text{C}$. На ротационном реометре Anton Paar выполнены измерения вязкости в диапазоне температур $1320\div 1500^\circ\text{C}$ и показано, что выпуске из доменной печи вязкость шлаков превышает оптимальное ее значение $0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$. На основании корреляционно-регрессионного анализа литературных данных и выполненных экспериментальных исследований установлена зависимость энтальпии расплавов от показателей химического состава доменных шлаков, которые представлены через стехиометрию (p) и температуру. Показано, что при колебании температур шлаковых расплавов в диапазоне $1453\div 1487^\circ\text{C}$ их энтальпия изменяется в диапазоне $1933\div 2031 \text{ кДж/кг}$. Предложена прогнозная модель для расчета энтальпии доменных шлаков. На основе предложенной прогнозной модели выполнен расчет энтальпии доменных шлаков для доменной печи объемом 1500 м^3 с учетом реальных их температур на выпуске.

Ключевые слова: доменный шлак, эксперимент, теплофизические свойства шлаков, вязкость, энтальпия, прогнозная модель

Ссылка для цитирования: Степаненко Д.А. Аналитическое и экспериментальное исследование теплофизических свойств расплавов доменных шлаков в условиях работы доменных печей Украины / Д.А. Степаненко, Н.А. Цюпа, А.И. Белькова, А.С. Скачко // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2018. – Вып.32. – С.137-150.

Doi:

D. A. Stepanenko, N. A. Tsyupa, A. I. Belkova, A. S. Skachko
Analytical and experimental study of the thermophysical properties of blast furnace slag melts in the conditions of blast furnaces of Ukraine

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Abstract. The aim of the work is to establish patterns of influence of the chemical composition of blast-furnace slags on the thermophysical properties of their melts, which is relevant to ensure high technical and economic indicators of the blast furnace. Experimental studies of the temperature of molten iron and slag at their release from a blast furnace with a volume of 1500 м^3 have been carried out. It is shown that the temperatures of iron and slag have almost identical values and vary in the range of

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2018. - Вып.32

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32

«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2018. – Vypusk 32

1451÷1487⁰C. On a Anton Paar rotary rheometer, viscosity measurements were made in the temperature range of 1320 ÷ 1500⁰C and it was shown that the viscosity of slags from the blast furnace output exceeds its optimal value of 0.3 Pa.second. Based on the correlation-regression analysis of the literature data and the performed experimental studies, the enthalpy of the melts was determined as a function of the chemical composition of blast-furnace slags, which are represented through stoichiometry (ρ) and temperature. It is shown that when temperature fluctuations of slag melts in the range of 1453 ÷ 1487⁰C their enthalpy changes in the range of 1933÷2031 kJ/kg. A predictive model for calculating the enthalpy of blast-furnace slags is proposed. On the basis of the proposed predictive model, the enthalpy of blast furnace slags for a blast furnace with a volume of 1500 m³ was calculated taking into account their actual temperatures at the outlet.

Keywords: blast furnace slag, experiment, thermal properties of slags, viscosity, enthalpy, predictive model

For citation: Stepanenko D.A. Analytical and experimental study of the thermophysical properties of blast furnace slag melts in the conditions of blast furnaces of Ukraine / D. A. Stepanenko, N. A. Tsyupa, A. I. Belkova, A. S. Skachko // *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii»*. – 2018. – Vypusk 32. – P.137-150. (In Russ.).

Doi:

Д. О. Степаненко, Н. О. Цюпа, А. І. Белькова, О. С. Скачко

Аналітичне та експериментальне дослідження теплофізичних властивостей розплавів доменних шлаків в умовах роботи доменних печей України

Інститут чорної металургії ім.З.І.Некрасова НАН України

Анотація. Метою роботи є встановлення закономірностей впливу хімічного складу доменних шлаків на теплофізичні властивості їх розплавів, що є актуальним для забезпечення високих техніко-економічних показників роботи доменної печі. Виконано експериментальні дослідження температури розплавів чавуну та шлаку на їх випуск з доменної печі об'ємом 1500 м³. Показано, що температури чавуну і шлаку мають практично однакові значення і змінюються в діапазоні 1451 ÷ 1487⁰C. На ротаційному реометре Anton Paar виконано вимірювання в'язкості в діапазоні температур 1320÷1500⁰C і показано, що на випуску з доменної печі в'язкість шлаків перевищує оптимальне її значення 0,3 Па.с. На підставі кореляційно-регресійного аналізу літературних даних і виконаних експериментальних досліджень встановлено залежність ентальпії розплавів від показників хімічного складу доменних шлаків, що представлені через стехіометрію (ρ) і температуру. Показано, що при коливанні температур шлакових розплавів в діапазоні 1453 ÷ 1487⁰C їх ентальпія змінюється в діапазоні 1933 ÷ 2031кДж / кг. Запропоновано прогнозну модель для розрахунку ентальпії доменних шлаків. На основі запропонованої прогнозної моделі виконано розрахунок ентальпії доменних шлаків для доменної печі об'ємом 1500 м³ з урахуванням реальних їх температур на випуску.

Ключові слова: доменний шлак, експеримент, теплофізичні властивості шлаків, в'язкість, ентальпія, прогнозна модель

Посилання для цитування: Степаненко Д.А. Аналітичне і експериментальне дослідження теплофізических властивостей расплавов доменних шлаков в умовах роботи доменних печей України / Д.А. Степаненко, Н.А. Цюпа, А.И. Белькова, А.С. Скачко // *«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»* – 2018. – Вып.32. – С.137-150.

Doi:

Введение. В процессе доменной плавки шлак играет весьма важную роль при выплавке чугуна, соответствующего тем или иным требованиям. При одинаковых условиях работы доменной печи различным маркам выплавляемого чугуна соответствуют шлаки различного химического состава, следовательно, и различных свойств. Между составом выплавляемого чугуна и образующимся при этом шлаком существует определенная тесная зависимость, обусловленная условиями их термодинамического согласования. Это объясняется, прежде всего тем, что, не учитывая той части шихты, которая выносится через колошник в виде газа и пыли, вся остальная ее часть почти полностью распределяется между чугуном и шлаком. Поэтому, при неизменной шихте каждое изменение распределения ее составных частей ведет к изменению, как состава чугуна, так и шлака.

Формирование чугуна и шлака также зависит и от ряда других факторов: качества и расхода топлива, режима дутья, качества железорудных материалов, профиля печи и других. Однако, при сохранении одинаковыми почти всех этих условий, выплавка определенных марок чугуна сопровождается шлаками определенного химического состава. Поэтому при выборе состава и весового соотношения шихтовых материалов, задавшись известным составом чугуна, технологи ведут в дальнейшем весь расчет, ориентируясь на получение состава шлака, обеспечивающего ему определенные физико-химические свойства, которые, в свою очередь, определяют качество выплавляемого чугуна, интенсивность плавки, ровность хода доменной печи и тем самым оказывают влияние на расход энергетических ресурсов.

Все изучаемые физико-химические свойства расплавов доменных шлаков (удельная теплоемкость, энтальпия, температура плавления, серопоглощительная способность, поверхностное натяжение, плавкость, вязкость, электропроводность и др.) взаимосвязаны между собой и являются следствием природы шлакового расплава, определяющей химическим составом шлака и зависят от термодинамических условий состояния расплава (температура, давление).

Наряду с наиболее изученными свойствами расплавов доменных шлаков, в частности вязкости, не менее значимыми для технологического процесса доменной плавки являются их теплофизические свойства (теплоемкость, энтальпия), характеризующие энергетическое состояние шлакового расплава, который следует рассматривать как подсистему термодинамической системы – совокупности физико-химических процессов доменной плавки.

Целью работы является выявление связей и установление закономерностей влияния химического состава доменных шлаков на теплофизические свойства их расплавов для обеспечения высоких технико-экономических показателей работы доменной печи.

Состояние вопроса. Различными учеными-металлургами, в частности,

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вып.32
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2018. – Vypusk 32*

А.Д.Готлибом [1], С.Л. Ярошевским [2], В.Г. Воскобойниковым [3], Н.М. Якубцинером и др. были выполнены исследования взаимосвязи между химическим составом чугуна и шлака и температурой их расплавов на выпуске из доменной печи. Многие исследователи отмечают, что температура чугуна и шлака на выпуске является комплексным показателем нагрева горна доменной печи, отражающий тепловой режим печи за определенный промежуток времени.

Как отмечено в работе [2] оперативный технологический контроль за работой печи может быть существенно улучшен при использовании температуры продуктов правки (температуры чугуна и шлака) на выпуске в качестве прямого и количественного показателя нагрева горна доменной печи. При этом особенно ценными эти показатели могут оказаться при освоении новых видов сырья, при внедрении новых технологических режимов, при отработке оптимального режима плавки или устранении длительных нарушений работы печи.

Согласно высказанным соображениям в работе А.Д. Готлиба [1], расход кокса и нагрев дутья нужно изменять для регулирования нагрева чугуна не произвольно, а только в тесной связи со свойствами шлаков, т.е. с учетом его химического состава.

Из результатов выполненных исследований [2] установлено, что характер изменения температуры по ходу выпуска сохраняется при выплавке различных марок чугуна и в различных технологических условиях плавки. Как правило, температура чугуна с большей или меньшей скоростью возрастает по ходу выпуска и наблюдается непостоянство химического состава чугуна. Повышение температуры чугуна по ходу выпуска объясняется появлением нижнего шлака. Относительная стабилизация температуры чугуна наступает во второй половине выпуска после того, как установится ровный ход нижнего шлака.

Измерения температуры чугуна и нижнего шлака на выпуске показали, что между этими показателями имеется надежная линейная зависимость, среднестатистическое значение температуры нижнего шлака по 73 измерениям составило $1472,1^{\circ}\text{C}$, а температура соответствующих выпусков чугуна – $1474,3^{\circ}\text{C}$.

По данным результатов работ [2] следует, что изменение химического состава чугуна, а именно содержания в нем серы и кремния, является косвенным показателем изменения теплового состояния горна печи, следовательно, химического состава шлака, а также температуры чугуна и шлака.

В анализируемых работах ставилась задача оценки температуры жидких продуктов доменной плавки (чугуна и шлака) и ее влияния с учетом химического состава на массообменные процессы в системе «чугун - шлак». При этом температура расплавов чугуна и шлака рассматривается как показатель, характеризующий их тепловое состояние, и расценивается авторами как один из основных показателей, характеризующих тепловое состояние горна доменной печи. Как известно, температура относится к интенсивным величинам и не зависит от массы системы, что не позволяет в полной мере судить о тепловых характеристиках чугуна и шлака на выпуске из доменной печи.

Для оценки состояния системы, в том числе теплового, энергетического недостаточным является использование лишь одной температуры, поскольку в зависимости от выбора независимых термодинамических переменных одна и та же функция состояния может рассматриваться или как независимая переменная, или как функция других термодинамических величин, характеризующих состояние системы. Об изменении температуры судят по изменению других

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вып.32

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32

«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2018. – Vypusk 32

физических свойств тел (объёма, давления, электрического сопротивления, ЭДС, интенсивности излучения и др.), однозначно с ней связанных (так называемых термометрических свойств). Для более обстоятельной оценки теплового состояния шлакового расплава и чугуна как одних из показателей теплового состояния горна доменной печи кроме температуры целесообразно использование термодинамических функций состояния с размерностью энергии, в частности теплоемкости и энтальпии.

Информационной основой для анализа экспериментальных данных о теплофизических свойствах (энтальпии и теплоемкости) расплавов доменных шлаков послужила созданная в Институте черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ НАНУ) база экспериментальных физико-химических данных о свойствах шлаковых расплавов «Шлак» в рамках банка данных «Металлургия» [4,5] ориентирована на удовлетворение информационных нужд теоретической и прикладной металлургии [6-8], которая в течение более 20 лет находится в стадии постоянной эксплуатации и активного пополнения новыми экспериментальными данными.

На основе имеющихся данных в базе данных «Шлак», выполнен сопоставительный анализ экспериментальных данных различных авторов о теплоемкости и энтальпии синтетических и реальных доменных шлаков, а также чугунов [3,9-11]. Анализ показал, что совместить все данные в единой выборке для построения прогнозной модели представляет определенные сложности. Так, в одних источниках теплофизические измерения для шлаков различного состава выполнены в узком температурном интервале, в других – в широком интервале температур, но для ограниченного количества составов, в третьих - для шлаков при температурах до 1200⁰С, что не соответствует температуре шлаков на выпуске их из доменной печи.

Из анализа существующих данных [9,3] о теплофизических свойствах расплавов доменных шлаков сложно сделать определенные выводы, поскольку величины значений их существенно разнятся, не в полной мере учитывают изменения химического состава [9] и температуры шлаковых расплавов [3]. Поэтому, выполнение собственных экспериментальных исследований теплофизических свойств шлаковых расплавов позволит осуществить обоснованный выбор литературных данных для установления связи химического состава шлака с теплофизическими свойствами его расплава.

Основной материал исследования. В целях объективной оценки теплофизических свойств (теплоемкости и энтальпии) расплавов шлака на выпуске их из доменной печи были выполнены замеры температуры чугуна и шлака для условий работы печи объемом 1500м³.

Для установления диапазона изменения реальных температур продуктов плавки были выполнены исследования по замеру температуры с помощью термозонда с термопарой ПР 30/6. Для измерения показаний термоэлектродвижущей силой (т.э.д.с.) термопары применялся цифровой мультиметр UNI-T UT61C с погрешностью измеряемой величины ±0,8%+3. Полученные значения т.э.д.с. приводились в абсолютные значения температуры с помощью таблицы номинальных статистических

характеристик термопары ПР 30/6 при условии, что температура свободных концов термопары равна 0°C [12].

Замеры температуры расплавов чугуна и шлака осуществлялись через 0,5 часа от начала выпуска. На выпуске производилось по два замера температуры чугуна и шлака. В начале осуществлялся замер температуры чугуна до установления стабильных показаний мультиметра, длившийся около 20-30 с. После замера температуры чугуна сразу выполнялся замер температуры шлака, также длившийся около 20-30 с. Горячий спай термопары был защищен кварцевым наконечником длиной около 10 см, с наружным диаметром 9 мм, и толщиной стенки около 1,5 мм. После замера температуры шлака кварцевый наконечник в основном растрескивался. При замене наконечника повторно выполнялись замеры температуры чугуна и шлака.

На доменной печи установлен стационарный пирометр, который на протяжении всего выпуска выполнял измерения температуры чугуна. Пирометр направлен на струю расплавленного металла перед его сливом в ковш. Результаты экспериментальных измерений температуры шлака на выпуске из доменной печи объёмом 1500м^3 приведены на рисунке 1. В таблицах 1,2 приведены химические составы чугунов и шлаков соответствующих выпусков. Как следует из рисунка 1, результаты замеров температуры с помощью термопары имеют хорошую сходимость с данными температуры оптического пирометра. Максимальная разница температур чугуна, замеренных с помощью термопары и оптического пирометра составляет 10°C на выпуске №5483 (№3, рис.1).

Таблица 1. Химический состав чугунов и температур их сплавов на выпуске из доменной печи

№ п/п	№ выпуска	Вес чугуна, т	Химический состав чугуна				Температура чугуна (ТПР 30/6), $^{\circ}\text{C}$	Температура чугуна (оптич. пирометр), $^{\circ}\text{C}$
			Si	Mn	S	Ti		
1	5473	196,1	0,68	0,07	0,018	0,021	1463	1465
2	5482	230,3	0,79	0,17	0,029	0,021	1472	1470
3	5483	354,1	0,65	0,16	0,029	0,018	1451	1460
4	5484	239,3	0,86	0,12	0,026	0,023	1465	1460
5	5485	196,6	0,76	0,07	0,021	0,023	1485	1480
6	5494	267,5	0,67	0,07	0,022	0,019	1465	1460

Таблица 2. Химический состав соответствующих шлаков и температур их расплавов на выпуске из доменной печи

№ п/п	№ выпус ка	Химический состав шлаков							$B_2 =$ $(\text{CaO}+\text{MgO})$ $(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$	Темп. шлака, °C
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	Fe ₂ O ₃	CaS		
1	5473	40,1	7,6	47	0,1	4,5	0,27	0,89	1,08	1466
2	5482	40,7	8,5	45,2	0,29	4,6	0,27	0,89	1,01	1473
3	5483	40,7	8	46	0,16	4,5	0,23	0,85	1,04	1453
4	5484	40,9	7,9	46	0,14	4,4	0,22	0,87	1,03	1470
5	5485	41,1	7,7	46	0,1	4,4	0,22	0,93	1,03	1487
6	5494	41,2	7,8	45,7	0,1	4,3	0,23	0,69	1,02	1469

В исследуемый период работы доменной печи диапазон значений температуры жидких продуктов доменной плавки по результатам замеров составил для чугунов 1451÷1485⁰C, а для соответствующих выпусков шлака 1453÷1487⁰C. За весь период экспериментальных измерений температура шлакового расплава в среднем превышала температуру чугуна на 2,8⁰C.

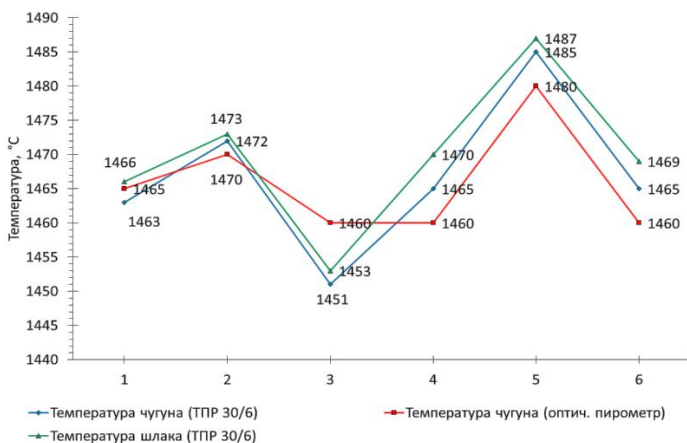


Рисунок 1 – Изменение температуры чугуна и шлака на выпуске из доменной печи

Работа печи в исследуемый период характеризовалась стабильными показателями химического состава чугуна и шлака. Содержание кремния в чугуне основной массы выпусков изменялось в диапазоне 0,65÷0,86% (табл.1). По содержанию серы, чугун в данный период отвечал требованиям, предъявляемым по его качеству ($S \leq 0,03\%$). Изменение основности (CaO/SiO_2) соответствующих выпусков шлака находилось в диапазоне 1,11÷1,17. В виду стабильности по химическому составу

выпусков чугуна и шлака в исследуемый период не представляется возможным выполнить основательную оценку взаимосвязи химического состава и выполненных экспериментальных замеров температуры расплавов чугуна и шлака на их выпусках из доменной печи.

Для трех проб шлака №5482, №5483 и №5494 (табл.2) выполнены измерения вязкости, определяющей серопоглотительную способность шлакового расплава, на ротационном реометре Anton Paar (г. Фрайберг, Германия, Institut für Eisen- und Stahltechnologie TU Bergakademie). Результаты измерений представлены на рисунке 2.

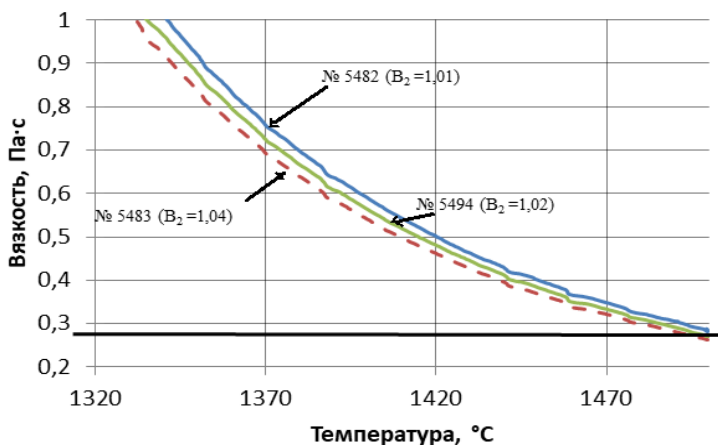


Рисунок 2 – Изменение вязкости расплавов доменных шлаков в диапазоне температур 1340÷1500⁰С с учетом их основности ($B_2 = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$)

Из рисунка 2 видно, что с повышением отношения $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ доменных шлаков, при постоянной температуре их расплавов, вязкость снижается.

Как отмечено в работе [3] оптимальной вязкостью для расплавов доменных шлаков является значение 0,3 Па·с, обеспечивающее полноту протекания диффузионных процессов в системе «металл-шлак» и как следствие реализации потенциальной серопоглотительной способности шлака. Из рисунка 2 следует, что вязкость исследуемых шлаков при температуре их расплавов на выпуске из доменной печи соответствовала значениям 0,342 Па·с (при $t = 1473^0\text{C}$) для шлака №5482, 0,358 Па·с ($t^0 = 1453^0\text{C}$) для шлака №5483 и 0,336 Па·с ($t = 1469^0\text{C}$) для шлака №5494. Следовательно, вязкость исследуемых доменных шлаков, характеризующих большую часть анализируемых шлаков превышала оптимальное ее значение.

Экспериментальное исследование энтальпии доменных шлаков выполнялось на калориметре. Калориметр размещался под лабораторной печью, в которой находился тигель со шлаком. Тигель имел отверстие в дне, которое было закрыто графитовым стержнем. При нагревании образца шлака в тигле до заданной температуры графитовый стержень извлекался, и шлаковый расплав выливался в калориметр. Изменение температуры в калориметре фиксировалось в автоматическом режиме с помощью термопары типа К и ртутного термометра.

При экспериментальных исследованиях теплофизических свойств доменных шлаков были взяты шлаки под №1 и №2 табл.2. Нагрев шлаков в печи осуществлялся до температуры $\approx 1450^{\circ}\text{C}$. В результате экспериментальных исследований установлена величина энтальпии для данных шлаков 2053 кДж/кг и 1949 кДж/кг соответственно без учета теплоты на парообразования, что связано со сложностью учета потери воды со шлаком при их разделении.

Для установления связей и построения моделей прогноза удельной энтальпии расплавов доменных шлаков, по причине дороговизны выполнения экспериментальных исследований, выполнен сравнительный анализ экспериментальных данных различных авторов об энтальпии синтетических и реальных доменных шлаков близких по составу к доменным шлакам заводов Украины [3,9]. Результаты экспериментальных исследований энтальпии расплавов доменных шлаков имели большую сходимость с результатами, полученными С.А. Гаврилко, поэтому в дальнейшем при оценке связи энтальпии расплавов доменных шлаков с их химическим составом и температурой были проанализированы данные работы [9].

Для построения прогнозной модели энтальпии доменных шлаков заводов Украины с целью получения более точных расчетных значений была сформирована базовая выборка экспериментальных данных энтальпии шлаков с характерным для заводов Украины диапазоном содержания компонентов и изменения температуры их расплавов в диапазоне $1350\div 1550^{\circ}\text{C}$, по данным работы [9].

В результате корреляционно-регрессионного анализа установлена связь химического состава доменных шлаков, представленного через модельный параметр стехиометрии – ρ [13] и температуры и предложена модель для прогнозирования энтальпии конечных доменных шлаков заводов Украины при изменении температуры их расплавов в диапазоне $1350\div 1550^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta H = -13418,7 + 15812,64 \cdot \rho + 2,925 \cdot T; \quad R^2 = 0,94 \quad (1)$$

На основе уравнения (1) выполнен расчет энтальпии доменных шлаков для печи объемом 1500 м^3 с учетом реальных их температур на выпуске из печи (рис.3).

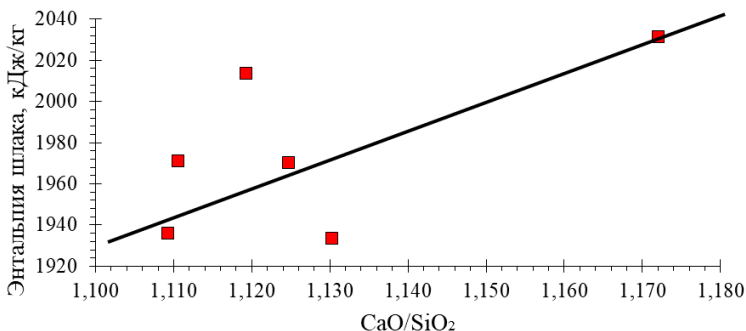


Рисунок 3 – Связь энтальпии расплавов доменных шлаков печи объёмом 1500м³ с их основностью при температурах (значения у точек) на выпуске из доменной печи (в соответствии с данными табл.2)

Показано (рис.3), что при колебании температур шлаковых расплавов в диапазоне 1453÷1487⁰С их энтальпия существенно изменяется (1933÷2031 кДж/кг). С позиции термодинамики доменного процесса теплофизические свойства (энтальпия и теплоемкость) расплавов чугуна и шлака на их выпуске из доменной печи являются важными показателями при оценке теплового состояния горна, поскольку учитывают химический состав продуктов плавки и температуру их расплавов.

Из выполненного ранее сопоставительного анализа имеющихся данных в базе данных «Шлак» о теплоемкости и энтальпии синтетических и реальных доменных шлаков, а также чугунов, наиболее полно представленных в работе [9], следует (рис.4), что энтальпия чугуна значительно ниже ее величины для шлака.

Как видно из рисунка 4 энтальпия чугуна, с содержанием кремния 0,6%, близкого по содержанию кремния к чугунам печи объёмом 1500м³ в исследуемый период, в диапазоне экспериментальных измерений температуры чугуна 1451÷1485⁰С, изменяется в достаточно узком интервале 1260÷1290 кДж/кг. Изменение энтальпии шлака близкого по химическому составу к исследуемым шлакам, при его основности (CaO/SiO₂) 1,18 и диапазоне температур его расплава 1453÷1487⁰С соответственно равна 2000÷2100 кДж/кг, т.е. в практически одинаковом диапазоне температур энтальпия чугуна около 1000 кДж/кг (для данных составов) меньше по отношению к энтальпии шлака. Следовательно, удельное количество теплоты, которым обладает чугун, значительно ниже, чем у шлакового расплава на выпуске из доменной печи. Из рисунка 4 также следует, что изменение температуры чугуна на выпуске в диапазоне 1450÷1500⁰С практически не влияет на изменение его энтальпии (его физический нагрев). Аналогичный характер связи

прослеживается в случае повышения содержания кремния в чугунах (до 0,6%) и основности шлака (до 1,23 ед.).

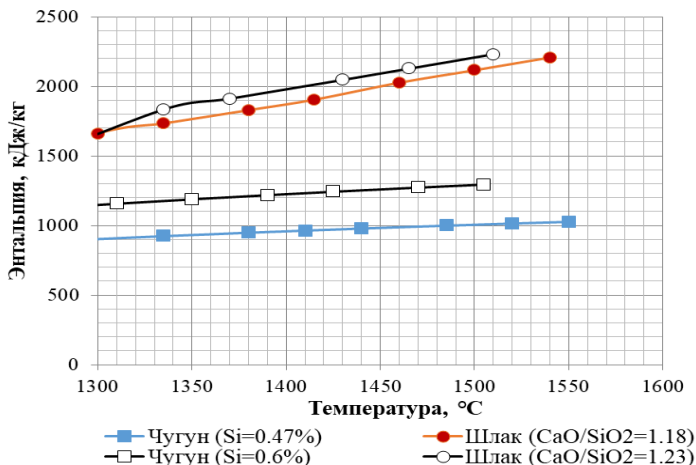


Рисунок 4 – Зависимость энтальпии чугунов и шлаков от их температуры и химического состава по данным [9]

Из анализа данных об удельной теплоемкости различных по составу чугунов и шлаков при различных температурах характер связи несколько изменяется (рис.5).

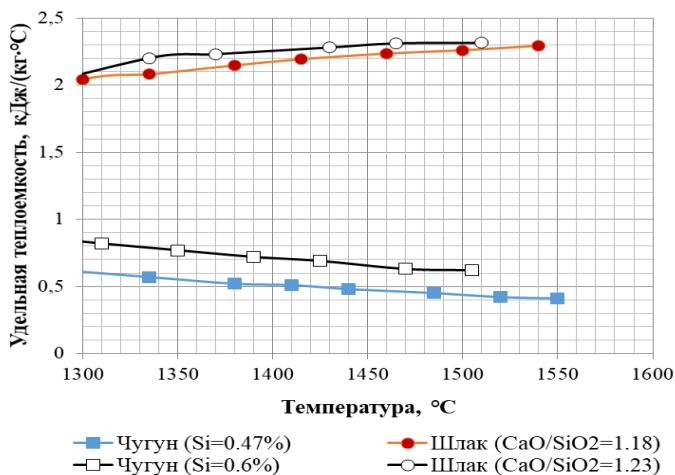


Рисунок 5 – Зависимость удельной теплоемкости чугунов и шлаков от их температуры и химического состава по данным [9]

Не зависимо от содержания кремния в чугуна удельная его теплоемкость при повышении температуры снижается, при этом удельная теплоемкость шлаков незначительно повышается, т.е. повышение температуры расплава чугуна в условиях доменной плавки должно сопровождаться уменьшением затрат тепловой энергии на его нагрев, а шлакового расплава – не значительным повышением.

Таким образом, помимо рафинирующих функций, которые выполняет шлак в процессе доменной плавки, теплофизические его свойства являются важной информацией при оценке теплового состояния горна доменной печи и тепловых потерь на выпуске со шлаком.

Выводы.

1. Выполнены экспериментальные исследования температуры расплавов чугуна и шлака на их выпуске из печи для технологических условий работы одной из доменных печей Украины. Показано, что температуры чугуна и шлака имеют практически одинаковые значения и изменяются в диапазоне $1451 \div 1487^{\circ}\text{C}$.

2. Для трех проб шлаков выполнены измерения вязкости в диапазоне температур $1320 \div 1500^{\circ}\text{C}$ на ротационном реометре Anton Paar и показано, что при температурах на их выпуске из доменной печи вязкость превышает оптимальное ее значению $0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

5. С целью выбора достоверных литературных данных выполнены экспериментальные исследования энтальпии доменных шлаков основностью $(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$ 1.17 и 1.11 (соответственно №1 и №2 табл.2). В результате экспериментальных исследований установлена величина энтальпии для данных шлаков (при температуре $\approx 1450^{\circ}\text{C}$) соответственно 2053 кДж/кг и 1949 кДж/кг без учета теплоты на парообразования, что связано со сложностью учета потери воды со шлаком при их разделении.

6. На основе корреляционно-регрессионного анализа литературных данных, содержащих информацию об энтальпии расплавов доменных шлаков с учетом выполненных экспериментальных исследований, установлена зависимость энтальпии доменных шлаков с их химическим составом, который представлен через показатель стехиометрии - r и температурой и предложена соответствующая прогнозная модель. На основе предложенной прогнозной модели выполнен расчет энтальпии доменных шлаков для доменной печи объемом 1500 м^3 с учетом реальных их температур на выпуске. Показано, что при колебании температур шлаковых расплавов в диапазоне $1453 \div 1487^{\circ}\text{C}$ их энтальпия существенно изменяется в диапазоне $1933 \div 2031 \text{ кДж/кг}$.

Библиографический список

1. Готтлиб А. Д. Доменный процесс. – М.: «Металлургия». – 1966. – 503 с.

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вып.32
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2018. – Vypusk 32*

2. Ярошевский С. Л., Гайворонский Я. С., Попов Н. Н. Контроль теплового состояния горна доменной печи. – К.: Техника. – 1968. – 184с.
3. Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михлевич А.Г. [и др.]. Свойства жидких доменных шлаков –М.: Metallurgiya. -1975. -184 с.
4. Жмойдин Г. И. Проблема информационного обеспечения теоретической и прикладной металлургии / Г. И. Жмойдин, Д. Н. Тогобицкая // Металлы. – 1991. - №3. - С.218-221.
5. Тогобицкая Д. Н. Оптимизация металлургических технологий и концепция создания информационно-интеллектуальных систем / Д. Н. Тогобицкая, А.Ф.Хамхотько, Ю. М. Лихачев // Сб. Фундаментальные и прикладные проблемы металлургии. -Киев: Наукова думка. –1995. – С.242-249.
6. Приходько Э. В. Базы физико-химических и технологических данных для создания информационных технологий в металлургии / Э. В. Приходько, Д. Н. Тогобицкая // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – №3. – С. 17-21.
7. Использование базы вискозиметрических данных для расчета кристаллизационной способности металлургических шлаков / Д. Н. Тогобицкая, А. Ф. Хамхотько, Ю. М. Лихачев, Д. А. Степаненко // Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». –Днепропетровск. – 2008. – вып. 18. – С. 200-209.
8. Інформаційно-аналітична система для дослідження кристалізаційної здатності металургійних шлаків / Д. М. Тогобицька, Д. О. Степаненко, А. Ф. Хамхотько, Ю. М. Ліхачев // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Дніпропетровськ. – 2010. – Вип. 2 (67). – С. 74-80.
9. Исследование теплофизических свойств доменных шлаков и передельных чугунов / С.А. Гаврилко, Ю. В. Моисейко, С. А. Черепанов [и др.] / Металургія (Наукові праці ЗДІА). – Запоріжжя: ЗДІА, 2006. – Вип. 13. – С. 106-112.
10. Ильченко К.Д., Чеченев В.А., Иващенко В.П., Терещенко В.С. Теплофизические свойства промышленных материалов: Справочник. – Днепропетровск: Січ. – 152с.
11. Усачев А.Б., Баласанов А.В., Чургель В.О., Вильданов С.К. Исследование физических свойств шлаков процесса жидкофазного восстановления железа РОМЕЛТ. –Изв.вузов. Черная металлургия. -1997. -№1. –С.27-30.
12. Приборы автоматические следящего уравнивания КСМ2, КСМ2И, КСП2, КСП2И, КСУ2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ТО-994".
13. Приходько Э. В. Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем / Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, Д.А. Степаненко // Днепропетровск: Пороги, 2013. – 344с.

Reference

1. Gotlib A. D. Domennyy protsess. – М.: «Metallurgiya». – 1966. – 503 s.
2. Yaroshevskiy S. L., Gayvoronskiy YA. S., Popov N. N. Kontrol' teplovogo sostoyaniya gorna domennoy pechi. – К.: Tekhnika. – 1968. – 184s.
3. Voskoboynikov V.G., Dunayev N.Ye., Mikhlevich A.G. [i dr.]. Svoystva zhidkikh domennykh shlakov –М.: Metallurgiya. -1975. -184 s.

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вип.32
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2018. – Vypusk 32

4. Zhmoydin G. I. Problema informatsionnogo obespecheniya teoreticheskoy i prikladnoy metallurgii / G. I. Zhmoydin, D. N. Togobitskaya // *Metally*. –1991. – №3. – S.218-221.
5. Togobitskaya D. N. Optimizatsiya metallurgicheskikh tekhnologiy i kontseptsiya sozdaniya informatsionno-intellektual'nykh sistem / D. N. Togobitskaya, A.F.Khamkhot'ko, YU. M. Likhachev // *Sb. Fundamental'nyye i prikladnyye problemy metallurgii*. –Kiyev: Naukova dumka. –1995. – S.242-249.
6. Prikhod'ko E. V. Bazy fiziko-khimicheskikh i tekhnologicheskikh dannykh dlya sozdaniya informatsionnykh tekhnologiy v metallurgii / E. V. Prikhod'ko, D. N. Togobitskaya // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. – 1999. – №3. – С. 17-21.
7. Ispol'zovaniye bazy viskozimetricheskikh dannykh dlya rascheta kristallizatsionnoy sposobnosti metallurgicheskikh shlakov / D. N. Togobitskaya, A. F. Khamkhot'ko, YU. M. Likhachev, D. A. Stepanenko // *Sb. nauchn. tr. ICHM «Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii»*. –Dnepropetrovsk. – 2008. – vyp. 18. – S. 200-209.
8. *Informatsiyno-analitichna sistema dlya doslidzhennya kristalizatsiynoi zdatsnosti metalurgiynikh shlakiv* / D. M. Togobits'ka, D. O. Stepanenko, A. F. Khamkhot'ko, YU. M. Likhachov // *Sistemni tekhnologii. Regional'niy mizhvuzivs'kiy zbirnik naukovikh prats'*. - Dnipropetrovsk. – 2010. – Vip. 2 (67). – S. 74-80.
9. *Issledovaniye teplofizicheskikh svoystv domennykh shlakov i peredel'nykh chugunov* / S.A. Gavrilko, YU. V. Moiseyko, S. A. Cherepanov [i dr.] / *Metalurgiya (Naukovi pratsi ZDIA)*. – Zaporizhzhya: ZDIA, 2006. – Vip. 13. – S. 106-112.
10. Il'chenko K.D., Chechenev V.A., Ivashchenko V.P., Tereshchenko V.S. *Teplofizicheskiye svoystva promyshlennykh materialov: Spravochnik*. – Dnepropetrovsk: Sich. – 152s.
11. Usachev A.B., Balasanov A.V., Churgel' V.O., Vil'danov S.K. *Issledovaniye fizicheskikh svoystv shlakov protsessa zhidkofaznogo vosstanovleniya zheleza ROMELT*. –Izv.vuzov. Chernaya metallurgiya. -1997. -№1. –S.27-30.
12. *Pribery avtomaticheskoye sledyashchego uravnoveshivaniya KSM2, KSM2I, KSP2, KSP2I, KSU2. Tekhnicheskoye opisaniye i instruktsiya po ekspluatatsii TO-994*".
13. Prikhod'ko E. V. Prognozirovaniye fiziko-khimicheskikh svoystv oksidnykh sistem / E.V. Prikhod'ko, D.N. Togobitskaya, A.F. Khamkhot'ko, D.A. Stepanenko // *Dnepropetrovsk: Porogi*, 2013. – 344s.

*Статья поступила в редакцию сборника 07.11.2018 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)
Рецензенты: д.т.н., проф.Л.В.Камкинв; д.т.н., проф. Д.Н.Тогобичкая*