

8. Пашков В.Д. Повышение давления доменного дутья // *Сталь*, 1952. – №3. – С. 219-227.
9. Ницкевич Е.А. Теплоэнергетика доменного производства. – М.: Металлургия, 1966. – 383 с.
10. Тетеревятников Е.Г., Андронов В.Н. Работа доменной печи на давлении под колошником до 1,3 ати. // *Сталь*, 1957. – №3. – С. 200-204.
11. Шерemet В.А. Аглодомненное и коксовое производство КГГМК “Криворожсталь” // Труды V Международного конгресса доменщиков “Производство чугуна на рубеже столетий”. Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 6-14.
12. Шерemet В.А. Развитие доменного производства Криворожского государственного горно-металлургического комбината “Криворожсталь” // Труды Международной научно-технической конференции посвященной 70-летию КГГМК “Криворожсталь” “Теория и практика производства чугуна”. Кривой Рог, 2004. – С. 5-12.
13. Павлов М.А. *Металлургия чугуна. Том II. Доменный процесс.* Изд. 6. – М: Металлургиздат, 1949. – 628 с.
14. Козлов И.З. Процессы восстановления и окисления в мощных доменных печах. Под редакцией М.А. Павлова. – Л-М: Металлургиздат, 1951. – 300 с.
15. Шатлов В.А. Состояние производства чугуна и технологии доменной плавки в России // Труды Международной научно-технической конференции посвященной 70-летию КГГМК “Криворожсталь” “Теория и практика производства чугуна”. Кривой Рог, 2004. – С. 22-27.
16. Донсков Е.Г., Лялюк В.П., Северенюк В.В. Работа воздушных фурм доменных печей. – Днепропетровск: Пороги, 1997. – 120 с.

Рукопись поступила в редакцию 24.02.12

УДК 669.162

А.В. РЕВЕНКО, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «Криворожский национальный университет»,
О.А. РЕВЕНКО, магистр, «ГИПОпром», Днепропетровск

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСИЯ СЕРЫ В ГОРНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Приведены методические особенности исследования равновесия серы в горне доменной печи. Для сглаживания неравномерности распределения температуры шлака в объеме горна и характеристики температурного уровня процесса десульфурации чугуна шлаком в печи предложено понятие теоретической температуры шлака в горне.

Качество металлопродукции предприятий черной металлургии определяется содержанием в стали вредных примесей и особенно серы. В современных условиях концентрация серы в качественной стали не должна превышать 0,001-0,005 %. Для обеспечения указанного содержания серы в стали, производимой, в основном кислородно-конвертерным сталеплавильным процессом, необходимо использовать металлошихту с ультранизким содержанием серы. Это обусловлено возникновением существенных физико-химических затруднений развитию десульфурации металлической фазы в кислородно-конвертерном процессе. Металлошихта этого сталеплавильного процесса состоит на 80% из жидкого доменного чугуна. Поэтому для выплавки качественной стали необходимо обеспечить снабжение сталеплавильного передела жидким доменным чугуном с ультранизким содержанием серы. В настоящее время основным средством получения жидкого чугуна с низким и ультранизким содержанием серы стала внедоменная десульфурация. Однако существенный уровень затрат на внедоменную десульфурацию чугуна, обусловленный высокой стоимостью десульфуратора, возбуждает практический интерес к изысканию и использованию скрытых резервов доменной плавки для производства чугуна с минимально возможной концентрацией серы. Чем ниже содержание серы в выплавленном доменном чугуне, тем ниже расход десульфуратора, ниже затраты на внедоменную десульфурацию чугуна, выше качество кислородно-конвертерной стали и конечной металлопродукции.

Выявление скрытых резервов доменной плавки по обеспечению качества металлопродукции нуждается в совершенствовании теории поведения серы в горне доменной печи, где формируется состав продуктов плавки. Состав чугуна в горне определяется развитием физико-химических процессов в этой части доменной печи. В свою очередь управление составом выплавляемого чугуна требует наличия количественных взаимосвязей между параметрами протекающих в горне физико-химических процессов. Поэтому основной задачей совершенствования теории поведения серы в горне доменной печи является создание математической модели, определяющей взаимосвязь между концентрацией серы в чугуне и основными параметрами физико-химической системы «чугун - шлак».

В горне доменной печи можно выделить целый ряд стационарных процессов, для которых параметры не зависят от времени. Например, струя дутья, выходящая из воздушной фурмы, создает очаг горения, в котором устанавливаются пространственно распределенные concentra-

ционные и температурные поля с неизменными в течении некоторого промежутка времени градиентами. При этом состав и температура в реакционной зоне закономерно изменяются по мере увеличения объема реагирования. Для стационарных процессов в доменной печи удастся определить пространственные границы их осуществления и отобразить структурную картину технологического процесса в целом. При обеспечении устойчивой работы доменной печи возможна стабилизация параметров и пространственных пределов осуществления локальных стационарных процессов во времени и допустима правомерность характеристики технологического процесса в целом как стационарного процесса. Если параметры и пространственные пределы осуществления стационарных процессов не являются стабильными, но изменяются достаточно медленно, то реальный процесс допустимо рассматривать в каждый момент времени как квазистационарный. Стационарные процессы близки к обратимым процессам, которые представляются в виде совокупности последовательных равновесных состояний и описываются термодинамикой.

В горне доменной печи сера распределяется между газовой, жидкими (чугун, шлак) и твердыми (кокс, футеровка, гарнисаж) фазами. В газовую фазу сера переходит в основном при сжигании кокса в фурменных очагах. При этом содержание серы в коксе резко снижается на 40% и более в объеме между низом шахты и уровнем воздушных фурм, где температура кокса достигает 1100 °С и более [1, с. 211]. В дальнейшем из газовой фазы сера интенсивно поглощается свежевосстановленным железом и флюсующими компонентами доменной шихты. Содержание серы в частично восстановленном агломерате увеличивается в 4-5 раз [1, с. 216], а в известняке до 0,18-0,35 % [1, с. 221] особенно на периферии и в центре печи. В «корольках» металла из низа шахты и зоны воздушных фурм содержится соответственно 0,193 % [S] и 0,29 % [S] [1, С. 223-224], а в пробах шлака из указанных объемов соответственно содержится 0,56 % (S) и 0,97 % (S) [1, с. 227]. Часть серы уносится из печи с колошниковым газом, а оставшаяся сера распределяется главным образом в горне между чугуном и шлаком, периодически выпускаемыми из доменной печи через летки. Кроме того, в горне часть серы переходит в чугун и шлак непосредственно из кокса, о чем свидетельствует более высокое содержание серы в металлической и шлаковой фазах из пор кусков горнового кокса [1]. Однако, кокс играет важную роль в процессах десульфурации в горне. Горновой кокс, имея плотность близкую к плотности шлака, находится в слое шлака и обеспечивает большую поверхность реагирования, а также более длительное пребывание капель жидкого чугуна в шлаке, лучшие условия перемешивания и контакта между реагирующими фазами [2, С. 4-5, с.17].

Обычно при экспериментальном моделировании термодинамического равновесия серы в горне в основном рассматривается поведение серы в системе «чугун - шлак», а в качестве критерия равновесия принимается стабилизация величины коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком. Так, применение в исследованиях лигатуры с радиоактивным изотопом S^{35} и принудительного перемешивания жидких фаз позволяло контролировать распределение серы между чугуном и шлаком и прекращать опыт после достижения стабилизации в них концентраций серы, т.е. «при достижении равновесия» [3, с.170]. Однако существенной особенностью экспериментальных исследований равновесия серы является то, что в большинстве случаев реальная реакционная система не являлась замкнутой, в которой отсутствовал бы обмен веществом с окружающей средой, а фактически была открытой. Для открытых реакционных систем присуще возникновение градиентов свойств и соответствующих им потоков, определить параметры которых позволяет термодинамика стационарных процессов, а обмен веществом с окружающей средой вызывает изменение начального содержания химических элементов в реакционной системе, ведущее к торможению обратных процессов и смещению равновесного состава относительно начального состояния. Поэтому реально достигаемое состояние термодинамического равновесия соответствует не реальному стартовому состоянию, а смещенному, если бы реальная реакционная система являлась замкнутой. С позиций термодинамики необратимых процессов собственно необратимость присуща лишь макропроцессам, а микропроцессы являются полностью обратимыми. Таким образом, смещенное начальное состояние реальной реакционной системы при обеспечении ее замкнутости будет достигнуто при обратимом микропроцессе из конечного состояния равновесия открытой физико-химической системы. Из принципа микроскопической обратимости, называемого также принципом детального равновесия, вытекает равенство в состоянии равновесия скоростей прямого и обратного процессов по любому возможному пути.

Исходя из этого для оценки степени достижения равновесия серы, относящегося к микро-

процессам, в незамкнутой реакционной физико-химической системе «чугун - шлак» для реальных условий плавки допустимо в качестве исходного состояния принимать не начальное состояние открытой реакционной системы, а ее конечное состояние, представляя его в качестве «замкнутой термодинамической системы».

Описание равновесия при химических превращениях осуществляется химической термодинамикой. Химические превращения относятся к микропроцессам и осуществляются в реакционной зоне, располагающейся в области непосредственного контакта исходных реагентов, совершения акта химического взаимодействия и образования новых химических соединений – продуктов. В свою очередь образующиеся продукты также реагируют между собой с образованием исходных реагентов в той же локальной реакционной зоне. Химический состав локальной реакционной зоны, характеризующийся соотношением количеств молей исходных реагентов и продуктов превращения, будет изменяться до тех пор, пока интенсивность химического взаимодействия между продуктами превращения (обратный процесс) не станет равной интенсивности химического взаимодействия между исходными реагентами (прямой процесс). В момент достижения равенства интенсивностей обратного и прямого процессов в локальной реакционной зоне наступает состояние химического равновесия.

В реальных условиях объем горна доменной печи представляет собой макрообъем, состоящий из микрообъемов локальных реакционных зон с различными температурами и химическими составами исходных реагентов и продуктов превращения, что обуславливает различие параметров химического равновесия по объему горна. Специфические особенности структуры слоя материалов в горне препятствуют перемешиванию фаз и выравниванию химического состава реакционной системы, а также температуры в ней для всего объема горна. Однако это не препятствует достижению состояния локального химического равновесия в каждом локальном микрообъеме рабочего пространства горна. Практически выравнивание температур, составов чугуна и шлака происходит после выпуска их из доменной печи в ковшах соответственно чугуновозов и шлаковозов. Вследствие неоднородности температуры жидкого шлака в объеме горна для оценки степени достижения равновесных значений концентрации серы в шлаке и чугуне целесообразно ввести понятие теоретической температуры шлака в горне, которая является расчетной величиной и соответствует такой температуре шлака в горне, при которой расчетные концентрации серы в металлической и шлаковой фазах равны их значениям в чугуне и шлаке на выпуске из печи.

Рассматривая равновесие серы в горне, следует оперировать данными о ее равновесных концентрациях во всех фазах, присутствующих в этой гетерогенной физико-химической системе, а также оценить химические потенциалы серы во всех фазах. Как известно химический потенциал (парциальная мольная свободная энергия) отражает тенденцию вещества покинуть фазу.

Поэтому сделать вывод о достижении состояния химического равновесия серы правомерно при условии равенства ее химических потенциалов во всех фазах. Так как химические потенциалы веществ являются сугубо расчетными величинами, определить параметры равновесного состояния физико-химической системы, возможно, прежде всего, путем термодинамических расчетов для условий, присущих конкретной реальной реакционной системе. Совпадение результатов расчетов с параметрами реальной реакционной системы позволяет сделать обоснованный вывод о достижении равновесного состояния в реальных условиях. В данном исследовании применен универсальный термодинамический метод определения характеристик равновесия произвольных гетерогенных систем, основанный на фундаментальном принципе максимума энтропии [4,5]. Этот метод предоставляет уникальную возможность обобщенного описания любого высокотемпературного состояния с помощью одних только фундаментальных законов термодинамики, независимо от условий и способов достижения равновесия. Метод требует минимальной информации о самой системе и о ее окружении. При этом формулировка задачи термодинамического моделирования требует назначения двух условий равновесия изучаемой системы с окружающей средой. Этими условиями могут быть либо численные значения термодинамических характеристик равновесия, либо функциональные соотношения между параметрами этого состояния. Для описания самой системы, как материального объекта, необходимо знать лишь содержание образующих ее химических элементов.

Моделируемые внутренние и межфазные взаимодействия описываются соотношениями, для замыкания которых используются термодинамические свойства только индивидуальных

веществ - компонентов равновесия. Термодинамические расчеты выполнялись при следующих допущениях: достижение полного или локального состояния внешнего и внутреннего термодинамического равновесия замкнутой системы, не обменивающейся веществом с окружающей средой; обязательное присутствие газовой фазы, которая описывается уравнением состояния идеального газа; конденсированные вещества образуют однокомпонентные несмешивающиеся фазы либо включаются в состав идеальных конденсированных растворов без учета поверхностных эффектов на границе раздела фаз; отсутствие растворимости газов в жидких и твердых фазах. В данном случае модель конденсированных растворов предполагала нулевые тепловые эффекты смешивания и с избыточной энтропией, присущей идеальным смесям.

Согласно данным [3, с.178] при экспериментальных исследованиях равновесия серы в системе «чугун - шлак» для опыта с пробой чугуна массой 60 г, содержащего 0,79 % [Si], 0,18 % [Mn], 0,80 % [S], 4,54 % [C], и шлака массой 30 г, содержащего 40,80 % (CaO), 14,74% (MgO), 35,53 % (SiO₂), 8,99 % (Al₂O₃), 1,00 % (S), в графитовых тиглях при температуре 1500 °С и нейтральной атмосфере через 5,6 часа чугун имел в своем составе 1,25 % [Si], 0,15 % [Mn], 0,0083 % [S], 4,62 % [C], а шлак содержал 40,20 % (CaO), 15,32 % (MgO), 34,82 % (SiO₂), 8,93 % (Al₂O₃), 0,031 % (Mn_{общ}), 0,12 % (Fe_{общ}), 1,68 % (S). Для термодинамических расчетов указанный конечный состав системы «чугун - шлак» представлен в виде замкнутой физико-химической системы десяти химических элементов следующего состава (в моль/кг): Fe=11,1926; Si=2,2110; Ca=2,3668; Mg=1,2628; S=0,1748; C=2,5667; O=8,3291; Mn=0,0196; Al=0,5773; N = 0,0001. Этот состав отличается от элементного стартового состава данной системы (в моль/кг): Fe_н=11,1536; Si_н=2,1413; Ca_н=2,4031; Mg_н=1,2154; S_н=0,2697; C_н=2,5222; O_н=8,397; Mn_н=0,0218; Al_н=0,5814; N_н=0,0001. Это свидетельствует о ее обмене веществом с внешней средой. Согласно существующим представлениям сера в жидком передельном чугуне может присутствовать в виде раствора и в виде химических соединений, главным образом, сульфидов железа и марганца. В жидком доменном шлаке, как правило, рассматривается наличие сульфидов кальция, магния, железа и марганца. При задании в рассматриваемой физико-химической системе двух идеальных конденсированных растворов MX1 (*k*Fe, *k*Si, *k*C, *k*S, *k*Mn) и MX2 (**k*CaO, **k*SiO₂, **k*CaS, **k*FeO, **k*FeS, **k*MgO, **k*MgS, **k*MnO, **k*MnS, **k*Al₂O₃) расчетное равновесное состояние характеризуется следующим составом (в моль/кг): *k*S=1,84·10⁻⁶; N₂=1,0702·10⁻⁵; *k*C=0,75355; CO=1,318·10⁻⁶; N₂C=3,93·10⁻⁵; *k*Si =0,20783; **k*SiO₂ =0,10145; SiS =1,379·10⁻⁸; **k*Al₂O₃=0,28865; *k*Fe=5,7528; **k*FeO=7,914·10⁻⁵; **k*FeS=3,4555·10⁻⁴; k*Fe₃C=1,8131; *k*Mn=0,018021; **k*MnO=1,7445·10⁻⁴; **k*MnS=1,4048·10⁻³; Mg=1,062·10⁻⁷; **k*MgO=0,401; **k*MgS=0,0456; k*Mg₂SiO₄ =0,42363; **k*CaO=0,088; **k*CaS=0,15849; k*CaSiO₃=0,055294; k*Ca₃Si₂O₇=0,7114. Полученные результаты соответствуют состоянию полного перехода FeS и MnS в шлак. Пересчет указанного общего состава системы на три фазы свидетельствует, что: в фазе, представляющей чугун, содержится 0, 87591%[Si], 0,14919%[Mn], 4,636%[C], 8,864·10⁻⁶ % [S]; в фазе, представляющей шлак, содержится 36,846 % (CaO), 3,4 % (CaS), 14,876 % (MgO), 0,2429 % (MgS), 35,811 % (SiO₂), 8,7724 % (Al₂O₃), 0,001698 % (FeO), 0,00906 % (FeS), 0,00369 % (MnO), 0,036415 % (MnS) при общем содержании в шлаковой фазе 1,6666% (S); в газовой фазе содержится 20,806 % {N₂}, 2,5629 % {CO}, 76,398 % {N₂C}, 0,026813 % {SiS}, 0,20638 % {Mg}. Следует отметить присутствие в рассматриваемой физико-химической системе в качестве самостоятельных конденсированных фаз также Fe₃C, Mg₂SiO₄, CaSiO₃, Ca₃Si₂O₇, которые учтены при пересчете в составе чугуна и шлака.

При задании в рассматриваемой системе двух идеальных конденсированных растворов MX1 (*k*Fe, *k*Si, *k*C, *k*S, *k*Mn, *k*FeS, *k*MnS) и MX2 (**k*CaO, **k*SiO₂, **k*CaS, **k*FeO, **k*MgO, **k*MgS, **k*MnO, **k*Al₂O₃) равновесное состояние характеризуется следующим составом (в моль/кг): *k*S=1,7985·10⁻⁶; N₂=1,0659·10⁻⁵; *k*C=0,76177; *k*Si = 0,2114; CO =1,3176·10⁻⁶; N₂C =3,9341·10⁻⁵; **k*SiO₂ =0,09948; SiS=1,3557·10⁻⁸; **k*Al₂O₃ = 0,28865; *k*Fe =5,7756; **k*FeO = 7,7026·10⁻⁵; *k*FeS = 0,0023044; k*Fe₃C =1,8049; *k*Mn = 0,012834; **k*MnO =1,2045·10⁻⁴; *k*MnS = 0,00664574; Mg =1,0676·10⁻⁷; **k*MgO =0,39319; **k*MgS =0,013952; k*Mg₂SiO₄ =0,42783; **k*CaO =0,018456; **k*CaS = 0,1519; k*CaSiO₃ = 0,02398; k*Ca₃Si₂O₇ = 0,72416. Полученные результаты соответствуют состоянию полного перехода FeS и MnS в металл.

При задании в рассматриваемой системе двух идеальных конденсированных растворов MX1(*k*Fe, *k*Si, *k*C, *k*S, *k*Mn) и MX2(**k*CaO, **k*SiO₂, **k*CaS, **k*FeO, **k*MgO,

$**k^*MgS, **k^*MnO, **k^*Al_2O_3$) равновесное состояние характеризуется следующим составом (в моль/кг): $*k^*S = 1,8641 \cdot 10^{-6}$; $N_2 = 1,0699 \cdot 10^{-5}$; $*k^*C = 0,7542$; $CO = 1,322 \cdot 10^{-6}$; $N_2C = 3,9301 \cdot 10^{-5}$; $*k^*Si = 0,20696$; $**k^*SiO_2 = 0,10145$; $SiS = 1,39 \cdot 10^{-7}$; $**k^*Al_2O_3 = 0,28865$; $*k^*Fe = 5,7552$; $**k^*FeO = 7,9316 \cdot 10^{-5}$; $k^*Fe_3C = 1,8125$; $*k^*Mn = 0,019412$; $**k^*MnO = 1,8827 \cdot 10^{-4}$; $Mg = 1,0592 \cdot 10^{-7}$; $**k^*MgO = 0,40099$; $**k^*MgS = 0,014705$; $k^*Mg_2SiO_4 = 0,42355$; $**k^*CaO = 0,018822$; $**k^*CaS = 0,16009$; $k^*CaSiO_3 = 0,061336$; $k^*Ca_3Si_2O_7 = 0,70885$. В этом случае в равновесном состоянии FeS и MnS отсутствуют в идеальных конденсированных растворах MX1 и MX2.

При указании в рассматриваемой системе двух идеальных конденсированных растворов MX1 ($*k^*Fe, **k^*Si, *k^*C, *k^*S, *k^*Mn, *k^*FeS, *k^*MnS$) и MX2 ($**k^*CaO, **k^*SiO_2, **k^*CaS, **k^*FeO, **k^*FeS, **k^*MgO, **k^*MgS, **k^*MnO, **k^*MnS, **k^*Al_2O_3$) равновесное состояние характеризуется следующим составом (в моль/кг): $Si = 0,8266 \cdot 10^{-4}$; $Si_2 = 0,0028875$; $Si_3 = 0,012981$; $**k^*SiO_2 = 0,048293$; $SiS = 0,036372$; $SiS_2 = 1,6436 \cdot 10^{-8}$; $Al = 1,6181 \cdot 10^{-4}$; $Al_2O = 1,1685 \cdot 10^{-4}$; $**k^*Al_2O_3 = 0,16455$; $Fe = 3,3721$; $**k^*FeO = 0,032657$; $**k^*FeS = 0,087344$; $FeS = 4,6111 \cdot 10^{-6}$; $k^*Fe_4N = 1,0 \cdot 10^{-4}$; $k^*Fe_3C = 2,5667$; $Mn = 0,018854$; $**k^*MnO = 1,2582 \cdot 10^{-4}$; $**k^*MnS = 6,2058 \cdot 10^{-4}$; $Mg = 0,45705$; $Mg_2 = 1,0792 \cdot 10^{-5}$; $**k^*MgO = 0,19088$; $**k^*MgS = 4,2449 \cdot 10^{-3}$; $MgS = 4,8511 \cdot 10^{-7}$; $k^*Mg_2Si = 0,1144$; $k^*Mg_2SiO_4 = 0,12895$; $k^*MgAl_2O_4 = 0,1239$; $Ca = 1,0166 \cdot 10^{-4}$; $**k^*CaO = 8,9598 \cdot 10^{-3}$; $**k^*CaS = 0,046214$; $k^*CaSiO_3 = 0,863114$; $k^*Ca_3Si_2O_7 = 0,46887$. В данном случае в равновесном состоянии конденсированный идеальный раствор MX1 отсутствует.

Рассмотренные четыре случая теоретически являются равновероятными, однако первый вариант задания составов конденсированных растворов для равновесного состояния является наиболее близким к экспериментально установленному механизму переноса серы из чугуна в шлак в форме сульфида железа при изучении кинетики десульфурации чугуна синтетическим шлаком [3, с.205]. Поэтому в дальнейшем при термодинамических расчетах задавалось присутствие в равновесном состоянии конденсированных растворов, компонентный состав которых соответствовал первому варианту. Однако в этом случае расчетная равновесная концентрация серы в металлической фазе получается крайне низкой и соответствует пребыванию серы в форме раствора с жидким железом.

В работе [6] результаты первого итерационного шага обработки и термодинамического анализа известных экспериментальных данных [7], [3, с.171,176, 178 ... 181] позволили получить приближенные количественные характеристики по распределению серы между компонентами жидкого чугуна и шлака применительно к десульфурации чугуна в условиях горна доменной печи. Последующие этапы исследований позволили уточнить количественные характеристики основных критериев распределения серы между жидкими фазами пирометаллургической физико-химической системы «чугун - шлак» и обобщить их зависимость от некоторых параметров состояния системы «Fe-Mn-Si-C-S-Ca-Mg-Al-O-N» математической моделью следующего вида

$$Y = \exp(A_O) \cdot (1 + T_{ш})^{A_1} \cdot (1 + q_{ш})^{A_2} \cdot (1 + [Mn])^{A_3} \cdot (1 + [Si])^{A_4} \cdot (1 + [C])^{A_5} \cdot (1 + [S])^{A_6} \times \\ \times (1 + \langle S \rangle_{ост})^{A_7} \cdot (1 + (Fe_{общ}))^{A_8} \cdot (1 + (Mn_{общ}))^{A_9} \cdot (1 + (MgO))^{A_{10}} \cdot (1 + (Al_2O_3))^{A_{11}} \times \quad (1) \\ \times (1 + (S))^{A_{12}} \cdot (1 + (CaO)/(SiO_2))^{A_{13}},$$

где $T_{ш}$ - теоретическая температура шлака, °C; $q_{ш}$ - удельный выход шлака, кг/т чугуна; $[Mn]$, $[Si]$, $[C]$, $[S]$ - концентрации в чугуне соответственно марганца, кремния, углерода и серы, %; $\langle S \rangle_{ост}$ - остаточная сера шихты, распределяющаяся между чугуном и шлаком в доменной печи, определяется согласно [8], %; $(Fe_{общ})$, $(Mn_{общ})$, (MgO) , (Al_2O_3) , (S) , (CaO) , (SiO_2) - концентрации в шлаке соответственно общего железа, общего марганца, магнезии, глинозема, серы, оксида кальция и диоксида кремния, %.

Применение построенных математических моделей в работе [9] обеспечило приемлемую сходимость расчетных и фактических значений концентраций серы в чугуне и шлаке на выпуске из доменной печи. При анализе таких показателей доменной плавки, как состав чугуна и шлака, относящихся к термодинамическим параметрам единой гетерогенной физико-химической системы, следует использовать фактические показатели конкретных выпусков жидких продуктов, а не усредненные результаты за избранный промежуток времени. При определении параметров поведения серы в доменной плавке следует пользоваться не температурой в реакционной зоне либо температурой чугуна, а температурой шлака. В горне доменной печи жидкие чугун и шлак имеют различные температуры. Как правило, температура жидкого шлака выше температуры жидкого чугуна. Поэтому для определения параметров поведения серы в доменной плавке необходимо знать темпе-

ратуру жидкого шлака в горне. Расчётная температура жидкого шлака в горне, которую в данной работе предложено именовать теоретической, изменялась в интервале 1562-1587 °С, что было на 53-72 °С измеренных температур жидкого чугуна на выпусках из доменной печи. Для прогноза качества выплавляемого чугуна и анализа причин колебания его сернистости разработаны методы моделирования [10] и пофакторного анализа.

Таким образом, можно заключить, что термодинамические расчеты по такой методике позволяют определить равновесные концентрации серы в металлической фазе в виде раствора с жидким железом и в шлаковой фазе в форме сульфидов железа, марганца, кальция и магния, а также состав газовой фазы над этими конденсированными фазами. Для сглаживания неравномерности распределения температуры шлака в объеме горна и характеристики температурного уровня процесса десульфурации чугуна шлаком в печи предложено понятие теоретической температуры шлака в горне.

Список литературы

1. **Воловик Г.А.** Сера в доменной шихте и борьба с ней при выплавке чугуна: Дисс... докт. техн. наук. - Т. 1. – Днепропетровск: ДМетИ, 1965г. - 314 с.
2. **Воловик Г.А.** Сера в доменной шихте и борьба с ней при выплавке чугуна: Дисс... докт. техн. наук. - Т. 2. – Днепропетровск: ДМетИ, 1965г. - 217 с.
3. **Куликов И.С.** Десульфурация чугуна. - М.: Металлургиздат, 1962. - 306 с.
4. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов // **Г.Б. Сиярев, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев.** - М.: Наука, 1982. - 263 с.
5. **Трусов Б.Г.** Термодинамический метод анализа высокотемпературных состояний и процессов и его практическая реализация: Дисс... докт. техн. наук. - М.: МГТУ, 1984. - 292 с.
6. **Ревенко А.В., Ивашенко В.П.** Распределение серы между компонентами жидкого чугуна и шлака в доменной печи // Теория и практика металлургии, 2002. - № 4. - С. 3-10.
7. **Taylor J., Stobo J.J.** The Sulphur Distribution Reaction between Blast-Furnace Slag and Metal // Journal of the Iron and Steel Institute. - London, 1954. - Vol. 178. - Part 4. - P. 360-367.
8. **Ревенко А.В., Ивашенко В.П.** Распределение остаточной серы шихты между жидким чугуном и шлаком в доменной печи // Теория и практика металлургии. - 2003. - №2. - С.18-21.
9. **Ревенко А.В.** Оценка показателей поведения серы в доменной печи объемом 5000 м³ // «Сталь», 2009. - №2. - С.9-14.
10. **Ревенко А.В., Ревенко О.А.** Моделирование содержания серы в чугуне // В кн.: VI Міжнародна конференція «Стратегія якості у промисловості і освіті» (4-11 червня 2010 р., Варна, Болгарія): Матеріали у 4 томах. Том 1 (Ч1). – Дніпропетровськ - Варна, 2010. - С.461-464.

Рукопись поступила в редакцию 24.02.12

УДК 621.926: 34.16

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Н.С. ПОДГОРОДЕЦКИЙ, канд. техн. наук, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Изложены результаты анализа возможности использования технологии фазированных решеток для построения систем контроля и диагностики на основе высокоэнергетического ультразвука.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, фазированная решетка.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Непрерывное повышение требований к надежности и безопасности работы технологического оборудования, состояния зданий и сооружений предопределяет широкое применение физических методов и приборов ультразвукового неразрушающего контроля. Ультразвуковой контроль отличается многообразием методов, типов применяемых волн, широким диапазоном частот. Перспективным направлением дальнейшего развития методов ультразвукового контроля является технология ультразвуковых фазированных решеток.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время известны различные способы фокусирования ультразвука, основанные на применении одиночных фокусирующих преобразователей [1,2], линз [3], а также фазированных решеток [4-7]. На практике давно используется простой и относительно дешевый метод, основанный на применении одиночных фокусирующих преобразователей с поверхностью в виде части сферической оболочки и с непрерывным распределением коле-