

УДК 669.162.2.04.005

**И. Г. Муравьева, Н. Г. Иванча, Е. А. Белошапка, В. И. Вишняков,  
Е. П. Ермолина, Н. Е. Ходотова**

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ О ФОРМЕ И ПОЛОЖЕНИИ ПЛАСТИЧНОЙ ЗОНЫ**

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

**Аннотация.** Целью работы является формирование рекомендации по принятию управляющих воздействий на ход плавки в современных условиях. Идеология современной интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой основывается на обеспечении оптимальной пластичной зоны (ПЗ) в доменной печи (ДП). Методы управления доменной плавкой основаны на информации о форме и положении пластичной зоны в доменной печи. По результатам исследований, выполненных различными учеными, показано, что пластичная зона представляет собой полый конус, стенки которого состоят из перемежающихся между собой горизонтальных слоев кокса, имеющих высокую газопроницаемость, и малопроницаемых для газа слоев железорудных материалов, находящихся в размягченном, полурасплавленном состоянии. В работе описаны факторы, определяющие форму и положение пластичной зоны в ДП. Проведенным анализом показано, что основное влияние на формирование пластичной зоны оказывает режим загрузки шихтовых материалов. Отмечено, что для контроля и управления ходом доменной плавки, наряду с различными методами моделирования, целесообразно создание критерия оценки формы и положения пластичной зоны, который бы учитывал ее толщину, профиль и положение в доменной печи. Разработаны рекомендации для принятия управляющих решений по ходу плавки.

**Ключевые слова:** доменная печь, пластичная зона, распределение шихты, управление ходом печи

**Ссылка для цитирования:** Муравьева И.Г. Анализ методов управления доменной плавкой на основе информации о форме и положении пластичной зоны / И.Г. Муравьева, Н.Г. Иванча, Е.А. Белошапка, В.И. Вишняков, Е.П. Ермолина, Н.Е. Ходотова // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2018. – Вып.32. – С.151-164.

**Doi:**

*I.G. Muravyova, N.G. Ivancha, E.A. Beloshapka, V.I. Vishnyakov,  
E.P. Ermolina, N.E. Hodotova*

**Analysis of the methods of management of the domain melt on the basis of  
information about the form and position of the cohesive zone**

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

**Abstract.** The aim of the work is to formulate recommendations on the adoption of control actions on the course of smelting in modern conditions. The ideology of the modern intellectual decision support system for blast smelting management is based on providing the optimal plastic zone in the blast furnace (DP). Blast furnace melting control methods are based on information on the shape and position of the plastic zone

*«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*

in the blast furnace. According to the results of research carried out by various scientists, it was shown that the plastic zone is a hollow cone, the walls of which consist of alternating horizontal coke layers with high gas permeability and low-permeable for gas layers of iron ore materials that are in a softened, semi-molten state. The work describes the factors that determine the shape and position of the plastic zone in the DP. The analysis carried out showed that the mode of loading of charge materials has the main influence on the formation of the plastic zone. It was noted that, in addition to various modeling methods, it is advisable to create a criterion for assessing the shape and position of the plastic zone, which would take into account its thickness, profile and position in the DP, to control and control the blast smelting process. Developed recommendations for making management decisions during smelting.

**Keywords:** blast furnace, plastic zone, charge distribution, furnace control

**For citation:** Muravyova I.G. Analysis of the methods of management of the domain melt on the basis of information about the form and position of the cohesive zone / I.G. Muravyova, N.G. Ivancha, E.A. Beloshapka, V.I. Vishnyakov, E.P. Ermolina, N.E. Hodotova // *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii»*. – 2018. – Vypusk 32. – P.151-164. (In Russ.).

**Doi:**

***I.G. Муравьова, М.Г. Иванча, О.О. Білошанка, В.І. Вишняков, Є.П. Єрмоліна, Н.Є. Ходотова***

**Аналіз методів керування доменною плавкою на підставі інформації про форму та положення пластичної зони**

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

**Анотація.** Метою роботи є формування рекомендації щодо прийняття управляючих впливів на хід плавки в сучасних умовах. Ідеологія сучасної інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень з управління доменної плавкою ґрунтується на забезпеченні оптимальної пластичної зони (ПЗ) в доменній печі (ДП). Методи управління доменною плавкою засновані на інформації про форму і положення пластичної зони в доменній печі. За результатами досліджень, виконаних різними вченими, показано, що пластична зона являє собою порожнистий конус, стінки якого складаються з почергових горизонтальних шарів коксу, що мають високу газопроникність, і малопроникних для газу шарів залізородних матеріалів, що знаходяться в розм'якшеному, напіврозплавленому стані. В роботі описано чинники, що визначають форму і положення пластичної зони в ДП. Проведеним аналізом показано, що основний вплив на формування пластичної зони надає режим завантаження шихтових матеріалів. Відзначено, що для контролю і управління ходом доменної плавки, поряд з різними методами моделювання, доцільно створення критерію оцінки форми і положення пластичної зони, який би враховував її товщину, профіль і положення в ДП. Розроблено рекомендації для прийняття управлінських рішень по ходу плавки.

**Ключові слова:** доменна піч, пластична зона, розподіл шихти, управління ходом печі

**Посилання для цитування:** Муравьева И.Г. Анализ методов управления доменной плавкой на основе информации о форме и положении пластичной зоны / И.Г. Муравьева, Н.Г. Иванча, Е.А. Белошапка, В.И. Вишняков, Е.П. Ермолина, Н.Е. Ходотова // «*Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*». – 2018. – Вып.32. – С.151-164.

**Doi:**

### **Постановка задачи.**

Согласно идеологии построения разработанной в ИЧМ интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой обеспечение оптимальной пластичной зоны (ПЗ) в доменной печи (ДП) является условием, выполнение которого позволит сформировать окончательные рекомендации по принятию управляющих воздействий на ход плавки [1]. Обоснование выбора рекомендаций основывается на ранжировании факторов, оказывающих наибольшее влияние на образование ПЗ и ее состояние, для чего целесообразно выполнить аналитический обзор известных методов управления доменной плавкой на основе информации о форме и положении ПЗ.

**Целью работы** является формирование рекомендации по принятию управляющих воздействий на ход плавки в современных условиях.

### **Изложение основных материалов исследований.**

Опыт исследования охлажденных доменных печей свидетельствует о том, что по своей структуре пластичная зона представляет собой полый конус, стенки которого состоят из перемежающихся между собой горизонтальных слоев кокса, имеющих высокую газопроницаемость, и малопроницаемых для газа слоев железорудных материалов, находящихся в размягченном, полурасплавленном состоянии [2]. Слои кокса при такой структуре пластичной зоны (ПЗ) играют роль своеобразных окон, по которым газовый поток, двигаясь в горизонтальном направлении от центра к периферии, распределяется по сечению печи.

Наибольший объем исследований, направленных на установление влияния образующейся в печи ПЗ на ход доменной плавки, выполнен немецкими исследователями [3–7]. Основное влияние на формирование ПЗ оказывает режим загрузки шихтовых материалов. К такому заключению пришли практически все исследователи [2-9]. В.Н. Ковшовым влияние режима загрузки на формирование ПЗ (ее конфигурацию) было изучено на газодинамическом стенде с движущимся столбом шихты [9]. Результаты выполненных им экспериментальных исследований показали значительное влияние режима загрузки на конфигурацию ПЗ и показатель газопроницаемости нижней зоны столба

шихты. Установленное им влияние неравномерного распределения рудных материалов на конфигурацию ПЗ, в частности, на ее толщину может быть использовано для обоснования управления ее величиной. Конфигурация ПЗ, обусловленная режимом загрузки, определяет и газопроницаемость. Определено качественное влияние параметров конфигурации ПЗ: дисперсии толщины по сечению рабочего пространства, высоты и средней толщины на газопроницаемость нижней части ДП. Выполненные исследования подтвердили мнение о том, что изменением распределения материалов (использование различных режимов загрузки) можно добиться рациональной конфигурации ПЗ, что в свою очередь должно приводить к изменению распределения газа.

В. Крафтом в ходе проведения промышленных исследований также подтверждена особая роль распределения шихтовых материалов на колошнике в регулировании газопроницаемости и формировании ПЗ [2]. Результаты выполненных им промышленных исследований свидетельствовали о том, что при увеличении доли кокса в направлении к периферии печи происходит опускание ПЗ. Т.к. форма ПЗ тесно связана с распределением металлошихта-кокс, о предполагаемом профиле этой зоны судили по распределению температур на колошнике, а также прочим результатам замеров по периферии печи. В ходе исследований было установлено, что четко выраженная осевая газопроницаемость при загрузке кокса в осевую зону наблюдается в случае, когда ПЗ имеет  $\Delta$ -образную форму. При высокой доле кокса в периферийной зоне печи ПЗ принимает  $W$  – образную форму. Таким образом, путем изменения способа загрузки можно достичь практически любой формы ПЗ. Для выбора способа в каждом конкретном случае необходимо получение объективных данных, т.к. аналогичные мероприятия по изменению способа загрузки на разных печах могут по-разному влиять на их технологические параметры и показатели работы.

В. Крафтом также приводятся заключения о том, что косвенным критерием толщины ПЗ является степень косвенного восстановления, служащая критерием расхода топлива. С толщиной и положением ПЗ тесно связан ее профиль, на который влияет не только распределение металлошихта-кокс, но и распределение материалов по крупности, поскольку газопроницаемость в области твердых материалов зависит от порозности столба шихты. Как показано в работе [3], поверхность расплавления должна быть по возможности большой, так как при этом уменьшается толщина ПЗ и ее сопротивление газовому потоку. Для объяснения причин, вызывающих перемещение ПЗ вверх и вниз, введено понятие отношения теплоемкостей потоков, которое зависит в основном от степени косвенного восстановления, расхода кокса и удельного количества горновых газов.

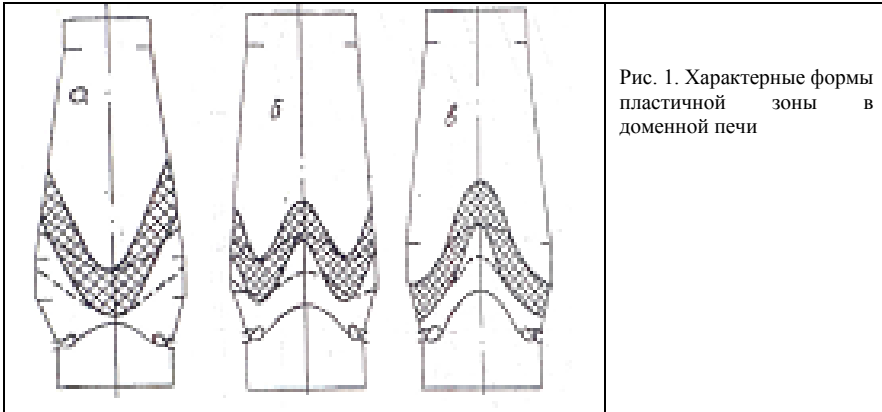
А.А. Гришкова с коллегами также придерживается мнения о том, что управлять положением, формой и размерами ПЗ возможно путем изменения режима загрузки и распределения материалов на колошнике [10].

Г. Эсфельд с группой исследователей показали в своей работе [6], что форма ПЗ зависит от размеров печи, вида шихтовых материалов, режимов работы и состояния печи. Желательным является пологий профиль ПЗ от стенок печи к оси, напоминающий по форме узкий конус с вершиной на оси печи. Причем вершина конуса должна быть направлена вверх к поверхности засыпи. Если путем соответствующего распределения материалов на колошнике и путем выбора соответствующих шихтовых материалов сопротивление газовому потоку в ПЗ удастся поддерживать на низком уровне, то высота конуса получается небольшой. В этом случае показатели работы печи, как правило, хорошие. От формы и строения ПЗ в большой степени зависит распределение газов в печи. Строение же ПЗ зависит, в свою очередь, от распределения материалов по сечению печи.

Исследования, выполненные В. Хартигом и коллегами, позволили авторам работы [8] получить новые результаты об особенностях ПЗ в ДП, а также подтвердить известные ранее положения. Так, авторами показано положительное влияние уменьшения объема ПЗ при увеличении объема «сухой» зоны на газопроницаемость ДП. Глубокое расположение ПЗ благоприятно сказывается и на степени косвенного восстановления, а тем самым на расходе восстановителей. Наряду с расположением и толщиной ПЗ ее форма также играет важную роль, являясь отражением распределения шихты на колошнике. При этом форма распределения, обратная V-образному, т.е. с заглубленным основанием и высокорасположенной вершиной, является предпочтительной. Здесь имеется большое число коксовых окон, т.е. значительная свободная площадь для прохода газового потока, хорошо выраженный, но ограниченный по площади центральный ход печи обеспечивает стабилизацию всего профиля газового потока.

Как следует из приведенных выше результатов исследований, определяющую роль в распределении газового потока в печи играет конфигурация ПЗ. В зависимости от принятого распределения рудных нагрузок и качества железосодержащих материалов, определяющих дутьевой режим, в ДП может быть сформирована ПЗ разного профиля, от которого зависит расход твердого топлива, производство печи, стойкость огнеупорной кладки в высокотемпературных зонах. Например, согласно приведенным в статье Дружкова В.Г. и Сысоева Н.П. сведениям при устойчивой работе ДП возможны V, W и Λ-образные формы ПЗ (рис. 1) [12]. По мнению авторов статьи, форма ПЗ имеет различное очертание в

зависимости от объема ДП: V-образная – 200–600 м<sup>3</sup>; W-образная – 1000–3000 м<sup>3</sup>; Λ-образная – 4000–5000 м<sup>3</sup>.



Более детальное исследование особенностей формирования ПЗ в ДП выполнено в диссертационной работе Н.П. Сысоевым [11]. Исследования замороженных печей, показанные в работе, выявили существенное влияние параметров ПЗ (конфигурация, протяженность, расположение по высоте печи) на распределение газа, эффективность использования печных газов и на результаты плавки в целом. Выполненные путем физического моделирования исследования подтвердили существующие представления о преимущественном движении газов по коксовым окнам и большем отклонении газов от стен к оси печи при Λ-образной ПЗ, в отличие от M-образной ее конфигурации. По мнению Н.П. Сысоева, как и большинства авторов, решающее влияние на ПЗ оказывает радиальное распределение шихты, изменением которого можно достичь любой формы ПЗ от Λ до W, регулировать ее толщину, газопроницаемость и расположение по высоте печи.

Помимо конфигурации, другим показателем, характеризующим формирование ПЗ в ДП, является ее расположение относительно оси печи. В результате исследования асимметричного протекания процессов в ДП немецкими исследователями под руководством К.Х. Петерса установлено, что факторы, влияющие на целевые параметры доменной плавки – производительность, расход топлива, состав чугуна и шлака, в решающей степени определяются формой и строением ПЗ, поскольку от профиля этой зоны зависят потери напора, распределение газового потока и степень его использования по поперечному сечению печи [7]. Отсюда вывод: указанные выше факторы, обуславливающие асимметричное

протекание процессов в ДП, возникают именно в этой области. Исследования выполнены на ДП в Швельгерне с использованием для анализа результатов промышленных замеров ряда математических моделей, в том числе математической модели для расчета формы и положения нижней границы ПЗ.

Целью исследований было определение влияния отклонения движения газового потока от оси симметрии на процессы, протекающие в верхней и нижней частях печи.

В ходе выполнения исследований наблюдалось ухудшение газопроницаемости ПЗ, что, по мнению исследователей, обусловлено изменением положения ПЗ. При неровном ходе печи высота ПЗ в течение короткого времени может значительно изменяться (на несколько метров). Авторами рассмотрены различные технологические решения, направленные на устранение нарушений газопроницаемости. Если эти нарушения вызваны повышением сопротивления движению газового потока в ПЗ, то необходимо принять меры по изменению положения ПЗ с тем, чтобы вновь добиться ровного хода печи. Предложен ряд способов регулирования, направленных на изменение положения ПЗ. Наиболее эффективным из них является изменение параметров дутья – расхода, температуры и влажности, а также температуры горновых газов и глубины внедрения дутья. Названные параметры, кроме последнего, определяют количество вносимого тепла. Путем изменения глубины внедрения дутья в результате регулирования давления на колошнике газовый поток в нижней части печи можно сместить ближе к осевой или периферийной зоне и изменить тем самым профиль ПЗ.

Обобщая вышесказанное, авторы утверждают, что путем регулирования количества и температуры горновых газов, а тем самым и количества вносимого тепла, а также путем установления соответствующего давления под колошником можно обеспечить стабильный режим работы ДП. При определении этих параметров следует руководствоваться результатами анализа всех измеряемых показателей и их взаимозависимости. Обязательным условием при этом является регулирование распределения материалов на колошнике.

Выполнены также исследования, позволившие выявить нарушения хода печи, вызванные асимметричным распределением материалов, оказывающим более сильное влияние. Неравномерное распределение материалов приводит к асимметричному положению ПЗ. Авторами показана сложность и неоднозначность устранения асимметричности профиля поверхности засыпи путем корректировки загрузки шихты.

Как показал анализ литературных источников, развитие представления о формировании и поведении ПЗ в ДП позволяет выполненный большой

объем экспериментальных исследований структуры столба шихтовых материалов в ДП [4, 5, 10].

Значительный объем исследований по изучению структуры столба шихты в ДП и, в частности, ПЗ выполнен немецкими учеными Х.В. Гуденау, К. Крайбихом и К.Х. Петерсом [5]. Впервые при решении задач оптимизации ими была определена динамика изменения конфигурации ПЗ и установлена связь между этими изменениями и показателями работы ДП. Исследователями с помощью модели разработан способ определения формы, положения и высоты ПЗ на основе данных о ходе процесса, который впоследствии опробован на ДП завода в Швельгерне. При проведении опытов на модели получали также количественное распределение газа по коксовым окнам, равномерное распределение которого является благоприятным фактором, способствующим повышению степени использования газового потока и снижению расхода топлива.

Известно, что смещение температур размягчения и плавления в сторону более высоких значений способствует улучшению равномерности распределения газового потока, т.е. увеличению количества газа, проходящего через нижние коксовые окна. Как показали выполненные исследования, вследствие увеличения количества газа, проходящего через нижние коксовые окна, общая длительность пребывания газа в области кусковых материалов возрастает, степень использования газового потока  $\eta_{CO}$  увеличивается с 49 до 52%, а расход кокса уменьшается примерно на 4%. При увеличении количества газа, проходящего через нижние коксовые окна, агрессивное воздействие горячих газов на футеровку усиливается, особенно в области распара, о чем свидетельствует большее количество отводимого с охлаждающей водой из этой области тепла. Основанный на определении количества отводимого с охлаждающей водой тепла способ, позволяет, по мнению авторов [5], более точно определять место контакта корней ПЗ со стенками печи.

По результатам выполненных исследований авторами сделаны заключения о том, что оптимальный профиль ПЗ образуется тогда, когда размягчение и плавление протекают по возможности в узком диапазоне высоких температур. При оптимизации профиля ПЗ следует учитывать общее сопротивление газовому потоку, термические нагрузки на футеровку в области распара, производительность и ход печи. Имеет значение и ширина верхних слоев ПЗ, поскольку она является показателем газопроницаемости. Исследования на модели показали, что улучшение газопроницаемости, повышение равномерности распределения газа и степени его использования, а также снижение расхода кокса достигаются при смещении ПЗ к оси печи или уменьшении ее высоты.



В работе [10] А.А. Гришковой с соавторами приведены результаты исследований структуры столба материалов в ДП, выполненные на одной из ДП Магнитогорского металлургического комбината, оборудованной двухконусным загрузочным устройством. С использованием математической модели на основе принятой в качестве критерия оценки ПЗ – радиальной ее конфигурации (тип ПЗ), глубины расположения от уровня засыпи, объема и толщины локальных участков по кольцевым сечениям сделаны следующие выводы:

наилучшие значения КИПО (от 0,46 до 0,48) были получены при W-образном профиле ПЗ;

общий объем ПЗ изменяется в пределах от 400 до 525 м<sup>3</sup>, что составляет 17–25% полезного объема печи;

наиболее типичным случаем является – W-образный профиль зоны с более или менее пологими границами периферийной части зоны;

при более глубоком залегании и большем объеме ПЗ, снижается производительность печи вследствие снижения газопроницаемости столба шихты;

при переходе от более сжатой к более растянутой форме зоны, определяемой отношением толщины локальных участков к средней толщине ПЗ, наблюдается увеличение общего объема ПЗ с уменьшением объема размягченного материала в периферийной зоне;

отмечена взаимосвязь между локальной высотой ПЗ и скоростями движения шихты на колошнике над данными участками. С увеличением высоты зоны скорость движения шихты в шахте печи снижается с соответствующим снижением производительности печи.

Следует подчеркнуть, что эти заключения характерны для ДП, оснащенных конусными загрузочными устройствами, обеспечивающими свойственное им распределение шихтовых материалов на колошнике печи, что способствует периферийному ходу печи.

Особо следует подчеркнуть ряд важных выводов исследований, выполненных под руководством А.А. Гришковой, и касающихся установления связи скоростей перемещения ПЗ в ДП со скоростями схода шихтовых материалов на колошнике. Как показано в [10], скорость перемещения ПЗ оказывает влияние на ритмичность схода шихтовых материалов на колошнике. Наряду с работой фурменных зон, процесс изменения размеров ПЗ определяет границы повышенных скоростей схода шихты на колошнике. Авторами работы также установлено, что снижение уровня ПЗ, связанное с похолоданием печи, подтверждается уменьшением содержания кремния в чугуне спустя 2–4 часа. Таким образом, непрерывный контроль за положением ПЗ позволяет своевременно устанавливать тенденции намечающегося похолодания печи. Вместе с тем, само изменение положения ПЗ зависит от

распределения материалов на колошнике. Таким образом, существует связь распределения материалов и газового потока на колошнике с работой фурменной зоны и горна через посредство ПЗ, которая так или иначе может реагировать на изменения в режиме загрузки. Такая дифференциация связей «колошник – ПЗ» и «ПЗ – горн» позволяет наметить схему управления тепловым состоянием и ходом ДП в связи с организацией рационального газового потока. Из заключения авторов работы следует, что форма ПЗ оказывает существенное влияние на производительность печи, качество выплавляемого чугуна и сохранность кладки печи.

Интерес представляет статья И.Ф. Курунова, рассматривающего вопросы совершенствования технологии доменной плавки за рубежом и управления ею [2]. Ключевым вопросом, который рассматривается в работе, является оптимизация распределения газового потока в печи. Как показано в статье, на распределение газа по сечению и на газопроницаемость столба шихты в печи оказывают большое влияние форма, положение и размеры ПЗ. Автором приводятся в качестве примера лабораторные исследования, проведенные на холодной модели ДП №2 завода в Муроране, Япония, (масштаб 1/10). Выполненные исследования показали, что W-образный профиль зоны размягчения обеспечивает более равномерное распределение газа по сечению, но создает повышенное сопротивление прохождению газов по сравнению с  $\Lambda$ -образным профилем. Потери напора в нижней части печи уменьшаются, в центральный поток газов усиливается с увеличением крутизны  $\Lambda$ -образного профиля. При чрезмерно крутом профиле зоны и приближении ее вершины к уровню засыпи появляется опасность прорыва газов в центре и образования здесь канала. С уменьшением толщины слоев кокса газопроницаемость зоны размягчения снижается.

В связи с расширившимся в последние годы использованием пылеугольного топлива интерес представляют исследования газодинамики доменной плавки при вдувании угольной пыли, выполненные на физической модели ДП в масштабе 1:20 группой немецких ученых под руководством Г.В. Гуденау [4]. При проведении исследований использованы четыре варианта форм ПЗ, образующейся в печи. Оптимальной формой считалась  $\Lambda$ -образная зона плавления. Этот профиль свидетельствует о высокой потере напора в области окислительной зоны и сопровождается весьма равномерным падением давления до колошника. Наиболее часто встречающейся формой ПЗ является W-образная форма, при которой наблюдается небольшая периферийность хода в нижней части печи, что проявляется в некотором повышении температуры у стенки. Смещение потока из центра со сдвигом линии плавления к стенке и ограничение температуры в центре печи характерны для M-образного

профиля. При сильно развитом периферийном ходе из W- и M-образных профилей может образоваться ПЗ с V-образным профилем.

По результатам анализа выполненных исследований автором сформулированы требования для условий доменного процесса с вдуванием больших количеств угольной пыли:

во-первых, следует стремиться к получению  $\Lambda$ -образного профиля пластичной зоны, т.к. он обеспечивает хорошую газопроницаемость печи;

во-вторых, вершину ПЗ следует смещать максимально вверх, чтобы достичь достаточного числа коксовых окошек и уменьшить сопротивление проходу газа в ПЗ;

в-третьих, следует сохранять толщину коксового слоя, установленную при работе без вдувания угольной пыли, и соответственно, увеличивать толщину рудного слоя, чтобы газопроницаемость печи не снижалась;

в-четвертых, пыль должна полностью сгорать в окислительной зоне во избежание нарушения газопроницаемости из-за попадания пыли в столб шихты.

Известен также ряд работ, в частности, немецких авторов, в которых приводятся результаты исследований поведения ПЗ в ДП в процессе управления доменной плавкой: по результатам работы автоматизированной системы «Тибас» [13], а также при неровном ходе печи [14]. Приведенные в этих работах результаты исследований могут быть полезными при разработке интеллектуальной системы.

**Закключение.** По результатам исследований, выполненных различными учеными, ими сформулирован ряд выводов, которые должны учитываться при решении задачи оптимизации ПЗ в ДП:

если в ДП загружается несколько различных материалов, обладающих разной восстановимостью, то расплавление протекает в широком диапазоне температур и в зоне большой толщины. Толщина этой зоны тем больше, чем ниже температура плавления. И наоборот, если толщина ПЗ невелика (т.к. расплавление происходит в узком диапазоне температур), то температуры повышаются, а степень восстановления шихты возрастает. С этой точки зрения наилучшим вариантом является использование одного материала;

поверхность расплавления должна быть по возможности большей, так как при этом уменьшается толщина ПЗ и ее сопротивление газовому потоку;

с уменьшением толщины слоев кокса газопроницаемость зоны размягчения снижается;

предпочтительной является  $\Lambda$ -образная форма ПЗ, которая наблюдается при четко выраженной осевой газопроницаемости в условиях загрузки кокса в осевую зону. Для этой формы характерным является большое число коксовых окон, т.е. значительная свободная

площадь для прохода газового потока. Хорошие показатели работы печи могут быть получены при небольшой высоте ПЗ. При высокой доле кокса в периферийной зоне печи ПЗ принимает W-образную форму;

профиль ПЗ, на который влияют распределение шихтовых материалов и распределение материалов по крупности, тесно связан с ее толщиной и положением;

улучшение газопроницаемости, повышение равномерности распределения газа и степени его использования, а также снижение расхода кокса достигаются при смещении ПЗ к оси печи или уменьшении ее высоты;

изменением радиального распределения шихты можно достичь любой формы ПЗ от  $\Delta$  до W, регулировать ее толщину, газопроницаемость и расположение по высоте печи;

эффективным способом регулирования, направленным на изменение положения ПЗ, является изменение параметров дутья – расхода, температуры и влажности, а также температуры горновых если в ДП загружается несколько различных материалов, обладающих разной восстановимостью, то расплавление протекает в широком диапазоне температур и в зоне большой толщины. Толщина этой зоны тем больше, чем ниже температура плавления. И наоборот, если толщина ПЗ невелика (т.к. расплавление происходит в узком диапазоне температур), то температуры повышаются, а степень восстановления шихты возрастает. С этой точки зрения наилучшим вариантом является использование одного материала;

Исходя из вышеперечисленного, следует отметить, что для контроля и управления ходом доменной плавки, наряду с различными методами моделирования [15], целесообразно создание критерия оценки формы и положения пластичной зоны, который бы учитывал ее толщину, профиль и положение в доменной печи.

### Библиографический список

1. *Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой* / [Муравьева И.Г., Тогобидкая Д.Н., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Белькова А.И., Белошапка Е.А.] – Сборник научных работ «Компьютерное моделирование, анализ, управление, оптимизация», 2017. – № 1. – С. 25–30.
2. *Курунов И. Ф. Совершенствование технологии и управления доменной плавкой за рубежом* / И. Ф. Курунов / Бюллетень института «Черметинформация». – 1981. – № 18. – С. 18–35.
3. *Разработка мероприятий по регулированию газопроницаемости столба шихты в доменной печи (Промышленные опыты)* / В. Крафт [и др.] / Черные металлы. – 1987. – № 13. – С. 15–25.

4. *Модельные* опыты исследования газопроницаемости в доменной печи при вдувании больших количеств угольной пыли / [Гуденау Х. В., Крайбих К., Кортах Б. и др.] / Черные металлы. – 1988. – № 19. – С. 10–19.
5. *Гуденау Х. В.* Оптимизация профиля пластичной зоны доменной печи / Х. В. Гуденау, К. Крайбих, К. Х. Петерс / Черные металлы. – 1981. – № 3. – С. 13–18.
6. *Эсфельд Г.* Контроль газопроницаемости столба шихты в доменной печи / Г. Эсфельд, В. Цишкале, У. Кляффен / – С. 17–19.
7. *Петерс К. Х.* Исследование причин нарушения газопроницаемости в доменной печи / К. Х. Петерс, Г. Пот, М. Петерс / Черные металлы. – 1986. – № 22. – С. 10–20.
8. *Повышение* производительности доменных печей / [Хартиг В., Лангнер К., Люнгер Г. Б. и др.] / Черные металлы. – 1996 – С. 17–25.
9. *Экспериментальная* оценка влияния режима загрузки на формирование пластичной зоны доменной печи / [Егоров Н. А., Ковшов В. Н., Петренко В. А. и др.] / Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1984. – № 12. – С. 25–26.
10. *Работа* доменной печи в форсированном режиме / [Гришкова А. А., Клемперт В. М., Федулов Ю. В. и др.] / Сталь. – 1987. – № 9. – С. 18.
11. *Сысоев Н. П.* Теория и технология доменной плавки с пониженной интенсивностью: дис. на соискание ученой степени доктора тех. наук : 05.16.02 / Николай Петрович Сысоев– М., 1993. – С. 169–171.
12. *Особенности* характера схода материалов и очертание зоны когезии в доменных печах различного объема: труды V международного конгресса доменщиков [«Производство чугуна на рубеже столетий»], (Дн-ск-Кр. Рог, 7–12 июня 1999 г.) / Сысоев Н. П. и др. // Д. «Пороги», 1999. – С. 266–268.
13. *Опыт* эксплуатации оптимизированной системы управления процессом доменной плавки в Швельгерне / [Петерс К. Х., Альтпетер В., Бахховен Г. Ю. и др.] / Черные металлы. – 1984. – № 14. – С. 27–30.
14. *Шюрман Э.* Динамическое изменение формы и положения пластичной зоны в доменной печи / Э. Шюрман, Г. В. Гуденау, К. Х. Петерс / Черные металлы. – 1982. – № 15/16. – С. 17–20.
15. *В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Н. А. Гладков, Е. А. Белошапка.* Анализ методов определения формы и положения пластичной зоны в доменной печи // Сб. научн. трудов ИЧМ «ФППЧМ». – Вып. 23. – 2011. –Стр. 80-88.

## Reference

1. *Intellectual'naya sistema podderzhki prinyatiya resheniy po upravleniyu domennoy plavkoy* / [Murav'yeva I.G., Togobitskaya D.N., Semenov YU.S., Shumel'chik Ye.I., Bel'kova A.I., Beloshapka Ye.A.] – Sbornik nauchnykh rabot «Komp'yuternoye modelirovaniye, analiz, upravleniye, optimizatsiya», 2017. – № 1. – С. 25–30.
2. *Kurunov I. F.* Sovershenstvovaniye tekhnologii i upravleniya domennoy plavkoy za rubezhom / I. F. Kurunov / Byulleten' instituta «Chermetinformatsiya». – 1981. – № 18. – С. 18–35.

*«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*

3. *Razrabotka* meropriyatiy po regulirovaniyu gazopronitsayemosti stolba shikhty v domennoy pechi (Promyshlennyye opyty) / V. Kraft [i dr.] / Chernyye metally. – 1987. – № 13. – S. 15–25.
4. *Model'nyye* opyty issledovaniya gazopronitsayemosti v domennoy pechi pri vduvaniy bol'shikh kolichestv ugol'noy pyli / [Gudenau KH. V., Kraybikh K., Kortakh B. i dr.] / Chernyye metally. – 1988. – № 19. – S. 10–19.
5. *Gudenau KH. V.* Optimizatsiya profilya plastichnoy zony domennoy pechi / KH. V. Gudenau, K. Kraybikh, K. KH. Peters / Chernyye metally. – 1981. – № 3. – S. 13–18.
6. *Esfel'd G.* Kontrol' gazopronitsayemosti stolba shikhty v domennoy pechi / G. Esfel'd, V Tsishkale, U. Klyaffen / – S. 17–19.
7. *Peters K. KH.* Issledovaniye prichin narusheniya gazopronitsayemosti v domennoy pechi / K. KH. Peters, G. Pot, M. Peters / Chernyye metally. – 1986. – № 22. – S. 10–20.
8. *Povysheniye* proizvoditel'nosti domennykh pechey / [Khartig V., Langner K., Lyunger G. B. i dr.] / Chernyye metally. – 1996 – S. 17–25.
9. *Ekspertmental'naya* otsenka vliyaniya rezhima zagruzki na formirovaniye plastichnoy zony domennoy pechi / [Yegorov N. A., Kovshov V. N., Petrenko V. A. i dr.] / Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya. – 1984. – № 12. – S. 25–26.
10. *Rabota* domennoy pechi v forsirovannom rezhime / [Grishkova A. A., Klempert V. M., Fedulov YU. V. i dr.] / Stal'. – 1987. – № 9. – S. 18.
11. *Sysoyev N. P.* Teoriya i tekhnologiya domennoy plavki s ponizhennoy intensivnost'yu: dis. na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekh. nauk : 05.16.02 / Nikolay Petrovich Sysoyev– M., 1993. – S. 169–171.
12. *Osobennosti* kharaktera skhoda materialov i ochertaniye zony kogeziy v domennykh pechakh razlichnogo ob'yema: trudy V mezhdunarodnogo kongressa domenschchikov [«Proizvodstvo chuguna na rubezhe stoletiy»], (Dn-sk–Kr. Rog, 7–12 iyunya 1999 g.) / Sysoyev N. P. i dr. // D. «Porogi», 1999. – S. 266–268.
13. *Opyt* ekspluatatsii optimizirovannoy sistemy upravleniya protsessom domennoy plavki v Shvel'gerne / [Peters K. KH., Al'tpeter V., Bakhkhoven G. YU. i dr.] / Chernyye metally. – 1984. – № 14. – S. 27–30.
14. *Shyurman E.* Dinamicheskoye izmeneniye formy i polozheniya plastichnoy zony v domennoy pechi / E. Shyurman, G. V. Gudenau, K. KH Peters / Chernyye metally. – 1982. – № 15/16. – S. 17–20.
15. *V. I. Bol'shakov, I. G. Murav'yeva, N. A. Gladkov, Ye. A. Beloshapka.* Analiz metodov opredeleniya formy i polozheniya plastichnoy zony v domennoy pechi // Sb. nauchn. trudov ICHM «FPPCHM». – Vyp. 23. – 2011. – Str. 80-88.

*Статья поступила в редакцию сборника 07.12.2018 года,  
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания  
редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)  
Рецензенты: д.т.н., проф. А.К.Тараканов; д.т.н., проф. Д.Н.Тогобицкая*