

4. Гресс О.В. Дослідження, моделювання та оптимізація ливарних систем [Текст]: навч. посібн. / О.В.Гресс, А.П.Огурцов, Ф.В.Недоп'юкін. – Дніпродзержинськ, 2012. – 287с. – ISBN978-966-175-066-0.
5. Гресс А.В. Физическое моделирование гидродинамики жидкого металла в литейном ковше, оборудованном фильтрующей перегородкой / А.В.Гресс, С.А.Стороженко // Зб. наук. праць, сер. «Металургія». – Запоріжжя: ЗДІА. – 2013. – Вип. 2 (30). – С.42-47.

Поступила в редколегію 14.09.2015.

УДК 669.162

КРЯЧКО Г.Ю, к.т.н., доцент  
МАСТЕРОВЕНКО Е.Л., к.т.н., доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОКСОВОЙ ЗОНЫ В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ

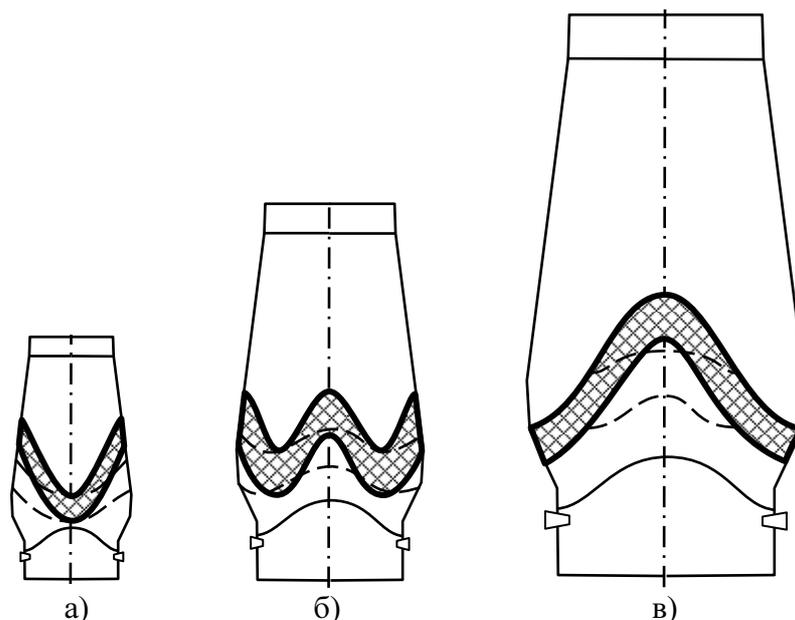
**Введение.** Важным элементом реализации доменного процесса являются создание и функционирование коксовой зоны в нижней части печи. Низ массива зоны затоплен чугуном и шлаком, может опираться на лещади и может всплывать при определенных условиях. Верх этого коксового образования совпадает с нижней высокотемпературной границей зоны когезии – зоны размягчения и плавления материалов (ЗРПМ). Коксовый массив при нормальной работе печи имеет подвижность, газопроницаемость и дренажную способность.

При оценке структуры столба шихты в доменной печи основное внимание уделяется специфике очертаний зоны когезии [1, 2]. К сожалению, коксовой зоне, расположенной ниже ЗРПМ, уделяется меньше внимания, хотя эта зона, получившая название коксовый тотерман, коксовая насадка, оказывает не меньшее влияние на работу печи, чем зона когезии. Термин «тотерман» для названия коксовой зоны является не совсем удачным, поскольку зона состоит из массивов различной подвижности, а тотерман по первоначальному определению представлял собой неподвижное застывшее образование на лещади.

Авторы работы [1] видели причину изменения очертаний ЗРПМ в печах различного объема в особенностях характера схода материалов в нижних частях доменных печей. Опираясь на данные холодного моделирования, ими было показано, что малым печам свойственен осевой сход шихты в заплечиках, а в больших – периферийный. Поэтому корневая область ЗРПМ в малых печах должна находиться у оси, а в больших – на периферии (рис.1). Нетрудно видеть, что массив кокса в малых печах представляет собой чашеобразную форму, в средних – чашеобразную с осевой выпуклостью, в больших – цилиндрикоконическую с вершиной конуса у оси. На схеме горн доменных печей независимо от объема занят коксом до горизонта воздушных фурм и выше.

Результаты в Украине, Японии и Германии в 60-80-х г.г. XX века позволяют оценить, в какой мере реальные форма и размещение зон когезии и коксовой насадки соответствуют предложенным в работе [1] схемам.

**Постановка задачи.** Задачей настоящего исследования является изучение особенностей формирования коксовой зоны в зависимости от объема доменных печей, условий плавки и принятой технологии, основываясь исключительно на экспериментальных данных, полученных на промышленных печах [4-6].



а – V-образная ЗК, объем печей 200-600 м<sup>3</sup>; б – W-образная ЗК, объем печей 1000-3000 м<sup>3</sup>;  
в – A-образная ЗК, объем печей 4000-5000 м<sup>3</sup>

Рисунок 1 – Характерные очертания зоны когезии (ЗК) и верхнего профиля коксовой зоны в доменных печах разного объема по данным работы [1]

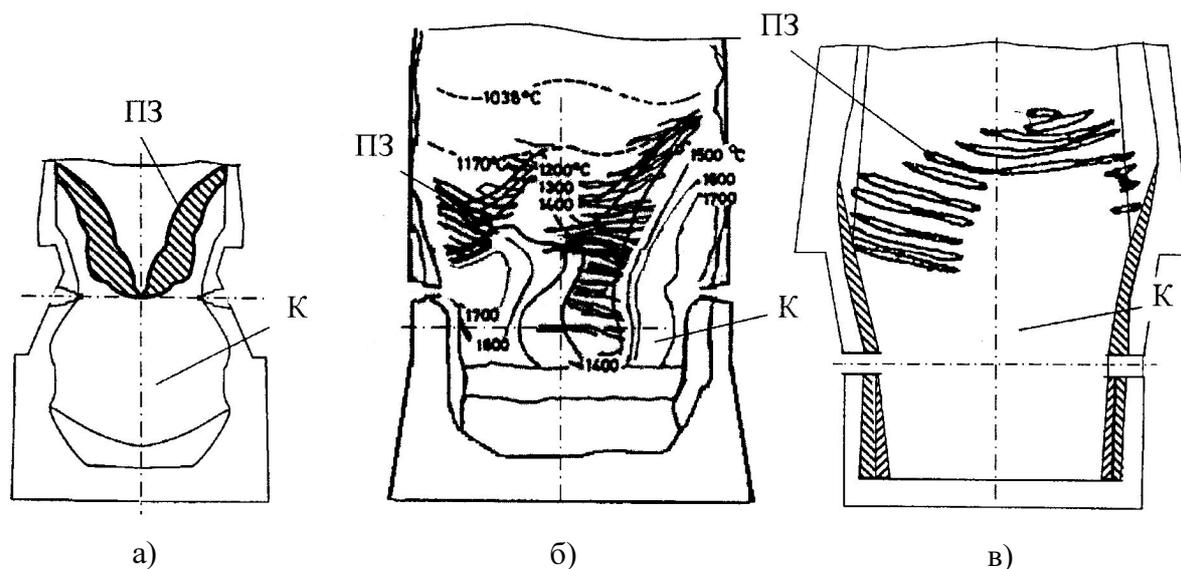
**Результаты работы. Методика исследования.** В отличие от ранее опубликованных работ, например [4], рассмотрение структуры столба охлажденных печей проведено в едином масштабе по группам печей малого и среднего объемов.

Особенностью анализа был учет влияния на структуру столба шихты не только объема печей, но и условий плавки, в частности, дутьевого режима. Для суждения о параметрах фурменных очагов, определяющих, наряду с параметрами загрузки, очертания зоны когезии и верхнюю границу коксового массива, использовали результаты работ [6, 7], согласно которым очаги в зависимости от соотношения длины (L) и ширины (D) в плане классифицированы на зоны периферийного ( $L/D \approx 1$ ) и радиального ( $L/D > 1$ ) типов. Влияние фурменных очагов на образование зоны когезии и формирование косового массива оценивали по двумерному распределению температур в охлажденных печах и удаленности корневой зоны когезии от горизонта воздушных фурм.

Для сравнения условий работы анализируемых печей использовали показатель – коэффициент уровня технологии [8], равный отношению удельных производительности ( $t/m^2 \cdot ч$ ) и расхода топлива ( $t/t$  чугуна). Этот коэффициент, включающий итоговые показатели процесса, отражает результаты использования всего комплекса имеющихся на исследуемый момент усовершенствований в подготовке шихты и в технологии доменной плавки.

*Оценка результатов анализа.* Графическая информация о структуре столба охлажденных малых печей, более конкретно, с диаметром горна 4,8-6,2 м представлена на рис.2. До настоящего времени малые печи эксплуатируются на некоторых мини заводах, в частности в Бразилии, где в основном на печах объемом до 500 м<sup>3</sup> выплавляют так называемый «зеленый» чугун. Этот чугун благодаря использованию древесного угля имеет низкое содержание серы ~ 0,015%. Имеются попытки использовать малые печи и в Украине. Так, например, на Макеевском заводе «Энергокапитал» работала доменная печь объемом 128 м<sup>3</sup>.

Доменная печь № 1 Енакиевского металлургического завода была первой в мире



а – Енакиевский металлургический завод, печь № 1 [3]; б – завод Амагасаки, печь № 1;  
в – завод Хигасида, печь № 5 [4];

цифры у кривых – изотермы; К – кокс; ПЗ – пластичная зона

Рисунок 2 – Форма пластичной зоны и коксового массива в замороженных доменных печах малого объема

промышленной печью, охлажденной на ходу [3]. Поскольку отбор проб материалов основывался на принципе осевой симметрии пропорциональности объемов, то зона когезии и коксовая насадка этой печи условно представлена осесимметричной (рис.2, а). Шихтовые и эксплуатационные условия работы данной печи были далекими от современных (расход кокса 920 кг/т чугуна, скорость истечения дутья 135 м/с), поэтому вывод о том, что V-образная форма зоны когезии определялась малым объемом печи и спецификой схода материалов в ней, нельзя признать надежным. Достаточно отметить, что из-за низкого качества сырьевых материалов печь перед остановкой работала с резко периферийным ходом и забитым центром (содержание  $\text{CO}_2$  у оси под уровнем засыпи было на 10% больше, чем на периферии).

Практический интерес представляет анализ структуры столба шихты малых печей, работавших на качественном сырье с параметрами дутья, близкими к современным (табл.1). Сравнение пары печей примерно одинакового малого объема (ДП №1 завода Амагасаки и №5 завода Хигасида) свидетельствует о существенном различии пластичных и коксовых зон нетипичной формы, сформированных в печах с примерно одинаковым диаметром горна.

В условиях проплавления подготовленной качественной шихты на ДП №1 Амагасаки с низким расходом топлива (450 кг/т чугуна) и выходом фурменных газов объем коксовой зоны ограничен. Дефицит горячих восстановительных газов сопровождался приходом в горн неподготовленных материалов, в результате корневая зона пластичных материалов на пассивной стороне печи достигала зеркала шлака. В то же время на активной стороне горна (левая сторона рис.2, б) и зона когезии коксовая насадка под ней соответствовали наблюдаемому на печах среднего объема.

Структура столба шихты, наблюдаемая на малой доменной печи завода Амагасаки, представляет интерес в том плане, что диаметрально противоположные фрагменты зоны когезии и коксового массива являются характерными для печей разного объема,

Таблица 1 – Показатели работы до выдувки замороженных доменных печей по данным работ [4-6]

Показатели	Страна, завод, номер печи					
	СССР, Енакиевский, № 1	Япония, Амагасаки, № 1	Япония, Хигасида, № 5	Германия, Хукинген, № 5	Япония, Кукиока, № 4	Япония, Хирохата, № 1
Диаметр горна, м	4,8	6,0	6,2	7,0	7,9	7,8
Объем, м <sup>3</sup>	426	721	646	Н.д.	1280	1407
Удельная производительность, т/м <sup>2</sup> ·сут	18,1	48,8	21,5	47,6	43,3	53,2
Расход топлива, кг/т чугуна	920	451	650	516	477	542
Рудная нагрузка	2,43	3,57	2,61	3,47	3,93	3,12
Коэффициент уровня технологии, т/м <sup>2</sup> ·ч	0,82	4,51	1,38	3,84	3,78	4,09

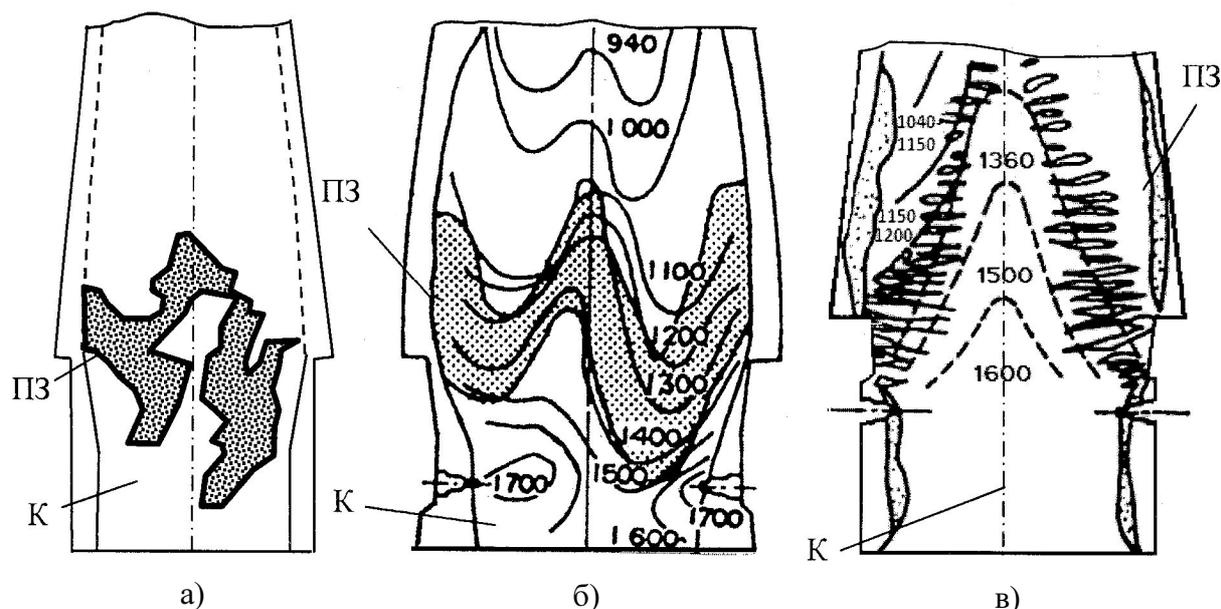
как малого (пассивная сторона), так среднего и большого (активная сторона). Информация, приведенная в работах [6, 7] позволяет утверждать, что условием наблюдаемой несимметричности структуры столба шихты явилось образование фурменных очагов периферийного типа ( $L/D \approx 1$ , правая сторона печи) и радиального ( $L/D > 1$ , левая сторона, рис.2, в).

На ДП №5 Хигасида (рис.2, в) свободный кокс с активной стороны горна достигал распара по высоте и оси печи по радиальному сечению. В результате образовались несимметричные зона когезии и коксовый массив под этой зоной с куполом на активной половине печи, что совсем не характерно для печей малого объема согласно представлениям работы [1]. Благодаря повышенному расходу кокса (650 кг/т чугуна) и, соответственно, выходу фурменных газов на единицу железорудных материалов корневая зона пластичных материалов находилась в верхней части заплечиков.

Следующая анализируемая группа представлена печами среднего объема (рис.3). Печи с диаметром горна 7,2-11 м наиболее распространены в Украине. Поэтому изменения, происходящие в столбе шихты таких печей, представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Из рис.3, а, видно, что структура столба материалов доменных печей № 5 завода в Хукингене и № 4 завода Кукиока находится в соответствии с представлениями, изложенными в работе [1], в соответствии с которыми W-образная зона когезии является характерной для печей объемом 1000-3000 м<sup>3</sup>. Также, как и на малых печах, на печах среднего объема наблюдалась существенная несимметричность зон когезии и кокса. На активной стороне печей массив коксовой зоны и корневая часть зоны когезии находились выше уровня воздушных фурм. На пассивной стороне горна зона когезии достигла не только уровня фурм (ДП № 4 Кукиока, рис.3, б), но и уровня шлака (ДП № 5 Хукинген, рис.3, а).

В противоречии с выводами работы [1] находится структура столба шихты ДП №1 завода Хирохата (рис.3, в). Профили зон когезии и кокса на этой печи, имевшие Λ-образное очертание (для коксовой зоны верхняя часть), характерны для печей объемом 4000-5000 м<sup>3</sup> (рис.1, в). Становится очевидным, что причина изменения рельефа ЗРПМ не в объеме печи и характере схода материалов, обусловленном размерами печи, а в особенностях сырьевых и эксплуатационных условий плавки.



а – завод в Хукингене, печь № 5 [5]; б – завод Кукиока, печь № 4 [4];  
в – завод Хирохата, печь № 1 [4]; остальные обозначения те же, что и на рис.2

Рисунок 3 – Форма пластичной зоны и коксового массива в замороженных доменных печах среднего объема

Действительно, сопоставляя показатели работы ДП № 4 Кукиока и № 1 Хирохата (табл.1), можно видеть различные подходы к форсировке хода печей. В первом случае (ДП № 4) реализована технология форсирования процесса повышением рудной нагрузки (3,93) при снижении интенсивности горения топлива ( $0,773 \text{ т/м}^3 \cdot \text{сут}$ ) и, соответственно, производительности печи. Такой вариант технологии снижает удельный расход топлива, чем способствует повышению эффективности (экономичности) процесса. Реализации технологии способствует W-образная ЗРПМ и чашеобразный с выпуклостью в центре массив кокса, образующиеся при умеренном развитии как периферийного, так и осевого потока газов.

В другом случае (ДП № 1 Хирохата) процесс форсировали дутьем (интенсивность горения топлива  $1,004 \text{ т/м}^3 \cdot \text{сут}$ ) при существенно меньшей рудной нагрузке (3,12). Для обеспечения высокой газопроницаемости столба шихты в таком случае были образованы мощный осевой газовый поток и  $\Lambda$ -образная зона когезии, которая обеспечивала увеличение поверхности коксовых окон для пропуска повышенного количества горновых газов. Результат организации процесса – повышенные производительность и удельный расход топлива. Иными словами результативность процесса выше, а эффективность – ниже. Разновидностью  $\Lambda$ -образной формы ЗРПМ является форма  $\Lambda$ , образующаяся, как правило, при так называемом «остром» осевом газовом потоке. Эта форма более предпочтительна, поскольку потери энергии газа в осевой отдушине сводятся к минимуму.

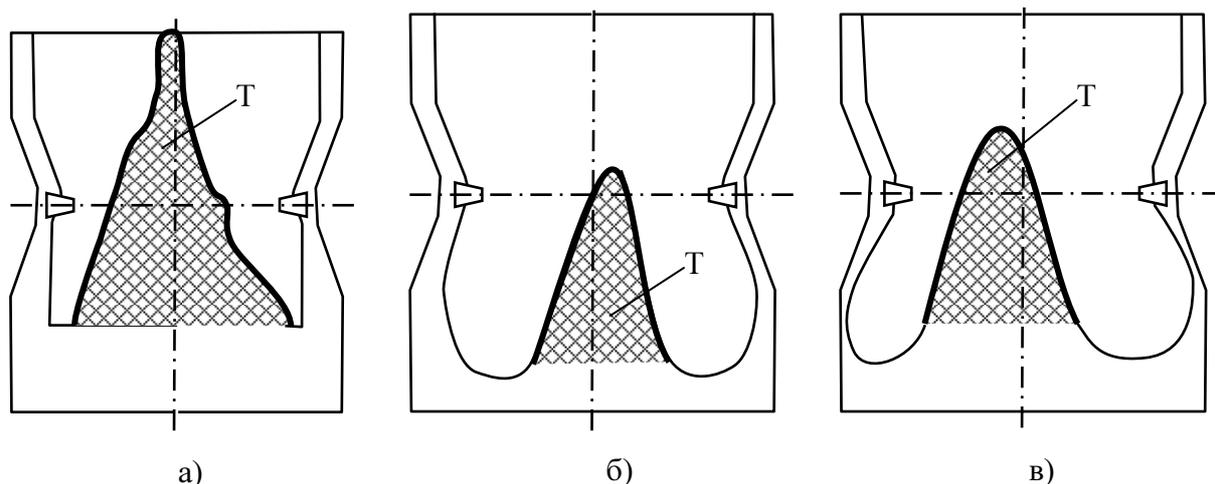
Таким образом, можно утверждать, что не объем доменной печи оказывает определяющее влияние на формирование структуры столба шихты, а особенности дутьевого режима и радиального распределения материалов.

Результаты анализа свидетельствуют о допустимости и приемлемости работы печей малого и среднего объема с образованием пластичной зоны W-типа и минимальным объемом коксовой зоны, верхняя часть которой имеет чашеобразную с осевой выпуклостью форму.

Опыт эксплуатации мощных доменных печей [9] показывает, что при использовании засыпного аппарата несовершенной конструкции и воздуходувных средств недостаточной производительности, а также при нестабильном ведении процесса, в коксовой зоне печей возникают критические явления. Наиболее опасным, резко снижающим результативность и эффективность плавки, явлением является образование на лещади коксорасплавного монолита – тотермана. Монолит уменьшает полезную емкость горна, активизирует разгар его стенок и сокращает кампанию доменной печи.

Условия для образования тотермана в центре горна возникают прежде всего в том случае, если корневая часть зоны когезии опускается на горизонт фурм и ниже. Это опускание сопряжено со снижением температур и застыванием расплавов в массиве кокса. Работа с W-образной зоной когезии на печи с диаметром горна более 12 м не позволяет создать цилиндрикоконический коксовый массив с конусом «безопасности» в надфурменном пространстве.

На доменной печи № 9 комбината Криворожсталь объемом 5000 м<sup>3</sup> в кампанию 1974-1977 г.г. работа с использованием загрузочного устройства ВНИИМЕТМАША – УЗТМ на фурмах диаметром 190 мм и скоростью дутья 150-175 м/с – привела к образованию несимметричного тотермана с вершиной, достигающей уровня низа шахты (рис.4, а). Основные причины – отсутствие возможности осевой загрузки кокса и создания центральной отдушины, а также фурменные очаги недостаточной протяженности.



а – ДП № 9 выдувка декабрь 1977 г.; б – ДП № 5 первая кампания 1986-1995 гг.;  
в – ДП № 5 в ходе второй кампании 1995-1997 гг.; Т – тотерман

Рисунок 4 – Схемы расположения тотермана (смесь кокса и застывшего расплава) в горнах ДП № 9 Криворожстали и ДП № 5 Северстали по данным [9]

Работа в первой кампании ДП № 5 Череповецкого комбината объемом 5500 м<sup>3</sup> с дутьевым режимом, обеспечивающим скорость истечения дутья из фурм диаметром 150 мм на уровне 225-230 м/с с развитым осевым газовым потоком, способствовала уменьшению объема и высоты тотермана (рис.4, б). Возможность создания развитого осевого газопотока была реализована с помощью бесконусного засыпного аппарата системы П.Вюрт.

Во вторую кампанию ДП № 5 была снижена форсировка по дутью, возросла температура периферийного газа до 200-350°С против 100-180°С в первую кампанию, понизилась зона когезии, что, в конечном счете, привело к увеличению размеров тотермана (рис.4, в).

Таким образом, недопущение критических явлений в горне мощных доменных печей, а именно, образование центрального тотермана, возможно только при образовании коксовой зоны цилиндроконического типа с конической частью, находящейся выше горизонта воздушных фурм. Такая коксовая зона может быть образована при  $\Lambda$  либо  $\Lambda$ -образном очертаниях области пластичного состояния проплавленной шихты. Необходимо отметить, что неизбежной платой за создание свободной коксовой зоны цилиндроконического типа будет некоторое ухудшение использования энергии газового потока.

**Выводы.** Показано, что объем доменной печи не определяет форму коксового массива в нижней части печи, как и не определяет форму зоны когезии. Кроме объема, важным фактором образования характера зон в столбе материалов являются сырьевые и эксплуатационные условия, а также технология плавки.

$\Lambda$ -образная зона когезии и цилиндроконическая коксовая зона не являются особенностями столба шихты доменных печей объемом 4000-5000 м<sup>3</sup>.

Цилиндроконический коксовый массив может быть образован в печах среднего объема, а при наличии бесконусных засыпных аппаратов и мощных дутьевых устройств – в печах малого объема.

Низкое качество шихты, высокий расход топлива и форсирование процесса дутьем способствуют увеличению объема коксовой зоны и подъему зоны когезии вверх. С улучшением условий плавки и снижением расхода топлива наблюдаются смещение зоны когезии вниз и уменьшение объема коксовой зоны.

Минимальный объем коксовой зоны допустим на печах малого и среднего объема, работающих с повышенной рудной нагрузкой на шихте высокого качества. Близость диаметрально расположенных фурменных очагов и, соответственно, зон высоких температур позволяет избежать критических явлений в осевой зоне горна, обусловленных опусканием неподготовленных материалов.

Стабильная эксплуатация мощных доменных печей объемом 3000-5750 м<sup>3</sup> возможна только при образовании развитой коксовой зоны цилиндрического типа с конической частью, находящейся выше горизонта фурм. Разумеется, что такая коксовая зона может быть образована только при  $\Lambda$  либо  $\Lambda$ -образном очертаниях области пластичного состояния железорудных материалов.

Зоны когезии типов  $\Lambda$  и  $\Lambda$ , а также коксовые массивы цилиндроконического типа позволяют достичь высоких температур в центральной части печи, обеспечить активный дренаж расплавов по сечению, однако достигаются за счет усиления неравномерности распределения газового потока и ухудшения его использования. Цилиндроконический массив кокса уменьшает также объем печи, занятый железорудными материалами, и соответственно зону косвенного восстановления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дружков В.Г. Особенности схода материалов и очертание зоны когезии в доменных печах различного объема / Дружков В.Г., Сысоев Н.П., Павлов А.В. // Междунар. конгресс доменщиков, 7-12 июня 1999, Днепропетровск - Кривой Рог: сб. тр. – Днепропетровск: «Пороги», 1999. – С.266-269.
2. Сibaгатуллин С.К. Критерий соответствия зоны размягчения и плавления и режима выпусков чугуна и шлака / Сibaгатуллин С.К., Прохоров И.Э., Павлов А.В. // Междунар. конгресс доменщиков, 7-12 июня 1999, Днепропетровск - Кривой Рог: сб. тр. – Днепропетровск: «Пороги», 1999. – С.236-238.
3. Фазовые превращения материалов при доменной плавке / Балон И.Д., Буклан И.З., Муравьев В.Н., Никулин Ю.Ф. – М: Металлургия, 1984. – 152с.
4. Гуденау Г.-В. Исследования на охлажденных доменных печах в Японии / Гуденау Г.-В., Сасабе М., Крайбих К. // Черные металлы. – 1977. – № 6-7. – С.13-17.
5. Грабе К. Поведение шихтовых материалов при размягчении в «замороженной» азо-

- том доменной печи и его влияние на расход кокса / Грабе К., Де Хаас Г. // Черные металлы. – 1986. – № 5. – С.25-32.
6. Доклад о разработке содержимого доменной печи № 1 завода Амагасаки / К.Нарита, Т.Сато, М.Маекава [и др.] // Тецу то хагане. – 1980. – № 13. – С.1975-1984.
  7. Оценка протяженности и формы полостей фурменных очагов доменной печи / Г.Ю.Крячко, Р.В.Авдеев, Ю.В.Беляев, Ю.К.Лебедь // Черные металлы. – 2009. – № 9. – С.17-22.
  8. Крячко Г.Ю. Оценка качества дутья и технической работы газа в доменном процессе / Крячко Г.Ю. // Черные металлы. – 2002. – № 10. – С.11-15.
  9. Влияние распределения шихты на разгар металлоприемника доменной печи / В.И.Большаков, С.Т.Шулико, В.В.Канаев, Ф.М.Шутылев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 4. – С.4-9.

Поступила в редколлегию 16.02.2015.

УДК 669.162

КРЯЧКО Г.Ю., к.т.н., доцент  
БАРСУКОВ Е.Е., инженер  
МАСТЕРОВЕНКО Е.Л., к.т.н., доцент  
СЕДЫХ А.А., инженер

Днепродзержинский государственный технический университет

### КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ОБРАЗОВАНИЙ В СТОЛБЕ ШИХТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

**Введение.** Результаты исследований столба шихты замороженных на ходу доменных печей [1-4] обратили внимание специалистов на ранее нереализованные возможности организации доменного процесса. Это касается, прежде всего, рациональной организации зон когезии и кокса, обеспечивающей достижение заданных технико-экономических показателей. При расстройках хода доменной плавки в коксовой зоне горна на лещади могут возникать устойчивые монолитные образования, состоящие из коксового массива, связанного застывшими расплавами [5]. В технической литературе такие образования получили название «тотерман».

Рациональная организация высокотемпературных зон в рабочем пространстве печи возможна при наличии количественной информации о размерах этих зон. Не менее важной является также количественная оценка новообразований в зонах высоких температур. Это касается гарнисажа, настылей и тотермана в частности, как долгоживущей настыли в металлоприёмнике. И если качественная информация о размерах характерных зон благодаря разборке содержимого охлажденных доменных печей имеется, то количественная – практически отсутствует, за исключением отдельных попыток [6], основанных не на экспериментальных, а на расчетных данных.

**Постановка задачи.** Задачей настоящего исследования является количественная оценка абсолютных и относительных объемов коксовых зон и тотермана, замороженных на ходу [1-4], остановленных на ремонт [5] и одной работающей доменной печи [6].

**Результаты работы. Методика исследования.** Поскольку и коксовая зона и тотерман представляют собой массивы геометрически неправильной формы, то для нахождения объемов этих массивов использовали методику Симпсона [7], согласно которой тело с переменным поперечным сечением разбивается на отдельные отрезки, разделенные одинаковым интервалом шириной  $d$ , причем отдельные части исследуемого тела разбиваются необходимым количеством параллельных плоскостей (рис.1).

Если известны площади поперечных сечений  $A_1 + A_2 + A_3 \dots$ , разделенные интервалом шириной  $d$ , то объем тела неправильной формы будет определен по формуле