

УДК 666.187.2:621.365.2:662.612.321/322

ОСОБЕННОСТИ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ СОВРЕМЕННОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Воронов Г.В., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

*Гольцев В.А., к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (v.a.goltsev@urfu.ru)*

Глухов И.В., студент

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Представлены результаты анализа материального, элементного по кислороду и теплового балансов рабочего пространства современной дуговой сталеплавильной печи емкостью 120 т. Показано, что приход теплоты при окислении железа и других компонентов шихты настолько значителен, что тепловой режим и технологический процесс в целом приобретают признаки автогенного. Существенные потери с химическим недожогом свидетельствуют о неудовлетворительной организации аэродинамических потоков в объеме рабочего пространства печи. С использованием компьютерной программы SolidWorks Flow simulation рассмотрены аэродинамические потоки и температурные поля в зоне нахождения холодной шихты, расположенной между электродами и внутренней поверхностью стены печи. Рекомендован рациональный способ установки газокислородных горелок, фурм подачи кислорода и эжекторов для ввода углеродсодержащих материалов в ванну печи.

Ключевые слова: печь, дуга, сталь, металл, шихта, природный газ, кислород, горелка, фурма, факел, углерод, электрод, свод, стена.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-645-651

В мировом производстве постоянно возрастает доля стали массового потребления, выплавляемая в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). Одним из основных факторов, связанных с динамичным ростом производства электростали, являются возрастающие запасы железосодержащего лома. Скрап от автомобилей, бытовых отходов, строительных предприятий, сельскохозяйственного и промышленного оборудования ранее перерабатывался в мартеновских печах, которые в настоящее время выведены из эксплуатации. В перспективе основная нагрузка по переработке таких шихтовых материалов придется на дуговые печи большой емкости – от 80 и более тонн [1 – 3]. В дальнейшем доля электростали будет постоянно возрастать за счет модернизации устаревших печей и переработки металлолома на современных ДСП.

Наибольшее распространение ДСП получили на мини-заводах как основной сталеплавильный агрегат для переработки железосодержащей шихты с концентрацией углерода около 0,3 %, недостаточной для завершения плавки, поэтому в исходную шихту добавляют углеродсодержащие материалы (УСМ). Способ загрузки шихты (в две бады на болото) и постоянно изменяющаяся плотность шихты (от 0,2 до 0,9 т/м³) накладывают дополнительные трудности в организацию теплового, аэродинамического и температурного режимов. Постоянное увеличение

численности автомобильного парка и сокращение срока эксплуатации автомобилей обеспечит железосодержащей шихтой электросталеплавильное производство [3].

Технология процесса в современных ДСП предполагает на первой стадии интенсивное расплавление шихты с последующей переработкой в сталь заданного химического состава и температуры в агрегатах внепечной обработки. Можно выделить основные мероприятия, способствующие повышению производительности печи:

- сортировка и подготовка шихтовых материалов;
- предварительный подогрев шихты за счет утилизации физической теплоты дымовых газов;
- использование в металлической шихте жидкого чугуна;
- работа печи на «болоте», т. е. использование остатка предыдущей плавки;
- применение кислородно-топливных горелок, кислородных фурм, инжекторов углерода, фурм для окисления оксида углерода в газовой среде рабочего пространства;
- наведение пенистого шлака для закрытия дуги.

Следует отметить, что с учетом условий работы электропечи нередко вносятся изменения в геометрические параметры ее рабочего пространства. При использовании легковесного лома или шихты в виде

окатышей и брикетов увеличивают объем рабочего пространства за счет высоты стены печи, преследуя тем самым возможность завалки одной бадьей. Перечисленные мероприятия не ограничивают возможность дополнительной интенсификации расплавления шихты [4, 5].

Последним достижением в совершенствовании современной ДСП с целью получения максимальной производительности по данным подразделения концерна Siemens VAI являются печи серии Ultimate [6]. Печи этой серии емкостью 120 т имеют следующие ключевые особенности:

- увеличенный объем рабочего пространства за счет изменения высоты стен;
- загрузка шихты одной бадьей;
- использование пяти универсальных фурм-горелок, трех газокислородных горелок, четырех горелок для дожига СО в отходящих газах и инжекторов порошковых углеродосодержащих материалов.

Эффективность каждого из перечисленных технических предложений, как правило, оценивают методом сравнения технико-экономических показателей. Известно, что исследование тепло- и массообменных процессов на действующей печи исключительно сложно в экспериментальном отношении и по некоторым позициям практически невозможно. Авторами была предпринята попытка исследования тепловой работы печи первоначально с использованием материального, элементного и теплового баланса. Затем, используя компьютерное моделирование, был выполнен сравнительный анализ аэродинамических потоков и температурного состояния в холодной зоне шихтовых материалов действующей ДСП и даны рекомендации по их изменению [7].

Оценка технологических и теплотехнических показателей работы ДСП была выполнена по результатам расчетного исследования материального и теплового

баланса на действующей печи ДСП-120 фирмы Danieli для периода плавления стали 35ГС.

Приход материалов состоит из массы стального лома, чугуна, извести, кокса, природного газа, кислорода. Угар электродов и переход части футеровки в шлак были приняты по статистическим данным, полученным в цехе, а подсос воздуха из окружающей среды в печь рассчитан по элементному балансу кислорода в рабочем пространстве печи. В расходе материалов плавки учитывали массу стального полупродукта, шлака, дымовых газов и пыли. Потерей дымовых газов через зазоры между поверхностью электродов и отверстиями в своде пренебрегли. Результаты расчета материального баланса реально действующей ДСП-120 показали, что угар железа и других компонентов шихты составил 14,3 % массы садки. Это позволяет сделать вывод, что современная ДСП является комплексным агрегатом, предназначенным для переработки любой железосодержащей шихты с целью получения стального полупродукта, но имеет недопустимо высокий угар составляющих шихты. Для этой же печи рассчитали тепловой баланс (см. таблицу).

Анализ баланса показал, что физическая теплота исходных материалов оказалась незначительной. Подогрев шихты за счет утилизации теплоты дымовых газов является существенным резервом интенсификации теплообменных процессов и снижения энергозатрат. Приход теплоты при окислении железа и других компонентов шихты настолько значителен, что тепловой режим и технологический процесс в целом приобретают признаки автогенного [8]. Существенные потери с химическим недожогом свидетельствуют о неудовлетворительной организации аэродинамических потоков в объеме рабочего пространства печи при достаточном содержании кислорода в дымовых газах.

Экспериментальные исследования тепло- и массообменных процессов в рабочем пространстве ДСП

Тепловой баланс действующей дуговой сталеплавильной печи емкостью 120 т

Heat balance of the acting electric arc furnace with a capacity of 120 tons

Статьи прихода теплоты	Количество теплоты, %	Статьи расхода теплоты	Количество теплоты, %
От электрической дуги	45,25	На нагрев, расплавление шихты, перегрев металла и образование шлака	28
От сгорания природного газа	7,7	С дымовыми газами	28
От экзотермических реакций, в том числе:	46,7	Теплопроводностью через под печи, неводоохлаждаемые части стенки печи (шлаковый пояс), излучением через открытое рабочее окно	1,8
– от окисления железа	28,1		
– от окисления углерода	10,0		
– от окисления алюминия	8,5		
– от прочих экзотермических реакций	0,1		
Физическая теплота от исходных материалов	0,35	С охлаждающей водой	15,2
		С химическим недожогом	27
Итого	100	Итого	100

имеют свою специфику и весьма затруднительны. Прямые измерения аэродинамических потоков и температурных полей на действующей печи всегда ограничены и затруднены, поэтому для их изучения применяют методы математического моделирования [9, 10]. Для расчета газодинамики и температурного состояния рабочего пространства в работе [11] использована 3D-модель печи, которая была предварительно получена в чертежно-графическом редакторе системы КОМПАС-3D, а затем импортирована в приложение SolidWorks Flow simulation.

Входные и выходные граничные условия газовой среды были приняты в соответствии с техническим регламентом ДСП-120. В частности, начальную скорость газокислородной смеси (13,52 % CH_4 и 86,48 % O_2) на срезе сопла горелки задавали равной 175,8 м/с, балансовую температуру продуктов сгорания в факеле определили как 2700 °С, давление в рабочем пространстве печи приняли атмосферным (101 325 Па). На выходе из рабочего пространства печи (на срезе газоотводящего канала) температуру дымовых газов задали равной 1600 °С, а давление 101 275 Па (с учетом разрежения 50 Па).

К рассмотрению предложены две модели, отличающиеся размещением комбинированных топливосжигающих устройств (ТСУ) для подачи в печь энергоносителей. В первой модели ТСУ расположены радиально в соответствии с проектными рекомендациями фирмы Danieli (вариант А), во второй – исходя из рекомендаций авторов [7] и размещены тангенциально (вариант Б).

В случае размещения ТСУ по варианту Danieli (рис. 1, а), наблюдается крайне неравномерное рас-

пределение скорости продуктов горения. Отмечается активное движение продуктов сгорания у технологического окна и практически отсутствие его в объеме печи, расположенном в районе эркера. Тангенциальное размещение ТСУ по предложенному варианту (рис. 1, б) способствует организации равномерно рассредоточенного движения в рабочем пространстве газовых потоков.

На рис. 2 изображены скоростные поля газовых потоков в горизонтальных сечениях рабочего пространства печи на уровне зеркала ванны и газокислородных горелок.

В современной ДСП по варианту Danieli продукты горения распространяются радиально в направлении центра печи, достигая поверхности электродов, меняют свое направление движения и уходят в подсводовое пространство. Циркуляция продуктов горения осуществляется в вертикальной плоскости, поэтому омываемая ими поверхность шихты, участвующая в теплообмене, невелика. Сохраняя большой запас тепла, продукты сгорания покидают рабочее пространство через газоотводящий канал.

Размещение горелок с тангенциальным направлением факела вызывает горизонтальную циркуляцию продуктов горения у поверхности шихты (см. рис. 2). В данном варианте обеспечивается круговое движение газов в периферийной зоне рабочего пространства и исключается направленное воздействие потока продуктов горения на поверхность электродов. К моменту попадания в подсводовое пространство и канал дымоудаления газы совершают до четырех циркуляционных

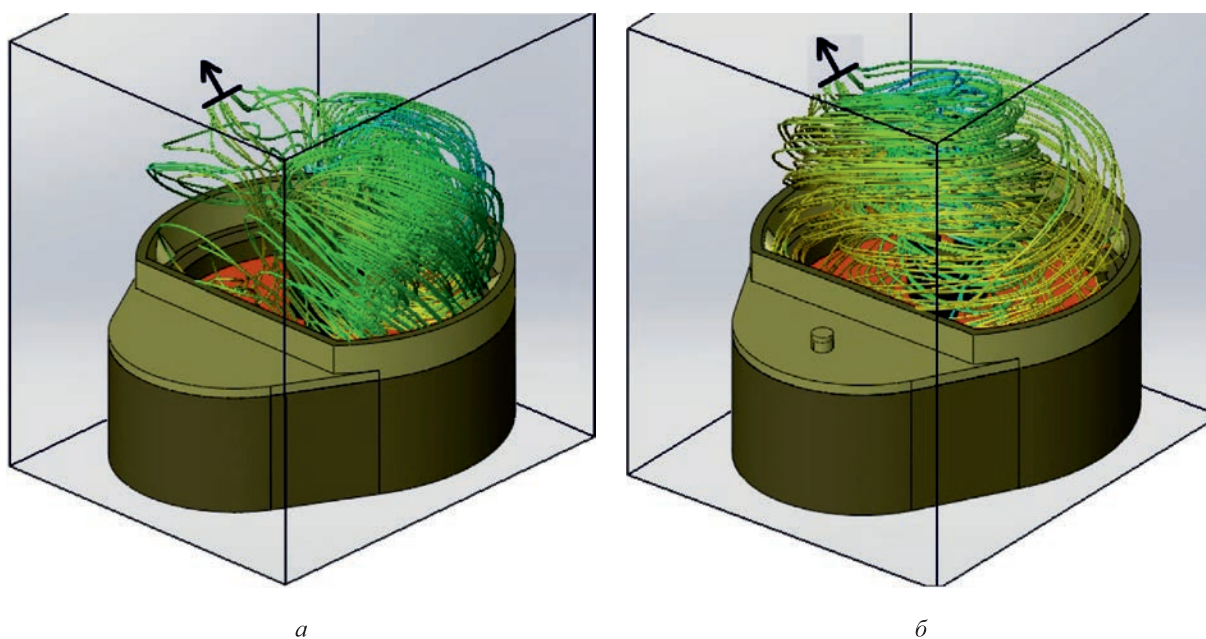


Рис. 1. Траектории движения газовых потоков в объеме рабочего пространства ДСП: а – по проекту Danieli; б – при тангенциальном расположении газокислородных горелок

Fig. 1. Trajectory of the gas flow in the volume of EAF workspace: а – Danieli project; б – with tangential gas-oxygen burners

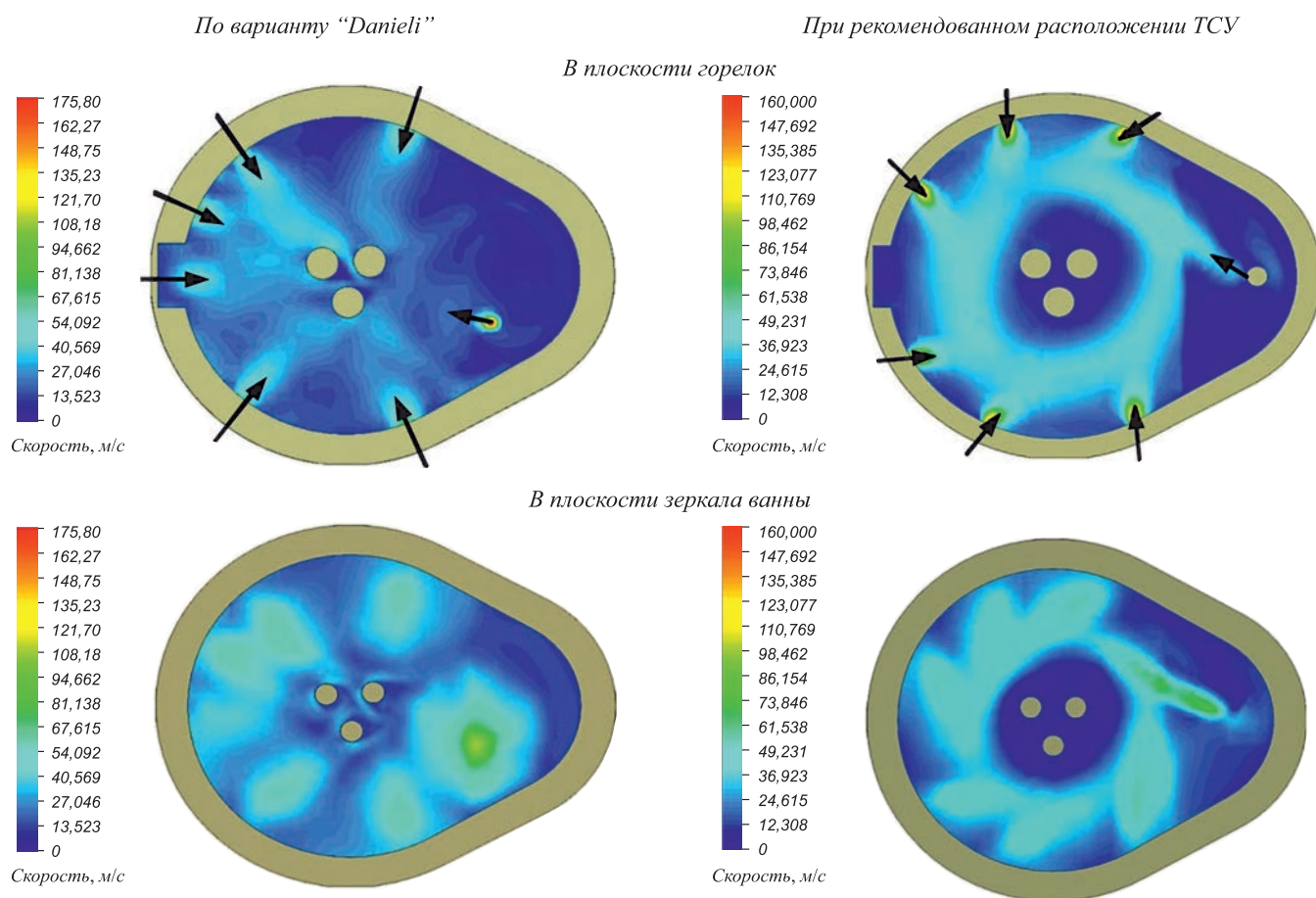


Рис. 2. Поля скоростей в горизонтальных сечениях рабочего пространства ДСП

Fig. 2. The velocity fields in the horizontal sections of EAF workspace

оборотов, имея лучшие условия для передачи тепла шихте. Интенсивное движение газов сосредоточено в нижней части объема печи у поверхности холодной шихты (плоскость зеркала ванны на рис. 2).

В сравнении с вариантом Danieli, предложенное расположение горелочных устройств выглядит более предпочтительным. В 2 – 3 раза увеличена кратность циркуляции газов в горизонтальной плоскости. За счет изменений в расположении горелочных устройств зона активного теплообмена расширяется более чем на 24 %.

Температурное состояние газовой среды в рабочем пространстве ДСП экспериментально изучить практически невозможно. Для решения этой задачи была использована программа SolidWorks при постоянных граничных условиях температуры на входе, равной расчетной балансовой температуре горения природного газа с кислородом, на выходе – 1600 °С для дымовых газов. Теплоотдача от продуктов сгорания природного газа к шихте принята постоянной и равномерно рассредоточенной по рассматриваемой зоне рабочего пространства печи. Компьютерное моделирование выполнено без учета тепловыделения в электрических дугах.

На рис. 3 представлены поля температур в поперечных сечениях, на рис. 4 – в вертикальной осевой плоскости, проходящей по двум электродам рабочего пространства ДСП.

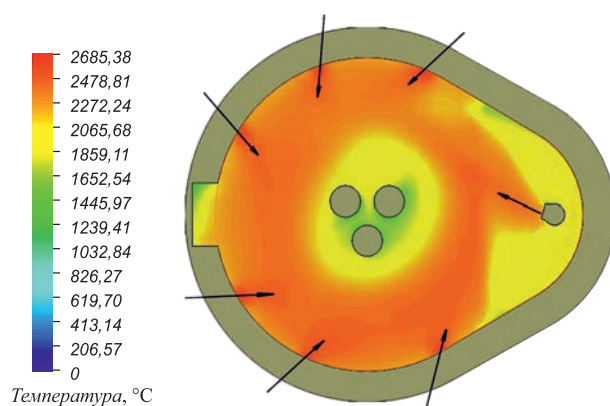
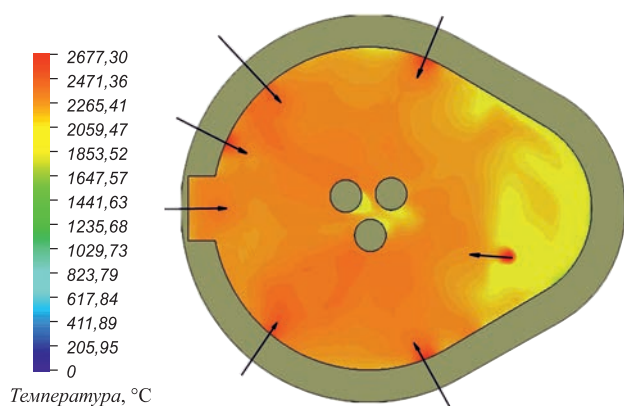
Анализируя поле температур (рис. 4, а), становится очевидным, что факелы горелок, направленных радиально, вызывают перегрев поверхности электродов. Такое же распределение температуры сохраняется и по высоте электрода. Направленное действие высокотемпературных газов на уровне плоскости горелок приводит к локальному перегреву электрода, возможной его деформации, к повышенному массообмену с избыточным кислородом, продуктами горения углеводородного топлива и углеродсодержащих материалов.

Существующая установка горелок обеспечивает высокотемпературное поле только в незначительном объеме шихты, расположенном против горелок. Равномерного распределения температуры по всему объему шихты, расположенной между электродами и поверхностью стены печи, не наблюдается. Высокие температуры отмечаются под сводом, около и выше водоохлаждаемой стеновой панели горелочного устройства. Для рассматриваемого варианта в эркерной зоне и на участ-

По варианту "Danieli"

При рекомендованном расположении ТСУ

В плоскости горелок



В плоскости зеркала ванны

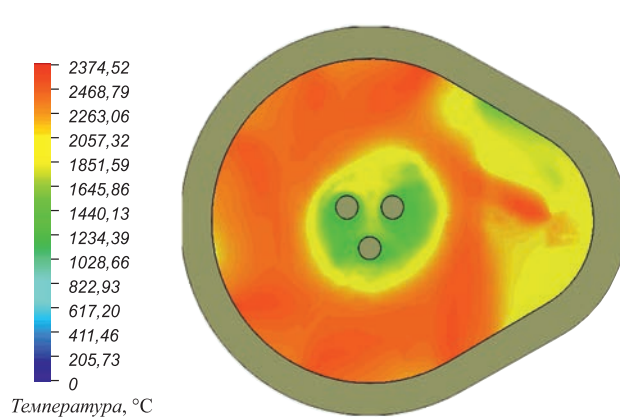
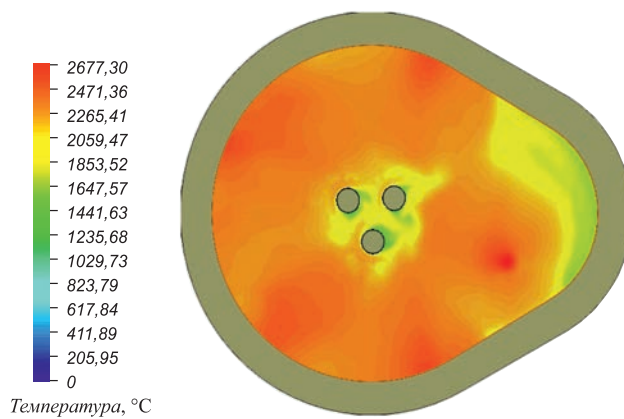


Рис. 3. Поля температур в горизонтальных сечениях рабочего пространства ДСП

Fig. 3. The temperature fields in the horizontal sections of EAF workspace

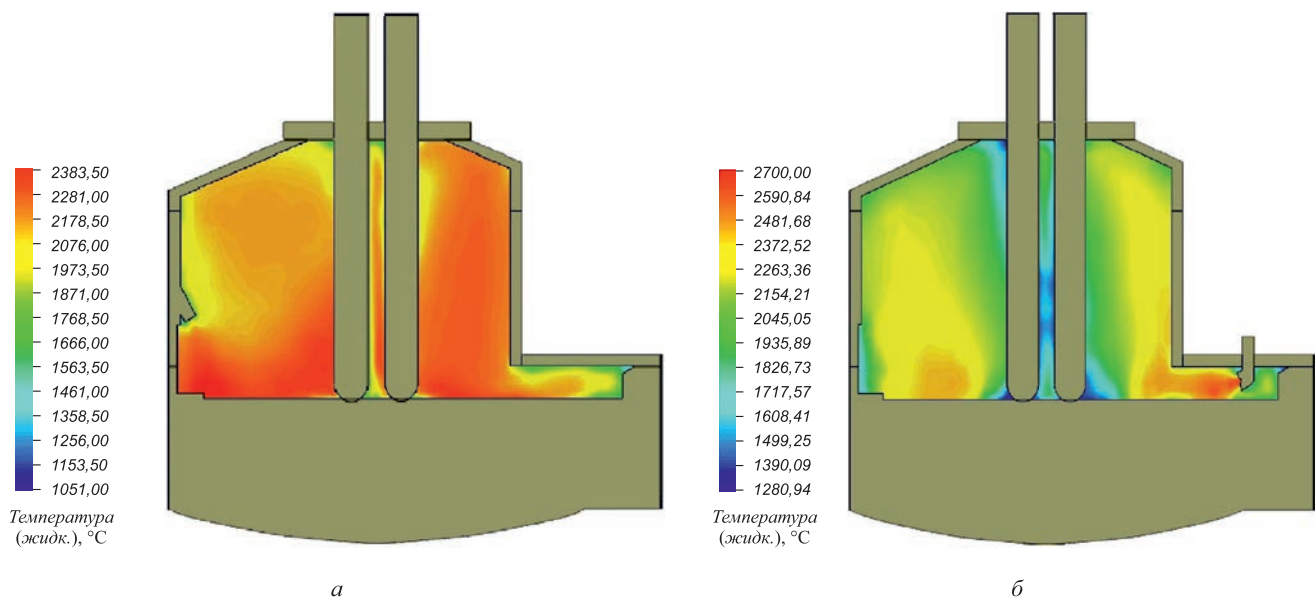


Рис. 4. Поле температуры в продольном осевом сечении по высоте печи:
а – по проекту Danieli; б – по рекомендованному варианту

Fig. 4. The temperature field in a longitudinal axial section of the furnace height:
а – Danieli project; б – according to the recommended embodiment

ках между горелками обнаружены плохо прогреваемые поверхности, тогда как в месте установки каждой горелки наблюдается перегрев шихты. Тангенциальное расположение горелок (см. рис. 3 и 4, б) изменило траекторию движения продуктов горения и вместе с этим, подобно скорости, изменилось и распределение температурных полей. К моменту попадания в подсводовое пространство и канал дымоудаления газы с большей эффективностью передают тепло шихте [9]. Циркуляция газов способствует рассредоточенному распределению температур в зоне расположения основной массы шихты по горизонтальным сечениям и высоте рабочего пространства.

Результаты расчета материального и теплового баланса плавки на ДСП-120 (сталь 35ГС) и компьютерного моделирования аэродинамических потоков и температурного состояния в зоне расположения холодной шихты позволяют сформулировать следующие практические выводы.

- Высокий угар составляющих шихты связан с несколькими причинами. Прежде всего, стоит отметить неподготовленность шихты (окисленная и с низкой плотностью), наличие зоны сверхвысоких температур в локальных участках газокислородного факела и введение кислорода в ванну.
- При высоких значениях угара исходной шихты плавка полупродукта стали в современной ДСП приобретает признаки ярко выраженного автогенного процесса. За счет экзотермических реакций в печь поступает до 46 % теплоты от общей тепловой нагрузки. Подробный анализ температурных полей и баланса по кислороду позволит снизить угар составляющих шихты.
- Компьютерное моделирование аэродинамических потоков дымовых газов и температурного состояния в зоне расположения холодной шихты позволило сделать заключение, что в современных ДСП не решена задача по эффективному использованию химической энергии природного газа и кокса. В этих печах газовые потоки от газокислородных горелок не обеспечивают равномерный нагрев поверхности и объема холодной шихты. После завалки в шихте образуются перегретые участки, материал в которых уплотняется в процессе оседания. Вследствие направленного нагрева и усадки возможна деформация шихтовой массы с повреждением электродов и созданием нестабильного горения электрических дуг. Кроме того, радиальное расположение энергоподающих устройств, обращенных к центру печи, не создает условий для циркуляции продуктов сгорания и равномерно рассредоточенного конвективного теплообмена

с шихтой. Направление факелов на электроды становится причиной их ускоренного износа.

- Тангенциальное размещение энергоподающих устройств взамен радиального позволяет изменить аэродинамику потоков дымовых газов и улучшить прогрев шихтовых материалов. Рационально организованная подача тепловой энергии от сгорания газообразного топлива в месте расположения холодной шихты способствует быстрому прогреву материалов. Положительный результат в таком случае существенно зависит от выбранной схемы расположения энергоподающих устройств и режима их работы.

Таким образом, предложенный способ интенсивного нагрева и плавления холодной шихты позволяет за счет организации движения продуктов горения газокислородной смеси, частичного окисления углеродсодержащих материалов, без изменения номинальной электрической мощности и при незначительных конструктивных изменениях обеспечить высокую производительность ДСП по выходу полупродукта стали, снизить удельный расход электродов и осуществить долговременную эксплуатацию стеновых панелей и свода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Worldsteel Association Steel Statistical Yearbook 2011. – Brussels: Worldsteel Committee on Economic Studies, 2011. – 120 p.
2. Белковский А.Г., Кац Я.Л., Краснянский М.В. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкции // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2013. № 3. С. 72 – 78.
3. Чижиков А.Г., Семин А.Е., Чижикова И.И. Автомобильный лом в структуре металлофонда России и технические решения по его утилизации // Электрометаллургия. 2010. № 4. С. 31 – 36.
4. Лякишев Н.П. Электрометаллургия – динамично развивающаяся отрасль сталеплавильного производства // Сталь. 2006. № 11. С. 58 – 63.
5. Проектирование и оборудование сталеплавильных цехов / В.М. Обухов, В.М. Шариков, Ю.А. Дерябин – Екатеринбург: УЦАО, 2010. – 410 с.
6. SIMETAL Ultimate. Leading EAF technology from a single source – powerful, flexible, environmentally compatible. <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industriesolutions/metals/simetal/en/SIMETAL-Ultimate-en.pdf>
7. Воронов Г.В., Антропов М.В., Порох О.В. Особенности аэродинамики в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи // Новые огнеупоры. 2014. № 7. С. 19 – 21.
8. Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Теория пирометаллургических процессов. – М.: Металлургия, 1973. – 504 с.
9. Logar V., Dovzan D., Skrjanc I. Mathematical Modeling and Experimental Validation of an Electric Arc Furnace // ISIJ International. 2012. Vol. 52. No. 3. P. 382 – 391.
10. Logar V., Dovzan D., Skrjanc I. Modeling and Validation of an Electric Arc Furnace. Part 1. Heat and Mass Transfer // Ibid International. 2012. Vol. 52. No. 3. P. 402 – 412.
11. Воронов Г.В., Антропов М.В., Глухов И.В. Газодинамика рабочего пространства современной дуговой сталеплавильной печи // Новые огнеупоры. 2014. № 11. С. 23 – 25.

Поступила 5 апреля 2015 г.

AERODYNAMICS AND TEMPERATURE FIELD FEATURES IN THE MODERN EAF WORKSPACE

Voronov G.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

Gol'tsev V.A., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

(v.a.goltsev@urfu.ru)

Glukhov I.V., Student

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg 620002 Russia)

Abstract. The paper presents the results of the design study of the material and heat balance on the existing furnace EAF-120 of company «Danieli». It is shown that the arrival of the heat in the oxidation of iron and other components of the charge is significant, and the thermal regime and the whole process become signs of autogenous process. Significant loss of chemical underburning indicate unsatisfactory organization of aerodynamic flows in the amount of working space of the furnace. Using a computer program SolidWorks Flow simulation the aerodynamic flow and the temperature field in the cold charge location disposed between the electrodes and the inner wall surface of the furnace has been considered. The authors have recommended the rational way to install oxy-fuel burners, oxygen lances and the eductors for inputting carbonaceous material into the bath of the furnace.

Keywords: furnace, arc, steel, metal, charge, natural gas, oxygen, burner lance, torch, carbon electrode, vault, wall.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-645-651

REFERENCES

1. *Worldsteel Association Steel Statistical Yearbook 2011*. Brussels: Worldsteel Committee on Economic Studies, 2011. 120 p.
2. Belkovskii A.G., Kats Ya.L., Krasnyanskii M.V. Current state and development trend of production technology of steel in EAF and their design. *Byulleten' "Chernaya metallurgiya"*, 2013, no. 3, pp. 72–78. (In Russ.).
3. Chizhikov A.G., Semin A.E., Chizhikova I.I. Automobile scrap in the structure of Russian metal reserves and the technical solutions for its disposal. *Elektrometallurgiya*. 2010, no. 4, pp. 31–36. (In Russ.).
4. Lyakishev N.P. Electrometallurgy – dynamic steelmaking industry. *Stal'*. 2006, no. 11, pp. 58–63. (In Russ.).
5. Obukhov V.M., Sharikov V.M., Deryabin Yu.A., Spirin V.A., Chernavin S.B. *Proektirovanie i oborudovanie staleplavil'nykh tsekhov* [Design and equipment of steelworks]. Ekaterinburg: UTsAO, 2010. 410 p. (In Russ.).
6. *SIMETAL Ultimate. Leading EAF technology from a single source – powerful, flexible, environmentally compatible*. Available at URL: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industry-solutions/metals/simetal/en/SIMETAL-Ultimate-en.pdf>
7. Voronov, G.V., Antropov M.V., Porokh O.V. Features of aerodynamics in the workspace of modern electric arc furnace. *Novye ognepory*. 2014, no. 7, pp. 19–21. (In Russ.).
8. Vanyukov A.V., Zaitsev V.Ya. *Teoriya pirometallurgicheskikh protsessov* [Theory of pyrometallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 504 p. (In Russ.).
9. Logar V., Dovzan D., Skrjanc I. Mathematical Modeling and Experimental Validation of an Electric Arc Furnace. *ISIJ International*. 2012. Vol. 52, no. 3, pp. 382–391.
10. Logar V., Dovzan D., Skrjanc I. Modeling and Validation of an Electric Arc Furnace. Part 1: Heat and Mass Transfer, *Ibid International*. 2012. Vol. 52, no. 3, pp. 402–412.
11. Voronov G.V., Antropov M.V., Glukhov I.V. Gasdynamics of the workspace of modern electric arc furnace. *Novye ognepory*. 2014, no. 11, pp. 23–25. (In Russ.).

Received April 5, 2015