

а)

б)

Рис. 2. Изображения поверхностей стальных образцов в световом микроскопе в светлом поле: после трения с использованием СМ, модифицированных  $\square$ -сиалоном: а – при нагрузке 20 МПа; б – при нагрузке 70 МПа

Очевидно, что наиболее выраженный антифрикционный эффект при использовании в качестве целевой добавки ультрадисперсных керамических частиц наблюдается в тяжело нагруженных узлах трения.

#### Литература

1. Структурные превращения металлов при трении. – Режим доступа: <https://znatock.org/s775t1.html>. – Дата доступа: 05.02.2021.
2. Кламанн, Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты / Д. Кламанн. – М. : Химия, 1988. – 488 с.
3. Что такое металлография, этапы и методы исследований. – Режим доступа: <https://wikimetall.ru/metalloobrabotka/metallografiya.html>. – Дата доступа: 05.02.2021.
4. Смитлз, К. Дж. Металлы / К. Дж. Смитлз. – М. : Metallurgiya, 1980. – 446 с.

### ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РАБОТЫ СИСТЕМ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАБОТЫ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МИНИ-ЗАВОДАХ

П. Н. Никитин

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель В. А. Жаранов

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 бадьи на болото) и постоянно изменяющаяся плотность шихты (от 0,2 до 0,9 т/м<sup>3</sup>) создают 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].

Перечислим основные способы интенсификации плавки в современной дуговой печи:

- 1) использование топливокислородных горелок для подогрева лома в печи и ускорения его расплавления;
- 2) окисление углерода, дополнительно вводимого в печь, газообразным кислородом с целью увеличения прихода тепла, получаемого от экзотермических реакций окисления компонентов шихты;
- 3) окисление части железа шихты газообразным кислородом с целью увеличения прихода тепла от экзотермических реакций окисления компонентов шихты и ускорения формирования окислительного основного шлака;
- 4) использование специальных фурм для дожигания СО в рабочем пространстве печи до СО<sub>2</sub> с целью увеличения прихода тепла от окисления углерода;
- 5) применение газообразного кислорода для ускоренного окисления избыточного количества углерода металла в окислительный период плавки;
- 6) применение донной или глубинной продувки расплава кислородом или чаще инертным газом для ускорения плавления и нагрева, а также уменьшения угара металла за счет лучшего перемешивания расплава;
- 7) использование в шихте жидкого чугуна с целью ускорения расплавления лома за счет физического тепла чугуна и дополнительного прихода тепла от экзотермических реакций окисления примесей;
- 8) использование физического тепла отходящих печных газов для подогрева лома;
- 9) применение ряда чисто технологических мероприятий для ускорения расплавления шихты и нагрева металла: работа на «болоте», использование вспененного шлака и т. д.;
- 10) использование специально подготовленной шихты (измельченного лома).

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 топливно-кислородных горелок, кислородных фурм, инжекторов углерода, фурм для окисления оксида углерода в газовой среде рабочего пространства.

Следует отметить, что с учетом условий работы электропечи нередко вносят изменения в геометрические параметры ее рабочего пространства.

Экспериментальные исследования тепло- и массообменных процессов в рабочем пространстве ДСП имеют свою специфику и весьма затруднительны. На данный момент существует большое количество прикладных программных пакетов для моделирования химико-технологических систем. Для расчета газодинамики и температурного состояния рабочего пространства использовали 3D-модель печи, которая была предварительно получена в чертежно-графическом редакторе системы КОМПАС-3D, а затем импортирована в приложение SolidWorks FlowSimulation.

Flow simulation моделирует движение потока на основе решения уравнения Навье–Стокса, которое является интерпретацией законов сохранения массы, импульса и энергии для потока жидкости.

К рассмотрению предложены две модели, отличающиеся размещением комбинированных устройств для подачи в печь энергоносителей (ТСУ). В первой модели ТСУ расположены радиально в соответствии с проектными рекомендациями фирмы «Danieli» (рис. 1, вариант *а*), во второй – размещены тангенциально (рис. 1, вариант *б*).

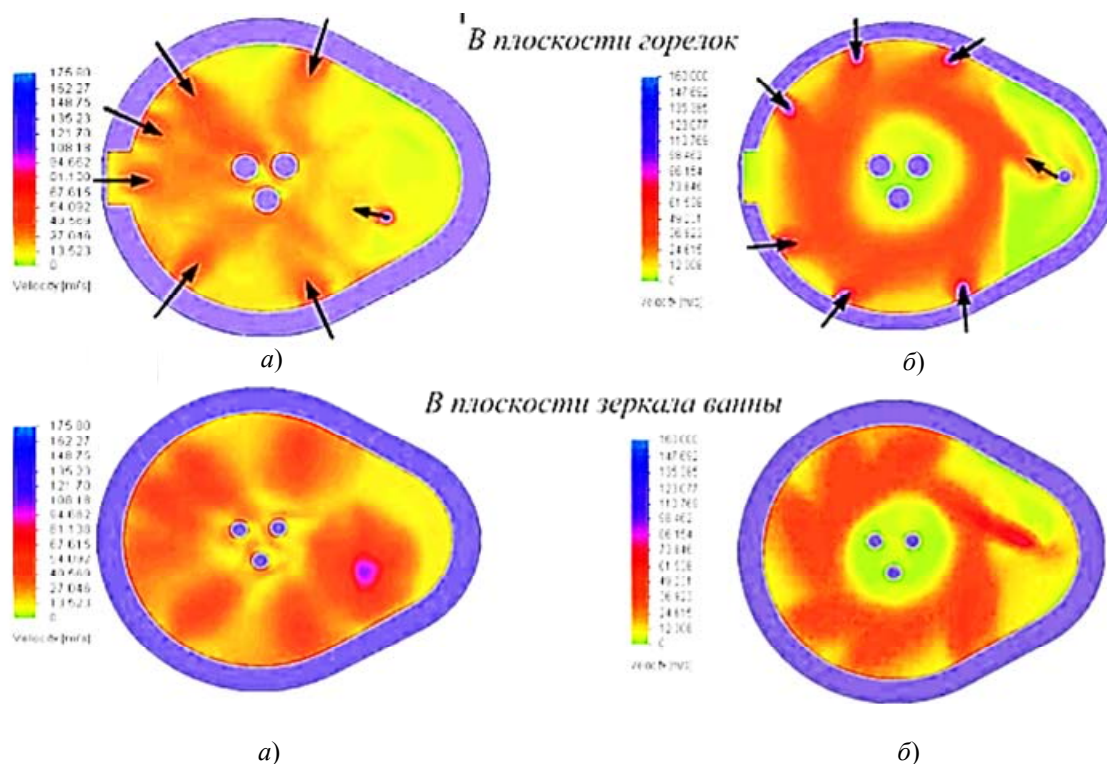


Рис. 1. Траектории движения газовых потоков в объеме рабочего пространства ДСП:  
*а* – по проекту «Danieli»; *б* – при тангенциальном расположении газокислородных горелок

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 %.

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 участках между горелками обнаружены плохо прогреваемые поверхности, тогда как в месте установки каждой горелки наблюдается перегрев шихты. Тангенциальное расположение горелок 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. Циркуляция газов способствует рассредоточенному распределению температур в зоне расположения основной массы шихты по горизонтальным сечениям и высоте рабочего пространства.

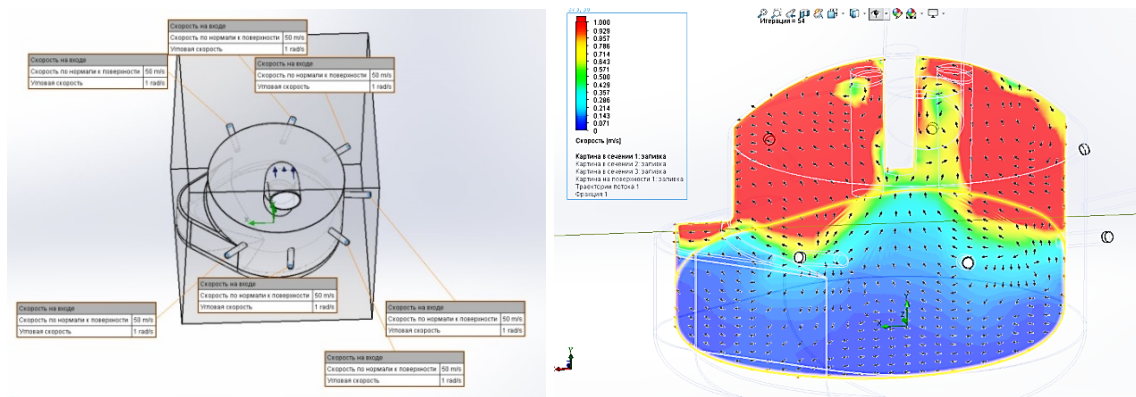


Рис. 2. Усовершенствованная параметрическая модель для газодинамического анализа и результаты моделирования в виде траекторий движения частиц газового потока

В заключение можно отметить, что предложенный способ интенсивного нагрева (рис. 2) 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.

#### Литература

1. Worldsteel Association Steel Statistical Yearbook 2011. – Brussels : Worldsteel Committee on Economic Studies, 2011. – 120 p.
2. Белковский, А. Г. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкции / А. Г. Белковский, Я. Л. Кац, М. В. Краснянский // Бюл. «Черная металлургия». – 2013. – № 3. – С. 72–78.
3. Чижиков, А. Г. Автомобильный лом в структуре металлофонда России и технические решения по его утилизации / А. Г. Чижиков, А. Е. Семин, И. И. Чижикова // Электрометаллургия. – 2010. – № 4. – С. 31–36.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОМКОВШЕЙ МАШИН НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ

В. И. Бабышев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель В. А. Жаранов

В последнее время в области технологий разливки стали наблюдаются существенные изменения, направленные на увеличение производительности МНЛЗ и повышение качества разливаемых сталей. Это обусловило развитие исследований, связанных с металлургическими и гидродинамическими процессами, происходящими в промковше в ходе разливки.

Геометрическая форма промковша выбирается по возможности наиболее простой и приближенной к параллелепипеду. Это упрощает процесс изготовления футеровки промковша и его обслуживания (например, извлечения остатка металла после разливки). Для удобства эксплуатации также выполняются технологические уклоны