

## ОТЗЫВ

**официального оппонента Нешпоренко Евгения Григорьевича на  
диссертационную работу Глухова Ильи Васильевича  
по теме «Совершенствование тепловой работы дуговой сталеплавильной  
печи при «скрап-карбюраторном» процессе выплавки полупродукта  
стали», представленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности**

### **2.6.2. Metallurgy of black, colored and rare metals**

**Актуальность.** Актуальность темы диссертационных исследований обозначена значительным ростом числа автомобильного парка, металлофонда производственного и обрабатывающего сектора экономики. Одновременно с этим, как следствие, растет количество металлического лома, который в большей степени представляет собой стальной лом. Для переработки стального лома в классическом металлургическом комплексе полного цикла применяются дуговые сталеплавильные печи, в которых значительную долю тепловой энергии при переплавке лома и выплавке стали вносит выжигаемый кислородом углерод жидкого чугуна. Поскольку всё большее распространение в промышленности получают перерабатывающие мини-заводы, у которых нет жидкого чугуна, то актуальным становится вопрос эффективной работы дуговых сталеплавильных печей, как в тепловом, так и в металлургическом плане при переработке стального лома с добавкой твердых углеродсодержащих материалов. Такая технология получила название «скрап-карбюраторный» процесс плавки стали. Существующая в настоящее время технология переплавки лома предлагает различные способы интенсификации тепловой работы в целях повышения производительности последних. Например, предварительный подогрев лома, применение газокислородных горелок и различные газодинамические принципы организации процесса в целом. Однако, автором настоящих исследований выделен ряд факторов, которые либо негативно влияют на процесс, либо могут быть существенно улучшены. В работе отмечено что, прогрев всей массы шихты до температуры плавления должен происходить равномерно по всему объёму без локальных зон перегрева и оплавления. Этого невозможно достичь при применении существующих газокислородных горелок. Обозначенные проблемы подчеркивают актуальность диссертационных исследований.

**Структура и анализ работы.** Анализ содержания диссертации подтверждает достаточный и необходимый объем материала, изложенного на 155 страницах и иллюстрированного 64 рисунками. Содержание диссертации соответствует научной специальности 2.6.2. Metallurgy of black, colored and rare metals, область исследования соответствует пункту 12 «Газо- и аэродинамика в металлургических агрегатах» и пункту 13 «Тепло- и массоперенос в низко- и высокотемпературных процессах» паспорта специальности. По материалам диссертации опубликовано 28 статей, 12 из которых представлены в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 9 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus, WoS, получен 1 патент РФ на изобретение. Автореферат содержит основные положения диссертации, ее результаты и основные выводы.

**В первой главе** представлен литературный обзор по теме диссертационной работы, в результате которого, обоснована цель и поставлены задачи исследования. Одним из вопросов, рассмотренных в первой главе, стал вопрос эффективности и целесообразности увеличения мощности трансформаторов в связи с небольшим снижением времени плавки. Аналогично стоит вопрос по максимальной газовой нагрузке в существующих конструкциях печей, технологии плавки, порозности шихтовых материалов. Проведенный автором диссертации литературный обзор позволил сделать вывод о том, что другими авторами подробно исследованы различные варианты отдельных процессов газодинамики и теплообмена, важных для организации различных способов сжигания газа, но они не акцентированы для применения в дуговых сталеплавильных печах, работающих по «скрап-карбюраторному» процессу. Из анализа литературных данных по эксплуатации современных дуговых сталеплавильных печей была сформулирована цель работы – исследование тепловой работы дуговой сталеплавильной печи при «скрап-карбюраторном» процессе при введении дополнительной тепловой энергии от сжигания природного газа с кислородом в объеме шихты.

**Во второй главе** обозначена важность контролируемого сжигания природного газа с использованием технологического кислорода, при этом можно избежать негативных результатов, таких как локальный перегрев и оплавление шихт, образование настывлей на футеровке, интенсивного образования пыли и угара железосодержащих компонентов. Разработана методика расчета горения природного газа с технологическим кислородом с учетом диссоциации водяных паров и диоксида углерода, которая позволяет определить расход технологического кислорода, количество и концентрацию компонентов продуктов сгорания, их действительную температуру горения с учётом потери теплоты излучением из зоны горения в неограниченную среду. Отмечено, разработанная методика позволяет произвести расчет выхода продуктов, температуры горения, степени диссоциации компонентов для любого сочетания соотношения горючих газов метанового ряда с кислородом.

**В третья глава** решает последующую задачу эффективного сжигания газокислородной смеси посредством горелочного устройства. Автор диссертационных исследований обозначил проблему в виде типа горения и устройства для реализации процесса горения. Отмечено, что существующие горелочные устройства с диффузионным факелом, распространяющимся в объёме дуговой сталеплавильной печи, заполненной насыпным ломом разной порозности, не могут избежать образования локальных участков с повышенным содержанием кислорода, что приводит к неравномерной температуре продуктов сгорания, к не стабильному теплообмену, повышается угар компонентов шихты. Поэтому акцентировано внимание на кинетическом режиме сжигания природного газа с кислородом, а также на разработке более эффективного горелочного устройства по сравнению с применяемыми. Сделан акцент на то, что при кинетическом горении факел получается более коротким и, как следствие, горение в слое шихты будет отсутствовать. Автором разработана и запатентована оригинальная конструкция горелочного устройства, с «защитой» от проскока факела в горелку. Сделан акцент на математическое моделирование с применение современных компьютерных средств вычисления и визуализации результатов. Отмечено, что длина факела быть сокращена в 1,5-5 раз по

сравнению с диффузионным режимом горения, а главное это позволит создавать равномерный поток греющих высокотемпературных продуктов сгорания. Исследование проведено с помощью компьютерного моделирования в программе Ansys.

**В четвертая глава** является комплексным продолжением предыдущих глав. В ней определен вариант рациональной загрузки шихтовых материалов в рабочее пространство ДСП, а также уточнены физические параметры и теплофизические свойства исходных материалов и комбинированного слоя шихты в условиях нагрева равномерным потоком греющих высокотемпературных продуктов сгорания. Автор работы указывает на то, что при нагреве и плавлении шихта «садится» и приходится делать подвалку лома – это, как правило, вынужденная технологическая операция. Проведенное им исследование позволяет спрогнозировать одноразовую подачу шихты, равной по массе емкости печи с учетом угара. Например, при средней плотности шихты  $1,29 \text{ т/м}^3$  и более завалку можно производить на ДСП-120 одной корзиной, создавая свободное пространство над уровнем шихты высотой не менее одного метра.

**В пятая глава** сводит воедино результаты предыдущих решенных задач и решает вопрос эффективности организации газодинамических потоков движения высокотемпературных продуктов сгорания в пространстве дуговой сталеплавильной печи, заполненной стальным ломом. Проведенный анализ сжигания и повода продуктов сгорания газокислородного факела в действующей технологии показывает, низкую эффективность организации газодинамических потоков в рабочем объеме печи. Автором предложено и исследовано решение по организации тангенциального подвода продуктов сгорания. Проведено компьютерное мультифизическое моделирование рабочего пространства дуговой сталеплавильной печи, а также предложена методика и рассчитано время нагрева шихты первой корзины. По результатам моделирования получено, что к моменту поступления в подсводовое пространство печи дымовые газы совершают 2-3 оборота, имея повышенное время для теплообмена со стальным ломом. Одновременно с этим имеет место резкое снижение с 20% до 3% осаждения пыли на поверхность электродов по сравнению с радиальным подводом газов. Так же автором разработана методика расчета времени нагрева слоя комбинированной шихты с использованием дифференциального уравнения теплопроводности в критериальной форме. Предложенная методика позволяет рассчитать время нагрева шихты с погрешностью до 6,8%.

**Научная новизна.** Научная новизна результатов диссертационного исследования характеризуется следующими положениями. На основе исследований температурных и скоростных полей газодинамических потоков получены новые результаты при радиальной и тангенциальной схеме размещения горелок в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи. Научно обоснована целесообразность тангенциального размещения горелок в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи, посредством компьютерного моделирования. Предложена методика расчета горения для определения действительной температуры продуктов сгорания природного газа с кислородом с учетом диссоциации  $\{CO_2\}$  и  $\{H_2O\}$  и теплоотдачи в окружающую среду. Предложен расчет физических параметров и теплофизических свойств шихты в объеме с различной порозностью, плотностью, формой и размером исходных компонентов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая и практическая значимость заключается в предложенном способе нагрева холодной шихты продуктами сгорания природного газа, сжигаемого в атмосфере кислорода при замене диффузионного режима горения газа кинетическим, в новой конструкции газокислородной горелки для сжигания природного в кинетическом режиме, подтвержденной патентом, в предложенном способе рационального заполнения рабочего пространства дуговой сталеплавильной печи при «скрап-карбюраторном» процессе в зависимости от насыпной плотности и доли компонентов в шихте, применением результатов работы в учебном процессе.

#### **Замечания и вопросы по диссертационной работе**

1. В условиях высоких температур следует более полно учесть диссоциацию продуктов сгорания, например, с образованием гидроксида ОН, которого при обозначенных температурах будет образовываться значительное количество, что приведет к снижению температуры горения. Для такого расчета придется использовать константы атомизации простых соединений. Так же имеются общеизвестные методики для расчета горения газообразных топлив. В чем заключаются отличия предложенной вами методики расчета горения природного газа с кислородом от уже имеющихся?
2. Известны работы по организации режима безокислительного нагрева стали. Насколько необходимо сжигать природный газ в кислороде при коэффициенте его избытка равного единице. Из работы не ясно, что лучше: полностью сжечь газ, но увеличить угар металла или же организовать безокислительные условия горения для сниженного угара металла, но с недожогом газа.
3. Организация тангенциального подвода продуктов горения природного газа с кислородом приводит к интенсивному движению высокотемпературного газа вдоль футеровки. Влияет ли теплогенерация при сжигании природного газа с кислородом при использовании разработанной автором горелки на стойкость футеровки печи и на футеровку шлакового пояса сталеплавильной ванны?
4. Как влияет применение разработанной автором горелки на экологические показатели производства, расход электроэнергии, воды, выбросы CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, пыли?
5. Как производился выбор расчетных моделей при компьютерном моделировании?

Высказанные замечания не снижают общего положительного впечатления от материалов диссертации.

#### **Заключение**

Диссертационная работа Глухова Ильи Васильевича представляет собой самостоятельную и законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему. Результаты работы обладают научной новизной, в достаточной мере обоснованы, имеют научную и практическую значимость. Работа «Совершенствование тепловой работы дуговой сталеплавильной печи при «скрап-карбюраторном» процессе

