

45.46.02

М125

Челябинский государственный технический университет

На правах рукописи

Магидсон Игорь Маркович

ВЫСОКОМОЩНЫЕ ТОПЛИВОКИСЛОРОДНЫЕ ГОРЕЛКИ ДЛЯ
НАГРЕВА ЛОМА В СОВРЕМЕННЫХ ДУГОВЫХ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Специальность 06.16.02 - "Металлургия черных металлов"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Челябинск, 1993

Работа выполнена в Челябинском научно-исследовательском институте металлургии.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Тулуевский Ю.Н.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Гудим Ю.А.

- кандидат технических наук Панченко А.Г.

Ведущее предприятие - Орск-Халиловский металлургический комбинат (г. Новотроицк, Оренбургской обл.).

Защита состоится "19" мая 1993 г. в 14 час. в ауд. 314 главного учебного корпуса на заседании специализированного Совета Д 053.13.04 Челябинского государственного технического университета по адресу: 454080, г.Челябинск, пр-т им.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧГТУ.

Автореферат разослан "19" апреля 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
Д 053.13.04, доктор физико-
математических наук, профессор

Д. А. Мирзаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для современного этапа развития черной металлургии характерно быстрое увеличение объемов выплавки электростали, совершенствование технологии и оборудования электросталеплавильного производства. Всё большее значение приобретает энергетическая экономичность электрошлаки. Для сокращения расхода и повышения производительности современные дуговые сталеплавильные печи (ДСП) оборудуют топливокислородными горелками (ТКГ) и устройствами для предварительного нагрева лома отходящими газами. Однако вопросы повышения эффективности ТКГ, применяемых на ДСП, до настоящего времени остаются малоисследованными и во многом дискуссионными. Этим, весьма актуальным вопросам, и посвящена настоящая диссертационная работа.

Работа выполнена в соответствии с координационным планом Национально-исследовательского института металлургии (НИИМ) по электросталеплавильному производству № 5.6-4.3-85.

Цель работы. Разработка высокомощных ТКГ для современных ДСП.

Научная новизна. Впервые методами физического моделирования нагрева шихты в условиях ДСП газокислородным факелом исследованы зависимости коэффициента полезного теплоиспользования, объема зоны активного нагрева, поверхности нагрева шихты, находящейся в этой зоне, и соответствующего усредненного коэффициента теплоотдачи от объемной плотности шихты. Исследовано также влияние на эти характеристики уровня тепловых потерь через ограждения рабочего пространства.

Предложена и обоснована методика прогнозирования основных тепловых, аэродинамических и акустических характеристик промышленных газокислородных горелок по результатам лабораторных испытаний их моделей.

Практическое значение работы. С использованием методики прогнозирования основных характеристик промышленных горелок разработана серия оригинальных многослойных ТКГ внешнего смешения тепловой мощностью до 20 МВт. Применение новой горелки на ДСП-100 ЗСШ-2 Челябинского меткомбината (ЧМК) позволило сократить расход электроэнергии на расплавление шихты на 9,2 %, а длительность периода плавления - на 13,8 % при удельных расходах природного газа 7,1 м³/т и кислорода - 14,2 м³/т.

Новые горелки нашли применение в рабочих проектах высокомощных 100-т ДСП нового поколения, разрабатанных в Челябинском НИИМ совместно с Челябгипромезом и предназначенных, в частности, для

проведения реконструкции электросталеплавильных цехов (ЭСП) ЧМК, Узбекского метзавода (УМЗ) и Орско-Халиловского меткомбината (ОХМК).

На ДСП конструкции НИИМ реализован новый тип установки горелок с размещением их в дополнительных зеркалах, выполненных в полике и сткосах печи. Установки горелок эркерного типа обеспечивают ввод факелов под слой шихты на уровне подины с равномерным распределением потоков газов по сечению рабочего пространства печи, что повышает эффективность использования топлива.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты физического моделирования нагрева лома топливокислородным факелом применительно к условиям ДСП.
2. Методика прогнозирования основных тепловых, аэродинамических и акустических характеристики промышленных ТКГ по результатам испытаний их лабораторных моделей.
3. Высокомощные (до 20 МВт) многосопловые газокислородные горелки оригинальной конструкции для современных ДСП.
4. Новые типы установок газокислородных горелок, обеспечивающие повышение эффективности использования топлива.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Использование дополнительных источников энергии (состояние вопроса)

Одной из основных тенденций развития электросталеплавильного производства является увеличение производительности дуговых сталеплавильных печей (ДСП) путем сокращения длительности плавки при одновременном снижении энергозатрат. На современных ДСП это достигается за счет повышения удельной мощности трансформатора до 850–1000 кВ·А/т и замены футеровки стен и свода водоохлаждаемыми панелями. Совершенствуются энерготехнологические режимы плавки, сокращаются длительности всех бестоковых операций (заправки, завалки, наращивания электродов и др.), интенсифицируется продувка ванны кислородом, улучшается подготовка лома.

Широкое распространение получили внепечные способы обработки стали, что сводит к минимуму длительность технологических операций, проводимых в ДСП, и превращает ДСП в агрегат для расплавления шихты и получения полупродукта. В настоящее время на

ряде высокомощных ДСП, работающих на металломоломе, при общей длительности цикла плавки 60–80 мин. расходы электроэнергии и электродов составляют соответственно 400–450 кВт·ч/т и 3,0–3,5 кг/т, а на печах постоянного тока I,2–I,5 кг/т. В отдельных случаях достигаются и более высокие показатели.

Дальнейшее сокращение расхода электроэнергии, электродов и общих энергетических затрат может быть получено при использовании для нагрева металлошлаков помимо электроэнергии дополнительных источников тепла, к которым можно отнести различные виды газообразного, жидкого и твердого топлива, а также технологические газы, выделяющиеся из ванны и покидающие рабочее пространство печи. Как известно, потери тепла с уходящими газами на современных высокомощных ДСП составляют 16–18 % от общих энергетических затрат. Использование этого тепла для предварительного подогрева лома является наиболее эффективным способом утилизации вторичных энергоресурсов в ДСП, который находит все большее применение.

Способ дополнительного нагрева металлошлаков в самой ДСП о помощью топливокислородных горелок является самым распространенным и одним из наиболее перспективных. Обладая весьма широкими возможностями сокращения длительности плавки, расходов электроэнергии, электродов и общих энергетических затрат, этот способ не требует установки в электросталеплавильных цехах дополнительного сложного и дорогостоящего оборудования, не предъявляет дополнительных требований к подготовке металлошлаков и вместе с тем, при минимальных капитальных вложениях, дает возможность получить наибольший экономический эффект.

Целообразность замены определенной доли электроэнергии более дешевой энергией топлива определяется ценой и дефицитностью различных энергоносителей, а также достижимой на практике степенью полезного их использования. Энергетическую целесообразность комбинированного применения электроэнергии и топлива при производстве электроотугли определяет сквозной коэффициент полезного использования первичной энергии топлива (природного газа) по двум различным схемам: при сжигании топлива непосредственно в ДСП и по схеме ТЭС–ДСП, когда все топливо сжигается на тепловых электростанциях (ТЭС) для получения электроэнергии, подаваемой к ЭСПЦ и ДСП. Такое соотношение правомерно, поскольку ТЭС, работающие на природном газе или мазуте, производят в нашей стране примерно 40 % всей электроэнергии и при-

менение природного газа в этих целях постоянно расширяется.

Сквозной коэффициент полезного использования первичного топлива по схеме ТЭС-ДСП $\eta_{\text{тэс}}^{\text{дсп}}$ определяется выражением

$$\eta_{\text{тэс}}^{\text{дсп}} = \eta_{\text{тэс}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\vartheta} \cdot \eta_d$$

где $\eta_{\text{тэс}}$ - КПД ТЭС, $\eta_{\text{пер}}$ - КПД линий электропередач с учетом потерь при трансформациях энергии; η_{ϑ} - электрический КПД ДСП, η_d - термический КПД электрических дуг. Принимая

$\eta_{\text{тэс}} = 0,38$, $\eta_{\text{пер}} = 0,92$, $\eta_{\vartheta} = 0,92$ и $\eta_d = 0,78$, получим $\eta_{\text{тэс}}^{\text{дсп}} = 0,25$. Таким образом, при использовании природного газа на ТЭС металлошахте, расплавляемой электрическими дугами в ДСП, передается, в конечном счете, только четвертая часть (25 %) его химической энергии.

При прямом нагреве металлома горелками КПД значительно выше. КПД горелок при предварительном подогреве лома η_g достигает значений 0,7-0,75. При использовании ТКГ, устанавливаемых на ДСП, необходимо учитывать дополнительные затраты электроэнергии и первичного топлива на получение кислорода на кислородно-компрессорных станциях (ККС). На современных ККС удельный расход электроэнергии составляет 0,6-0,65 кВт·ч на 1 м³ кислорода, что при $\eta_{\text{тэс}} = 0,38$ соответствует удельному расходу первичного топлива, равному 0,17-0,18 м³ природного газа. С учетом этих дополнительных затрат КПД ТКГ на ДСП достигает 0,40-0,45 и более высоких значений.

За рубежом обычно устанавливают по три горелки в стенах или оводе печей так, чтобы с их помощью ускорить плавление шихты в холодных зонах между электродами. Иногда число горелок увеличивают до шести. На печах небольшой емкости устанавливают одну горелку в рабочем окне; такие горелки широко используются и в отечественной практике. Суммарная мощность ТКГ на 100-120-т ДСП составляет обычно 8-12 МВт и не превышает 15-20 МВт. Дальнейшее увеличение мощности ТКГ сопровождается ухудшением использования топлива. Современной практикой является уменьшение длительности электроплавки за счет применения ТКГ на 10-15 %, снижение расхода электроэнергии на 8-13 % и электродов на 4-6 %.

При современных темпах электроплавки дальнейшее резкое сокращение расходов электроэнергии, электродов и общих энергетических затрат за счет использования топлива в самой печи

требует повышения мощности топливокислородных горелок до уровня, относительно близкого к мощности электрических дуг в период плавления шихты. При этом термический КПД горелок не должен снижаться. Решение этой задачи представляет значительные трудности. Основными факторами, определяющими интенсивность теплопередачи от факела к шихте, являются температура факела, коэффициент теплоотдачи от факела к кускам лома и общая поверхность этих кусков, омываемых продуктами горения.

Одной из наиболее сложных конструктивных проблем является разработка способов ввода в рабочее пространство печи горелок, обеспечивающих оптимальные условия нагрева слоя шихты газокислородными факелами, а также необходимую эксплуатационную надежность горелочных устройств. При нагреве слоя шихты оптимальные условия теплопередачи обеспечиваются при равномерном по сечению прохождении газов через весь слой снизу вверх или сверху вниз, как это реализуется в установках для нагрева лома в бальях.

2. Исследование и разработка топливокислородных горелок.

Разработка высокоеффективных мощных ТКГ для современных ДСП является весьма сложной технической задачей. Практика показывает, что разработка новых конструкций ТКГ идет чисто эмпирическим путем. Конструктивные изменения вносят непосредственно в промышленные образцы горелок. Эффективность этих изменений оценивается по результатам эксплуатации новых горелок на печах. При таком подходе трудно предугадать, каким образом скажется то или иное изменение на эффективности работы горелки, в частности, на ее аэродинамических, энергетических и акустических характеристиках. Возможности аналитических методов в рассматриваемой области весьма ограничены. В результате процесс совершенствования горелок удлиняется и требует больших затрат. Созданию эффективных ТКГ значительно способствовало бы проведение предварительных исследований разрабатываемых промышленных образцов на специальных огневых стендах. Однако такие стенды отсутствуют, а их создание и эксплуатация требуют значительных капиталовложений.

В такой ситуации весьма желательно предварительное изучение характеристик факелов разрабатываемых горелок на их небольших моделях в лабораторных условиях. При работе с такими горелками, не требующими сооружения полупромышленных установок, обс-

рудованных достаточно мощными газо- и кислородопроводами и соответствующими системами газоудаления, открываются весьма широкие возможности для проведения исследований. Однако возникает проблема правомерности переноса результатов лабораторных исследований на промышленные образцы.

В работе установлено, что при соблюдении определенных условий результаты, полученные в лабораторных масштабах, могут эффективно использоваться при создании промышленных образцов ТКГ. К этим условиям относятся: геометрическое подобие горелок; использование одинаковых с образцом топлива и окислителя, что обеспечивает близость температурных условий горения; примерное равенство абсолютных значений скоростей истечения струй топлива и окислителя из сопел горелок, обусловливающих приближенное подобие аэродинамических характеристик факелов при достаточно больших числах Re для модели, находящихся в автомодельной области.

Предложена следующая методика разработок новых горелок. На первом этапе в лабораторных условиях путем изучения большого числа вариантов горелок отсеваются неудачные и тем самым резко сокращается число конструктивных решений, требующих дальнейшей проверки на горелках, выполненных в натуральную величину. На втором этапе наиболее перспективные горелки изготавливаются в макетном исполнении. Такие горелки не рассчитаны на длительную эксплуатацию и поэтому имеют весьма упрощенную конструкцию, допускающую лишь кратковременные промышленные испытания. После проведения этих испытаний выявляются конструктивные варианты, показавшие на первых этапах наилучшие результаты. Эти варианты (или вариант) горелки изготавливаются в промышленном исполнении и проходят длительные испытания на ДСР в различных условиях эксплуатации.

Лабораторные исследования проводили на моделях ТКГ, выполненных в геометрических масштабах от 1:10 до 1:20 на огневом стенде при вертикальном направлении факелов снизу вверх. Тепловая мощность лабораторных горелок составляла от $2,5 \cdot 10^{-2}$ до $3,0 \cdot 10^{-2}$ МВт, что на два-три порядка меньше мощности промышленных ТКГ. Скорости истечения из сопел природного газа изменились на моделях от 80 до 130 м/с, кислорода - от 160 до 300 м/с и были близкими к скоростям, характерным для промышленных образцов. Этим скоростям соответствуют числа $Re = 30 \cdot 10^3 - 40 \cdot 10^3$, лежащие в автомодельной области. Таким образом были

соблюдены все изложенные выше условия моделирования. Для определения геометрических параметров лабораторных и промышленных факелов их фотографировали. Уровни шума горелок измеряли импульсным шумомером типа ТИШ-00017. Для определения оранжевое тепловое излучение лабораторных горелок с помощью миниатюрного калориметрического тепломера измеряли средние тепловые потоки в нескольких поперечных сечениях факела по его длине. В экспериментах соблюдали стехиометрическое соотношение расходов природного газа и кислорода. Было исследовано более 15 вариантов двухсопловых и многосопловых горелок. Шумовые характеристики и уровни тепловых потоков некоторых из них представлены на рис. 1 и 2.

Первые исследования с целью апробации предложенной методики провели на моделях двухсопловой сводовой и многосопловой оконной горелок с известными по результатам их промышленной эксплуатации характеристиками. Характерное для промышленной двухсопловой ТГ неустойчивое горение факела имело место и на её модели. Для поддержания горения даже при небольших расходах газов приходилось использовать дополнительный стабилизатор. При повышении расходов газов факел отрывался от сопел, что сопровождалось скачкообразным повышением уровня шума с 85 до 100 дБ (рис. 1, кривая 1). При испытаниях многосопловой лабораторной горелки, основной конструктивной особенностью которой являются дополнительные кислородные ступенчатые сопла, в полном соответствии с образцом наблюдалось устойчивое безотрывное горение факела во всем исследованном диапазоне расходов газа. Уровень шума при этом изменился незначительно и не превышал 95 дБ (рис. 1, кривая 2).

Измерение уровней тепловых потоков в поперечных сечениях факелов двухсопловой (рис. 2, кривая 1) и многосопловой (рис. 2, кривая 2) горелок подтвердило намного более высокую тепловую эффективность многосопловой горелки, что также хорошо согласуется с известными результатами промышленной эксплуатации. Таким образом, результаты моделирования многосопловой и двухсопловой горелок подтверждают правомерность проведения лабораторных исследований, с целью прогнозирования свойств промышленных горелок при соблюдении перечисленных выше условий.

Как показали лабораторные исследования, основной причиной наблюдающегося на практике скачкообразного повышения уровня шума горения в отдельные периоды главки является отрыв факела от сопел горелки. Установлено, что отрыв факела двухсопловых горелок может быть устранен за счет использования в конструкции горелки дополнитель-

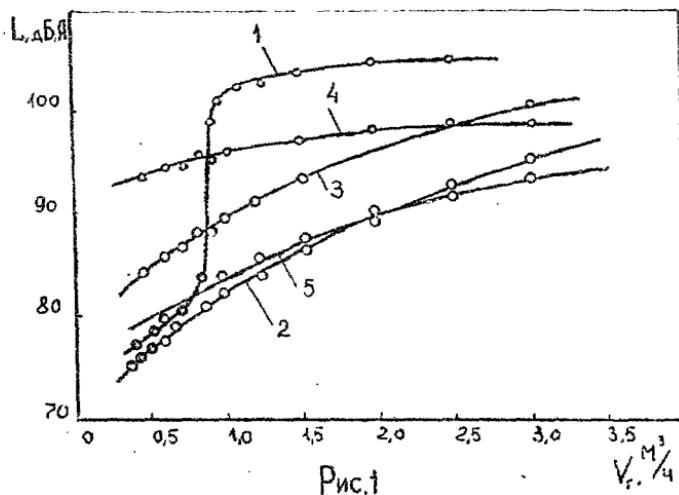


Рис.1

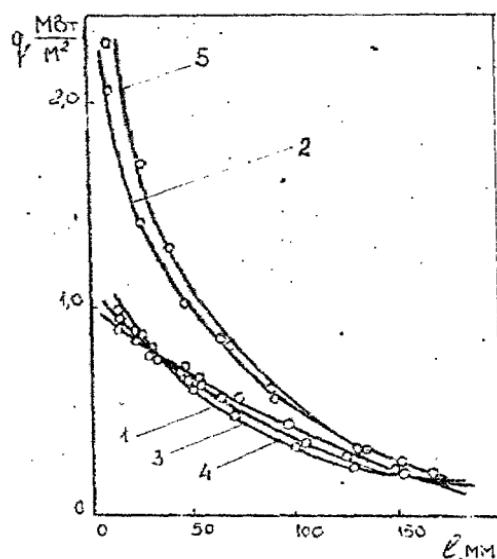


Рис.2

тельных элементов, таких, например, как ступенчатые кислородные сопла или выборки особой конфигурации возле сопел. Вместе с тем, несмотря на существенное снижение уровней шума двухсопловых горелок за счет введения в их конструкцию указанных элементов (рис.1, кривые 3 и 4), уровни тепловых потоков при этом практически не изменились (рис.2, кривые 3 и 4) и были более чем вдвое ниже значений соответствующих потоков многосопловых горелок (рис.2, кривые 2 и 5).

Результаты лабораторных исследований горелок получили удовлетворительное подтверждение и при проведении испытаний их макетов. Это относится к изменениям как уровня шума, так и тепловой эффективности горелок. Термовую эффективность определяли в кратковременных испытаниях макетов на ДСН по времени достижения температуры плавления кусков шихты, находящихся вблизи горелки. Таким образом, методика прогнозирования основных характеристик промышленных горелок по результатам лабораторных исследований их моделей получила достаточное обоснование и может быть рекомендована для разработки новых мощных ТКГ для современных ДСН.

На основании результатов лабораторных исследований и макетных испытаний была разработана оригинальная конструкция промышленной многосопловой сводовой горелки. Максимальный расход природного газа $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$, кислорода – $4000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Максимальная тепловая мощность горелки – 20 МВт. Скорости истечения природного газа 210 м/с, кислорода – 240 м/с. С целью более глубокого проникновения факела в слой шихты медная головка наклонена под углом 45° к вертикальной оси горелки. Чередующееся расположение на единой окружности газовых и кислородных сопел достигается благодаря особой форме головки. В центре окружности располагается одно кислородное сопло большого диаметра.

Промышленный образец сводовой многосопловой горелки был установлен на 100-т электропечи ЭСП-2 ЧМК. В процессе опытной эксплуатации горелки были получены хорошие тепловые, аэродинамические и акустические показатели. Анализ результатов 40 плавок, проведенных с горелкой в компании 109 плавок показал, что расход электроэнергии на расплавление шихты при относительно небольшом удельном расходе природного газа $7,1 \text{ м}^3/\text{т}$ сократился на 53 кВт·ч/т (9,2 %), а длительность плавления на 28 мин (13,8 %). Такие результаты можно считать вполне удовлетворительными.

Замеры шума на печи, оборудованной горелкой, показали, что её работа не оказывает влияния на общий уровень шума печи, по-

скольку величина последнего (II5-II6 дБ, А) значительно превышает уровень шума собственно горелки (I08-I10 дБ, А). Этот уровень существенно ниже шума обычной двухсопловой горелки, который при равной мощности составляет II2-II4 дБ, А.

В дальнейшем варианты разработанной и внедренной многосопловой горелки были использованы в рабочих проектах ДСП нового поколения конструкции НИИМ.

3. Исследование некоторых закономерностей слоевого нагрева лома топливокислородным факелом.

Процессы нагрева слоя лома факелами топливокислородных горелок в условиях ДСП относятся к малоизученным. Это вызвано известными трудностями исследований таких процессов, как в промышленных условиях, так и методами физического и математического моделирования. При таком моделировании помимо подобия собственно горелок необходимо рассматривать также и весь комплекс условий, характеризующих процессы нагрева лома. Эти условия определяются соотношением размеров модели, массы лома и тепловой мощности горелок, размерами и физическими свойствами кусков и олова лома, аэродинамическими и тепловыми характеристиками факелов, распространяющихся в слое, температурным уровнем процесса и другими параметрами, от выбора которых зависит степень подобия явлений на модели и на образце.

Следует отметить, что при огневом моделировании нагрева лома не требуется соблюдения одинаковости геометрических масштабов для модели рабочего пространства печи и для модели головки горелки, а также одинаковости соответствующих числе Re . Важно лишь проведение исследований в автомодельном режиме, который, благодаря турбулизирующему воздействию кусков лома, наступает на модели при относительно небольших значениях Re .

Величины расходов природного газа и кислорода на горелку при моделировании, размеры огневого стенда, определяли, основываясь на известном критерии Больцмана (Bo), а также на равенстве относительных импульсов горелок. В обоих случаях получены близкие результаты, что указывает на достаточную степень подобия и позволяет остановиться на найденных с их помощью линейных масштабах огневого стенда и расходах газов на горелку.

Исследование нагрева шихты топливокислородным факелом проводили на огневом стенде, представляющим собой упрощенную модель ДСП, выполненную в масштабе I:10. В качестве шихты использовали набор регулярно установленных, вертикальных металлических стержней - об-

разцов лома, которые с целью предотвращения окисления были выполнены из нержавеющей стали марки Х18Н10Т. Для нагрева шихты применяли многосопловую поворотную ТКГ внешнего смешения, подобную разработанной.

Эксперименты на стендде включали как огневое, так и холодное моделирование. В зависимости от объемной плотности шихты ρ , которую в экспериментах изменяли от 0,8 до 4,7 т/м³, определяли коэффициенты полезного теплоизпользования η , объем зоны активного нагрева шихты факелом со скоростями движения газов не ниже 1 м/с V и поверхность нагрева шихты S , находящейся в этой зоне, а также значения коэффициента теплоотдачи α . При проведении огневого моделирования оценивали влияние на η длительности нагрева T и наличия теплоизоляции на внутренних оттенках модели. Эксперименты проводили как с поворотной, так и неподвижной горелкой при постоянных расходах природного газа и кислорода соответственно 2,5 и 5,0 м³/ч. Максимальные температуры в зоне нагрева достигали 1350–1450 °С.

При холодном моделировании установлено, что с увеличением ρ объем зоны V уменьшается в несколько раз, а сама зона локализуется в области, расположенной вблизи водоохлаждаемой стенки модели, что объясняется увеличением гидравлического сопротивления шихты. Величина S при этом увеличивается и достигает максимального, постоянного значения при $\rho = 2,2-2,4$ т/м³. Подобный характер имеет зависимости как для поворотной, так и для неподвижной горелки, однако в последнем случае абсолютные значения V и S уменьшаются в 2–2,5 раза.

Одной из величин, оказывающих наибольшее влияние на эффективность нагрева лома топливокислородным факелом, является коэффициент теплоотдачи α . Для выявления характера зависимости средних (эффективных) значений α в зоне V от ρ использовали методику, основанную на аналогии процессов тепло- и массообмена. Металлические стержни в зоне активного нагрева заменяли одинаковыми по размерам отверстиями, выполненным из нафталина. Гидродинамическая картина движения факела имитировалась потоком холодного воздуха, подаваемого через сопла неподвижной горелки с расходами, равными расходам природного газа и кислорода. Потери массы нафталина в результате продувки воздухом ΔM определяли взвешиванием с точностью до 0,5 %. Определив поток массы нафталина m с поверхности цилиндров S в зоне активного нагрева $m = \frac{\Delta M}{S \cdot t}$,

находили коэффициент массоотдачи β из выражения $\beta = \frac{m}{\rho_n}$, в котором ρ_n — плотность паров нафталина на поверхности цилиндров, кг/м³. Величину ρ_n определяли из уравнения состояния идеального газа $\rho_n = \frac{P_n}{64,84T}$, где P_n — давление насыщенных паров нафталина на поверхности цилиндров, кг/м²; T — температура воздуха для продувки, К. Величину P_n определяли с помощью выражения

$$\lg P_n = 13,565 - \frac{3729}{T}$$

Значения β и α связаны пропорциональной зависимостью. Поэтому полученные результаты позволяют судить о характере изменения α с увеличением β . Приближенно пересчет значений β на α можно выполнить по уравнению:

$$\alpha = Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Sc^{\frac{2}{3}} \cdot \lambda \cdot \beta,$$

где $Pr = \frac{V}{a}$ — критерий Прандтля;

$Sc = \frac{V}{D}$ — критерий Шидта;

V, a, D, λ — соответственно коэффициенты кинематической вязкости, температуропроводности, диффузии и теплопроводности.

Результаты пересчета приводят к значениям α , изменяющимся в диапазоне от 100 до 30 Вт/м² · К.

Уравнение теплового баланса огневого стенда за период нагрева шихты имеет вид:

$$Q_T + Q_X = Q_H + Q_A + Q_B + Q_{ne},$$

где Q_T — тепло от сгорания топлива, кДж;

Q_X — тепло, выделяющееся при окислении материала шихты, кДж;

Q_H — энтальпия, или полезное теплоусвоение шихты (за время нагрева), кДж;

Q_A — потери тепла с отходящими дымовыми газами, кДж;

Q_B — потери тепла с охлаждающей водой за период нагрева шихты, кДж;

Q_{ne} — прочие потери тепла, кДж.

Конечный результат нагрева металлошахты определяется её энтальпией Q_m , от точности измерения которой зависит разрешающая способность эксперимента. В работе применяли метод динамического калориметрирования, причем в качестве калориметра использовалась сама модель ДСП. Энтальпия Q_m измерялась после окончания нагрева шихты в период её охлаждения водой, смывающей всю наружную поверхность модели. При этом Q_m определяется количеством теп-

ла, переданного воде за время охлаждения. Погрешность определения

Q_m не превышала 1,0-1,5 %. Для определения величины возможного окисления шихты её взвешивали до и после эксперимента. Во всех случаях величиной Q_x можно было пренебречь.

Огневое моделирование показало, что абсолютные значения η , определяемого как отношение энталпии шихты к количеству тепла, введенного с топливом за период нагрева шихты Q_t , при среднемассовой температуре в зоне нагрева 950-1000 °С достигает 73-75 % (рис.3). По мере увеличения длительности нагрева τ , которую в экспериментах изменяли от 7 до 28 мин., коэффициент η уменьшается практически вдвое. Значения η для поворотной горелки на 5-6 % (абс.) выше, чем для неподвижной (рис.3, кривые 1 и 2).

Установлено, что при отсутствии теплоизоляции стенок зависимости $\eta = f(\rho)$ носят отчетливо выраженный экстремальный характер (рис.3, кривые 1...3). При этом независимо ни от τ , ни от использования поворотной или неподвижной горелки максимальным значениям η соответствуют одни и те же значения ρ , лежащие в относительно узком интервале 2,2-2,4 т/м³.

При теплоизоляции стенок модели с ростом ρ от 0,8 до 2,2-2,4 т/м³ значения η увеличиваются по затухающей кривой и при дальнейшем повышении ρ остаются постоянными (рис.3, кривая 4). По сравнению с опытами на модели без теплоизоляции стенок при больших значениях τ значения η повышаются на 20-30 % (отн.) (рис.3, кривые 3 и 4).

Различный характер кривых $\eta = f(\rho)$ для стендса без теплоизоляции и с теплоизоляцией объясняется резким изменением уровня тепловых потерь через стеки стендса, а также установленными при холодном-моделировании зависимостями V , S и ∞ от ρ .

Данные, полученные методами физического моделирования, показывают, что на современных печах, оборудованных водосохлашающим сводами и стновыми панелями, коэффициенты полезного теплоиспользования η могут достигать весьма высоких значений, сопоставимых с КИЦ электроустановок печей. Основными условиями эффективного повышения мощности ТКГ и количества полезно используемого в ДСП топлива являются увеличение поверхности кусков лома, контактирующих с факелами, а также использование лома оптимальной объемной плотности. Этими условиям соответствует применение высокомощных ТКГ с большой кинетической энергией и изменяющимся по ходу нагрева лома направлением факелов.

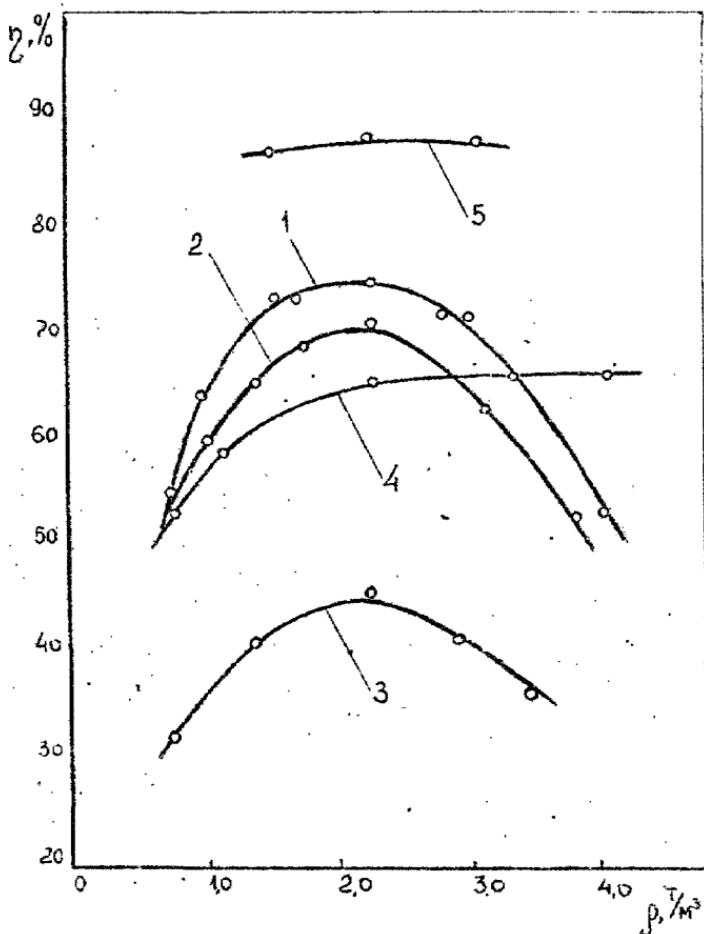


Рис.3

4. Разработка установок топливокислородных горелок для современных высокомощных ДСП

4.1. Установка сводовых ТКГ на ДСП-100 ЧМК.

Принципиальной особенностью электропечи ДСП-100 ЧМК, разработанной коллективом специалистов НИИМ, ЧМК и Челябгипромезом для реконструкции электросталеплавильного цеха № 2 ЧМК, является относительно небольшая мощность трансформатора, составляющая всего 60 МВА, что компенсируется использованием разработанных высокомощных ТКГ.

Такое сочетание снижает расход электроэнергии и электродов и облегчает установку печи в действующем цехе, поскольку уменьшает требования к питающим электросетям. Расчетная продолжительность периода плавления шихты составляет 55-60 мин., расход электроэнергии на плавление - 320-350 кВт·ч/т, годовая производительность около 400 тыс.т. Достижение приведенных показателей при умеренной электрической мощности печи обеспечивается двумя сводовыми газокислородными горелками, общая максимальная мощность которых составляет 40 МВт. Следует отметить, что такая высокая мощность ТКГ, не имеющая аналогов в мировой практике, обусловлена оригинальной конструкцией установки горелок, обеспечивающей значительное повышение эффективности использования топлива.

В соответствии с разработанным энерготехнологическим режимом плавки длительность нагрева шихты горелками одновременно с дугами составляет 15 мин. после основной завалки, 10 мин. - после подвалки. В течение этого времени при средней мощности горелок 30 МВт в печь вводится с топливом 12500 кВт·ч энергии или 125 кВт·ч/т. При отношении к.п.д. газового отопления к к.п.д. электрического нагрева, равном 0,7-0,75, это позволяет уменьшить необходимый на расплавление 1 т шихты расход электроэнергии на 90-94 кВт·ч/т.

В отличие от известной схемы установки сводовых ТКГ, согласно которой горелки стационарно располагаются в двух или трех точках на своде печи, две сводовые поворотные ТКГ на ДСП-100 ЧМК перемещаются на тележках по обе стороны стационарного газостроящего патрубка и в исходном, нерабочем положении находятся сбоку от печи. Такое размещение установки решает проблему ее ремонтопригодности, поскольку позволяет производить осмотр и замену горелок, ремонт механизмов установки без остановки печи.

После загрузки шихты в печь горелки перемещаются в сторону печи, устанавливаются над отверстиями в своде, а затем по программе, заложенной в АСУПИ, опускаются в рабочее пространство печи.

По достижении горелкой рабочего положения автоматически открываются отсечные и регулирующие клапаны на трубопроводах подачи газа и кислорода и устанавливается рабочий расход газа $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и кислорода $4000 \text{ м}^3/\text{ч}$ на каждую горелку.

Повороты горелок могут производиться как в автоматическом, так и ручном режимах. В первом случае горелки непрерывно поворачиваются от одного крайнего положения до другого и обратно по колебательному закону с периодом цикла колебания 40-50 с. Во втором случае горелки могут поворачиваться оператором. При поворотах из стороны в сторону зона нагрева значительно расширяется и в процессе интенсивного нагрева вовлекаются обширные области шихты перед рабочим склоном, в районе сталевыпусканого отверстия, а также в "холодных" зонах между электродами.

По истечении времени работы горелок, значение которого введено в программу ведения плавки, автоматически закрываются отсечные и регулирующие клапаны на трубопроводах подачи газов, горелки отключаются и поднимаются в верхнее положение, а затем откатываются на тележках от печи.

4.2. Установка эжкерных ТКГ на ДСП-100И6 ОХМК

Конструкция установки сводовых поворотных ТКГ на ДСП-100 ЧМК во многом решает вопросы, связанные с её ремонтопригодностью. Однако при этом не устраивается принципиальный недостаток подобных и других установок, заключающийся в невозможности введения факела под слой шихты на уровне подины печи, что обеспечило бы максимальную эффективность использования топлива. Даже при полном опускании сводовых горелок в печь до уровня откосов ванны большая часть шихты, расположенная ниже, оказывается не подверженной воздействию факела. Но и такое опускание горелок не всегда возможно, поскольку на ряде плавок лом может располагаться под горелками вплотную к стенкам печи.

Решению этой проблемы способствовало бы размещение горелок под слоем шихты, в подине. Однако реализация способов нагрева шихты, при которых горелки расположены в подине печи, несмотря на их высокую энергетическую эффективность, связаны со значительными трудностями. В жаркие периоды плавки, например, возникает необходимость продувки горелок инертным газом. Горелки не могут быть выполнены водоохлаждаемыми и должны изнашиваться вместе с футеровкой подины, которая при этом значительно ослабляется. Все это накладывает на конструкцию горелок те же ограничения, что и на

донные продувочные фурмы кислородных конвертеров. Такие горелки могут успешно использоваться, в основном, для вдувания в жидкую ванну пылеугольного топлива и кислорода, как это имеет место в процессе К-ЕС, но они мало пригодны для нагрева лома.

В Научно-исследовательском институте металлургии (НИИМ) предложена новая концепция ДСП с высокомощными ТКГ. Согласно этой концепции нельзя ограничиваться при определением установок горелок к традиционным конструкциям печей, сложившихся без учета требований, обеспечивающих эффективное использование в ДСП больших количеств топлива. Необходимо, идя навстречу этим требованиям, существенно менять и основные параметры самой печи, поскольку ТКГ должны рассматриваться уже в качестве не вспомогательных, а равноправных с электрическими дугами источников энергии. Основываясь на этой концепции при непосредственном участии автора был разработан принципиально новый способ установки высокомощных ТКГ на ДСП, сочетающий преимущества вертикальных сводовых и подовых горелок и устраняющий их недостатки.

Новый способ установки ТКГ требует существенного изменения конфигурации подины печи. В подину встраиваются дополнительные эркерные камеры, аналогичные той, которая служит для эркерного выпуска плавки. Многослойные вертикальные горелки с боковым расположением сопел вводятся в печь через водоохлаждаемые сводики этих дополнительных камер. Сводики располагаются на минимальной высоте, исключающей их оприкосновение с жидким металлом и шлаком при наклонах печи. При такой установке горелок факелы могут вводиться под слой лома на уровне подины печи, а сами горелки не требуют особой защиты, т.к. в жидкие периоды плавки выводятся из рабочего пространства.

Первая установка двух эркерных ТКГ суммарной тепловой мощностью 40 МВт была разработана применительно к реконструкции высокомощных печей типа ДСП-10016 ЭСПЦ Орского-Халиловского металлургического комбината. Дополнительная камера для ввода эркерных ТКГ, закрыта водоохлаждаемым сводиком, размещена в зоне рабочего окна печи.

Установка эркерных ТКГ полностью механизирована и автоматизирована. Ввод ее в работу производится автоматически, согласно АСУ ТП плавки. Предусмотрено также и ручное управление горелками с высшего пульта, расположенного на рабочей площадке. Каждая горелка может вводиться в работу самостоятельно, независимо от другой.

В отличие от других установок горелок, процесс нагрева шихты поворотными эркерными горелками имеет принципиальные особенности. Он сопровождается непрерывным поступлением относительно холодного лома в зону действия факелов за счет опускания верхних слоев шихты по мере осаживания нижних. В результате устраняются местные перегревы лома и в течение длительного времени поддерживается конвективный контакт факелов с развитой поверхностью нагреваемой шихты. Повороты и изменения положения горелок по высоте обеспечивают относительно равномерное распределение грекущих газов по всему сечению столба шихты, что еще более повышает эффективность использования топлива. Эркерные ТКГ могут быть использованы также и для работы на пылеугольном топливе, вдуваемом в потоке кислорода, как это реализовано в К-ES процессе.

4.3. Установка эркерных ТКГ на печи нового поколения типа ДСП-100 УМЗ

Электропечь типа ДСП-100 УМЗ, разработанная коллективом специалистов НИИМ, Узбекского металлургического завода (г.Бекабад), Сибэлектротерма (г.Новосибирск) и Челябинского Гипромеза, предназначена для реконструкции ЭСПЦ УМЗ. На первом этапе реконструкции она заменит одну из трех действующих в цехе печей типа ДСП-100 НЗА. Конструкция новой печи выключает установку эркерных ТКГ, суммарная тепловая мощность которых составляет 40 МВт. Печь оснащена печным трансформатором мощностью 80 МВА. Расчетная длительность плавления составит не более 45-50 мин. расход электроэнергии на плавление - 370-380 кВт·ч/т, ожидаемая производительность печи 600 тыс.т заготовки в год.

В отличие от печи ДСП-100И6 ОХМК, на печи ДСП-100 УМЗ дополнительная камера для ввода эркерных ТКГ, закрытая водоохлаждаемым сводиком, размещена в боковой части подины под газоотводящим патрубком. Эркерные горелки не располагаются на сводике дополнительной камеры, а с помощью механизмов отворота могут отводиться от печи, что повышает их эксплуатационную надежность и облегчает обслуживание.

В И В О Д И

I. Для исследования малоизученных вопросов нагрева слоя лома топливно-кислородным факелом в условиях ДСП и разработки на этой основе новых более эффективных горелочных устройств разработан огневой стенд, обеспечивающий прямое измерение энталпии нагретой шихты по способу динамического калориметрирования с погрешностью, не превышающей 1,2-1,4 %.

2. Методами холодного гидравлического моделирования установлено, что с увеличением объемной плотности шихты ρ от 0,8 до 4,7 т/м³ объем активной зоны действия факела V уменьшается в несколько раз, а сама зона локализуется вблизи водоохлаждаемой стенки модели. Величина суммарной поверхности контакта факела с шихтой S в зоне V с увеличением ρ сначала возрастает, а при $\rho = 2,2-2,4 \text{ т}/\text{м}^3$ стабилизируется на максимальном уровне. Подобный характер рассматриваемых зависимостей наблюдается как для поворотной, так и для горелки с постоянным направлением факела, однако в последнем случае абсолютные значения V и S уменьшаются в 2,0-2,5 раза.

3. Установлено, что с увеличением ρ от 0,8 до 2,2-2,4 т/м³ средние по S значения коэффициента теплоотдачи от факела к шихте α в зоне V снижаются от значений порядка 100 Вт/м².к до 30 Вт/м².к, а при более высоких ρ практически не изменяются.

4. Отгневое моделирование нагрева лома на стенде с незолированными водоохлаждаемыми стенками показало, что зависимости коэффициента полезного теплоспользования η от ρ в этом случае носят отчетливо выраженный экстремальный характер. Установлено, что независимо ни от длительности нагрева, изменяющейся от 7 до 30 мин, ни от работы горелки в поворотном или стационарном режиме, максимальные значения η достигаются при одних и тех же ρ , лежащих в узких пределах 2,2-2,4 т/м³. При среднемассовых температурах шихты в зоне V 950-1000 °С максимальные значения η для горелки с изменяющимся направлением факела составляют 0,73-0,75. Для стационарной горелки эти значения снижаются на 5-8 % (абс.).

5. На стенде с теплоизолированными стенками характер зависимости η от ρ существенно меняется. С увеличением ρ до 2,2-2,4 т/м³ значения η возрастают, а затем стабилизируются на уровне, который при больших длительностях нагрева на 20-30 % (отн.) превышает соответствующие максимумы при отсутствии изоляции. Изменение характера кривых $\eta=f(\rho)$ при резком изменении уровня тепловых потерь через стенки стенда объясняется установленными при холодном моделировании зависимостями V , S и α от ρ .

6. Данные, полученные методами физического моделирования, показывают, что на современных ДСП, обсрудованных водоохлаждаемыми сводами и стеновыми панелями, коэффициенты полезного использова-

ния топлива η могут достигать весьма высоких значений, близких к КПД электроустановок печей. Основными условиями эффективного повышения мощности топливовоздородных горелочных устройств ДСП и количества полезно используемого топлива являются: соответствующее увеличение поверхности кусков лома, контактирующих с факелами, за счет распределенного их ввода в олой шихты, а также использование лома оптимальной объемной плотности.

7. Показана возможность и результативность исследований высокомощных газокислородных горелок внешнего смешения на их лабораторных моделях. Установлено, что при геометрическом подобии горелок, одинаковых с образцом топливе и окислителе, а также близких значениях начальных скоростей истечения струй обеспечивается удовлетворительная степень подобия геометрических, тепловых и акустических характеристик факелов, достаточная для сопоставления различных конструктивных вариантов и выбора из них наилучших для дальнейших испытаний в промышленных условиях. Такой методический подход позволяет резко сократить затраты времени и средств, необходимые для разработки и внедрения новых конструкций горелок для ДСП и других высокотемпературных установок.

8. С использованием предложенной методики путем исследований ряда конструктивных вариантов лабораторных горелок, включаящих фотографирование факелов, измерение тепловых потоков и шумовых характеристик, разработана оригинальная девятисопловая газокислородная горелка внешнего смешения, предназначенная для высокомощных, крупнотоннажных ДСП. Горелка отличается хорошим смешением топлива, кислорода, большой кинетической энергией и высокой нагревательной способностью факела в условиях ДСП при относительно низком уровне шума. Максимальная мощность горелки составляет 20 МВт, что применительно к горелкам на ДСП не имеет аналогов.

9. Длительные промышленные испытания разработанной девятисопловой горелки на 100-т ДСП ЭСПЦ-2 ЧМК подтвердили её эффективность и высокую эксплуатационную надежность. При удельном расходе топлива $7,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ расход электроэнергии на расплавление шихты сократился на 53 кВт·ч/т (9,2 %), а длительность плавления на 28 мин (13,8 %).

Работа горелки не оказывает влияния на общий уровень шума печи, поскольку величина последнего (II5-II6 дБ,А) значительно превышает уровень шума собственно горелки (I98-I10 дБ,А). Этот уровень существенно ниже шума обычной двухсопловой горелки, который при равной мощности составляет II2-II4 дБ,А.

Ю. Созданные многосопловые горелки нашли применение в проектах высокомощных 100-т ДСП нового поколения, разработанных в Челябинском научно-исследовательском институте металлургии (НИИМ) совместно с Челябгипромезом и предназначенных, в частности, для проводимой в настоящее время реконструкции ЭСЦ Узбекского метзавода и ОХМК. Предусмотрено оборудование этих печей двумя такими горелками общей мощностью 40 МВт.

II. На ДСП конструкции НИИМ реализован новый тип установок горелок с размещением их в дополнительных эркерах, выполненных в подиуме и откосах печи. Установки эркерного типа в сочетании с поворотными горелками обеспечивают вход факелов под слой шихты на уровне подиума с равномерным распределением потоков газов по сечению рабочего пространства печи. Таким образом создаются условия теплопередачи, близкие к оптимальным.

Основные научные результаты диссертационной
работы представлены в публикациях

1. Предварительный нагрев шихты газом "снаружи" горелкой в плазменных дуговых сталеплавильных печах /Ю.Н. Тулуевский, Г.А. Конюченко, И.М. Магидсон и др./ // Изв. вузов. Черная металлургия.- 1986. - № 7. - С. 42-44
2. Интенсификация выплавки стали и сплавов в плазменных дуговых печах. / Г.А. Конюченко, И.М. Магидсон, Ю.Н. Тулуевский и др. // Металлург. - 1988. - № 2. - С. 28-30.
3. Комбинированное использование электроэнергии и топлива в дуговых сталеплавильных печах. / С.Ф. Соколовских, Г.А. Конюченко, И.М. Магидсон и др. // Интенсификация выплавки металла с использованием природного газа и кислорода. - Киев. - 1987. - С. 68-72.
4. Оконная газокислородная горелка для мощной дуговой сталеплавильной печи. / И.М. Магидсон, Р.Д. Ибатуллин, Ю.Н. Тулуевский и др. // Черная металлургия. - 1989. - № 7. - С. 55-56.
5. Сводовая газокислородная горелка усовершенствованной конструкции. / И.М. Магидсон, Г.А. Конюченко, Ю.Ф. Маменко. // Информ. лист № 599-87 - Челяб. межотрасл. территориальный центр НТИ и пропаганда.
6. Исследование нагрева лома газокислородной горелкой в дуговой сталеплавильной печи методами огневого моделирования. / И.М. Магидсон, Ю.Н. Тулуевский, И.Ю. Зинурсв. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1992. - № 3 - С. 57-70.
7. А.с. 1333965 СССР, МИН 23.Д/4/38. Опубл. Б.И. - 1987. -

Подписано к печати 14.04.93. Формат 60X90 1/16. Печ.л. 1,25.
Уч.-кад.н. 1. Тираж 100 экз. Заказ 82/205.

УСП издательства. 454060, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 70.