

05.16.02  
В 677

На правах рукописи

**ВОЛКОДАЕВ Александр Николаевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ  
ВЫПЛАВКИ ПОЛУПРОДУКТА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ  
В ВЫСОКОМОЩНОЙ ДУГОВОЙ  
ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ**

Специальность 05.16.02 - **Металлургия чёрных металлов**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

Челябинск  
2000

Работа выполнена в ОАО «Мечел» и на кафедре «Физическая химия» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук,  
профессор Токовой О.К.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,  
профессор Гудим Ю.А.

кандидат технических наук  
Шумаков А.М.

Ведущее предприятие – ОАО «Златоустовский  
металлургический завод».

Защита состоится 24 мая 2000 г., в 14.00,  
на заседании диссертационного совета Д053.13.04  
в Южно-Уральском государственном университете.

Адрес: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан \_\_\_ апреля 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Мирзаев Д.А.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Высокоомощные дуговые сталеплавильные печи (ДСП) наряду с кислородными конверторами являются в настоящее время, основными и наиболее перспективными агрегатами для массового производства стали.

Конкурентноспособность различных способов производства стали определяется их энергетической эффективностью. Рассматривая перспективы развития электросталеплавильного производства в современных условиях необходимо учитывать фактор неизбежности дальнейшего удорожания всех, прежде всего наиболее высококачественного вида энергии – электрической. Поэтому, в соответствии с общими принципами рыночной экономики, снижение расходов электроэнергии и общих энергетических затрат следует считать одной из самых актуальных проблем дальнейшего развития отечественного производства электростали. Расход электроэнергии зависит от большого числа взаимосвязанных факторов, определяющим среди которых являются параметры электрического режима плавки. С этой позиции для высокоомощных ДСП главным является использование технического потенциала печных трансформаторов на протяжении всего периода плавки, что связано с разработкой технологических приемов, обеспечивающих экранирование электрической дуги в период доплавления и нагрева ванны.

Актуальность данной работы определяется необходимостью сохранения и усовершенствования экономически и социально значимого промышленного производства коррозионнотойких марок стали на основе использования высокоуглеродистого феррохрома, а также целесообразностью улучшения технических, социальных и экологических показателей производства нержавеющей стали.

Кроме того, в связи с производимой реконструкцией электросталеплавильного производства ОАО «Мечел» с заменой печей и установкой мощных трансформаторов, результаты работы могут быть использованы при освоении электротехнологических режимов плавки в высокоомощных ДСП и способов управления ими.

**Цель работы.** Целью работы является разработка энерготехнологического режима плавления полупродукта нержавеющей стали в высокоомощной дуговой печи ДСП-100И7, который включает электрический режим периода расплавления и нагрева металла, метод расчета рациональных электрических параметров, разработку критерия количественной оценки расплавления металлошихты в печи на основе анализа теплового состояния электрической дуги, технологию вспенивания хромистого шлака для работы на длинных дугах и технологию использования топливо-кислородной горелки в высокоомощной печи.

В связи с этим были поставлены следующие задачи.

1. Исследовать основные характеристики в высокоомощной дуговой печи, разработать методику расчета основных параметров энерготехнологического режима плавки коррозионнотойких марок стали и способ управления электрическим режимом плавки полупродукта нержавеющей стали в высокоомощной ДСП.
2. Исследовать поведение электрической дуги переменного тока, разрабо-

тать аппаратуру для экспериментального изучения гармонического состава напряжения электрической дуги, исследовать гармонический состав и интерпретировать изменения величины высших гармоник в течении периода плавления и нагрева металла в высокомошной ДСП.

3. Разработать технологию вспенивания хромистых шлаковых расплавов, обеспечивающую экранирование длиной дуги при работе на высоких ступенях печного трансформатора.

4. Выполнить анализ технических характеристик и обосновать тип и мощность топливокислородной горелки для высокомошной дуговой сталеплавильной печи.

#### **Научная новизна.**

1. Исследовано поведение электрической дуги переменного тока в высокомошной дуговой электросталеплавильной печи. Изучен гармонический состав напряжения дуги и дана интерпретация изменения величины амплитуды высших гармоник напряжения в течении периода плавления и нагрева металла.

2. Разработан метод расчета основных параметров и способ управления энерготехнологическим режимом плавки полупродукта коррозионностойких марок стали на основе характеристики электрической дуги в высокомошной дуговой сталеплавильной печи.

3. Выполнен термодинамический анализ состава и физических свойств хромосодержащих шлаковых расплавов, формирующихся при расплавлении, и на его основе разработана технология вспенивания хромистых шлаков, обеспечивающих экранирование электрической дуги в высокомошной сталеплавильной печи.

4. Обоснован выбор работы топливокислородной горелки в высокомошной ДСП, изучено влияние ТКГ на качественные характеристики полупродукта коррозионностойкой стали.

#### **Практическая значимость.**

1. Разработан и внедрен на ОАО «Мечел» энерготехнологический режим плавки полупродукта нержавеющей стали в ДСП-100И7.

2. Даны рекомендации по использованию амплитуд высших гармоник в качестве контролируемого параметра для разработки замкнутой системы динамического управления в высокомошной дуговой сталеплавильной печи.

3. Внедрена в производство технология вспенивания хромистых шлаковых расплавов для экранирования дуг при работе на высших ступенях печного трансформатора.

4. Разработана и внедрена в производство оконная топливокислородная горелка мощностью 9,3 МВт. Определены основные параметры ее применения.

5. Годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составил 9 млрд. 598 тыс.руб. (в ценах 1997г.)

**Публикации и апробация работы.** По материалам диссертационной работы опубликовано 5 статей, получен патент Российской Федерации и решение о выдаче патента РФ. Материалы работы доложены и обсуждены на 49-ой и 50-ой научно-технических конференциях ЮУрГУ (Челябинск 1997, 1998г.), на X международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Челябинск, 1998г.).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, библиографического списка из 92 наименований и 19 приложений, изложенных на 178 страницах машинописного текста, содержит 14 таблиц и 29 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *первой главе* дана общая характеристика современного представления о мощной электрической дуге в сталеплавильной печи, рассмотрено влияние температуры, условий охлаждения и физических свойств окружающей среды на электрическую проводимость дуги. Приведены данные, характеризующие дугу как электрический проводник, имеющую определенные геометрические размеры и обладающую электромагнитными свойствами. Рассмотрены данные по магнитогидродинамическим явлениям в дуге и заглублинии электрической дуги в шлак и металл.

Приведены данные, показывающие, что плотность теплового потока, падающего на футеровку стен и свода от дуги с учетом ее экранирования электродом, шлаком и металлом, определяются отношением открытой части дуги  $l_{отк}$  к длине  $l_d$ . Таким образом, экранирование дуги шлаковым расплавом, металлом, электродом позволяет значительно увеличить теплоотдачу дуги металлической ванны и уменьшить ее тепловое воздействие на футеровку печи.

Отмечено многообразие подходов к способам управления энерготехнологическими режимами, а так же значительное количество факторов, влияющих на него. Общим у них является директивность задания параметров вводимой мощности по периодам плавки. Поэтому, несмотря на большое количество работ, посвященных этой проблеме, данный вопрос нельзя считать полностью рассмотренным.

В литературном обзоре изложены основы теории вспенивания шлака в дуговых печах и проанализированы факторы, влияющие на образование пенистого шлака. Отмечено влияние физико-химических свойств, химического состава, температуры, вязкости, поверхностного натяжения, присутствия частиц, неассимилированных шлаком, окиси, магнезии, хромита на устойчивость шлаковой пены. Анализ показал, что, регулируя состав хромосодержащих шлаков, можно достичь такого его состава, при котором физические свойства обеспечат его вспенивание как при обычном электросталеплавильном процессе.

Последний раздел литературного обзора посвящен анализу применения топливокислородной горелки в электросталеплавильном производстве.

**Энерготехнологический режим выплавки нержавеющей стали в высоко-мощной дуговой сталеплавильной печи.** Разработанная методика расчета режима плавки предполагает три этапа. Первый и главный этап – это определение характеристик электрической дуги. По результатам хронометража 5...10 плавков рассчитывали характеристики электрической дуги для каждой ступени печного трансформатора и стадии плавления. Характеристики дуги представляли в виде зависимости от тока  $tg\varphi_d$ , равного отношению индуктивного ( $x_d$ ) и ак-

тивного ( $r_d$ ) сопротивлений (рис.1). Для заданного значения тока дуги  $I_d$  по кривым  $tg\varphi_d = f(I_d)$  находили величину  $tg\varphi_d$ , при известных параметрах короткой сети рассчитывали падение напряжения на дуге  $U_d$ , а затем – все параметры электропечной установки.

Выбор характеристики дуги в виде отношения реактивного сопротивления к активному, основан на представлении дуги в виде комплексного сопротивления, включающего параллельно соединенные активное, индуктивное и емкостное сопротивления. На этом этапе по результатам предварительных опытов рассчитывали активное  $r_{kc}$  и реактивное  $x_{kc}$  сопротивление короткой сети.

Второй этап включает анализ технологии плавки, заданной марки стали с разделением на отдельные стадии и составление графика расплава. На этом этапе, исходя из хронометража и анализа технологии, составляли график расплава по стадиям с указанием массы расплавляемой шихты и массы загружаемых шлакообразующих компонентов. При этом учитывали энергию химических реакций и тепловые потери печи.

Третий этап включает выбор рациональной величины тока и напряжения трансформатора, а затем – расчет параметров энерготехнологического режима. Для каждой стадии расплава выбирали ток дуги, который не должен превышать допустимого тока электродов. Степень напряжения выбирали исходя из возможности экранирования дуги загруженной шихтой. При хорошем экранировании дуги легковесной шихтой использовали высокие ступени печного трансформатора, при переработке тяжеловесной шихты – применяют ступени трансформатора с пониженным напряжением.

Период расплава условно делили на стадии. Расчетное количество вводимой на каждой стадии энергии эквивалентно затрате энергии, необходимой для расплавления определенной массы металлической шихты и шлакообразующих металлов.

Задавая массу расплавляемой шихты, массу шлакообразующих, химический состав шихты, тепловые потери печи, коэффициент дуги, сопротивления короткой сети, рассчитывали электрические и рабочие параметры печи для выбранной ступени напряжения и тока:

Коэффициенты мощности электропечной установки

$$\lambda = r_\phi / \sqrt{r_\phi^2 + x_\phi^2}, \quad (1)$$

$$\gamma = x_\phi / r_\phi. \quad (2)$$

Активная мощность дуги

$$P_d = 3I_d^2 r_d = 3U_d I_d \cos \varphi_d. \quad (3)$$

Мощность потерь в короткой сети

$$P_{ном} = 3I_d^2 r_{kc}. \quad (4)$$

Активная мощность, потребляемая из сети

$$P_o = P_d + P_{ном}. \quad (5)$$

Индекс Швабе

$$R_r = P_o U_o / 3a^2. \quad (6)$$

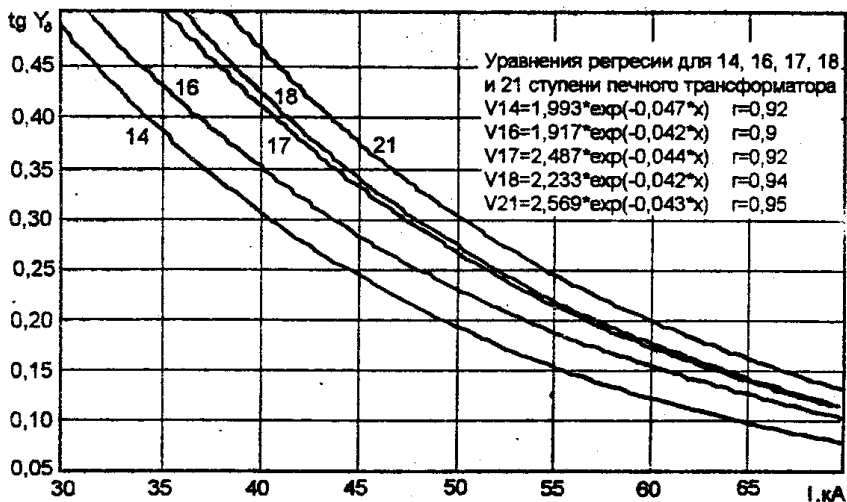


Рис. 1. Влияние тока на коэффициент дуги

Производительность печи

$$Q = \frac{(1 + k_{хим})P_o - P_{пот} - P_{ин}}{h} \quad (7)$$

Удельный расход электроэнергии

$$W = \frac{P_o}{Q}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.} \quad (8)$$

Затраты электроэнергии на данной стадии расплавки,

$$A_o = Wm_m, \text{ кВт} \cdot \text{ч.} \quad (9)$$

Время работы на данной стадии

$$t_p = A_o / P_o. \quad (10)$$

Где  $a$  – расстояние от торца электрода до стен печи;  $h$  – энтальпия шихты и шлакообразующих с учетом химического состава шихты;  $h = \frac{h_o + \xi h_{ин}}{1 + \xi}$ ,

$$h_o = h_1 m_1 + h_2 m_2 + \dots + h_n m_n,$$

$m_n$  – масса химических элементов в составе шихты в процентах;

$h_n$  – энтальпия химических элементов;

$h_{ин}$  – энтальпия извести;

$\xi$  – отношение массы шлакообразующих к массе шихты, расплавленных на данной стадии.

Параметры, рассчитанные по уравнениям 1-10, характеризуют энерготехнологический режим данной стадии высокоомощной ДСП

В табл.1 представлен энерготехнологический режим расплава нержавеющей стали в высокоомощной печи ДСП-100И7 Челябинского металлургического комбината – ОАО «Мечел». Режим рассчитан для электродов с допустимым током 60 кА и плотностью 20,5 А/см<sup>2</sup> при напряжении сети до 34 кВ.

Таблица 1

## Энерготехнологический режим плавления коррозионностойкой стали в печи ДСП-100И7

Стадия	Номер ступени	Масса, т.		Уст, В	Р <sub>т.п</sub> МВт	I <sub>ср</sub> %	I <sub>ср</sub> КА	P <sub>ср</sub> МВт	A <sub>ср</sub> кВт·ч	T, мин	W, Вт·ч/т	R, МВт·В/м <sup>2</sup>	λ	γ
		4	5											
1	2	3								11	12	13	14	15
Плавление завалки	14	528,7	4,5	0,5	2	0,16	40	26,0	2163	5	481	535	0,747	0,89
	18	670,5	15,0	1,5	2	0,22	55	40,3	7134	11,3	475	904	0,672	1,10
	18	670,5	15,5	1,0	2	0,22	60	40,9	7472	11,7	481	810	0,624	1,25
Плавление подвалки	14	528,7	4,0	0,5	2	0,16	40	26,0	1930	4,5	483	535	0,747	0,89
	17	645,8	14,0	0,75	2	0,18	55	38,9	6612	10,9	472	826	0,672	1,10
	17	645,8	14,5	0,75	2	0,17	60	39,3	7025	11,1	484	734	0,623	1,26
	16	601,4	33,5	1,0	4	0,12	60	35,0	1483,6	25,4	443	556	0,597	1,35
Итого			101	6,0					47172	799				



### Исследование электрической дуги переменного тока в высокоомощной печи.

Исследование поведения электрической дуги переменного тока высокоомощной дуговой электросталеплавильной печи ДСП-100И7 с трансформатором 80МВА в зависимости от тепловых условий ее горения, проводили при выплавке коррозионностойких и углеродистых марок стали. Для снятия осциллограмм тока и напряжения использовали двухлучевой осциллограф «Orsillar Diolo» фирмы «Сименс», который был подключен по интерфейсу RS232 с ПЭВМ рабочего места сталевара АСУ ТП печи. Сигналы тока и напряжения (5В) снимали с блока регулирования мощности.

Исследование показало, что дуга в высокоомощной ДСП горит достаточно устойчиво. Осциллограммы тока и напряжения на протяжении всего периода расплава не имеют прерываний и близки по форме к синусоидам. Причем, дуга на жидком металле горит более устойчиво (рис. 2), чем в начале расплава на холодной и твердой шихте (рис. 3). Это связано с тепловыми условиями горения дуги. Кроме того, дуга на коррозионностойких марках стали, горит более устойчиво, чем на рядовых углеродистых сталях. Это связано, по-видимому, с тем, что легирующий элемент хром имеет более низкий потенциал ионизации, чем железо, что и определяет состав, свойства газовой среды и ее температуру.

Обработку записанных осциллограмм проводили с помощью пакета программ Quattro Pro. Для количественной оценки степени отклонения формы кривой напряжения от синусоиды проводилось разложение функции напряжения в ряд Фурье.

Для расчета коэффициентов ряда Фурье

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos k \cdot \omega t + \sum_{k=1}^n b_k \sin k \cdot \omega t$$

По имеющимся значениям периодической функции в точках за один период значения коэффициентов вычисляли по уравнениям

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \cos 2\pi \frac{t_i}{T}, \quad b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \sin 2\pi \frac{t_i}{T},$$

где:  $T$  – период функции;  $t_i = \frac{T}{n} i$  – значение абсциссы  $i$ -ой точки,  $n$  – число точек;

$k$  – номер гармоники.

Рассчитанная с использованием коэффициентов ряда Фурье кривая напряжения хорошо совпадает с записанными осциллограммами напряжения, что свидетельствует о правильности выполненного разложения по гармоникам.

Установлено, что тепловые условия горения дуги сильнее вносят искажения в форму кривой напряжения, чем тока, что позволяет при анализе осциллограмм напряжения более четко выделять весь спектр гармоник как четных, так и нечетных.

При анализе осциллограмм напряжения они были разложены по гармоникам, при этом каждую гармонику вычисляли по уравнению:

$$y_k(t) = A_k \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (11)$$

$$\text{где } A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}. \quad (12)$$

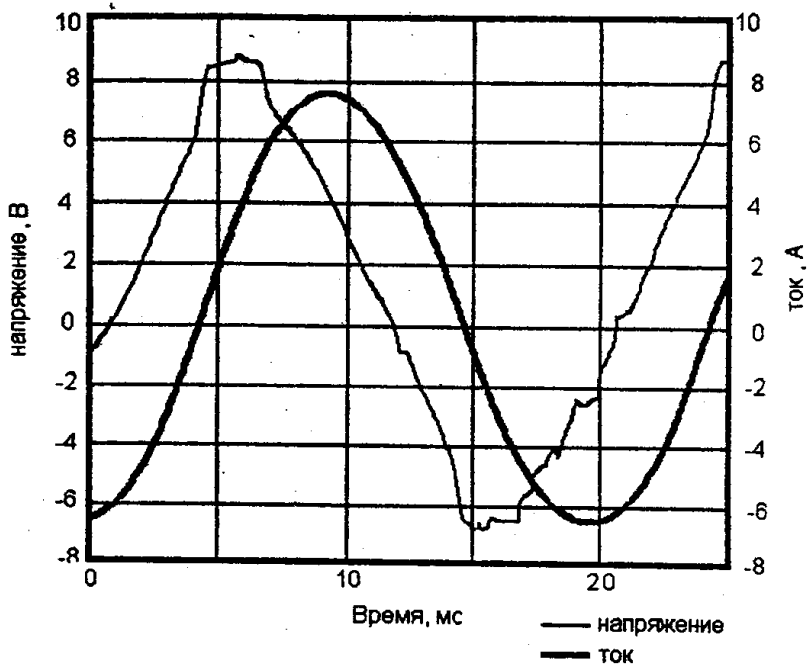


Рис.2. Осциллограммы тока и напряжения при наличии жидкого металла под дугой

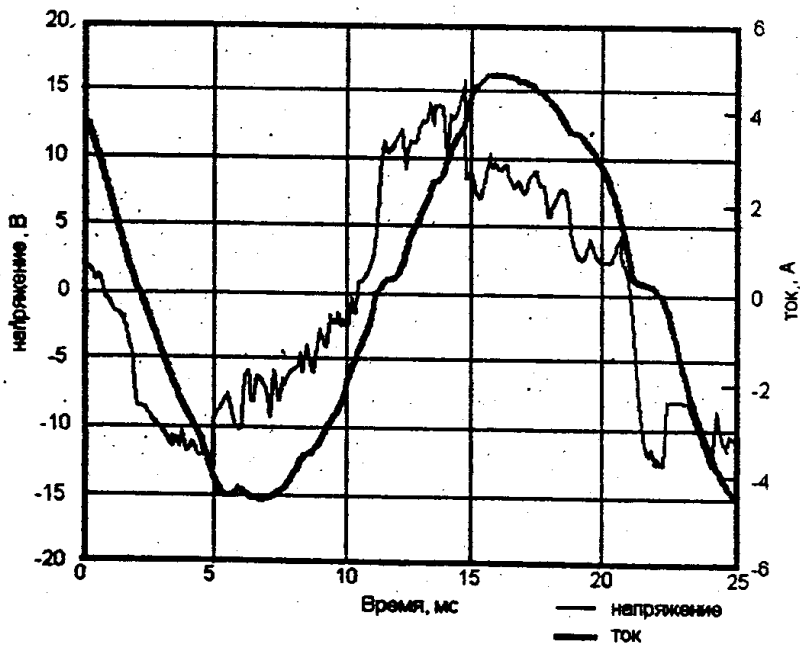


Рис.3. Осциллограммы тока и напряжения в начальный период расплава

По результатам расчетов построены диаграммы (рис.4), где величина гармоник приведена в процентах от величины первой гармоники.

$$\Gamma_k = \frac{A_k}{A_1} 100\%, \quad \varphi = \varphi_k - \varphi_1.$$

На рис.4  $\Gamma_k$  – относительная амплитуда,  $\varphi$  – относительная фаза.

Установлено, что высота амплитуды нечетных гармоник существенно больше, чем четных (рис.4). Величина в период расплавления составляет 5-20%, в то время как любая из четных гармоник не превышает 5% от значения первой. Когда шихта расплавилась и дуга горит на жидком металле, величины как четных, так и нечетных гармоник составляют не более 2-3% от первой.

Таким образом, нечетные гармоники более предпочтительны для интерпретации тепловых условий горения дуги в ДСП, так как изменения их амплитуды происходят в более широких пределах.

Изучение гармонического состава напряжения электрической дуги высокомошной печи проводилось с помощью разработанной аппаратуры, состоящей из ряда полосовых фильтров с полосой пропускания частот кратных частоте питающей сети. Фильтры собирали на одном операционном усилителе и после предварительного расчета настраивали с помощью стандартного генератора импульсов. Фильтры подключали к электрододержателю и подине печи. Сигналы, пропорциональные амплитудам выделенных гармоник, через усилители регистрировали самопишущим потенциометром Н-3020.

С помощью опытной установки на диаграммную ленту записывали четыре первых нечетных гармоники (третью, пятую, седьмую и девятую) в течение всей плавки. Одновременно с помощью УВК фиксировали основные параметры энерготехнологического режима. Анализировали гармонический состав напряжения дуги при расплавлении нержавеющей марки стали на твердой шихте, а также углеродистых марок стали на твердой шихте и с использованием в шихте жидкого чугуна (25...30 т).

Анализ гармонического состава показал, что информативность гармоник уменьшается по мере увеличения их номера. Третья и пятая несут, видимо, более комплексную информацию о ходе расплава, которую в данной работе интерпретировать не удалось. Возможно, это связано с химическим составом расплавляемой шихты. Информативность девятой и седьмой гармоник, более проста (рис.5) и она сводится к зависимости их амплитуды от температуры материала, т. е. наличия в печи жидкой ванны или твердой шихты, степени экранирования дуги шлаком. Уменьшение амплитуды седьмой и девятой гармоник или их полное исчезновение означает, что электрическая дуга горит на жидкую металлическую ванну, что является своеобразным сигналом к проведению очередных технологических операций (подвалки шихты, продувки металла, изменения электрического режима и др.). Увеличение амплитуды высших гармоник при горении дуг на жидком металле является своеобразным индикатором раскрытия дуг, несоразмерности длины дуги и толщины вспененного шлака, и служит сигналом к принятию соответствующих технологических решений по уменьшению длины дуги или увеличению толщины вспененного шлака.

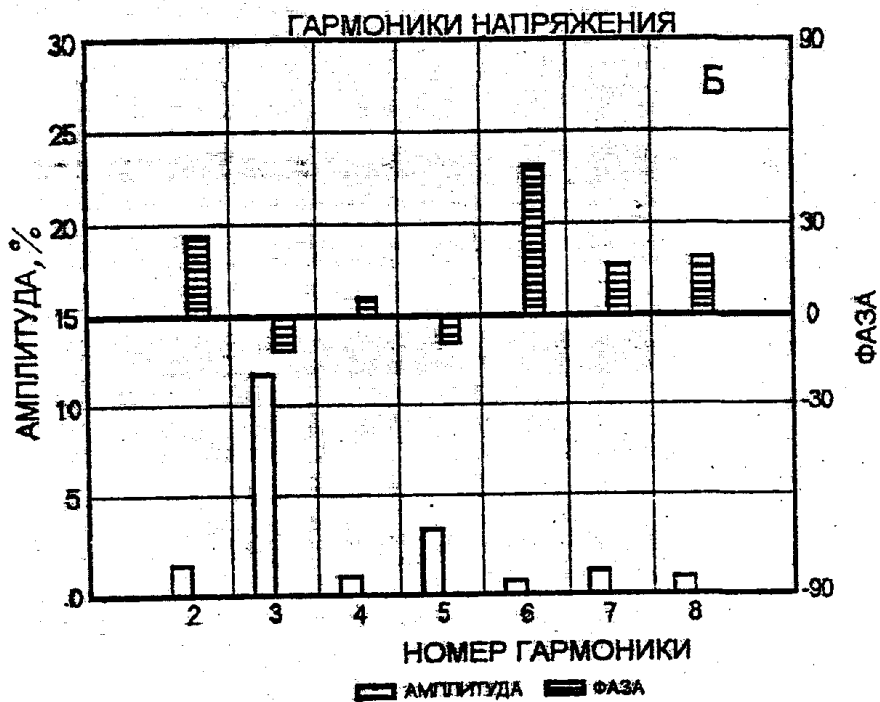


Рис.4. Величина амплитуды высших гармоник  
 А – начало расплава, Б – работа на жидкой ванне



Рис.5. Амплитуда седьмой (А7) и девятой (А9) гармоник при расплавлении углеродистой легковесной шихты (а), тяжеловесной шихты коррозионностойких марок стали (б) и углеродистой шихты при использовании жидкого чугуна (в)

Таким образом, использование высших гармоник в качестве контролируемого параметра создает предпосылки для разработки замкнутой системы управления электрическим режимом. Создание адаптивных систем управления электрическим режимом особенно важно в условиях работы ОАО "Мечел", перерабатывающего предварительно неподготовленную негабаритную шихту.

Разработка технологии вспенивания хромосодержащих шлаков в дуговой сталеплавильной печи. Хромистые шлаки, формирующиеся в ДСП100И7 при расплавлении полупродукта нержавеющей стали, представляют собой сложную шлаковую систему, содержащую 28..45% CaO, 17..32% SiO<sub>2</sub>, 2..30% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1..7% FeO, 3..10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6..15% MgO, 1..3% MnO. Для определения области вспениваемости шлаков по методике, разработанной на кафедре физической химии ЮУрГУ, выполнен термодинамический расчет фазовых равновесий в системе CaO-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, сопряженной с областью существования металлических расплавов. Активности компонентов металлического расплава рассчитывали с помощью параметров взаимодействия по теории Вагнера.

На рис. 6 представлены результаты расчетов координат поверхности ликвидус оксидной системы, содержащей CaO-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-5%FeO-5%MgO-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в интервале температур 1525...1600 °С. Поверхность ликвидус здесь представлена в виде проекции на плоскость составов этих шлаков в координатах «основность шлака - Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>». Контрастными линиями диаграмма разбита на 4 поля, представляющие собой изотермические сечения поверхности ликвидус изучаемой оксидной системы указанных составов. Этими линиями заданы: *ab* - составы шлаков, равновесных с твердым раствором Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *bc* - с хроматами кальция CaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, *cd* - CaO. Область внутри поля *abcd* отвечает составу жидкого шлака.

Таким образом, диаграмма (рис. 6) позволяет выделить область шлаков, которые при конце плавления находятся в жидком состоянии и, следовательно, могут быть вспенены. Как видно из диаграммы (рис. 6) область гомогенности хромистых шлаков сложного состава зависит от температуры, содержания оксидов хрома и основности шлаков. Так в интервале температур 1525...1600 °С в

области жидкости шлаки, по-видимому, могут быть вспенены, если их основность не превышает 2, а содержание  $Cr_2O_3$  – не более 12...14%.

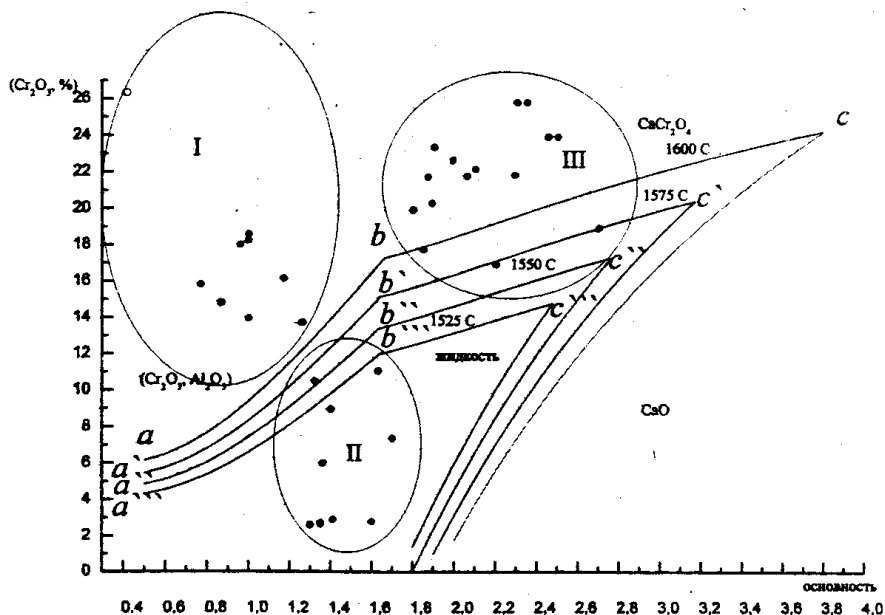


Рис. 6. Координаты линий ликвидус шлаков системы  $CaO-SiO_2-Cr_2O_3-5\%FeO-5\%MgO-5\%Al_2O_3$

Исследования проводили на промышленных плавках массой 100 т. В печь по обычной технологии загружали легированные и нелегированные металлоотходы, углеродистый феррохром, никель, известь, кокс. Завалку производили корзиной не более чем в два приема. Подвалку производили после израсходования около 40% электроэнергии, необходимой для расплавления всей шихты. Высоту вспененного шлака измеряли Г-образным металлическим стержнем и по углу наклона печи.

В основу исследования был положен метод предварительного (перед вспениванием) понижения уровня оксидов хрома в шлаках по расплавлению с последующей организацией процесса вспенивания. Для снижения уровня содержания оксидов хрома были использованы следующие технологические приемы: обеспечение оптимальной основности шлака; предварительное восстановление оксидов хрома из шлаков.

Для определения влияния основности шлака на содержание оксидов хрома на диаграмму (рис. 6), ограничивающую область гомогенности в многокомпонентной шлаковой системе  $CaO-SiO_2-Cr_2O_3-Al_2O_3-MgO-FeO$ , нанесли результаты серии из 33 опытных плавки, полученных при исследовании области вспенивания хромистых шлаков.

Все опытные данные можно условно разделить на три группы. К первой и третьей группе относятся плавки, где вспенивания шлака не происходило, а ко второй группе – плавки, проведенные под вспененным шлаковым расплавом. Последняя группа плавки имела основность 1,2...1,5 и содержание оксидов

хрома 2...13%. Как видно из рис. 6 она находится в области жидкого состояния шлаковой системы сложного состава.

Две другие группы шлаков имели либо основность около 1 при содержании  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в шлаке 14...26%, либо основность 1,8...2,6 и содержании от 20 до 28%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Судя по диаграмме (рис. 6) в первой области из жидкого шлака выпадает твердый раствор  $|\text{Cr}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3|$ , а во второй хромиты кальция. Такие шлаки были тугоплавки (температура ликвидус  $\sim 1770^\circ\text{C}$ ) и не вспенивались в ДСП.

Последнее обстоятельство хорошо согласуется с диаграммой состояния  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  (по Глассеру и Осборну), согласно которой область жидкого состояния шлакового расплава ограничивается содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в шлаке 14...15%. Таким образом, обеспечение основности шлака 1,2...1,5 является необходимым техническим приемом для обеспечения эффективного вспенивания шлака.

Предварительное восстановление проводилось: присадкой расчетного количества кокса в корзину или во время расплавления в печь необходимого количества ферросилиция (ферросиликохрома) из расчета введения в металл 0,30...0,35% кремния (после расхода 20 МВт/ч электроэнергии); введение в печь кокса массой до 0,5 кг/т, ферросилиция (ферросиликохрома) из расчета введения в металл 0,30...0,40% кремния и отходов алюминия 1,0...1,5 кг/т (после расхода 35...40 МВт/ч электроэнергии).

Ранняя присадка извести в сочетании с предварительным (перед вспениванием) вводом в печь восстановителей дают возможность понизить содержание оксидов хрома в шлаках по расплавлению до 6...15% и создают условия для улучшения процесса вспенивания шлака (рис. 7).

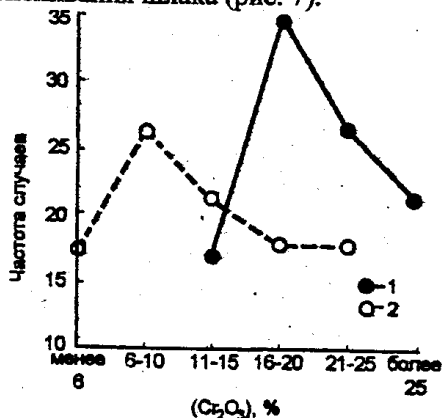


Рис. 7. Частотный график содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в шлаках без предварительного восстановления (1) и с предварительным восстановлением (2) шлака перед вспениванием

Процесс вспенивания шлака начинали после израсходования 38...40 МВт/ч (85% от всей энергии на расплавление шихты) при температуре металла 1450...1500  $^\circ\text{C}$ . По тракту сызучих через сводовое отверстие присаживались вспенивающие смеси. Всего было испытано пять вариантов смесей, содержащих известь, кокс, электродную крошку и карбид кремния в разных соотношениях.

После ввода смеси через сводовую фурму подавался кислород с расходом

20-25 м<sup>3</sup>/мин, через 5-10 минут расход кислорода увеличивался до 40 м<sup>3</sup>/мин и через 3-5 минут после присадки смеси шлак начинал вспениваться.

Наилучшие результаты по вспениванию шлака получены при использовании вспенивающей смеси состоящей из 2,5...5 кг/т известняка и 1,5...2,5 кг/т электродной крошки. Это связано с тем, что электродная крошка, обладающая большей плотностью, глубже проникает в шлаковый расплав, а выделяющийся при разложении известняка диоксид углерода улучшает кинетику протекающих в шлаке реакций.

В процессе проведения опытных плавов отмечали прекращение вспенивания за 3...5 минут до объемного окисления углерода. Температура металла в верхних слоях достигала 1650...1700 °С, а температура шлака была значительно выше. Прекращение вспенивающего эффекта можно объяснить тем, что температура шлака достигает таких величин, при которых вязкость и поверхностное натяжение пленки шлака становятся настолько малыми, что образующиеся пузырьки оксида углерода быстро всплывают через шлак в атмосферу печи, не вызывая сколько-нибудь заметного увеличения его объема.

Высота вспененного шлака в значительной степени зависит от содержания в нем оксидов хрома (рис. 8). При содержании в шлаках оксидов хрома на уровне 5-12% процесс вспенивания протекает активно и эффект сохраняется достаточно продолжительное время, при этом шлак поднимается на высоту 100...150 мм, практически экранируя электрические дуги.

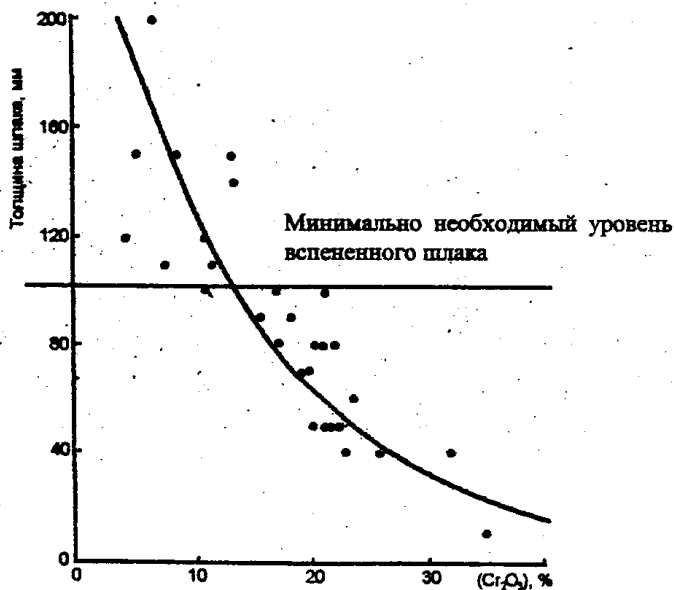


Рис. 8. Высота слоя вспененного шлака в зависимости от содержания оксидов хрома  
0 — высота слоя шлака в спокойном состоянии



На опытных плавках со вспениванием шлака температура воды, отходящей из стеновых и стеновых панелей была на  $5...10^{\circ}\text{C}$  ниже уровня максимальных величин, возрастает стойкость футеровки на 30 плавках, сократился расход электроэнергии на  $13,6 \text{ кВт/т}$

Таким образом, разработанная технология вспенивания хромистых шлаков при переплаве хромосодержащей шихты обеспечивает полное экранирование дуг при работе на высших ступенях печного трансформатора.

**Разработка конструкции и технология использования оконной топливокислородной горелки при расплавлении хромистой шихты в высокомошной дуговой печи.** Водоохлаждаемая топливокислородная горелка (ТКГ) внешнего смешения мощностью  $9,3 \text{ МВт}$  установлена на манипуляторе, конструкция которого позволяет перемещать горелку как в вертикальной так и горизонтальной плоскости и для работы вводится в загруженное окно печи. После окончания рабочего цикла выводится из окна и устанавливается рядом с печью.

Горелка предназначена для работы, как при наличии электрических дуг, так и без них. Она рассчитана на расходы природного газа и кислорода соответственно  $1000$  и  $2000 \text{ Нм}^3/\text{ч}$ . Кислород подводится к медной головке горелки по внутренней трубе, а природный газ по кольцевому каналу, образуемой внутренней трубой и водоохлаждаемым кожухом. Газ выходит из головки через щели, образованные 6 пазами в головке и водоохлаждающим кожухом. Кислород подается основным соплом диаметром  $32 \text{ мм}$  и шестью вспомогательными, ступенчатыми соплами с переменным сечением по длине канала. Ступенчатые сопла обеспечивают устойчивое горение факела на всех режимах работы горелки за счет резкого снижения скорости истечения кислорода, что стабилизирует зажигание факела и уменьшает уровень шума. Длина факела горелки составляет  $1...1,5 \text{ м}$ , что позволяет эффективно нагревать металлошихту, лежащую на пороге, и не оказывать вредного воздействия на электроды.

С целью установления оптимальных режимов работы ТКГ проведены исследования по измерению температуры поверхности металла в зоне окна с использованием оптического пирометра Тера50. Было установлено, что по достижении температуры поверхности шихты  $1000...1100^{\circ}\text{C}$  начинается оплавление и резкие обвалы кусков лома. Требуемое для этого время составляет, в зависимости от расхода газа,  $10...15 \text{ мин}$ . Эти данные рекомендованы как оптимальное время нагрева. При необходимости подрезки шихты и расчистки пространства в зоне рабочего окна проводилась дополнительная работа до  $10 \text{ минут}$  с пониженным расходом газа в соотношении газ: кислород =  $1:3$ , против рабочего соотношения  $1:2$ . Использование ТКГ исключает технологическую операцию по «сталкиванию» шихты от порога завалочной машиной, что дало возможность сократить длительность плавки на  $5...10 \text{ мин}$ .

Изучено влияние использования ТКГ на качественные характеристики нержавеющей металла. На опытных плавках отбирали пробы металла и шлака до подачи в печь кислорода. В пробах металла определяли содержание уг-

лерода и водорода, а в пробах шлака концентрацию  $Cr_2O_3$  и  $FeO$ . На рис. 9, 10 представлены результаты исследований.

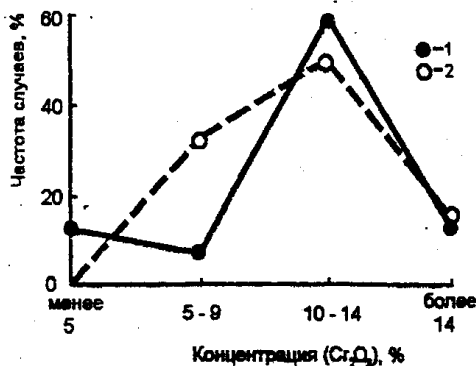


Рис. 9. Частотный график содержания оксида хрома в шлаке:

- 1 – при использовании ТКГ;
- 2 – без использования ТКГ.

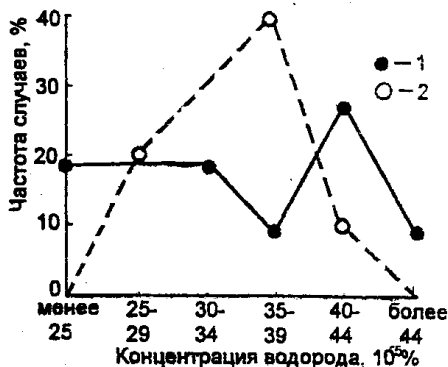


Рис. 10. Частотный график содержания водорода в хромоникелевом расплаве:

- 1 – при использовании ТКГ;
- 2 – без использования ТКГ.

Как видно из результатов исследования, применение ТКГ не оказывает отрицательного воздействия на качество металла и угар элементов.

Сопоставление результатов опытных и сравнительных плавов, в том числе 30 с использованием ТКГ, показали, что окисление углерода практически не зависит от технологии расплавления, что особенно важно для дуплекс-процесса производства нержавеющей стали ДСП-АКР (агрегат аргонно-кислородного) и не требует корректировки химического анализа полупродукта по углероду.

Для оценки влияния работы оконной ТКГ на энерготехнологический режим плавки полупродукта нержавеющей стали в ДСП-100И7, проведена серия из трех балансовых плавов. На плавках использовались ТКГ и полупродукт предназначался для передела в агрегате АКР.

Расчетный и фактический материальный баланс плавки нержавеющей стали удовлетворительно совпадают, невязка составляет 3 %. Тепловой баланс приведен в табл. 2.

Таблица 2

Тепловой баланс на 1000 кг металлошихты

Приход	МДж	%	Расход	МДж	%
Энергия химических реакций	578	25,3	Нагрев стали	1353	59,2
Электроэнергия	1632	71,4	Нагрев шлака	243	10,6
ТКГ	75	3,3	Потери тепла	689	30,2
<b>ИТОГО</b>	<b>2285</b>	<b>100</b>		<b>2285</b>	<b>100</b>

Энергетическая составляющая ТКГ в балансе по приходу тепла составляет 3,3 %, что безусловно не оказывает заметного влияния на тепловой баланс

плавки в целом. Однако внедрение ТКГ позволила сократить длительность расплавки 15..20 мин, в том числе на 5..10 минут за счет сокращения операции сталкивания шихты мульдозавалочной машиной и подрезкой шихты кислородной трубкой в зоне загрузочного окна.

Таким образом, выполненные исследования показали, что применение ТКГ не оказывает отрицательного воздействия на качество металла и угар элементов при плавлении их на высокомошных дуговых печах является средством достижения преимущественно технологических целей, а не энергетических, и обеспечивает синхронизацию скорости расплавления металлошихты в центральной (вблизи дуг и электродов) и периферийных холодных частей ванны.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан энерготехнологический режим плавления полупродукта нержавеющей стали в высокомошной дуговой электросталеплавильной печи ДСП-100И7 с печным трансформатором 80 МВА, включающий электрический режим периода расплавления и нагрева металла, метод расчета рациональных энергетических параметров, технологию вспенивания хромистого шлака для работы на длинных дугах и технологию использования топливокислородной горелки в высокомошной печи.

2. Исследованы основные характеристики электрической дуги в высокомошной дуговой электросталеплавильной печи. Разработана методика расчета основных параметров энерготехнологического режима плавки коррозионно-стойких марок стали в высокомошной печи, базирующийся на основных параметрах электрической дуги. Метод теоретически обоснован и обеспечивает высокую точность практических расчетов. Результаты расчетов хорошо совпадают с данными промышленных плавов.

3. Разработан способ управления электрическим режимом плавки полупродукта нержавеющей стали ДСП. Способ позволяет регламентировать процессы плавления и нагрева шихты, уменьшить расход электроэнергии и продолжительность периода плавления за счет поддержания максимальной электрической мощности дуги. Способ управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи защищен патентом Российской Федерации №2128401 и внедрен в производство.

4. Изучены осциллограммы тока и напряжения электрической дуги в высокомошной ДСП в период плавления. Установлено, что они не имеют прерываний, близки по форме к синусоидам и хорошо оцениваются количественно, путем разложения функций тока и напряжения в ряды Фурье. Показано, что гармонический состав дуги во время расплавления изменяется, что позволяет использовать его для интерпретации тепловых условий горения дуги, при этом нечетные гармоники являются наиболее предпочтительными для выполнения этой функции.

5. Разработана аппаратура для экспериментального изучения гармонического состава напряжения электрической дуги в высокомошной ДСП. Изучено изменение величины амплитуды третьей, пятой, седьмой и девятой гармоник в

течение всего периода плавления и нагрева металла. Показано, что информативность гармоник уменьшается по мере увеличения их номера.

6. Установлено, что величина амплитуды седьмой и девятой гармоник зависит от наличия в печи твердой или жидкой фазы, степени экранирования электрической дуги шлаковым расплавом. Показана принципиальная возможность использования амплитуд высших гармоник в качестве контролируемого параметра для разработки замкнутой системы динамического управления электрическим режимом плавки в высокоомощной дуговой сталеплавильной печи. На способ определения стадий плавления шихты в дуговой сталеплавильной печи по заявке № 99118661 получено положительное решение о выдаче патента РФ.

7. Выполнен термодинамический анализ условий вспенивания шлаковых систем и установлены параметры формирования вспененного хромистого шлака. Опробовано пять композиций вспенивающих шлаковых смесей. Показано, что наилучшие результаты дает смесь, состоящая из известняка и электродной крошки с использованием до 1 кг/т алюминия. Установлено, что эффективное вспенивание хромистого шлака происходит при содержании в нем  $Cr_2O_3$  5...12%.

8. Разработана технология вспенивания хромистых шлаковых расплавов. Технология обеспечивает вспенивание хромистых шлаков на 100 – 150 мм и дает возможность экранировать длинные дуги при работе на высших ступенях печного трансформатора. Это позволяет сократить расход электроэнергии и увеличить стойкость футеровки печи. Разработанная технология вспенивания хромистого шлака внедрена в производство.

9. Выполнен анализ технических характеристик и обоснован выбор типа и мощность топливокислородной горелки для высокоомощной ДСП. Разработана конструкция оконной ТКГ мощностью 9,8 МВт. Определены основные параметры ее применения, исследовано влияние топливокислородной горелки на качество выплавляемого металла, производительность агрегата. Результаты разработки внедрены в производство.

10. По данным балансовых плавок изучено влияние работы оконной ТКГ на энерготехнологический режим плавки полупродукта нержавеющей стали в высокоомощной ДСП и показано, что доля тепла, вносимого горелкой, не превышает 3,3%. ТКГ не оказывает заметного влияния на приходную часть теплового баланса, однако является необходимым средством решения технологических задач.

11. Общий годовой экономический эффект от внедрения результатов работы на высокоомощной дуговой электросталеплавильной печи ДСП-100И7 электросталеплавильного цеха № 6 ОАО «Мечел» составил 9598059560 руб. (в ценах 1997 года).

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. Волкодаев А.Н., Токовой О.К., Звонарев В.П., Прокофьев С.Н. Вспенивание хромистого шлака в высокоомощной дуговой печи // Сталь. – 1997, №6, – С 46–48.

2. Евсеева Н.В., Токовой О.К., Волкодаев А.Н., Прокофьев С.Н. Метод расчета энерготехнологического режима плавки в высокоомощной дуговой печи // Сталь. – 1998, – №7– С 27– 29.

3. Волкодаев А.Н., Евсеева Н.В., Токовой О.К. Исследование высших гармоник в напряжении на дуге высокоомощной дуговой сталеплавильной печи и их использование для управления энерготехнологическим режимом //Современные проблемы электрометаллургии стали. Тезисы докладов X Международной научной конференции. – Челябинск: ЮУрГУ, 1998. – С. 95 – 96.

4. Волкодаев А.Н., Токовой О.К., Звонарев В.П., Маменко Ю.Ю. Выплавка коррозионностойкой стали в высокоомощной дуговой печи с использованием оконной газоокислородной горелки // Сталь. –1998. – №12 – С. 20 – 22.

5. Патент РФ № 2128407 Способ управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи / Евсеева Н.В., Чернуха С.Ю., Мянник А.Г., Павлов В.В., Чекунов Г.М., Кочкин В.Н., Шафигин З.К., Павлушин Н.В., Иванова Т.Н., Токовой О.К., Волкодаев А.Н., Зиновьев В.Ю. / – №97110526/09; Заявл. 20.06.97; Оpubл. 27.03.99. Бюл. №9. С.411.

6. Волкодаев А.Н., Евсеева Н.В., Токовой О.К. Использование амплитуд высших гармоник в напряжении дуги высокоомощной дуговой печи для управления энерготехнологическим процессом // Сталь. –2000. – №2 – С. 24 – 27.