

УДК 669.187.2

**Казачков Е.А.<sup>1</sup>, Чепурной А.Д.<sup>2</sup>**

### **ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ**

*Для повышения производительности ДСП необходимо увеличение удельной мощности трансформатора, интенсивная продувка ванны кислородом через подовые фурмы, использование топливно-кислородных горелок, предварительный подогрев скрапа. Для ввода в печь повышенной мощности при низком рабочем токе необходимо повысить вторичное напряжение до 900–960 В., работать на длинных дугах с повышенным импедансом печного контура и пенистым шлаком.*

Во всем мире в последние 15-20 лет просматривается отчетливая тенденция увеличения доли электростали в общем объеме производства стали. (рис. 1), которая составляет в настоящее время около 40 %. В отдельных странах этот показатель более значителен. Так, в США доля электростали в общем производстве стали превышает 45 %, в Италии – 60 %, в Испании – 72 % и т.д. [1,2].

Причинами, обусловившими быстрый рост производства электростали во всем мире, являются преимущества электроплавки по сравнению с другими способами получения стали:

- большая гибкость процесса электроплавки и слабая зависимость процесса от вида и состава исходного сырья;
- возможность перерабатывать большое количество скрапа, поскольку его доля в составе металлошихты может достигать до 100 %;
- ряд марок легированной стали можно производить только в электрических сталеплавильных печах;
- легкость автоматизации процесса;
- лучшая возможность создания экологически чистого процесса в связи с малым количеством выделяемых газов и сравнительной легкостью улавливания пылевывделений.

Увеличение доли электростали в общем объеме производства стали связано с современными высокими требованиями к качеству металла, перспективами дальнейшего расширения производства и использования легированных сталей, необходимостью утилизации накапливающегося лома а также существенного повышения производительности дуговых сталеплавильных печей (ДСП). Рост производства электростали в последние годы (рис. 2) опережают темпы общего объема выплавки стали и темпы роста конвертерного производства.

Опережающий рост выплавки стали в ДСП непосредственно связан с использованием передовых технических и технологических разработок, позволивших существенно улучшить технико-экономические показатели электроплавки

ДСП переменного тока широко используются в черной металлургии и машиностроении для выплавки как легированных, так и рядовых углеродистых сталей. Выплавка в ДСП не только высококачественных высоколегированных, но и низколегированных и рядовых углеродистых сталей стала экономически целесообразной в связи с существенным увеличением их производительности при переходе к концепции сверхмощных ДСП большой вместимости. [3,4]. Однако, имеющиеся на ряде заводов ДСП средней вместимости, при необходимости увеличения их производительности, можно реконструировать, используя те же принципы сверхмощных ДСП. Для этого необходимо выполнить реконструкцию соответствующих участков цехов, оснащенных ДСП.

Повышение производительности ДСП следует рассматривать как комплексную задачу, решение которой состоит в сокращении продолжительности трех основных периодов плавки: подготовительного (выпуск, заправка, завалка шихты), энергетического (расплавление шихты) и технологического (окислительный и восстановительный периоды плавки) а также сокращении простоев и ремонтов. При эксплуатации ДСП с водоохлаждаемыми панелями существенно увеличивается время безремонтной работы ДСП, что увеличивает годовую производительность агрегата на 5 – 10 %. Сокращение длительности расплавления шихты и всей плавки достигается при использовании концепции «сверхмощная ДСП» - повышением удельной мощности трансформатора до 800-1000 кВ.А/т. Это, в

<sup>1</sup> ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

<sup>2</sup> ОАО «ГСКТИ», д-р техн. наук, проф.

свою очередь, определяет электрический режим периода плавления – работа на повышенных ступенях напряжения, с длинными дугами и повышенным коэффициентом мощности в течение всего периода плавления.



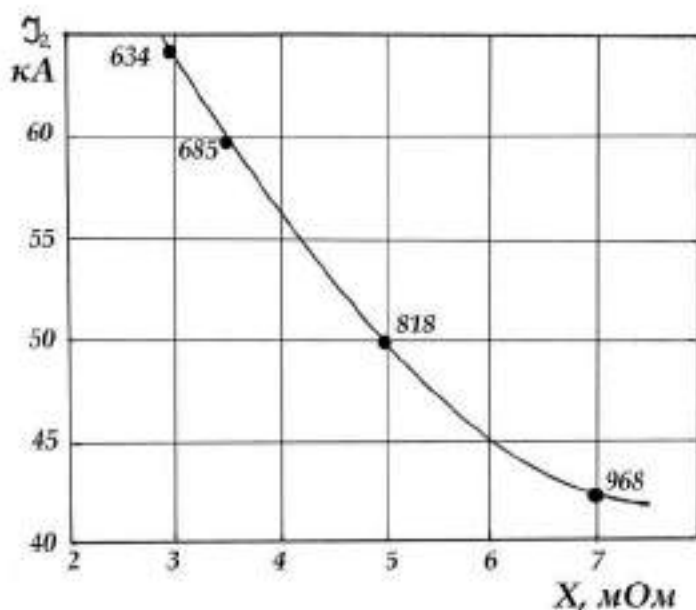
Рис. 1 - Изменение структуры сталеплавильного производства.



Рис. 2 – Изменение общего объема производства стали в мире (I), конвертерной и электростали

Современные высокоомощные электродуговые печи переменного тока характеризуются увеличенным значением импеданса (полного сопротивления) электропечного контура. Электрическая мощность в такие печи вводится в энергосберегающем режиме пониженных рабочих токов и повышенных ступенях вторичного напряжения до 900-960 В. Это обеспечивает существенное сокращение расхода электроэнергии и электродов, значительное улучшение технологических, экологических и экономических показателей процесса.

При отключенной печи или в режиме короткого замыкания реактивное сопротивление  $X$  электропечного контура примерно на порядок больше, чем активное сопротивление  $R$ , поэтому значение импеданса печи  $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$  определяется практически величиной реактивного сопротивления – реактансом  $X$ . Регулировать мощность, вводимую в ДСП, можно дискретно, переключая ступени печного трансформатора и меняя вторичное питающее напряжение  $U_2$ , и плавно, за счет рабочего тока  $I_2$ , при вертикальном перемещении электродов, когда изменяется длина  $l$  и сопротивление дуги  $R_d$ . Работа на повышенных ступенях напряжения – это работа с длинными дугами. Для защиты футеровки от чрезмерного теплового воздействия, снижения тепловых потерь и повышения энергетического КПД печи, необходимо экранировать дуги пенным шлаком. Пенные шлаки формируются путем



вдувания в шлак порошка кокса и кислорода.

Возможность экранирования дуг пенным шлаком позволяет вводить достаточную мощность на длинных дугах, т.е. на повышенных напряжениях и пониженных рабочих токах. Такой режим позволяет экономить электроэнергию и существенно сократить расход дорогих графитированных электродов, поскольку на эти расходные показатели заметно влияет уменьшение рабочих токов.

Рис. 3 – Влияние увеличения реактивного сопротивления и импеданса печного контура на снижение рабочего тока (цифры у точек – вторичное напряжение, В).

Рост реактивного сопротивления и импеданса печного контура обеспечивает уменьшение рабочего тока за счет повышения вторичного

напряжения при сохранении уровня вводимой в печь активной мощности. Данные расчета [5] показывают (рис. 3), что для одной и той же вводимой активной мощности  $P_1 = 60$  МВт с ростом реактанса и повышением вторичного напряжения величина рабочего тока существенно уменьшается. Таким образом, рост импеданса электропечной установки позволяет уменьшить рабочий ток и расходные показатели, зависящие от величины тока: расход технологической электроэнергии и электродов.

Возможность увеличения вводимой в печь мощности для ускорения расплавления металла и увеличения производительности печи, во многих случаях лимитируется мощностью короткого замыкания существующей питающей сети. Перспективными в этом плане являются печи, имеющие пониженный ток короткого замыкания и более стабильные эксплуатационные характеристики при той же

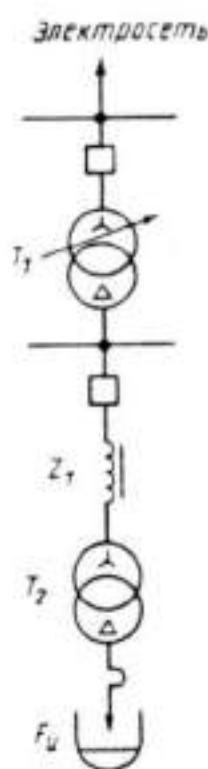


Рис. 4 – Схема подвода тока к печи с высоким импедансом.

подводимой к ванне мощности. Для этих целей в последние годы [7] на первичной обмотке печного трансформатора  $T_2$  устанавливают дополнительный последовательно включенный дроссель  $Z_1$  для управления длинными дугами, низким током на электродах и поддержания стабильной дуги (рис. 4). Схема с высоким импедансом позволяет осуществлять подвод большой мощности благодаря стабильным условиям горения дуги, высокому напряжению ее зажигания и повышенному коэффициенту мощности в течение всего периода плавления.

Схема с высоким импедансом обеспечивает низкий ток короткого замыкания и, таким образом, низкие электродинамические усилия на электродах, электродержатели и подводящие кабели, т.е. меньший риск поломки электродов и меньший механический износ. Низкие токи на вторичной обмотке трансформатора понижают расход электродов и потери во вторичной цепи.

Известно, что колебания тока сопровождаются изменениями длины дуги, что вызывает токовые флуктуации как в низкочастотном (фликкер-эффект), так и высокочастотном диапазонах (гармоники). Эксплуатация печи на длинных дугах и с высоким импедансом электропечного контура предпочтительней, так как относительное изменение длины меньше при длинной дуге, следовательно, меньше и относительное изменение тока. Таким образом, работа на длинной дуге позволяет иметь низкие колебания тока на электродах и, следовательно, низкий уровень возмущений в питающей сети.

Основными преимуществами высокоимпедансных ДСП являются:

- меньший расход графитированных электродов вследствие работы на пониженной силе тока;
- уменьшение электродинамических сил, действующих на электроды, электрододержатели, кабели, что способствует минимизации риска поломок электродов и меньшему износу механических элементов печи;
- снижение отрицательного влияния электрической нагрузки ДСП на питающую сеть.

Для реализации высокоимпедансных режимов работы ДСП требуются электропечные трансформаторы со специально выбранными параметрами и дополнительные реакторы, включаемые последовательно в линии питания трансформаторов.

В ОАО ХК «Электрозавод» разработаны и освоены в производстве электропечные трансформаторы для современных 100-т ДСП, обеспечивающие их работу в высокоимпедансных режимах. Характерной особенностью таких трансформаторов является увеличенная мощность (по сравнению с ранее использовавшимися) в результате повышения вторичного напряжения [8]. Здесь же произведена модернизация трансформатора для 100-т ДСП Молдавского металлургического завода. Этот трансформатор выполнен на базе типового трансформатора, разработанного в 1981 г. для комплектации 100-т ДСП. Трансформаторы этого типа успешно работают на ряде металлургических предприятий России и стран СНГ. Суть модернизации состояла в увеличении его номинальной мощности и вторичного напряжения. Был выбран вариант с сохранением магнитопровода, обмоток высшего напряжения и регулировочных обмоток, переключающего устройства и заменой только обмоток низшего напряжения. В системе охлаждения трансформатора добавлен один рабочий маслоохладитель. В результате

модернизации номинальная мощность трансформатора увеличилась от 80 до 95 МВ·А (приблизительно на 19 %), а максимальное вторичное напряжение возросло с 761 до 951 В (на 25 %).

Заметное сокращение длительности плавки достигается также интенсификацией массо- и теплообмена перемешиванием ванны в течение всей плавки путем вдувания кислорода трубкой или фурмой, повышенным расходом кислорода через донные газокислородные фурмы, установкой в «холодных» участках ДСП стеновых газокислородных горелок, а также использованием сверхзвукового копия для подачи кислорода и карбюризатора. Общий расход кислорода при этом увеличивается до 30-35 м<sup>3</sup>/т. В качестве примера комплексного использования кислорода и альтернативных источников энергии в современной сверхмощной ДСП можно привести реконструкцию базового технологического агрегата – дуговой печи ДСП-100И6 – Молдавского металлургического завода, произведенного с использованием системы Данарк, разработанной фирмой «Danarck». Для этого в состав печи был включен следующий комплекс оборудования (рис. 5) [6,7]:

- четыре донные кислородные фурмы, охлаждаемые по периметру природным газом;
- два установленных в кожухе печи инжектора для вдувания в ванну (на шлак и непосредственно в металл) порошкообразного карбюризатора;
- поворотную фурму для одновременного ввода в печь кислорода и карбюризатора со сверхзвуковой скоростью;
- шесть стеновых газо-кислородных горелок многофункционального использования, расположенных по периметру кожуха печи.

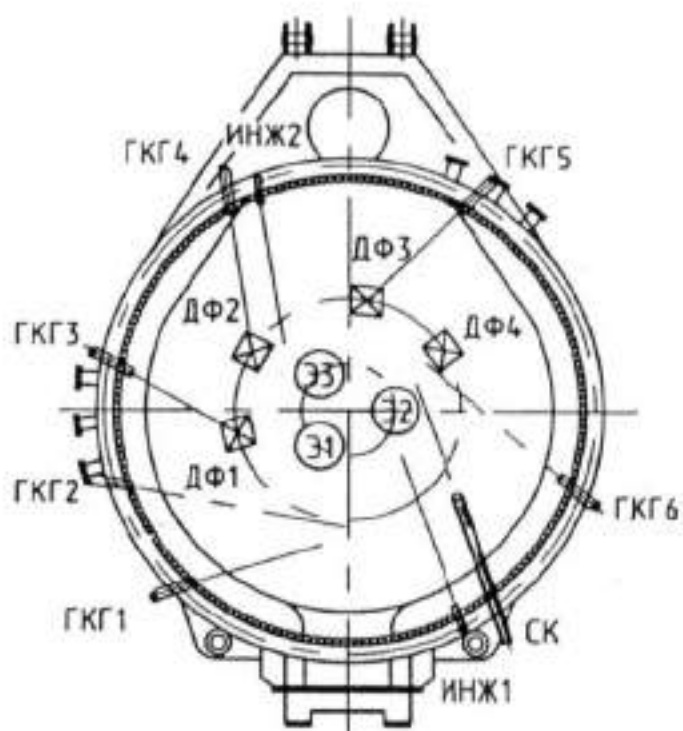


Рис. 5 – Схема расположения горелок и фурм в ДСП-100 НМЗ: ГКГ1 – ГКГ6 – стеновые газокислородные горелки; ИНЖ1, ИНЖ2 – инжекторы для глубокого вдувания карбюризатора; ДФ1 – ДФ4 – донные газо-кислородные фурмы; СК – сверхзвуковое копьё для подачи кислорода и карбюризатора.

Подовые кислородные фурмы располагаются в зонах ванны, оцениваемых как «холодные». Использование в этой части днища подовых фурм позволяет активизировать процессы плавления и газовыделения. Особенностью стеновых газо-кислородных горелок является возможность их использования как в топливном (период плавления), так и в кислородном (дожигание СО в период доводки) режимах. Поворотная фурма обеспечивает заданный наклон потоков для проникновения кислорода в расплав, а карбюризатора – в шлак.

В целом новая комплексная система энергообеспечения печи позволяет утилизировать внутри рабочего пространства печи дополнительную тепловую энергию при снижении удельного расхода электроэнергии.

Дальнейший рост производительности высокоомощных ДСП связан с улучшением подготовки шихтовых материалов к плавке: повышением насыпной плотности металлошихты до 1,2 – 1,4 т/м<sup>3</sup>, предварительным подогревом скрапа до 400 – 500°С теплом отходящих из печи газов или специаль-

ными газовыми горелками. Подогрев лома в загрузочных бадьях до 400°С обеспечивает экономию электроэнергии до 70-75 кВт·ч/т и сокращение длительности плавления на 10-12 %.

После расплавления шихты необходимо поддержание пенистых шлаков вдуванием порошка кокса и кислорода, чтобы обеспечить «закрытый» режим горения дуг с целью снижения излучения на стены и свод. Повышение производительности ДСП требует также значительного сокращения технологического периода плавки за счет использования одношлакового процесса, весьма короткого восстановительного периода и переноса ряда процессов рафинирования на внепечную обработку с использованием установки «ковш-печь».

#### *Выводы*

1. Важным направлением повышения производительности ДСП является повышение удельной мощности трансформатора до 800-1000 кВт·А/т. При этом целесообразно повышение вторичного напряжения до 900-960 В. Работа на длинных дугах при таких высоких напряжениях возможна при условии поддержания пенистых шлаков, надежно экранирующих дуги. Пенистые шлаки формируются путем вдувания в шлак порошка кокса и кислорода.
2. Для сглаживания толчков тока и борьбы с опасными вибрациями электрододержателей сверхмощные ДСП переменного тока должны иметь повышенный импеданс электропечного контура. Электрическая мощность в этом случае вводится в энергосберегающем режиме пониженных рабочих токов на повышенных ступенях вторичного напряжения до 900-960 В, что обеспечивает сокращение расхода электроэнергии и электродов и значительное улучшение технологических, экологических и экономических показателей процесса электроплавки.
3. Заметное сокращение длительности плавки достигается также интенсификацией массо- и теплообмена вдуванием в металл через фурмы, установленные в подине, кислорода в «рубашке» из природного газа, установкой в «холодных» участках ДСП стеновых газокислородных горелок, а также одновременным вводом в печь кислорода и карбюризатора со сверхзвуковой скоростью.
4. Дальнейший рост производительности высокоомощных ДСП связан с улучшением подготовки шихтовых материалов к плавке: повышением насыпной плотности металлошихты до 1,2-1,4 т/м<sup>3</sup>, предварительным подогревом скрапа до 400-500 °С теплом отходящих из печи газов или специальными газовыми горелками.

#### *Перечень ссылок*

1. Лопухов Г.А. Ближайшие перспективы развития мировой черной металлургии / Г.А.Лопухов // Электromеталлургия.- 2001.- № 1.- С. 7-31.
2. Еланский Д.Г. Тенденции развития электросталеплавильного производства / Д.Г.Еланский // Электromеталлургия.- 2001.- № 5.- С. 3-18.
3. Поволоцкий Д.Я. Устройство и работа сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Д.Я.Поволоцкий, Ю.А. Гудим, И.Ю. Зинуров. - М.: Металлургия, 1990.- 178 с.
4. Смоляренко В.Д. Высокомощные дуговые сталеплавильные печи / В.Д.Смоляренко. - М.: Энергия, 1976.- 104 с.
5. Смоляренко В.Д. Современное состояние и перспективы развития электродуговых печей для выплавки стали / В.Д.Смоляренко, С.Г. Овчинников, Б.П.Черняховский // Сталь.- 2005.- № 2.- С. 47-51
6. Мавридис Дж. Концепция «Данарк» - усовершенствование технологии выплавки в дуговых печах переменного тока / Дж.Мавридис, М. Бедин // Тр. Международной конференции «Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке». Кн. 2.- М.: Металлургия, 1994.- С. 265-270.
7. Совершенствование технологии плавки в сверхмощной дуговой печи с использованием системы Данарк / А.К.Белитченко, А.В.Кутаков, Г.А.Лозин и др. // Черная металлургия. Бюллетень н.-т. и экономических исследований.- 1998.- Вып. 1-2.- С.23-26.
8. Мейксон В.Г. Трансформаторы для современных 100-т дуговых сталеплавильных печей / В.Г.Мейксон, В.Л. Рабинович // Электromеталлургия.- 2003.- № 6.- С. 18-21.

Статья поступила 25.02.2005