

ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ГРАФИТИРОВАННЫМИ ФИТИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

А.Г. Богаченко¹, Д.Д. Мищенко¹, В.И. Брагинец¹, В.И. Галинич¹,
И.А. Нейло¹, А.П. Лютый², М.А. Фридман³

¹Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ПАТ «Завод «Днепроспецсталь» им. А.Н. Кузьмина».

69008, г. Запорожье, ул. Южное Шоссе, 81. E-mail: czl_us@dss.com.ua

³ЧАО «Ферротрейдинг».

69032, г. Запорожье, ул. Южное Шоссе, 59. E-mail: <ref@ferrotr.com.ua>

Отмечено, что мировое производство стали в последние десятилетия непрерывно увеличивается. При этом увеличивается и количество стали, выплавленной в дуговых сталеплавильных печах переменного (ДСП) и постоянного тока (ДСП ПТ). Обладая рядом технических преимуществ ДСП ПТ активно внедряются на металлургических предприятиях. Эффективным средством улучшения технико-экономических показателей ДСП ПТ являются фитильные графитированные электроды, разработанные в ИЭС им. Е.О. Патона. Исследовательские работы первого этапа, проведенные на промышленных печах типа ДСП ПТ-12 показали, что дуга фитильного электрода всегда держится в центре электрода, обеспечивается устойчивый электрический режим плавки на длинных дугах и низких напряжениях источника питания. Установлено, что напряжение в прикатодной области, а также диапазон пульсаций тока и напряжения фитильной дуги существенно ниже, чем у обычного (монокристаллического) графитированного электрода. Эти факторы обусловили экономию активной электроэнергии, снижение реактивных потерь, увеличение $\cos\phi$ и снижение уровня шума печи. Наши дальнейшие работы направлены на исследования влияния фитильных электродов на стойкость огнеупоров, производительность печей, расход электродов, а также возможность применения фитильных электродов меньшего диаметра в сравнении с монокристаллическим электродом. Библиогр. 9, табл. 2, ил. 9.

Ключевые слова: фитильные графитированные электроды; дуговые сталеплавильные печи переменного и постоянного тока; активная и реактивная электроэнергия; вольт-амперная характеристика; пульсации тока и напряжения

Отличительной особенностью мировой металлургической промышленности в последние десятилетия является увеличивающееся из года в год производство стали. Так, если в 1974 г. в мире было выплавлено порядка 700 млн т стали, то в 2014 г. ее производство составило уже 1,661 млрд т. По некоторым прогнозам годовое производство стали может вырасти до 2 млрд т к 2020 г. [1, 2].

Порядка 30 % стали от указанного количества выплавляется в дуговых сталеплавильных печах переменного (ДСП) и постоянного (ДСП ПТ) тока. При этом общая доля электростали также непрерывно увеличивается и может достичь 43 % к 2050 г. [3, 4].

Обладая рядом преимуществ, ДСП ПТ все шире внедряются в промышленности. При этом в последние годы предпочтение отдается печам большой емкости. Так, в Японии работают несколько сверхкрупных ДСП ПТ, в том числе двухэлектродная, емкостью 420 т ДСП ПТ емкостью 110...200 т. работают также в Мексике и Индии, США и Германии. Поэтому ДСП ПТ представляют большой интерес

для исследований с целью повышения технико-экономических показателей их работы.

Известно, что эти показатели во многом определяются техническими характеристиками и эксплуатационной надежностью графитированных электродов. В себестоимости электростали электроды занимают значительную долю — до 8...12 %. Поэтому трудно переоценить значимость работ, которые ведут производители электродов по обеспечению требуемого удельного электросопротивления, увеличению плотности, обеспечению высоких механических характеристик электродов и т.п. Для этого используются различные исходные материалы, в т.ч. дефицитный игольчатый нефтяной кокс, совершенствуются технологии подготовки исходных материалов и прессования, включая обжиг в печах Кастнера (прямой нагрев), пропитка поверхности различными реагентами и др. для решения главной задачи — снижения удельного расхода электродов. Однако при всем сказанном электрод является не более чем элементом электрической цепи печи. Сталеплавыльщики всегда искали и пытались раскрыть

потенциальные возможности электродов, чтобы использовать их также в качестве универсального инструмента для управления параметрами плавки и, в конечном итоге, улучшения технико-экономических показателей работы печи. Так, еще в 1962 г. были проведены промышленные опыты по применению полых электродов. Такие электроды обеспечивали более стабильное горение дуги и ее привязку к отверстию, более стабильный режим плавки и снижение расхода электроэнергии [5]. Другие исследователи через отверстие в электроде вводили в расплав активные и инертные газы, окатыши и лигатуру. В другом случае через отверстие вводилось отработанное масло и достигался эффект ионизации дуги. Известны также работы по нанесению на электрод нескольких слоев материалов, каждый из которых имел заданную электропроводность или термостойкость [6]. Испытания этих электродов показали приемлемые результаты. Однако ни один из этих способов не нашел широкого применения в промышленности. Так, сквозное отверстие повышало расход электродов, применение масла сопряжено со взрывоопасностью, а нанесение слоев обуславливало очень высокую стоимость электродов.

В ИЭС им. Е.О. Патона применительно к ДСП ПТ были разработаны многофункциональные электроды, имеющие твердую активную вставку или фитиль. Эти электроды получили название фитильных электродов. Фитиль в электроде получают путем сверления в обычном (монокристаллическом) электроде одного или нескольких вертикальных отверстий, которые заполняются различными компонентами, в т.ч. содержащими элементы I и II групп таблицы Менделеева с низкой работой выхода электронов. Благодаря этому, в прикатодной области электрода создаются благоприятные термодинамические условия для ионизации газов столба дуги. В результате принципиально изменяются параметры дуги, ее вольт-амперная характеристика (ВАХ), форма рабочего торца электрода и другие характеристики, обуславливающие возможность оптимизации технологических и электрических режимов и, как следствие, улучшение технико-экономических показателей работы печи. Об этом свидетельствуют результаты лабораторных и промышленных исследований, позволяющие говорить о реальной возможности создания промышленных крупногабаритных фитильных электродов [7]. ДСП ПТ явились объектом наших исследований еще и потому, что в этих печах отсутствует переполяризация дуги и, следовательно, наиболее полно проявляются свойства фитиля. В данной статье мы приводим данные только по одному из эффектов фитильного электрода — снижению расхода электроэнергии.

В процессе исследований и испытаний фитильных электродов было проведено более 100 промышленных экспериментальных плавов, опробовано 10 составов фитилей, 7 экспериментальных электрических режимов и др. Было четко установлено, что имеет место экономия активной до 10 % и снижение реактивной мощности до 23 % в зависимости от электрического режима и состава фитилей.

Работы проводились на 12-тонной ДСП ПТ с набивной кислой футеровкой с использованием графитированных электродов диаметром 350 мм на переплаве отходов FeSiMn. Нестабильное качество шихты (значительный разброс по химическому и фракционному составу, а также по содержанию CaO) обуславливает значительный разброс значений расхода электроэнергии, если его отнести к одной тонне годного ферросплава. Поэтому удельный расход активной электроэнергии в конкретных условиях производства принят как расход на плавку (на исходную массу шихты), (p , кВт·ч/пл) и сравниваемые показатели приняты как средние по максимальному количеству идентичных плавов. Схема измерений электрических параметров на ДСП ПТ приведена на рис. 1.

Программа работ предусматривала:

проведение сравнительных испытаний различного состава фитильных и монокристаллических электродов на серийных режимах (рис. 2);

оценку влияния на расход электроэнергии коротких и длинных дуг в сравнении с серийным режимом (рис. 3);

оценку влияния пониженного напряжения источника питания (рис. 4).

Из рис. 2 следует, что фитильные электроды (Ф1, Ф2 и Ф6) на серийных режимах обеспечивают снижение расхода активной электроэнергии в сравнении с монокристаллическими (М1 и М2) и ниппелями (Н) на 2,4...5,3 %. Для сравнения здесь же приведены данные по плавкам на полой электроде (П).

Известно, что эффективным средством экономии электроэнергии является работа печи на длинных дугах [8]. Говоря о длине дуги применительно к фитильному электроду следует иметь в виду, что

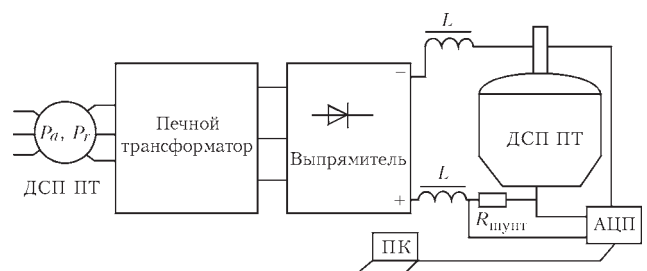


Рис. 1. Схема измерения электрических параметров, где: P_a , P_r — счетчики активной и реактивной энергии; L — дроссель; $R_{шунт}$ — ток измерительный шунт; АЦП — аналогово-цифровой преобразователь L-CARD E14-140/D; ПК — компьютер с установленной программой LGratf

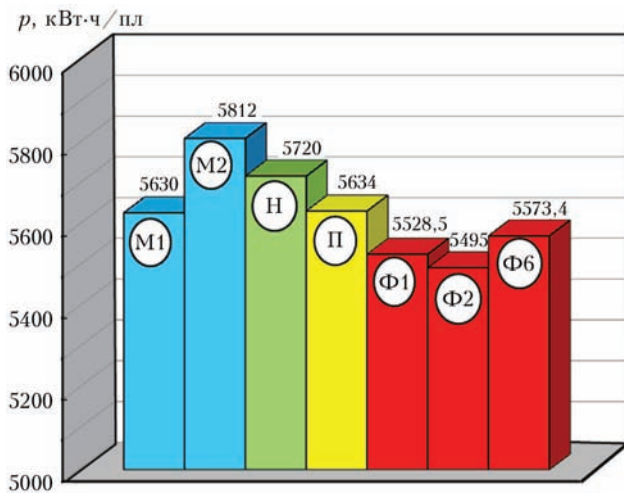


Рис. 2. Удельный расход активной электроэнергии (кВт·ч/пл) на плавках по серийному режиму с использованием монокристаллических (M1, M2), ниппеля (H), полого (П) и фитильных электродов (Ф1, Ф2, Ф6) опытных составов (8-я ступень напряжения) торец фитильного электрода всегда имеет форму вогнутой полусферы, что принципиально отличает его от монокристаллического электрода. Поэтому длина дуги фитильного электрода L_{ϕ} складывается из длины ее открытой L_0 и закрытой L_3 части. При этом L_{ϕ} всегда в 1,3...1,5 раза больше L_0 монокристаллического электрода при равных параметрах электрического режима, что обусловлено наличием фитиля и его составом. В данной работе за исходное условие бралось практическое равенство длины дуги монокристаллического L_m электрода и открытой части дуги фитильного электрода L_0 в условиях серийного электрического режима. Увеличение (или уменьшение) длины дуги L_0 осуществлялось путем соответствующей корректировки напряжения дуги и тока во второй половине плавки (после второй завалки шихты).

Сравнительные результаты этих исследований приведены на рис. 3. Видно, что работа на длинных дугах обеспечивает снижение удельного рас-

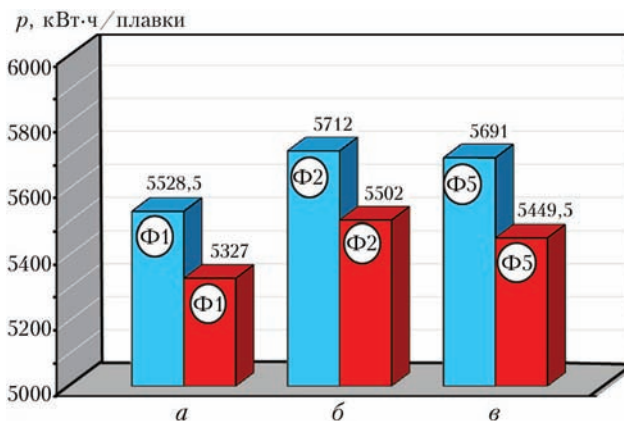


Рис. 3. Удельный расход активной электроэнергии (кВт·ч/пл) на плавках с фитильными электродами на короткой и длинной дуге, где: а — серийная и длинная дуга (электрод Ф1); б — короткая и длинная дуга (электрод Ф2); в — короткая и длинная дуга (электрод Ф5)

хода электроэнергии на фитильных электродах в среднем на 4 %, а в сравнении с монокристаллическими электродами — на 8,3 %. Надо отметить, что по причине низкой стойкости набивной кислой футеровки, используемой для переплава отходов FeSiMn, даже при сравнительно небольшом увеличении длины дуги (на 10...15 %) оказалось невозможным в достаточной мере выявить влияние фактора длинной дуги фитильных электродов на экономию электроэнергии. По-нашему мнению, здесь имеется определенный резерв в части экономии электроэнергии, который должен проявиться при плавке стального лома на печи с основной футеровкой. Еще одним фактором, обеспечивающим экономию активной электроэнергии на фитильных электродах, стала устойчивая работа печи на пониженных напряжениях печного трансформатора (рис. 4). Из этого рисунка следует, что плавки на электроде Ф2 на длинной дуге и 9-й ступени обеспечили экономию электроэнергии на 2...4 % по сравнению с работой на длинной дуге на 8-й ступени (рис. 4, а, б) (серийный режим на монокристаллических электродах не устойчив на 9-й ступени напряжения). Такая же зависимость наблюдается на других фитильных электродах и ниппелях (рис. 4, в). Важно отметить, что работа печи на длинных дугах обеспечила и самую высокую производительность, определяемую временем плавки (2 ч 4 мин...2 ч 13 мин) как на 8-й, так и на 9-й ступени напряжения без потери температуры металла на сливе. На опытных режимах, предусматривающих короткие дуги, время плавки увеличилось до 2 ч 14 мин...2 ч 20 мин. Более того, фитильные электроды обеспечивают также устойчивую работу печи и экономию электроэнергии на 2,5 % и на 10-й ступени. Эти данные четко свидетельствуют о высокой стабильности дуги фитильных

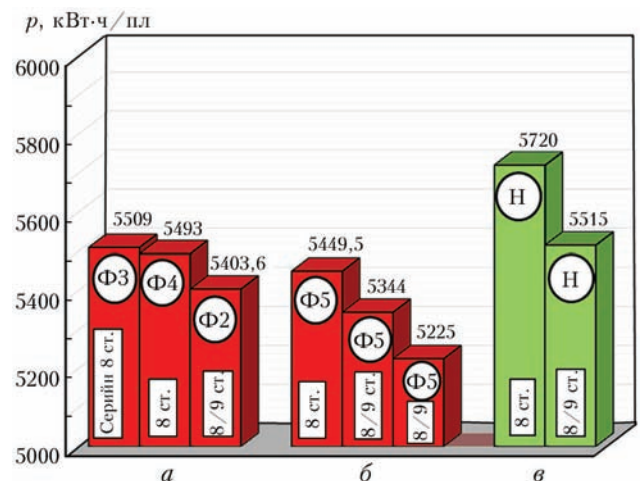


Рис. 4. Удельный расход активной электроэнергии (кВт·ч/пл) на 8-й и 9-й ступенях напряжения, где: а — фитильные электроды Ф2 (V серия), Ф3 и Ф4 (IV серия) (состав F₂); б — фитильный электрод Ф5 (IV серия) (состав F₃); в — ниппель (серийный режим)

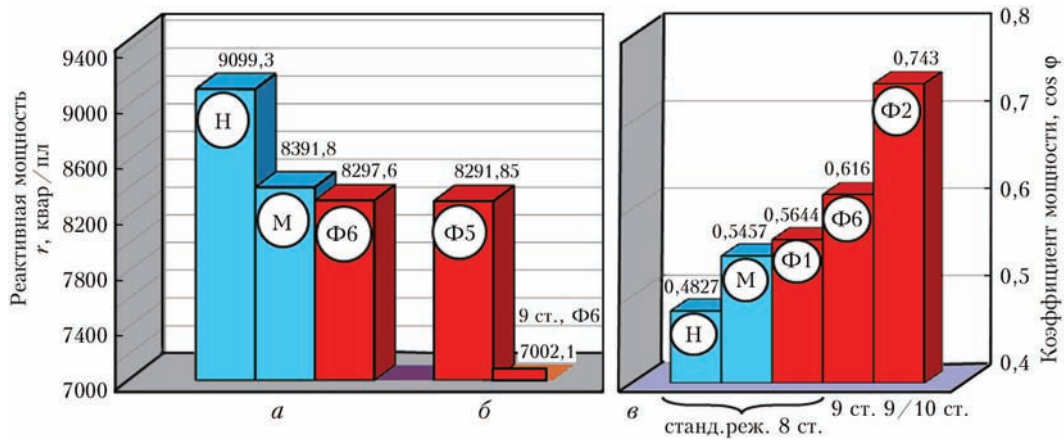


Рис. 5. Сравнительные показатели по снижению реактивной мощности и $\cos \varphi$: а — стандартный режим: ниппель № 5 (Н), монокристаллические электроды (М) и фитильный электрод Ф6 (пл. 3732...3735); б — стандартный режим, Ф5 и опытный режим № 8 на 9-й ст. напряжения, Ф6; в — $\cos \varphi$ на стандартном режиме 8-й ст.; на опытном режиме 9-й ст.; на опытном режиме 9-й/10-й ст.

электродов и экспериментальных электрических режимов, что обусловлено эффективной работой компонентов фитиля. Таким образом, фитильные графитированные электроды при работе на длинных дугах и низких ступенях напряжения источника питания могут обеспечить до 10 % экономии активной электроэнергии.

Фитильные электроды обеспечивают также существенное снижение потерь реактивной мощности (рис. 5). Уже на плавке по стандартному режиму имеет место снижение потерь реактивной мощности на фитильных электродах в сравнении с ниппелями и монокристаллическими электродами на 8,8 и 1,1 % соответственно (рис. 5, а). Еще больше снижается реактивная мощность при использовании фитильных электродов при низком напряжении трансформатора (9-я ст.) и длинной дуге в сравнении с фитильным электродом на стандартном режиме (рис. 5, б). А в сравнении с ниппелями на стандартном режиме этот показатель снижается на 23 %.

Фитильные электроды также обуславливают рост коэффициента мощности ($\cos \varphi$). Из рис. 5, в следует, что $\cos \varphi$ возрастает с 0,4827 (8-я ст.) при плавке на ниппелях по стандартному режиму до 0,743 при плавке на фитильных электродах по опытному режиму на 10-й ступени.

Для понимания фактов экономии активной электроэнергии и снижения реактивной мощности рассмотрим ВАХ дуг монокристаллических и фитильных электродов (рис. 6), полученных на экспериментальной установке на модельных электродах диаметром 50 мм для монокристаллического и пяти экспериментальных составов фитилей.

На промышленных ДСП ПТ-12 плавки ведутся на максимальном токе 17,1...17,3 кА с использованием монокристаллических и фитильных графитированных электродов с исходным диаметром 350 мм. На установке-модели с электродами диаметром 50 мм указанный ток соответствует току 345...350 А. Как видно на рис. 6, при использовании фитильных

электродов (в зависимости от их состава) один и тот же ток достигается при существенно меньшем напряжении, чем в случае монокристаллического электрода. Такое снижение напряжения обеспечивается присутствием в материале фитиля веществ с низкой работой выхода электронов. Одним из важнейших следствий присутствия таких веществ является существенное уменьшение падения напряжения на катодном пятне.

Падение напряжения на катодном пятне и других участках дуги было определено с помощью замеров потенциала на конце зонда, перемещаемого по всей длине дуги. На основании этих данных был выполнен количественный анализ параметров дуги (см. табл. 1). Замеры проводились при длине дуг 15 мм.

Как следует из данных таблицы, имеет место одно из принципиальных отличий в параметрах дуг — падение напряжения на катодном пятне фитильного электрода в 2...3 раза ниже, чем у дуги монокристаллического электрода. Это явление объясняет существенное снижение тепловых потерь в прикатодной области. В совокупности со стабильной привязкой дуги на фитиле и стабильным электрическим режи-

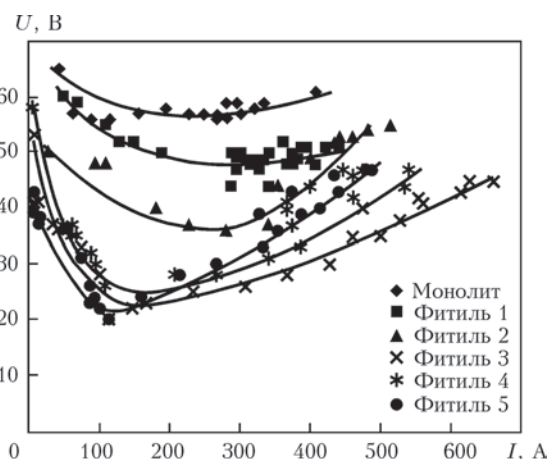


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) дуг, полученные на монокристаллическом и фитильных электродах

Таблица 1. Электрические параметры дуг при длине 15 мм*

| Показатель | Монолит | | Фитиль F3 | | Фитиль F4 | | Фитиль F5 | |
|------------------------------------|---------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| Общее напряжение на дуге U_d , В | 52 | | 36 | | 41 | | 39 | |
| Катодное напряжение U_k , В | 18 | | 6 | | 7,5 | | 9 | |
| Напряжение столба дуги U_c , В | 20 | | 20 | | 20,5 | | 19 | |
| Анодное напряжение U_a , В | 14 | | 10 | | 13 | | 11 | |
| Ток дуги I_d , А | 300 | | 420 | | 320 | | 313 | |
| Общая мощность P_d , Вт | 15608 | (100 %) | 15128 | (100 %) | 13120 | (100 %) | 12226 | (100 %) |
| Мощность катода P_k , Вт | 5403 | (35 %) | 2521 | (17 %) | 2400 | (19 %) | 2821 | (23 %) |
| Мощность столба P_c , Вт | 6003 | (38 %) | 8404 | (56 %) | 6560 | (51 %) | 5956 | (49 %) |
| Мощность анода P_a , Вт | 4202 | (27 %) | 4202 | (28 %) | 4160 | (30 %) | 3448 | (28 %) |

*Приведены средние данные по трем замерам.

мом плавки, это обуславливает отмеченную выше экономию активной электроэнергии.

Несколько иначе обстоит дело с реактивной мощностью. На первый взгляд выглядит довольно странным факт столь высоких показателей реактивной мощности (соизмеримых с активной мощностью) в электрической цепи выпрямленного тока. Вместе с тем известно, что в цепях, содержащих накопители энергии (дрессель, конденсатор) и нелинейный элемент, могут возникать автоколебания или так называемый детерминированный хаос [9]. Таким элементом цепи в ДСП ПТ является электрическая дуга, обладающая свойствами нелинейного активного (нереактивного) накопителя энергии.

Ниже приведены осциллограммы напряжения (верхнее окно) и тока (нижнее окно), которые были записаны на промышленных ДСП ПТ-12 для монолитного и фитильного электродов на стандартных режимах (рис. 7 и 8 соответственно). Как видно, амплитуда пульсаций как тока, так и напряжения (особенно напряжения) существенно больше в случае монолитного электрода, вплоть до переполяризации напряжения. Здесь диапазон колебаний напряжения на дуге составил +50...-350 В, а колебания падения напряжения на шунте составили 45...58 мВ, что соответствует колебаниям тока в диапазоне 14,6...18,8 кА. Для случая фитильного электрода эти показатели составили 10...350 В и 14,9...17,8 кА соответственно. Таким образом, диапазон колебаний напряжения и тока у фитильных электродов на 15 и 31 % соответственно меньше, чем у монолитных электродов.

Уменьшение амплитуды пульсаций означает уменьшение переменной составляющей тока и, следовательно, снижение реактивной мощности до 23 %.

Чтобы объяснить влияние активирующих компонентов добавок фитиля на уровень пульсации

электрических параметров дуги следует снова вернуться к ВАХ дуг. Для большей наглядности приведенные на рис. 6 зависимости $U = f(I)$ пересчитаем в зависимость сопротивления дуги от тока $R = f(I)$. Экспериментальные данные были обработаны также с помощью пакета программ Scilab, и получены математические зависимости $R = f(I)$ для каждого рассмотренного случая. Результаты математической обработки экспериментальных замеров представлены на рис. 9.

Как отмечалось выше, диапазону номинальных токов плавки в промышленной печи ДСП ПТ-12 в модельных условиях на электродах диаметром 50 мм соответствуют токи 345...350 А. В табл. 2 приведены некоторые результаты математической обработки осциллограмм дуг на модельных электродах.

Показателем нелинейности ВАХ для заданного значения тока является угол наклона касательной к кривой зависимости сопротивления дуги от тока $R = f(I)$. Значение тангенса этого угла равно первой производной dR/dI в данной точке. Линейная зависимость ВАХ характеризуется постоянством сопротивления, т.е. горизонтальной линией зависимости сопротивления от тока.

Значение производной dR/dI для тока 345...350 А можно считать показателем нелинейности ВАХ — чем больше dR/dI отлично от нуля, тем больше ВАХ отличается от линейной зависимости, и, как видно из приведенных данных, у фитильных электродов этот показатель ближе к нулю, чем у монолитного электрода. Иными словами, чем ближе ВАХ дуги находится к линейной зависимости в рабочем диапазоне токов, тем меньше пульсации тока и напряжения, обуславливающие снижение реактивной мощности при работе на фитильных электродах, а также в меньшей мере выражено явление автоколебаний в электрической цепи ДСП ПТ.

Расход монолитных и фитильных электродов на последних сериях опытных промышленных плавок был, практически, одинаков и составил

*Методика измерений будет приведена в последующих публикациях.

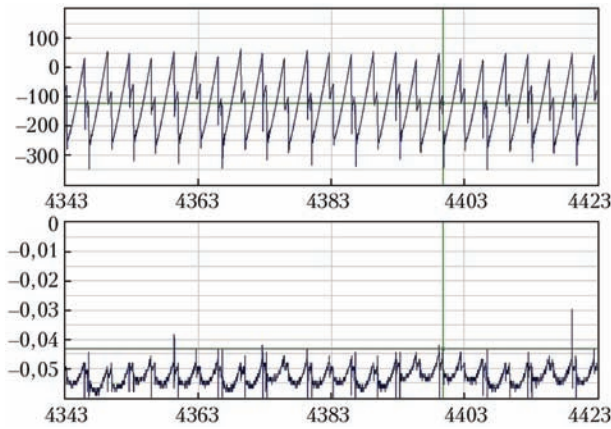


Рис. 7. Осциллограмма плавки № 3739. Монолитный электрод. Ступень 8. Режим стандартный (запись 03.06.2014 13:58)

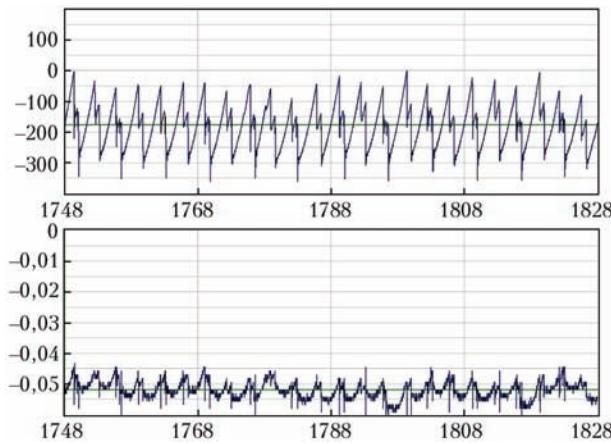


Рис. 8. Осциллограмма плавки № 3678. Фитильный электрод Ф1. 8-я ступень. Режим стандартный

22...26 кг/пл. Этот показатель требует дополнительных исследований, так как на него определенное влияние оказывает, в частности, форма и глубина полусферы на торце фитильного электрода, состав фитиля и т.п.

Стабильная, привязанная к центру дуга фитильного электрода, обуславливает также снижение уровня шума при работе ДСП ПТ. Этот факт был сразу отмечен обслуживающим персоналом.

По-нашему опыту, технология изготовления фитилей в графитированных электродах (сверление отверстия, приготовление смеси и ее набивка) достаточно проста. Поэтому производство фитильных электродов может быть организовано как на заво-

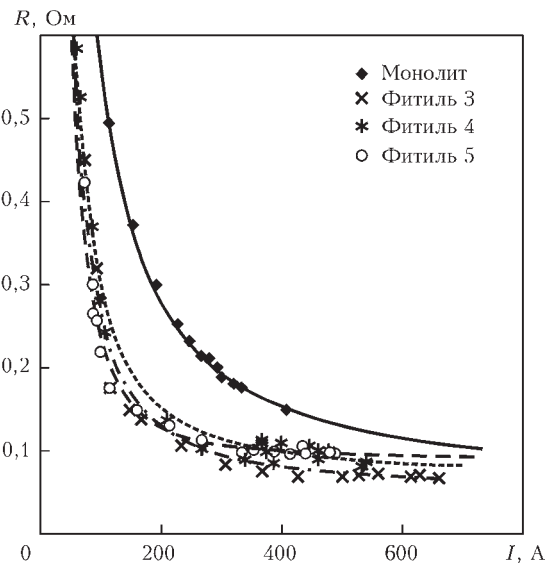


Рис. 9. Зависимость сопротивления дуги от тока $R = f(I)$ для монолитного и фитильных электродов

де-изготовителе электродов, так и на металлургическом заводе — потребителе электродов.

Как отмечалось выше, фитильные электроды следует рассматривать как универсальный инструмент для управления процессами плавки и оптимизации технико-экономических показателей работы печи. Одним из преимуществ применения фитильных электродов являются приведенные в данной статье результаты по экономии электроэнергии. Отметим несколько, на наш взгляд, перспективных исследовательских работ по фитильным электродам.

Важной отличительной особенностью фитильных электродов является то, что рабочий торец такого электрода во время плавки всегда имеет форму вогнутой полусферы, независимо от состава фитиля и параметров электрического режима. Эта полусфера предопределяет два основных технологических фактора. Во-первых, она может концентрировать в себе до 50 % мощности дуги. Это в сочетании с высокой стабильностью длинных дуг на фитильных электродах должно способствовать эффективному расплавлению крупногабаритной шихты. Во-вторых, края полусферы надежно экранируют значительную часть дуги, предохраняя от перегрева футеровку стен и свода печи. Как

Таблица 2. Результаты математической обработки осциллограмм дуг на модельных электродах диаметром 50 мм

| Электрод | Уравнение зависимости $R = f(I)$, Ом | Уравнение производной dR/dI , Ом/А | Значение dR/dI при $I = 350$ А, Ом/А |
|------------|--|--------------------------------------|--|
| Монолитный | $R(I) = 128,56 \cdot I^{-2} + 0,056$ | $dR/dI = -154,274I^{-2,2}$ | $-3,903 \cdot 10^{-4}$ |
| Фитиль 3 | $R(I) = 208,52 \cdot I^{-1,5} + 0,055$ | $dR/dI = -312,777I^{-2,5}$ | $-1,365 \cdot 10^{-4}$ |
| Фитиль 4 | $R(I) = 230,52 \cdot I^{-1,5} + 0,071$ | $dR/dI = -345,783I^{-2,5}$ | $-1,509 \cdot 10^{-4}$ |
| Фитиль 5 | $R(I) = 1512,84 \cdot I^{-2} + 0,090$ | $dR/dI = -3025,671I^{-3}$ | $-0,706 \cdot 10^{-4}$ |

следствие, должен снизиться расход огнеупоров, уменьшится количество ремонтов печи, и следовательно, возрастет ее производительность.

Надо ожидать также уменьшения выбросов газов и пыли в атмосферу цеха и снижения угара легирующих элементов.

Еще одной перспективной и важной задачей мы считаем исследование возможности уменьшения диаметра крупногабаритных графитированных электродов для ДСП ПТ при прочих равных условиях в сравнении с монолитными электродами.

Естественно, что каждое металлургическое предприятие имеет свои стоимостные показатели для оценки того или иного экономического фактора плавки. Применительно к ДСП ПТ-12 с учетом только приведенных показателей по экономии активной электроэнергии и снижению реактивной мощности, стоимость материалов и изготовление фиделя для одного графитированного электрода не превышает 20 % от суммы полученной экономии.

Выводы

Установлено, что дуга фидельного электрода всегда устойчиво держится на фиделе и не мигрирует по торцу электрода, характеризуется высокой стабильностью при большой длине и на низких напряжениях источника питания.

Падение напряжения в прикатодной области фидельного электрода всегда в 2...3 раза меньше, чем у монолитного электрода, что существенно снижает потери тепла в этой части электрода.

Амплитуда колебаний напряжения и тока дуги фидельного электрода, в среднем, на 15 и 31 % соответственно, ниже, чем у монолитного электрода.

Установлено, что на промышленных ДСП ПТ-12 при переплаве отходов FeSiMn, обеспечивают-

ся: экономия активной электроэнергии до 10 %; снижение реактивной мощности до 23 %; повышение $\cos \varphi$ с 0,48 до 0,74; снижение уровня шума; устойчивый электрический режим в широком диапазоне изменений электрических параметров и длин дуг.

Определены перспективные направления исследований свойств фидельных электродов для ДСП ПТ.

1. Дюдкин Д.А., Кисленко В.В. Производство стали. — Т. 1. — М.: Теплотехник, 2008. — 528 с.
2. Белковский А.Г., Кац Я.Л., Криснянский М.В. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкций (ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» // Сталеплавильное производство. Бюллетень «Черная Металлургия». — 2013. — № 3. — С. 73–75.
3. Rob Boom. Breakthrough development in ironmaking and steelmaking: collaboration or competition // 2nd Intern. conf. «Advanced in Metallurgical Processes and Materials» Ad-Met, 2015. — P. 9–14.
4. Украинская Ассоциация сталеплавильщиков. Информац. портал о черной и цветной металлургии. Апрель 2015 г.
5. Окорочков Н.В., Никольский Л.Е., Егоров А.В. Влияние трубчатых электродов на тепловую работу дуговой электросталеплавильной печи // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 1952. — № 9. — С. 105–110.
6. Воденников С.А. Изучение возможности снижения электросопротивления графитированных электродов. — Запорожье: ЗГИА, Металлургия. — 2001. — Вып. 5, С. 33–134.
7. Фидельные электроды электродуговых печей / Б.Е. Патон, В.И. Лакомский и др. // Черные металлы. — 2011. — № 5. — С. 13–15.
8. Казачков Е.А., Чепурной А.Д. Пути повышения производительности дуговых сталеплавильных печей // Вісник Призовського державного технічного університету. — 2005. — Вип. — № 15. — С. 1–5.
9. Сидорец В.Н., Пентегов И.В. Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. — 272 с.

It was outlined that the world production of steel during recent decade is continuously growing. Moreover, the amount of steel, melted in arc melting furnaces of alternating (EAF) and direct current (EAF DC) is increased. By possessing a number of technological advantages the EAF DC are actively implemented at the metallurgical enterprises. The effective means for improvement of technical-economical values of EAF DC are the cored graphitized electrodes, developed at the E.O. Paton Electric Welding Institute. The research works of the first stage, carried out in the industrial furnaces of EAF DC-12 types showed that the arc of the cored electrodes is always maintained in the electrode center, a stable electric mode of melting at long arcs and low voltages of the power source is provided. It was found that the voltage in the near-cathode zone, as well as the range of pulsations of current and voltage of the cored arc is much lower than that in conventional (monolithic) graphitized electrode. These factors stipulated the saving of active electric power, reduction in reactive losses, increase in $\cos \varphi$ and decrease in level of the furnace noise. The further our works are directed to the investigation of effect of cored electrodes on the resistance of refractories, efficiency of furnaces, consumption of electrodes, as also the feasibility of application of cored electrodes of smaller diameter as compared with a monolithic electrode. 9 Ref, 2 Tables, 9 Figure.

Key words: cored graphitized electrodes; arc steel melting furnaces of alternating and direct current; active and reactive electric power; volt-ampere characteristic; pulsations of current and voltage

Поступила 01.12.2015