

## Подовые электроды ДСППТ. Обзор основных технических решений.

Тищенко П.И., Тимошенко С.Н., Онищенко С.П.

ЧП «Фирма «РОУД», Украина, Донецк. (<http://roud.com.ua>).

Фирмы-производители печей применяют собственные запатентованные конструктивные решения подовых электродов (ПЭ) дуговых сталеплавильных печей постоянного тока (ДСППТ), но их детальный сопоставительный анализ в доступных источниках не приводится. Наибольшее распространение получили электроды стержневого типа (фирма «Danieli», Италия) [1,2], а также пластинчатого типа (фирма «Siemens VAI», ранее «VAI/Fuchs», Германия) [3].

ПЭ стержневого типа (рис.1а) состоит из биметаллического стержня, изолированного от кожуха печи, с верхней стальной частью и нижней медной водоохлаждаемой частью, к которой выполнен токоподвод. ПЭ пластинчатого типа (рис.1б) состоит из группы токопроводящих стальных пластин, замурованных в огнеупорную набивку на всю толщину пода. Токопроводящие элементы (их число может достигать нескольких сотен) соединяют с источником питания и охлаждают воздухом.

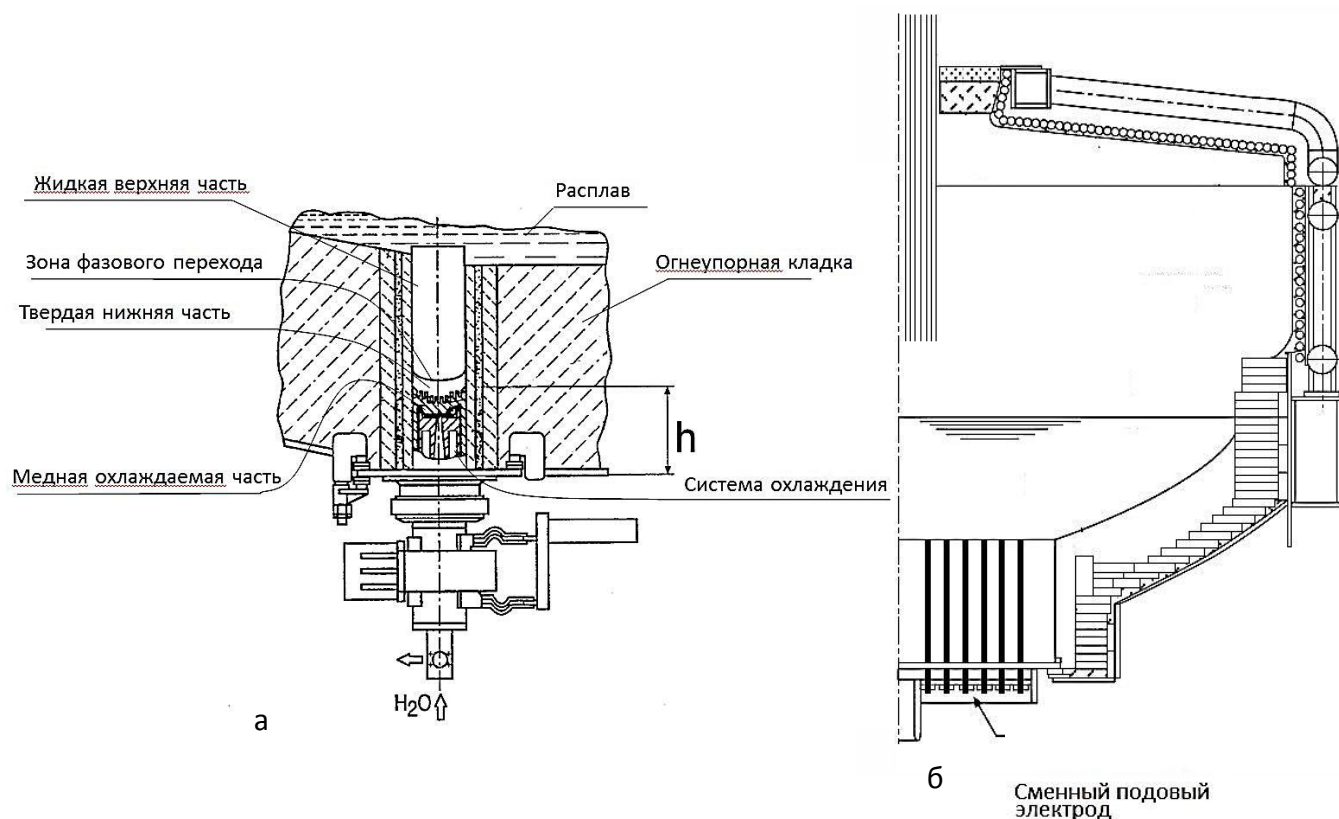


Рис. 1. Основные схемы подовых электродов.

а-стержневого типа, фирма «Danieli», б-пластинчатого типа, фирма «Siemens-VAI».

Стойкость подовых электродов фирмы «Danieli» составляет до 5300 плавов [1]. Стойкость сменной части подины – подового электрода фирмы «Siemens VAI» достигает 2000 плавов, а теоретически (до утонения подины с 900 мм до 400 мм) может составлять до 2600 плавов [2] при сопоставимых геометрических, и теплоэнергетических параметрах печей.

На заводах Украины эксплуатируют ДСППТ вместимостью до 12 т, в России – до 25 т. Практически на всех ДСППТ Украины и России используют ПЭ стержневого типа, особенностям которых уделено основное внимание в данном обзоре.

ПЭ является наиболее критичным узлом ДСППТ из-за проблемы стойкости футеровки и самого электрода, вызванной образованием в подине «анодной ямы» (рис.4), выходящей в ряде случаев за пределы кожуха печи [4]. «Анодная яма» представляет собой расплавленную стальную часть ПЭ и обусловлена значительным (несколько МВт/м<sup>2</sup>) тепловым потоком конвекции в перемешиваемой электромагнитными силами ванне при недостаточной теплопроводности электрода и удаленности (по соображениям безопасности эксплуатации печи) канала водяного охлаждения от ванны.

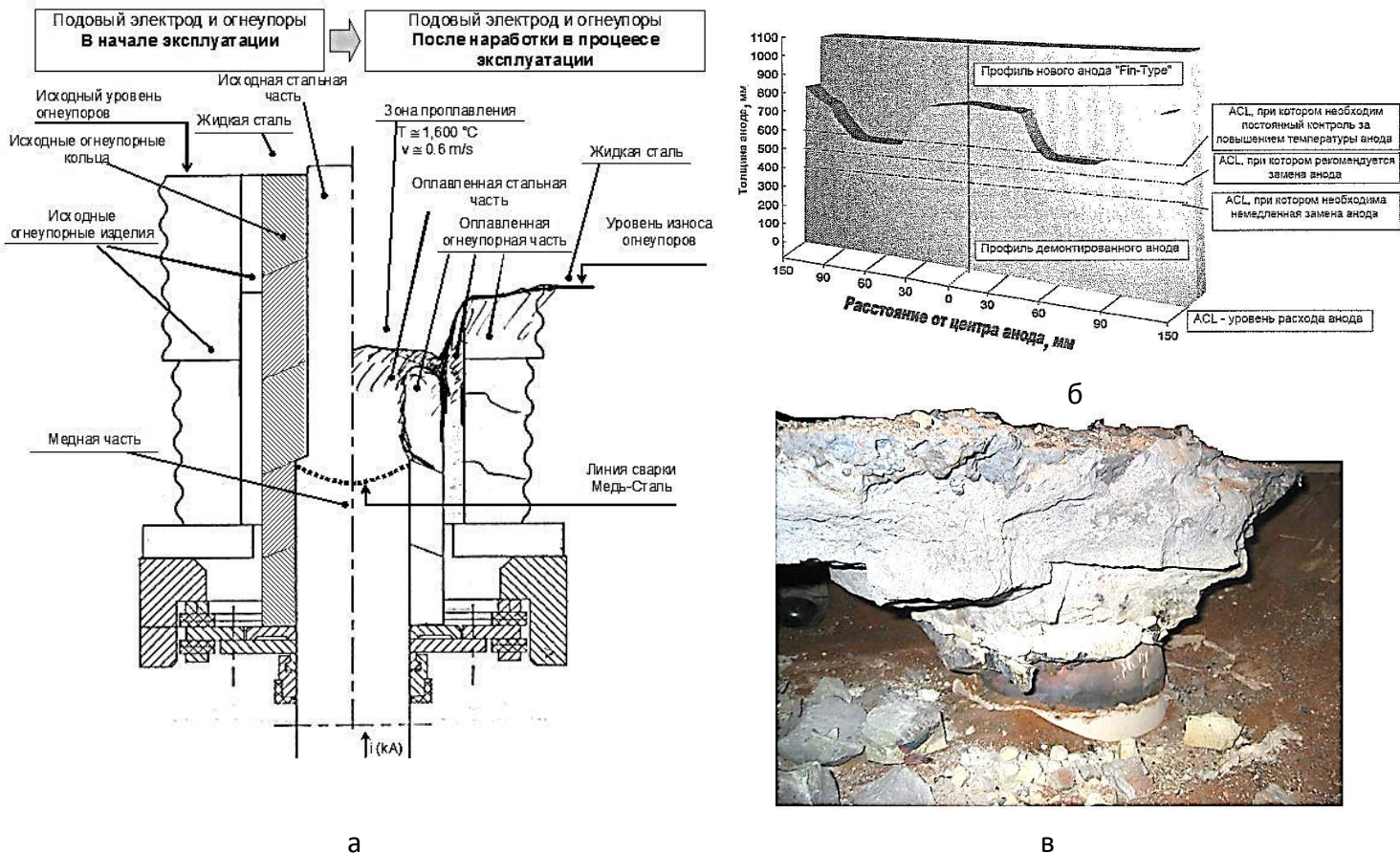


Рис.2. Износ подового электрода и футеровки.

а- схема износа подового электрода стержневого типа, б-схема износа подового электрода пластинчатого типа, в- вид на подовый электрод стержневого типа после расчистки футеровки.

Для минимизации «анодной ямы» фирма “Danieli” (Италия) использует приближение водяного канала к жидкой ванне вместе с увеличением интенсивности охлаждения ПЭ [2], что требует тщательного контроля теплового состояния электрода.

По теплотехническим расчетам, для обеспечения надежной эксплуатации ПЭ и эффективного отвода тепла из области «анодной ямы» к воде, переходная область медь-сталь, загрязненная примесями железа должна быть, как можно, более узкой, а повышение интенсивности водяного охлаждения сверх определенного предела (коэффициент теплоотдачи от стенки к воде выше 40 кВт/(м<sup>2</sup>·К)) неэффективно.

### Для изготовления заготовок ПЭ используют следующие технологии:

- Технология Института электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, г. Киев – последовательный электрошлаковый переплав стального и медного расходоуемых электродов в кристаллизаторе [5,6].
- Технология Курганского государственного университета – переплав расходоуемого медного электродов в стальной толстостенной трубе [7].
- Технология фирмы «Danieli» – соединение стальных и медных заготовок методом алюмотермической сварки [1].
- Технология НПФ «ЭКТА», Россия - горячая посадка стальной трубы на медный стержень с дополнительным соединением шпильками [8] .

В технологиях Института электросварки им. Е.О. Патона и Курганского государственного университета – температура шлака должна обеспечить расплавление медного расходоуемого электрода и составляет  $1250^{\circ}\text{C}$  [7]. По диаграмме состояния Cu-Fe при данной температуре растворимость железа в меди достигает 10%, что снижает тепло- и электропроводность переходной области в 2-3 раза; соответственно повышает термическое сопротивление электрода и ведет к его перегреву и расплавлению.

В технологии фирмы «Danieli» основная трудность заключается в получении качественной сплошной и узкой переходной области сталь-медь в трудно контролируемом процессе алюмотермической сварки.

В технологии НПФ «ЭКТА», по нашему мнению, негативным фактором является дополнительное контактное термическое и электрическое сопротивление механического (шпильки) соединения медь-сталь. В процессе циклической термической нагрузки за счет разных коэффициентов линейного расширения меди и стали происходит окисление контактирующих поверхностей, что способствует повышению термического сопротивления переходной области и снижает долговечность изделия.

Учитывая недостатки вышеописанных технологий ЧП «Фирма «РОУД», Украина разработала и внедрила технологию электрошлаковой наплавки меди на стальную заготовку в теплоизолированном графитовом тигле с использованием нерасходоуемого графитированного электрода. Это позволило поддерживать температуру шлаковой ванны на уровне, достаточном для расплавления подаваемой медной (М0 или М00) шихты с перегревом расплава меди не более  $20^{\circ}\text{C}$ . Периодическое «замораживание» наплавленных слоев для минимизации диффузии железа в меди позволяет получить качественную узкую переходную область. Выбранный флюс обеспечивает надежное удаление окислов со стальной заготовки и, как следствие, высокую адгезию меди к стали (прочность сплавления выше прочности меди – см. рис. 3). Для дополнительной надежности соединения стык медь – сталь выполнен с замками типа «ласточкин хвост». В 30 мм от стыка обеспечено содержание железа в меди на уровне химического состава меди М2-М1 и коэффициент теплопроводности не ниже  $370 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , что подтверждается результатами химических анализов и механическими испытаниями ( рис 3.)



Рис.3–Образец стыка медь-сталь после механических испытаний.

## Конструктивные особенности подовых электродов стержневого типа:

### Геометрия со стороны жидкого металла.

1. Фирма «Danieli» , Фирма «РОУД» - цилиндрический стержень;
2. НТФ «ЭКТА» - оребренный стержень (компромиссный вариант между решениями фирм «Danieli» и «Siemens-VAI» -см. рис.1.)

### Геометрия с наружной стороны кожуха.

1. Фирма «Danieli» - канал водяного охлаждения медной части заходит в подину печи на 1/3 толщины футеровки (рис. 1).
2. НТФ «ЭКТА» - канал водяного охлаждения медной части ниже кожуха печи на 1/4-1/2 толщины футеровки подины (рис.4).
3. ЧП «Фирма «РОУД» - канал водяного охлаждения медной части заходит в подину печи на 1/4 толщины футеровки (рис.5);

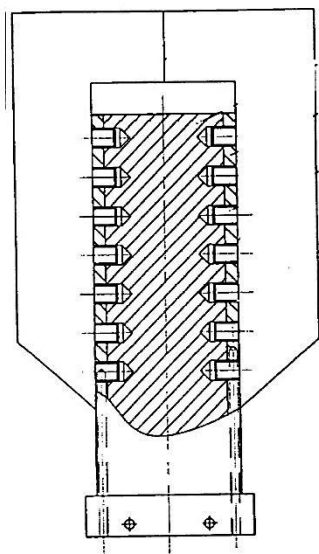


Рис. 4. Конструкция подового электрода НТФ «ЭКТА»[8].

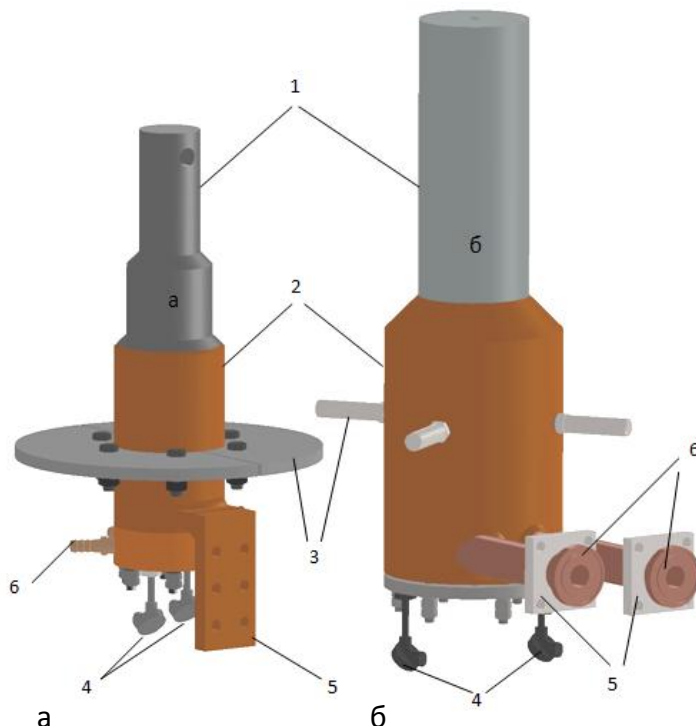


Рис.5—Общий вид подовых электродов ЧП «Фирма РОУД». а- для токов до 6кА, б-для токов до 20кА.

1 – стальная часть; 2 – медная часть; 3 – опорные элементы; 4- термопары; 5- токоподвод; 6- патрубки для охлаждающей воды.



Подовый электрод НТФ «ЭКТА» представляет собой компромиссную конструкцию между классическими стержневым и пластинчатым электродами. Учитывая отдаленность границы водяного охлаждения от кожуха печи и пониженную теплопроводность стержня за счет контактного сопротивления медь-сталь, можно ожидать стойкость на уровне пластинчатых электродов фирмы «Siemens VAI». Однако, как было отмечено ранее, в процессе эксплуатации возможно окисление контактных поверхностей стальной трубы и медного стержня и, как следствие, потеря работоспособности ПЭ.

Для стержневых ПЭ фирмы «Danieli» и ЧП «Фирма «РОУД» «заметаливание» поверхности «анодной ямы» и образование «грибка» из застывшего металла на верхней части стального стержня (см. рис. 2 в) в начальный период эксплуатации равноценно использованию стальных приварных листов, как у НТФ «ЭКТА».

Таким образом, для ДСППТ украинских заводов предпочтительным представляется использование ПЭ стержневого типа ЧП «Фирма «РОУД».

### **Список литературы.**

1. Лопухов Г.А. Подовый электрод дуговой сталеплавильной печи постоянного тока конструкции фирмы DANIELI // Электрометаллургия. 2004. № 6.С. 48.
2. Патент WO2011073244A1, Danieli, 2011.
3. Райле В. Подовый электрод дуговой печи SIMETALcis постоянного тока// Электрометаллургия. 2010. №12. С 18-20.
4. Liu X. Melting mechanism of water-cooled billet-type bottom electrode of direct current arc furnace: a numerical approach / X.Liu, J.Zhou, H.Shi et al// Metallurgical and materials transactions B. - October 2008. - №39B. - P.713-724.
5. Применение ЭШП по двухконтурной схеме для получения сталемедных заготовок анодов дуговых печей постоянного тока/ В. А. Зайцев., Медовар Л.Б., Тищенко П.И. Федоровский Б.Б., Журавель В.М. // Современная электрометаллургия. - 2011. - N 2.
6. Зайцев В.А. Подовые электроды дуговых печей постоянного тока / В. А. Зайцев, Л. Б. Медовар // Современная электрометаллургия. - 2009. - N 2. - С. 3-8.
7. Соловьев Г.И., Давыдов А.К., Марфицын В.В. Изготовление заготовок подовых электродов электрошлаковым способом// Заготовительные производства в машиностроении.- 2003. №6. С.12-13.
8. Патент РФ № 2285356. В.С. Малиновский. 2006.