



## СВАРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ РАЗНОРОДНЫХ ПРОВОДНИКОВ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, чл.-кор. НАН Украины **В. И. ЛАКОМСКИЙ**

(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

**В. И. БРАГИНЕЦ**, канд. техн. наук (ЗНИЦ ПТ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Запорожье)

Обоснована высокая энергоэффективность использования разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона сварных электрических контактов металлов с различными углеродными материалами и сварных электроконтактов катодных блоков и обожженных анодов. Разработаны конструкции электроконтактных пробок (ЭКП), а также дуготроны — специальные бесплощевые горелки, работающие на оксидном катоде. Даны примеры эффективного применения контактных узлов с ЭКП в печах синтеза и Ачесона.

*Ключевые слова:* энергозатраты, потери электроэнергии, электрический контакт, переходное электросопротивление, оксидный катод, дуготрон, смачивание, сварка «металл – углеродный материал», электроконтактная пробка, сварная контактная сборка, электролизер, печь Ачесона

Как свидетельствует мировой рынок электроэнергии, стоимость последней непрерывно возрастает и, видимо, такая тенденция сохранится еще надолго, если не навсегда. В связи с этим первостепенной задачей заводских ИТР должен быть поиск новых путей минимизации расхода электроэнергии в технологических процессах и непрерывная борьба с потерями электроэнергии. Насколько эффективно решается эта задача на производстве?

На примере производства алюминия покажем, как расточительно расходуется электроэнергия в этой подотрасли цветной металлургии.

Передача электроэнергии от электростанции к алюминиевому заводу зависит от расстояния и доходит до 13 % потерь, поэтому энергетики затрачивают много усилий для энергосбережения, повышая, например, напряжение в ЛЭП. Когда же электроэнергия доставлена на завод, отношение к ней меняется. Одному из авторов доводилось видеть на одном из уральских промышленных предприятий как сварку магистральных алюминиевых шин в цехе производства магния выполняли открытой угольной дугой большой мощности, без какой-либо газовой или шлаковой защиты. Так работали только во времена Н. Н. Бенардоса, когда начиналась дуговая сварка в России и то сваривали сталь, а не алюминий. Этот технологический прием даже трудно назвать сваркой. Можно лишь представить себе, сколько оксидных пленок при этом запутывалось в сварном шве и сколько электроэнергии потом терялось на этом соединении.

В последнее время при проектировании новых алюминиевых заводов принято рассматривать комплекс «алюминиевый завод – электростанция» как единое целое и предпринимать все необходимые меры для энергосбережения.

Из статистических данных, полученных еще в советское время, известно, что из всех потребителей электроэнергии в народном хозяйстве Советского Союза наиболее энергоемким была алюминиевая промышленность. Для того чтобы представить себе насколько много электроэнергии требуется в современном производстве алюминия, приведем такой пример. На производство 36 млн т алюминия (достигнутое недавно ежегодное производство металла во всем мире) требуется столько электроэнергии, сколько может выработать за два с половиной года такой гигант, как Красноярская ГЭС.

Столь огромное потребление энергии при производстве алюминия методом высокотемпературного электролиза объясняется прежде всего весьма прочной химической связью между алюминием и кислородом в глиноземе  $Al_2O_3$  — сырье для производства этого металла. На преодоление химической связи между элементами в этом соединении с целью высвобождения алюминия по различным данным требуется затратить около 7 тыс. кВт·ч, в расчете на каждую тонну получаемого металла. В то же время в промышленности в целом удельный расход электроэнергии в среднем составляет 14 тыс. кВт·ч. Остальные 7 тыс. кВт·ч — это потери.

Полезно используется лишь половина всей электроэнергии, подводимой к алюминиевому электролизеру. Не слишком ли расточительно?

Серьезный и добросовестный ученый, стоявший у истоков металлургии алюминия СССР, Ю. В. Баймаков еще в довоенные годы тщательно проанализировал энергозатраты при производстве легких металлов, а в блокадные ленинградские годы написал небольшую, но весьма ценную кни-

гу [1]. Он показал, что в конструкции алюминиевого электролизера наиболее расточительными являются прижимные электроконтакты между стальными токоподводами и электродами из графитированного углеродного материала при их исполнении с помощью чугуновой заливки. Только на этих контактах теряется до 30 % всех потерь, наблюдаемых в многочисленных электроконтактах электролизера. Вот он, Молох, пожирающий так тяжело достающуюся человечеству электроэнергию. Последователи Ю. В. Баймакова пренебрегли его рекомендациями и даже придумали название этим паразитным контактными сопротивлениям — «греющие сопротивления». Тем самым они реабилитировали эти потери, свыклись с ними, поэтому даже в электролизерах XXI в. ныне сохраняются те же конструкции контактов, что использовались более ста лет назад в первых промышленных агрегатах.

Как известно всем алюминщикам, электрические контакты в подине электролизера изготавливаются путем заливки жидким чугуном технологической щели, образующейся между стальным токоподводом и пазом, в углеродном подовом блоке. Жидкий чугун хорошо смачивает твердую сталь, поэтому создается хороший электрический контакт. В то же время жидкий чугун совершенно не смачивает углеродный материал подового блока, поэтому перенос электрических зарядов через эту поверхность раздела осуществляется с большими энергопотерями, а сама поверхность раздела доступна для проникновения на нее различных легкоплавких материалов. В процессе работы электролизера на эту поверхность через катодный блок и особенно по швам между блоками просачиваются отдельные элементы электролитной ванны. Со временем эта граница раздела теряет значительную долю и без того малой электропроводности. Вот еще один «виновник» огромных потерь электроэнергии. Здесь мы имеем пример того, как ради простоты технологии сборки катодных блоков, затем в процессе четырех-пятiletней эксплуатации электролизера допускаются большие потери электроэнергии.

Далее, как показывает анализ, большинство электроконтактов в электрометаллургических установках работает при повышенных температурах до 250...300°C, а также 850...900°C (подовые блоки). И, несмотря на столь тяжелые условия работы электрических многоамперных контактов, их исполняют прижимными, что порождает огромные потери электроэнергии вследствие высокого переходного электросопротивления и, что особенно важно отметить, увеличивающегося во время работы агрегата. Для иллюстрации количества потерь электроэнергии на многоамперных контактах можно показать, что каждый микроом сопротивления в современном электролизере на 175 кА приводит

к ежегодной потере  $1 \cdot 10^{-6} (175)^2 \cdot 10^6 \cdot 24 \cdot 365 = 268$  тыс. кВт·ч. И это только на одном контакте!

В алюминиевой промышленности находятся в эксплуатации еще много электролизеров с самоспекающимися анодами (аноды Содерберга), к которым электроэнергия подводится от магистрального шинпровода цеха с помощью алюминиво-медно-стальных спусков. Использование в них прижимных контактов вынуждает рабочих довольно часто зачищать вручную контактные поверхности в некомфортных условиях труда (температура до 150...200°C). Посылать рабочих выполнять эти работы на высоте и при таких температурах, это, на наш взгляд, бесчеловечно. Видимо ИТР алюминиевых заводов забыли, что изначально в истории развития техники обязанностью инженеров было облегчение труда рабочих, механизация их труда, создание таких конструкций, которые бы избавляли рабочих от труда в тяжелых условиях.

Эти два примера мы привели для того, чтобы показать, что алюминщики используют в своих электролизерах архаичные конструкции мощных контактных узлов, несмотря на то, что, вот уже более 20 лет существуют прогрессивные сварочные технологии.

Благодаря изобретению оксидных катодов сварочных дуг [2, 3] Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины разработал еще в 1980-х годах и всесторонне проверил в промышленных условиях способ изготовления сварных электрических контактов металлов с различными углеродными материалами [4].

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработаны технологии монтажа с помощью сварных электроконтактов катодных блоков и обожженных анодов. Что касается подвесного контакта «алюминий–медь», то в институте на основе нового способа сварки спроектирован энергоберегающий контакт, не требующий зачистки контактных поверхностей в течение всего ресурса электролизера. Этот контакт получил название «серьга ИЭС», поскольку находится в подвешенном состоянии.

Когда-то в алюминиевых цехах все электрические контакты были прижимными, но после Великой Отечественной войны Минцветмет СССР своим приказом обязал заводы заменить их сварными электроконтактами. Тогда не были известны способы сварки разнородных материалов, а переход на сварные контакты только в металлических проводниках позволил сэкономить 7 % электроэнергии, потребляемой заводами Союзалюминпрома. В целом по стране это составило ощутимый экономический эффект.

В настоящее время широко известны разработки Института электросварки им. Е. О. Патона в области сварки разнородных электропроводных



материалов, но алюминиевые заводы почему-то обходят их. Они, теряя огромное количество электроэнергии, включают эти потери в себестоимость металла и не хотят переходить на новые методы монтажа электрических контактов. Поэтому половину себестоимости алюминия составляет электроэнергия. Нет министерства, которое могло бы заставить заводы освоить новую сварочную технологию! Очевидно, здесь требуется решение правительства, поскольку потери электроэнергии достигают, например, в России при производстве 5...6 млн т алюминия в год, величин государственных масштабов. На наш взгляд, правительству не стоит соглашаться с просьбами алюминщиков снизить тарифы на электроэнергию, отпускаемую государственными электростанциями. У них есть свои внутренние резервы, которые позволяют снизить удельный расход электроэнергии и, тем самым, снизить себестоимость металла, что повысит конкурентоспособность российского алюминия на внешнем рынке.

Справедливости ради следует признать, что выполнение монтажных работ на катодных блоках и на обожженных анодах, конечно, более трудоемкий процесс, нежели заливка блоков жидким чугуном, но, перейдя на новую технологию, завод сэкономит электроэнергию, стоимость которой перекроет с лихвой затраты на оплату труда более квалифицированных рабочих-сварщиков, нежели заливщиков жидкого чугуна. Не следует забывать, что, выплачивая больше рабочим за их труд, завод вносит вклад в решение одной из социальных задач. Кроме того, завод избавляется от вагранок, источника вредных газов, пыли и шлака, несвойственных алюминиевому производству, улучшая тем самым экологическую обстановку на заводе.

Вернемся теперь к контактам. Из теории контактов твердых тел [5] известно, что, как бы тщательно ни подготавливали поверхность металлических контактов, она тем не менее остается шероховатой и реальный контакт двух контактных губок осуществляется не по всей видимой площади, а только по микровыступам на этой поверхности. На медно-алюминиевых контактах реальная площадь, например, составляет всего лишь 5 % видимой площади. В связи с этим контактирующие поверхности с силой прижимают друг к другу, стараясь деформировать микровыступы и тем самым увеличить реальную площадь прижимного контакта. Однако более чем до 30 % увеличить площадь реального указанного контакта физически невозможно.

Данное явление объясняется гиперболической зависимостью контактного электросопротивления от силы прижатия друг к другу контактной пары. Начальные усилия прижатия весьма эффективны и, наоборот, последующие усилия очень слабо действуют на сопротивление контакта.

Такой же характер зависимости между контактным электрическим сопротивлением и, как это на первый взгляд ни странно, силой тока наблюдается при нормальной (комнатной) температуре у контакта «углеродный материал – чугун»: чем выше сила тока, проходящего через контакт, тем ниже его сопротивление. Это явление (явление фитинга) объясняется электрическим пробоем узкого воздушного промежутка между контактирующими материалами. При этом в области больших токов образуются, образно говоря, дополнительные микромостики из чугуна и по ним устремляется ток. Необходимо отметить, что это явление наблюдается только при нормальной температуре. Если же температуру повысить и поверхность чугуна при этом окислится, то явление фитинга, к сожалению, не наблюдается.

В противоположность этому в сварных контактах реальная контактная поверхность равна видимой поверхности. В этом состоит главное преимущество сварных металлических электроконтактов. Естественно, что при этом контактное электросопротивление сварных контактов намного ниже прижимных и главное не возрастает во время работы контакта.

Сварные электрические контакты металлов с углеродными материалами в этом отношении стоят на особом месте. Дело в том, что все твердые углеродные материалы пористые. Общая пористость их колеблется от 20 до 30 %. Есть специальные графитированные материалы с пористостью 50 %.

Указанные материалы имеют поры двух типов: закрытые, обособленные и каналные, транспортные поры. Важно отметить, что последние составляют 3/4 общего объема пор.

При сварке металлов с углеродными материалами используется эта их особенность. Жидкая медь или алюминий в обычных условиях не смачивают углеродные материалы. Если же добавить в них сильные карбидообразующие элементы, лучшими из которых в данном случае являются кремний и марганец, то угол смачивания углеродных материалов падает до 5...15° и тогда жидкий перегретый сплав проникает вглубь графитированных материалов по их транспортным порам на 10...15 мм. В этом случае площадь реального контакта в десятки, а то и сотни раз превышает видимую площадь. В практике электрических контактов — это беспрецедентный случай, и человек обязан использовать этот подарок природы. Жидкое железо смачивает углеродные материалы, но в электроконтактные сплавы на железной основе, тем не менее, тоже добавляют некоторые карбидообразующие химические элементы.

Конструктивным элементом различных сварных контактных сборок является так называемая электроконтактная пробка (ЭКП). Три варианта конструкции этой пробки показаны на рис. 1. ЭКП

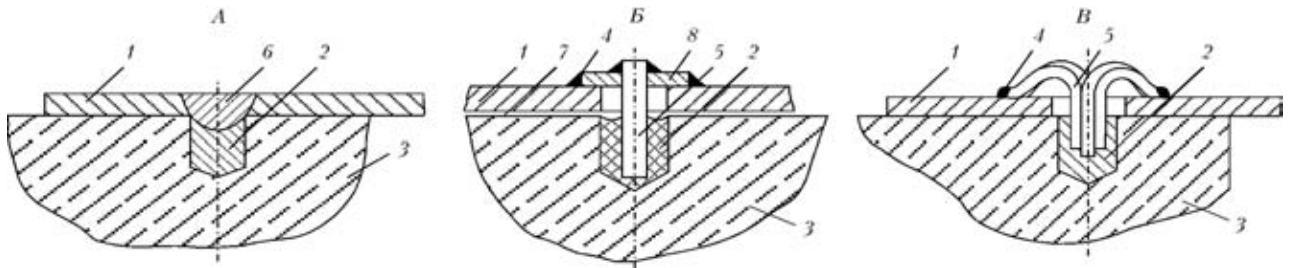


Рис. 1. Схемы сварных соединений «металл – углеродный материал» разных вариантов (А–В): 1 — металлическая пластина; 2 — ЭКП; 3 — углеродный блок; 4 — сварной шов; 5 — компенсатор; 6 — электрозаклепка; 7 — зазор между пластиной и углеродным блоком; 8 — шайба

представляет собой пробку диаметром 30 мм и глубиной не более 40 мм, вваренную в массив углеродного блока, будь это катодный блок электролизера или его обожженный анод. ЭКП является общим элементом для всех трех вариантов электроконтактных сборок. Они различаются способом электрического соединения с плоским металлическим токоподводом. Вариант А рекомендуется применять в контактных сборках, если расстояния между крайними пробками не превышают 200 мм, вариант В — при расстояниях в зависимости от диаметра штыря-компенсатора до 500 мм. И, наконец, вариант В можно использовать без ограничения межпробковых расстояний. На рисунке показано, что компенсатор, будь это единичный пруток или пучок тонких прутков, приварен к токоподводу ручной или полавтоматической электросваркой.

Основа электроконтактного сплава пробки и материал компенсаторов обязательно должна быть такой же, как и металл токоподвода. Назначение компенсаторов сводится к тому, чтобы сгладить огромную разницу в значениях термического коэффициента линейного расширения (КТЛР) углеродного материала ( $4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) и, например, алюминия ( $28 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Если отказаться от компенсаторов, то при изменении температуры сварное соединение под действием термических напряжений может разрушиться. Контактное сопротивление ЭКП в зависимости от материала сплава, измеренное при комнатной температуре, колеблется от 50...70 (для медного электроконтактного сплава) до 100...120 мкОм (для железного сплава). Предельное значение токовой нагрузки ЭКП колеблется от 400 (для железного сплава) до 750 А (для алюминиевого и медного сплавов).

Создание ЭКП нам далось нелегко: габариты пробки определяются сопоставлением сил адгезии сплава к углеродному материалу с силами, которые вызываются литейной усадкой жидкого сплава ЭКП при его затвердевании и термической усадкой металла при его дальнейшем охлаждении.

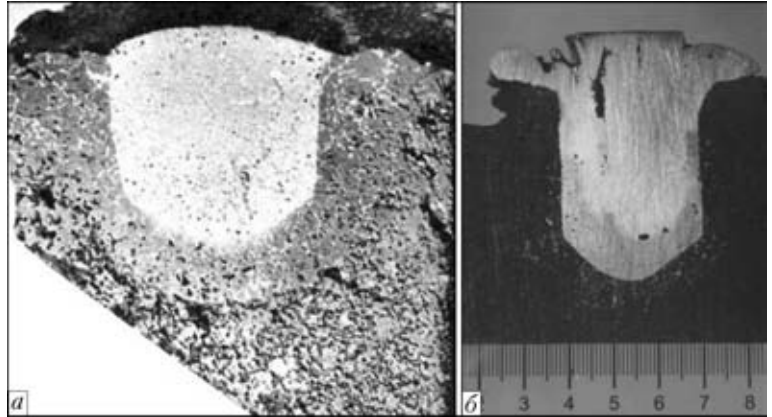


Рис. 2. Макрошлифы ЭКП, вваренных в углеродный материал: а, б — соответственно сплав на железной и алюминиевой основе

Специфическим и очень ценным свойством пробки является постоянство значения контактного сопротивления в процессе многолетней работы пробки. Добавим, что при нагреве ЭКП ее сопротивление снижается на 20...30 %.

С металлургической точки зрения удивительно, что после сварки на открытом воздухе содержание кислорода, например, в металле сплава на железной основе не превышает 0,005 %. Такое же содержание кислорода обнаруживается в обычном сером чугуне. Объяснение этому феномену находим в низком локальном парциальном давлении кислорода в газовой атмосфере в углублении углеродного материала в процессе вваривания пробки, в кратковременном исполнении пробки и в наличии в металле электроконтактного сплава среди присадок сильных раскислителей.

Нормальная макроструктура ЭКП представлена на рис. 2 их продольными сечениями. На рис. 2, а просматривается плотная хорошо сформированная граница раздела «пробка–углеродный материал» и мелкая рассредоточенная усадочная пористость в объеме пробки. На рис. 2, б видно, что прилежащие к пробке слои углеродного материала глубоко пропитаны электроконтактным сплавом.

Технология вваривания пробки контролируется как контактным электросопротивлением, так и механической силой вырыва пробки из углеродного массива. Усилие вырыва в зависимости



Рис. 3. Внешний вид пробок после испытания на вырыв: верхняя — выполнена с соблюдением технологии; нижняя — с нарушением

от сплава пробки составляет от 600 до 1000 кг. На рис. 3 показаны две вырванные пробки. Конусная форма вырванной пробки свидетельствует о соблюдении технологии сварки. В этом случае сплав по транспортным капиллярным каналам проник глубоко в металл. Такую пробку можно вырвать, приложив усилие до 1000 кг, ее контактное сопротивление минимальное. Другая пробка по форме цилиндрическая, с «лысой» по выражению рабочих поверхностью, вырвана при минимальных усилиях ниже 600 кг, имеет повышенное значение контактного сопротивления. Эта пробка выполнена с нарушением технологии.

Техника и технология вваривания пробок в массив углеродного материала является нашим «know-how» и передается заказчику при покупке лицензии. Выполняется ЭКП с помощью дуготрона — специальной плазменной бессопловой горелки, работающей на оксидном катоде.

Оксидные катоды (рис. 4) — изобретение Института электросварки им. Е. О. Патона. Они относятся к разряду нерасходуемых электродов электрической дуги, как вольфрамовые или угольные. Но в отличие от них оксидные катоды могут работать во всех кислородсодержащих газах, вплоть до чистого кислорода. Ресурс их работы такой же, как и у вольфрамового электрода в среде аргона —  $2...4 \cdot 10^{-8}$  г/К. Катодное пятно на жидком оксидном сплаве при больших токах дуги

достигает в диаметре 2 мм, а плотность тока на нем  $300 \text{ А/мм}^2$ . Рекомендуется, чтобы сварочный ток на дуге не превышал  $750...800 \text{ А}$ . Диаметр анодного пятна на углеродном материале достигает 20 мм. Указанные параметры для сварочных дуг уникальны.

Электрическая дуга оксидного катода отличается от свободно горящей дуги на порядок меньшим градиентом напряжения в столбе дуги и высокой самостабилизацией, бесшумностью, а также плоским максимумом температуры в поперечном сечении столба дуги и анодного пятна.

Для использования оксидного катода в сварочных работах создан ряд горелок на различные токи, начиная с 50 А, получивших торговое название «дуготрон». С конструкторской точки зрения — это бессопловый плазмотрон с тепловым КПД 95 %. Работы по ввариванию ЭКП в углеродные блоки выполняют с помощью дуготрона Д-4А (рис. 5).

Многочисленные опыты, проведенные в лабораторных и промышленных масштабах, показали, что применение ЭКП при монтаже катодных блоков электролизеров позволяет получать на каждой тонне алюминия дополнительно  $50...200 \text{ кг}$  металла при том же расходе электроэнергии. Достигается это за счет не только снижения потерь электроэнергии в контактах при передаче ее от стальных токоподводов к катодным углеродным блокам, но и практически полного исключения такого явления как вторичное окисление алюминия в ванне. Дело в том, что при боковом подводе электроэнергии к подине наблюдается достаточно неоднородная плотность тока на рабочей плоскости подовых блоков. В месте подвода тока она в 16 раз больше, чем в удаленных участках блока. Это, естественно, вызывает образование паразитных горизонтальных токов в металлической ванне. Взаимодействие этих токов с магнитным полем электролизера вызывает образование макротокков металла и электролита. Взвешенные в электролите мельчайшие капельки алюминия выносятся на поверхность раздела с воздухом и окисляются. Это и есть вторичное окисление металла.

Если же подвод энергии к блоку выполняется с помощью ЭКП, то достигается превосходная однородность тока. Плотность тока по всей рабочей поверхности блока  $550 \times 1800 \text{ мм}$  колеблется в пределах 3 %. Разумеется, при этом паразитные горизонтальные токи сводятся к ничтожно малым



Рис. 4. Оксидные катоды сварочной дуги для различных технологий

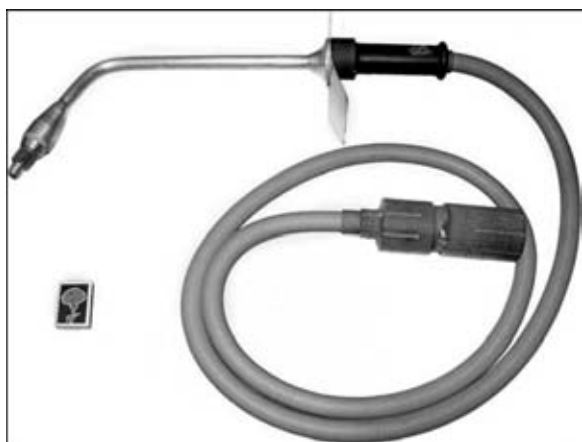


Рис. 5. Специализированный дуготрон Д-4А

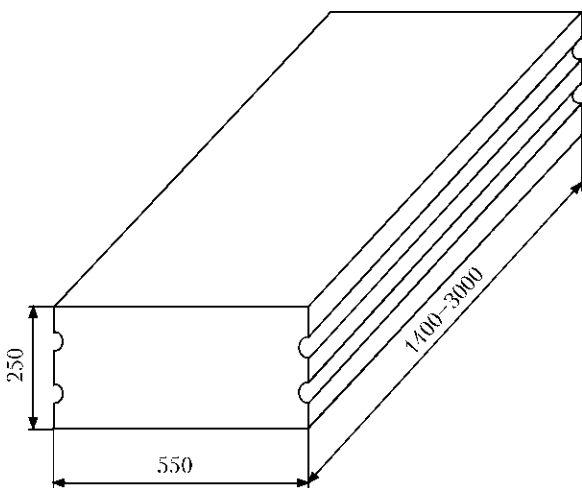


Рис. 6. Схема типичного подового блока новой конструкции



Рис. 7. Фрагменты двух контактных сборок для подины алюминиевого электролизера

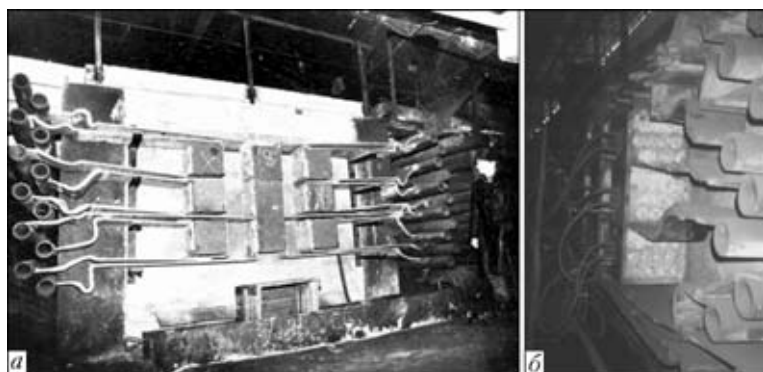


Рис. 8. Задние торцы печей графитации, выполненных с применением ЭКП с неорганизованным (а) и принудительным (б) охлаждением



Рис. 9. Контактная сборка печи синтеза карбида кремния, выполненная с применением ЭКП

значениям, а вторичное окисление металла практически исключается.

Следует добавить, что взаимодействие горизонтальных паразитных токов с основным магнитным полем электролизера вызывает образование стоячей волны жидкого металла ванны. Последнее заставляет технологов увеличивать толщину слоя электролита, что ведет к перерасходу энергии на ведение процесса электролиза.

Кроме того, замена прижимных электрических контактов катодных блоков на ЭКП позволяет экономить 1/3 катодного углеродного материала, ибо в данном случае вместо архаической формы блоков используется простой параллелепипед (рис. 6).

Экономится также стальной прокат на токоподводах (до 20 %) за счет одинаковой плотности тока в токоподводах длинных и коротких катодных блоков, а также в результате исключения натриевого барьера, поскольку его функцию в этом случае исполняют плоские токоподводы к катодным блокам.

Электродные заводы в свою очередь должны снизить цену на катодные блоки, так как их производство упрощается — блоки не нужно экструдировать на чрезвычайно дорогих мощных прессах.

Приведем несколько примеров использования ЭКП в алюминиевых (рис. 7) и магниевых электролизерах, в печах Ачесона для графитации углеродных материалов (рис. 8) и синтеза карбида кремния (рис. 9).

На рис. 8 показан задний торец печи Ачесона на 100 кА, в котором все электрические контакты между металлическими токоподводами и графитированными электродами выполнены сварными, а медная ошиновка заменена алюминиевой.

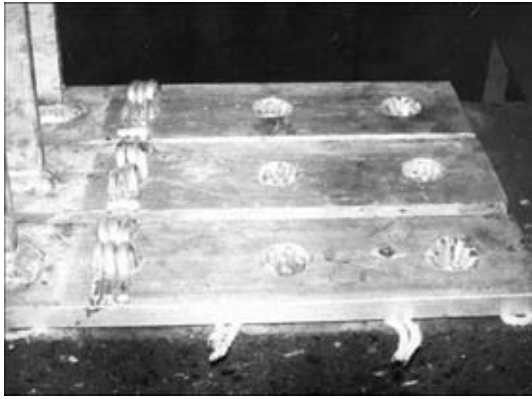


Рис. 10. Элемент контактного узла печи Ачесона, подготовленный к монтажной сварке

Контактная сборка с воздушным охлаждением печи Ачесона на 20 кА для синтеза карбида кремния, выполненная также из алюминия, показана на рис. 9. Один из элементов контактного узла этой печи, подготовленный к ручной монтажной сварке, показан на рис. 10.

Оба примера, относящиеся к печам Ачесона, характерны тем, что обходятся заводу дешевле прижимных контактов с медной ошиновкой по затратам на материалы и обслуживание контактов.

Таким образом, применение описанных в работе решений, найденных специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона, позволит заводам цветной металлургии, электродной и инструментальной промышленности сэкономить электроэнергию и улучшить условия труда рабочих.

1. Баймаков Ю. В. Электролиз в металлургии: Т. 3. Расход электроэнергии в производстве легких металлов. — М.: Металлургиздат, 1944. — 110 с.
2. Лакомский В. И. Оксидные катоды сварочной дуги. — Запорожье: Интернал, 1997. — 192 с.
3. Lakomsky V. J. Oxide cathodes for electric arc. — Harwood: Academic publ., 2000. — 121 p.
4. Лакомский В. И., Фридман М. А. Плазменно-дуговая сварка углеродных материалов с металлами. — Киев: ЭкоТехнологія, 2004. — 196 с.
5. Хольм Р. Электрические контакты. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961. — 464 с.

High energy effectiveness of application of welded electric contacts of metals with different carbon materials and welded electric contacts of cathode units and annealed anodes developed at PWI is substantiated. Designs of electric contact plugs (ECP), as well as arcotrons and special nozzle-free torches using an oxide cathode, were developed. Examples of effective application of contact assemblies with ECP in synthesis and Acheson furnaces are given.

Поступила редакцию 19.05.2011