



УДК 669.117.86.002

## ПРИМЕНЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИЯХ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ ЭШП

К. А. Цыкуленко, Б. Б. Федоровский, А. К. Цыкуленко

Рассмотрена возможность увеличения срока службы кристаллизаторов ЭШП, проанализированы факторы, влияющие на стойкость против разрушения стенки медного водоохлаждаемого кристаллизатора, и пути ее повышения. Описаны новые конструкции токоподводящих кристаллизаторов ЭШП, использующих биметаллические и огнеупорные материалы, при выборе которых предлагается учитывать тип переплавляемого материала.

Feasibility of increase in service life of ESR moulds is considered, factors, influencing the resistance against fracture of wall of copper water-cooled mould, and ways of its improvement are analyzed. New designs of current-supplying ESR moulds, using bimetal and refractory materials, at the selection of which the type of metal remelted should be taken into account are described.

**Ключевые слова:** кристаллизаторы ЭШП; интенсивность разрушения медной стенки кристаллизатора; процесс электрокоррозии; процесс электроэрозии; ремонтпригодность кристаллизатора; биметаллы; огнеупорные материалы

Известно [1, 2], что в процессе электрошлакового переплава (ЭШП) в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе его стенка разрушается вследствие прохождения части тока по цепи электрод–шлак–стенка кристаллизатора. Разрушение заключается в появлении на рабочей поверхности кристаллизатора каверн и раковин, которые с течением времени увеличиваются как в размерах, так и количестве, что в результате приводит к выходу кристаллизатора из строя. Ремонтпригодность медного кристаллизатора довольно низкая. Для исправления дефектов, образовавшихся при наплавке рабочей поверхности кристаллизатора, необходимо нагревать медную гильзу целиком.

В зависимости от условий электрошлакового процесса интенсивность указанного вида разрушений может быть различной. В наименьшей степени подвержены такому виду разрушения стационарные кристаллизаторы, в которых электрошлаковый процесс ведется при сравнительно небольших коэффициентах заполнения. Более интенсивно разрушаются стенки коротких подвижных кристаллизаторов. Этому способствует тот факт, что при относительном перемещении слитка и кристаллизатора шлаковая ванна постоянно находится в контакте с одним и тем же участком его стенки. Скорость разрушения медной стенки кристаллизатора зависит также от состава шлака и средней плотности тока в месте контакта стенки со шлаком. Авторы работы [2]

пришли к выводу, что интенсивность разрушения медной стенки кристаллизатора зависит от плотности проходящего через нее тока: например, при плотности тока свыше  $3 \text{ А/см}^2$  (в случае электрошлакового процесса на фторидных шлаках) она скачкообразно возрастает. Для защиты медной стенки кристаллизатора от разрушения предложено уменьшать значение составляющей тока, проходящего через стенку (например, путем применения добавочного регулируемого сопротивления в цепи кристаллизатора) или покрывать ее слоем металла, более стойкого против анодного разрушения, чем медь. При этом более стойкими против электрокоррозии во фторидных расплавах металлами (по сравнению с медью) являются молибден, вольфрам, ниобий, титан, цирконий и железо, а более стойкими против электроискрового разрушения (электроэрозии) — никель, кобальт, железо и алюминий (расположены в порядке повышения стойкости).

Казалось бы, если железо является более стойким материалом против электрокоррозии и электроэрозии (по сравнению с медью), то в качестве материала для водоохлаждаемого кристаллизатора следует использовать сталь. Она имеет температуру плавления выше, чем медь, и при плотности тока  $40 \text{ А/см}^2$  и выдержке в шлаке в течение 1,5...2,0 ч практически не разрушается [2]. Кроме того, ремонт стального кристаллизатора (заварка дефектов на его рабочей поверхности) значительно проще, чем медного.

Все заключается в теплопроводности материалов. Известно, что медь, имея более низкую температуру плавления, отличается в то же время более высокой теплопроводностью: отводит значительное количество

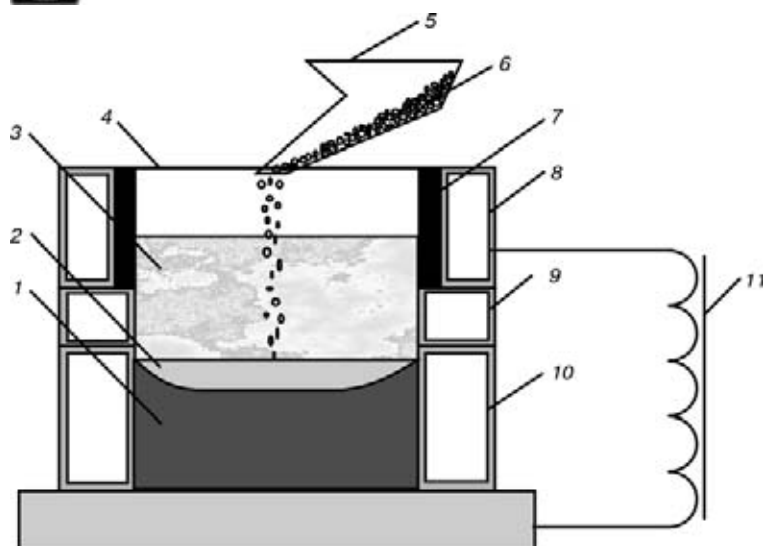


Рис. 1. Схема выплавки слитка в токоподводящем кристаллизаторе [3]: 1 — слиток; 2 — металлическая ванна; 3 — шлаковая ванна; 4 — кристаллизатор; 5 — механизм подачи присадочного металла; 6 — кусковой присадочный материал; 7 — защитный слой (молибден, вольфрам и графит); 8–10 — секции кристаллизатора; 11 — трансформатор

тво тепла от рабочей поверхности кристаллизатора к потоку воды, охлаждающей кристаллизатор. При одинаковой толщине стенки кристаллизатора и параметрах охлаждения водяного канала (напор и температура охлаждающей воды) температура поверхности водоохлаждающего канала стального кристаллизатора будет заметно выше, чем медного. В процессе эксплуатации стального кристаллизатора вследствие воздействия высоких температур и возможного местного кипения охлаждающей воды у его стенки на поверхности водяного канала образуется слой накипи, толщина которого быстро увеличивается. При этом теплопроводность этого слоя незначительна. Образование на поверхности стального водоохлаждающего канала слоя с низкой теплопроводностью приводит к резкому снижению градиента температур в стенке стального кристаллизатора и, как следствие, к его прожогу. Возможное попадание воды в шлак и на зеркало металлической ванны создает аварийную ситуацию. Поэтому, хоть ранее и предпринимались попытки использования в промышленности стальных кристаллизаторов, в настоящее время практически все кристаллизаторы для стандартного процесса ЭШП являются медными водоохлаждаемыми конструкциями.

Развитие и совершенствование электрошлаковой технологии привело к разделению процессов плавления и кристаллизации металла и созданию электрошлаковых технологий переплава и наплавки жидким металлом. Для реализации этих технологий используется кристаллизатор с токоподводящей секцией, выполняющей функцию нерасходуемого электрода. Конструкция такого кристаллизатора (рис. 1) впервые была предложена Г. В. Ксендзыком с группой сотрудников (Институт электросварки им. Е. О. Патона) [3]. В этом кристаллизаторе плотность тока заметно выше указанного значения ( $3 \text{ А/см}^2$ ). Учитывая, что цепь кристаллизатор–

слиток является основной электрической цепью электрошлакового процесса, единственным способом избежать разрушения токоподводящей секции является защита ее рабочей поверхности материалом, который в меньшей степени, чем медь, склонен к анодному разрушению. В качестве такого материала предложили использовать молибден, вольфрам и графит. Практическим решением указанной проблемы явилось создание составной конструкции токоподводящей секции кристаллизатора — водоохлаждаемой медной ватержакетной секции, защищенной сменным графитовым кольцом. Через определенное количество плавов по мере износа графита кольцо заменяют новым. Износ графитового кольца связан не столько с анодным разрушением, сколько с высокотемпературным окислением графита, происходящим вблизи поверхности шлаковой ванны. Сменные кольца

из молибдена или вольфрама не нашли применения из-за низкой стойкости этих материалов против окисления при температурах электрошлакового процесса (что приводит к быстрому выходу их из строя), а также из-за их высокой стоимости.

Кристаллизатор указанной конструкции (со сменным графитовым кольцом) используется при наплавке прокатных валков из высокоуглеродистых материалов. Переход через шлак в металл небольшого количества углерода (по мере износа графитового кольца) не является для указанных материалов особой проблемой. Однако при переплаве сталей и сплавов с ультранизким содержанием углерода применение графита в качестве материала для рабочей поверхности токоподводящей секции не допустимо. Еще одной проблемой, возникающей при использовании графитового кольца для защиты водоохлаждаемой медной стенки, являются его габариты. Так, для выплавки крупных слитков (диаметром 700 мм и более) необходим кристаллизатор, а следовательно, и графитовое защитное кольцо соответствующих размеров, изготовление которого представляет серьезную производственную проблему.

Чтобы исключить попадание графита в металлическую ванну и повысить ремонтпригодность такого кристаллизатора, токоподводящую секцию предложено изготавливать из двух частей — внутренней гильзы из биметалла и наружного кожуха. Одним из возможных типов биметалла является пара медь–сталь, представляющая компромиссное решение между медным и стальным кристаллизаторами. Слой биметалла, контактирующий с наружным кожухом, выполнен из меди, являющейся тепло- и электропроводным материалом, обеспечивающим хороший теплоотвод из второго (стального) слоя, непосредственно соприкасающегося со шлаковой ванной и в незначительной степени подверженного анодному разрушению. Компоненты стального (внутреннего) слоя при попадании в переплавляе-



мый и наплавляемый металл (в любую сталь, в том числе и с ультранизким содержанием углерода) не изменяют его свойства.

Такой кристаллизатор легко ремонтируется. В то же время биметаллическая конструкция внутренней гильзы при соотношении толщины первого слоя к толщине второго (с более низкой теплопроводностью) от 1:1 до 5:1 обеспечивает надежный токоподвод через внутреннюю гильзу к шлаковой ванне и достаточно хороший теплоотвод от кристаллизующегося металла. При соотношении толщины первого слоя к толщине второго менее 1 электрическая и тепловая проводимость внутренней гильзы уменьшается настолько, что нарушается токоподвод к шлаковой ванне и теплоотвод от кристаллизующегося металла, из-за чего происходят дополнительные затраты электроэнергии и ухудшение структуры закристаллизовавшегося металла. При соотношении толщины первого слоя к толщине второго более 5:1 ремонтпригодность кристаллизатора существенно ухудшается, что вызывает опасность прожога ремонтируемого слоя и загрязнение его металлом первого слоя. Кроме того, появляется опасность загрязнения переплавляемого или наплавляемого металла металлом первого слоя еще в процессе переплава или наплавки вследствие прожога стенки кристаллизатора.

В качестве материала внутренней гильзы в зависимости от переплавляемых материалов может быть использован также биметалл медь–титан, медь–никель или медь–наплавляемый сплав.

Кристаллизаторы с гильзой токоподводящей секции из биметалла медь–сталь диаметром до 1500 мм прошли промышленные испытания и с успехом применяются для изготовления валков прокатных станов способом электрошлаковой наплавки жидким металлом на Новокраматорском машиностроительном заводе [5].

К недостаткам конструкции кристаллизаторов с биметаллической гильзой токоподводящей секции, как впрочем и обычных медных, следует отнести тот факт, что тепловая эффективность электрошлакового процесса в таких кристаллизаторах ниже, чем в кристаллизаторах со сменными графитовыми кольцами.

Попытки повысить тепловую эффективность электрошлакового процесса предпринимались и ранее — различного рода шлаковые надставки, крышки, затворы, системы дифференциального охлаждения и пр. [6]. В качестве материалов для футеровки верхней части кристаллизатора, кроме графита, использовали различные шлаки, нитридную керамику, многослойные материалы [6, 7]. Тепловая эффективность электрошлакового процесса в кристаллизаторе с футерованной верхней частью примерно на 20 % выше, чем в обычном водоохлаждаемом медном кристаллизаторе [8].

В настоящее время усовершенствование конструкции токоподводящего кристаллизатора, с точки зрения снижения тепловых потерь, нам представляется следующим образом. Верхняя токоподводя-

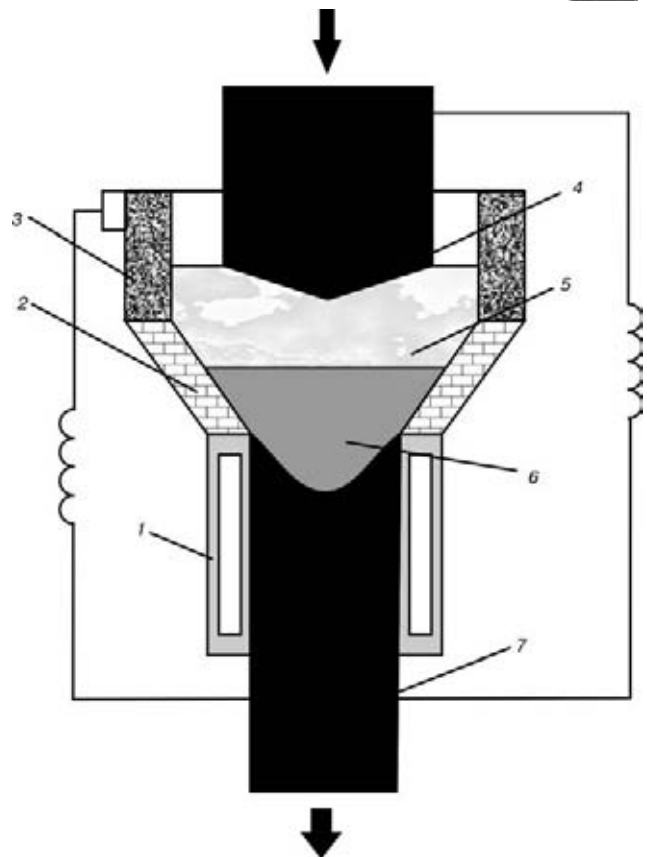


Рис. 2. Схема выплавки слитка в трехсекционном токоподводящем кристаллизаторе: 1–3 — соответственно нижняя, средняя и верхняя секции; 4 — расходный электрод; 5, 6 — соответственно шлаковая и металлическая ванны; 7 — слиток

щая секция такого трехсекционного кристаллизатора может быть изготовлена из электропроводного материала (рис. 2), стойкого против воздействия расплавленного шлака, нижняя секция — из материала с высокой теплопроводностью, стойкого против воздействия жидкого металла, а промежуточная секция — из неэлектропроводного материала с низкой теплопроводностью, стойкого против воздействия расплавленного шлака и металла [9]. Необходимость использования в качестве материала для промежуточной секции неэлектропроводного материала с низкой теплопроводностью вызвана желанием повысить тепловую эффективность процесса, с одной стороны, и обеспечить надежную электрическую изоляцию верхней токоподводящей секции от нижней формирующей секции, с другой. В качестве материала для промежуточной секции можно использовать тот же графит. Секция, находящаяся под слоем шлака, будет подвержена износу в значительно меньшей степени, чем верхняя токоподводящая. Однако учитывая то, что промежуточная секция также, как и верхняя, является неохлаждаемой, изоляционные прокладки между промежуточной и другими секциями будут работать в условиях высоких температур и быстро выгорать, что приведет к короткому замыканию. Поэтому для секций такого кристаллизатора предложены следующие материалы: графит — для верхней неохлаждаемой



секции, медь — для нижней водоохлаждаемой, материал на основе периклаза — для промежуточной.

Исходя из изложенного выше можно заключить, что использование того или иного типа токоподводящего кристаллизатора зависит в первую очередь от того, какой материал (сталь, сплав) предполагается в нем переработать. Состав переплавляемого (или наплавляемого) материала влияет на выбор материала токоподводящей секции. Нам представляется, что в качестве таких материалов должны широко использоваться биметаллические материалы. Если основной проблемой при переработке металла является тепловая эффективность процесса, то токоподводящая и промежуточная секции должны быть неводоохлаждаемыми.

1. Дудко В. А., Рублевский И. Н. К вопросу о природе вентильного эффекта при электрошлаковом процессе // Автомат. сварка, — 1962. — № 3. — С. 40–48.
2. К вопросу об анодном разрушении в шлаке при ЭШП токоведущих металлических элементов / В. Л. Артамонов, Б. И. Медовар, В. М. Мартын, Е. М. Гисер // Спец. электротехнология. — 1972. — Вып. 17. — С. 3–10.

3. Пат. 4185682 USA, МПК В 22 В 27/02. — Оpubл. 29.01.80.
4. Пат. 25605Ф UA, МКИ В 22 Д 19/00. Струмодвідний кристалізатор / Б. І. Медовар, Л. Б. Медовар, Б. Б. Федоровський та ін. — Оpubл. 30.10.98.
5. Рекламные материалы НКМЗ // Пробл. спец. электротехнология. — 2002. — № 2. — 2-я с. обложки.
6. Электрошлаковая плавка в футерованной емкости / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, К. А. Цикуленко и др. // Спец. электротехнология. — 1989. — Вып. 68. — С. 14–22.
7. А. с. СССР № 1563252, В 22 Д 19/00. Кристаллизатор для электрошлакового переплава / Б. И. Медовар, К. А. Цикуленко, А. Г. Богаченко и др. — Оpubл. 05.04.88; Бюл. № 2.
8. Уменьшение тепловых потерь от шлаковой ванны при ЭШП / Б. И. Медовар, Б. Б. Федоровский, К. А. Цикуленко и др. // Пробл. спец. электротехнология. — 1989. — № 4. — С. 22–24.
9. Пат. 49053 UA, МКИ В 22 Д 19/00. Секційний кристалізатор електрошлакових установок / Б. І. Медовар, Л. Б. Медовар, А. К. Цикуленко та ін. — Оpubл. 16.09.2002.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 29.09.2004

## Крупнейший промышленный форум в Украине XIII Международная специализированная выставка «МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ 2004»

17–20 мая 2005 г.

Украина, г. Запорожье

### ОРГАНИЗАТОРЫ

- Министерство промышленной политики Украины
- Запорожская областная государственная администрация
- Запорожский городской исполнительный комитет
- Запорожский областной союз промышленников и предпринимателей «Потенциал»
- Запорожская торгово-промышленная палата

### ТЕМАТИКА

- ⇒ Новые технологии, технологичные материалы, сырье
- ⇒ Машины, механизмы, технологическое оборудование, инструмент и оснастка
- ⇒ Тяжелое машиностроение
- ⇒ Станкостроение, приборостроение
- ⇒ Автотранспортная и дорожно-строительная техника, автосервис
- ⇒ Сельскохозяйственная техника
- ⇒ Топливо-энергетический комплекс, энергосбережение
- ⇒ Горношахтное оборудование
- ⇒ Металлургия, металлообработка, литейное оборудование
- ⇒ Абразивные материалы
- ⇒ Сварка
- ⇒ Электротехника, кабельно-проводниковая продукция, КИИ
- ⇒ Промышленная электроника, электронные приборы
- ⇒ Вычислительная техника, радиоэлектроника, связь, АСУ
- ⇒ Гидро- и пневмоинструмент
- ⇒ Химическая промышленность
- ⇒ Промышленная санитария, спецодежда
- ⇒ Инновационные и инвестиционные проекты
- ⇒ Товары народного потребления

По вопросам участия обращаться в дирекцию выставки:  
Запорожская торгово-промышленная палата  
69000, Украина, г. Запорожье, бульвар Центральный, 4  
Тел./факс: + 38 (0612) 13-50-26, 13-51-67  
E-mail: expro@cci.zp.ua; <http://www.cci.zp.ua>