

# Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

УДК 669.187.26

DOI: 10.14529/met160306

## ОБЗОР СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОЙ ЗАГОТОВКИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ ПЕРЕПЛАВОМ. ЧАСТЬ I

*Д.А. Пятыгин, И.В. Чуманов*

*Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте*

Представлен краткий обзор способов получения полых слитков. В связи с развитием ресурсодобывающих отраслей и энергетического машиностроения возобновился интерес к возможностям электрошлаковых технологий в вопросах повышения качества полой заготовки. Проблема повышения эксплуатационных свойств полых заготовок и снижения их себестоимости является весьма актуальной и требует своего дальнейшего разрешения. Ведь формирование полости методом горячей деформации при производстве полых заготовок замкнутой формы это вынужденное решение, которое использовали металлурги из-за низкого качества литья. Поэтому необходимо получать литые полые заготовки, которые по качеству не уступали бы горячедеформированным. Эта задача успешно решается технологиями на основе электрошлакового переплава. Применение электрошлакового переплава (ЭШП) для производства полых слитков реализовано в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины еще в 70-х гг XX в. Электрошлаковый переплав является одним из прогрессивных способов улучшения структуры и физико-химических свойств металла посредством управления процессами кристаллизации. Показана целесообразность применения полых слитков электрошлакового переплава для изготовления оборудования, используемого в ресурсодобывающих отраслях и энергетическом машиностроении. Представлены достоинства и недостатки основных видов ЭШП, таких как с подвижным дорном, неподвижным многоразовым дорном, с подвижными кристаллизаторами и заготовкой, центробежное электрошлаковое литье, жидкая штамповка в электрошлаковом литье, электрошлаковая подпитка, ЭШП с вытягиванием.

*Ключевые слова:* электрошлаковый переплав; электрод; полая заготовка; дорн; кристаллизатор.

В связи с развитием ресурсодобывающих отраслей и энергетического машиностроения возобновился интерес к возможностям электрошлаковых технологий в вопросах повышения качества полой заготовки. Проблема повышения эксплуатационных свойств полых заготовок и снижения их себестоимости является весьма актуальной и требует своего дальнейшего разрешения. Ведь формирование полости методом горячей деформации при производстве полых заготовок замкнутой формы это вынужденное решение, которое использовали металлурги из-за низкого качества литья. Поэтому необходимо получать литые полые заготовки, которые по качеству не уступали бы горячедеформированным. Эта задача успешно решается технологиями на основе электрошлакового переплава.

Применение электрошлакового переплава (ЭШП) для производства полых слитков реализовано в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины еще в 70-х гг. XX в. Данный способ является одним из прогрессивных способов улучшения структуры и физико-химических свойств металла посредством управления процессами кристаллизации. Так, относительно малый объем порций кристаллизующегося металла, постоянная подпитка жидкой ме-

таллической ванны, направленный теплоотвод и высокие скорости кристаллизации позволяют обеспечить плотную, бездефектную структуру металла, стабильный химический состав по объему слитка с минимальными ликвационными явлениями. Наличие внутреннего и наружного кристаллизатора обеспечивает более интенсивный теплоотвод и металл полого слитка кристаллизуется с большим переохлаждением, чем металл сплошного слитка такого же наружного диаметра. Это приводит к получению более мелкозернистой первичной структуры, а также к повышенным и стабильным значениям плотности полых слитков по сравнению с цельнолитым. В результате металл полого слитка характеризуется более высокой пластичностью, чем металл сплошного слитка. Электрошлаковые слитки отличаются высоким качеством поверхности и незначительными усадочными дефектами, что позволяет повысить выход годного за счет уменьшения технологической обрезки и снижения объема механической обработки. Многочисленные исследования показали, что электрошлаковые слитки могут применяться для производства изделий ответственного назначения как после деформации, так и литом виде без какой-либо деформации [1–14]. Развитие электрошлако-

вых технологий привело к созданию способов получения полых заготовок непосредственно в процессе переплава [1, 15–18].

### ЭШП с подвижным конусным дорном

Для осуществления данного способа ЭШП полых заготовок применяют внутренний кристаллизатор в виде усеченного конуса, который в ходе процесса перемещают относительно выплавляемой детали, что позволяет избежать его зажатия остывающим металлом. Конусность дорна назначают такой, чтобы при перемещении последнего уменьшение его диаметра соответствовало тепловой усадке заготовки. При этом дорн располагают большим основанием в сторону его перемещения. В зависимости от направления перемещения в отливках формируется полость различной конфигурации. При перемещении дорна вверх полость имеет постоянный диаметр, а при перемещении вниз формируется полость с небольшой конусностью (рис. 1).

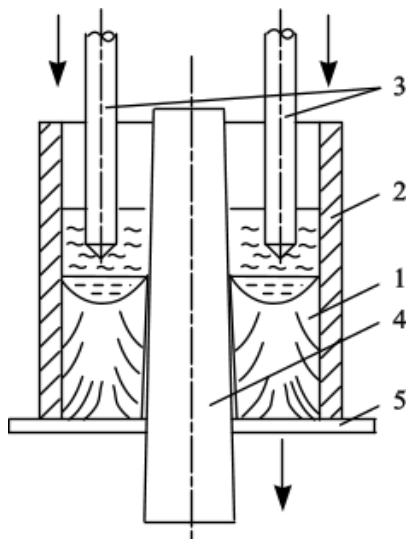


Рис. 1. Схема ЭШП полых заготовки с перемещением конического дорна вниз: 1 — слиток; 2 — кристаллизатор; 3 — расходный электрод; 4 — дорн; 5 — поддон

Электрошлаковую плавку ведут по многоэлектродной схеме в неподвижном кристаллизаторе, выплавляемые слитки имеют гладкую наружную поверхность. Их внутренняя поверхность также получается гладкой (без надрывов) в связи с тем, что конусный дорн, перемещаясь в сторону, противоположную направлению роста заготовки, сжимает корочку затвердевающего металла [19, 20].

Особенность формирования полости при таком способе ЭШП позволяет допускать некоторое сдавливание дорна остывающей заготовкой. Значение усилия, необходимого для преодоления зажатия дорна, используют в качестве параметра для регулирования скорости вытягивания. Несомненным достоинством указанного способа ЭШП полых заготовок является возможность его осуществ-

ления без применения специальных датчиков, определяющих положение уровня металлической ванны относительно подвижного дорна. При использовании подвижного дорна заготовка практически не испытывает сопротивления при усадке металла, отпадают также дополнительные затраты на изготовление разовых рубашек. Но для перемещения дорна требуется механизм, который в автоматическом режиме двигает его со скоростью, пропорциональной скорости наплавления заготовки или скорости усадки.

Чтобы дорн мог скользить беспрепятственно, на пограничной поверхности между ним и внутренней поверхностью полого слитка должно быть равновесие напряжений, которое может осуществиться только тогда, когда конусность дорна составляет угол  $10^\circ$  [21]. Из-за конусности внутренней полости этот способ выплавки применяют для получения сравнительно коротких заготовок с отношением высоты к внутреннему диаметру, близким к единице.

Существенным недостатком этих устройств является длительное время выбирания люфтов в винтовой системе, а дорн все это время неподвижен относительно отливки и сильно обжимается ею. Поэтому к моменту начала форсированного движения дорна усилие вытяжки достигает 10 т. Под действием таких нагрузок медная рубашка дорна быстро коробится и требует проточки после 30–50 плавов. Кроме того, значительные нагрузки на механизмы и увеличенный ход каретки для опускания дорна под откатную тележку обусловили большие габариты и металлоемкость устройства вытяжки. Недостатком таких устройств является также неудобство их обслуживания в приемке, дополнительные затраты на изготовление специальной откатной тележки с отверстием для прохода дорна в кристаллизатор и устройство самого приемка с освещением и откачивающим насосом.

Таким образом, можно сделать вывод, что способ ЭШП с подвижным конусным дорном позволяет получать полую заготовку с высоким качеством внутренней и наружной поверхностей. При этом не требуется специальных датчиков уровня ванны и разовых рубашек для дорна. Но его применение ограничено небольшой высотой получаемой заготовки и сложностью специального автоматического механизма для перемещения дорна, малый срок службы рубашки дорна и неудобство обслуживания. Таким способом серийно изготавливают различные полые заготовки для последующей деформации или использования в литом виде взамен поковок.

### ЭШП с неподвижным дорном многоразового использования

Данный способ ЭШП преимущественно используется для серийного производства литых

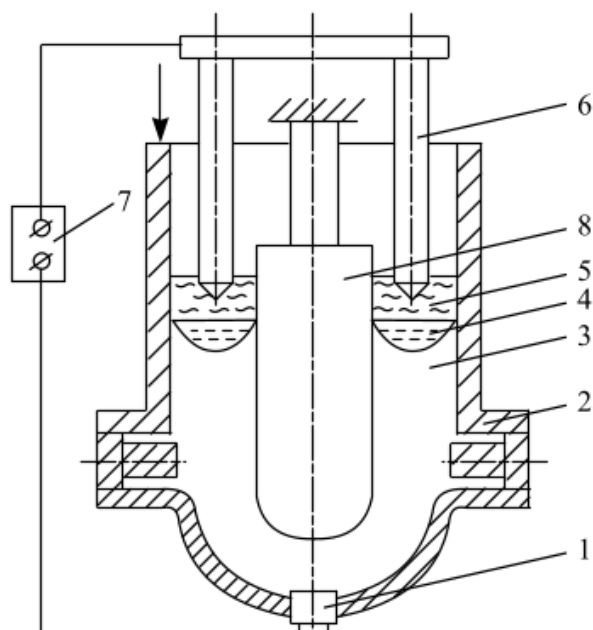


Рис. 2. Схема ЭШП полых заготовок корпусов энергетической арматуры с неподвижным конусным дорном: 1 – поддон; 2 – наружный кристаллизатор; 3 – заготовка; 4 – металлическая ванна; 5 – шлаковая ванна; 6 – расходный электрод; 7 – источник питания; 8 – неподвижный многоразовый дорн

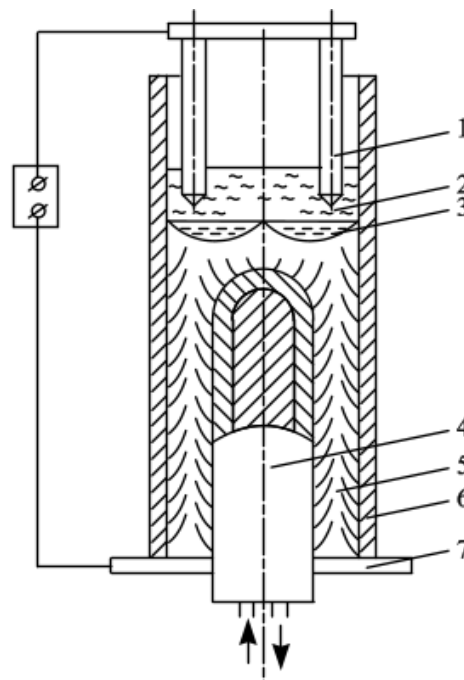


Рис. 3. Схема переплава, при которой выплавка начинается с обечайки: 1 – расходный электрод; 2 – шлаковая ванна; 3 – металлическая ванна; 4 – дорн; 5 – слиток; 6 – кристаллизатор; 7 – поддон

электрошлаковых заготовок с полужамкнутыми полостями (рис. 2 и 3), которые формируют неподвижным дорном многоразового использования [19, 22, 23]. Такие дорны представляют собой жесткие водоохлаждаемые стержни, изготовленные из металла с тепловым расширением, заметно отличающимся от расширения металла отливки.

После плавки заготовку с зажатым в ней дорном нагревают в печи. При нагреве она растягивается жестким дорном, имеющим большее тепловое расширение. После охлаждения между ними образуется зазор, и дорн удаляют из заготовки. Поскольку дорны после каждой плавки деформируются незначительно, то могут использоваться многократно.

Данный способ нашел применение в производстве полых заготовки с дном типа «стакан» с целью дальнейшего передела на заготовки сосудов высокого давления. Естественным и весьма важным следствием данной технологии является существенное повышение качественных показателей (гомогенности и плотности структуры, механических свойств и т. д.). Кроме того, в результате применения ЭШП решается задача получения полых толстостенных заготовок с дном (типа «стакан»), т. е. выплавки половины сосуда вместе с донной частью.

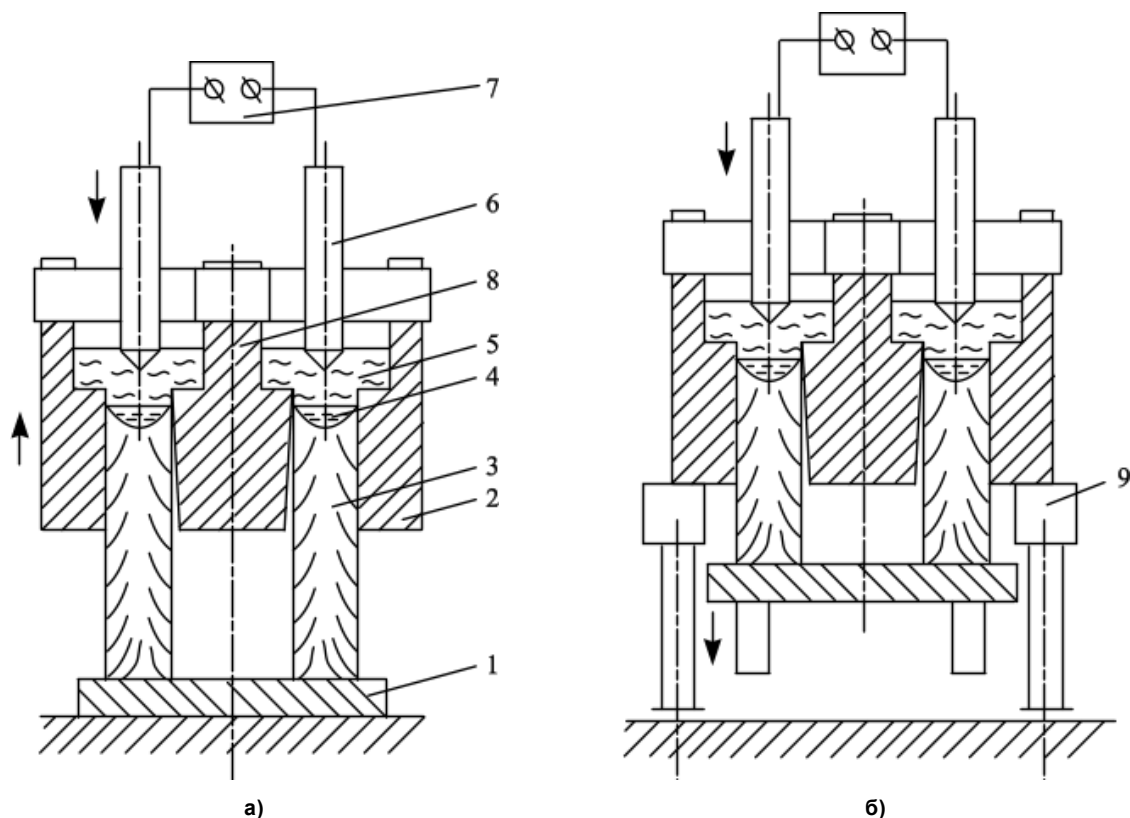
Таким образом, данный способ является предпочтительным для получения заготовок с полужамкнутыми полостями, но его применение ог-

раничивается высокой вероятностью образования горячих трещин. Также недостатком данной схемы является неудовлетворительное формирование дна отливки, особенно в тех случаях, когда отношение диаметра сосуда к толщине стенки превышает 10. Наибольшее распространение неподвижных дорнов разной конструкции получил при изготовлении деталей энергетического оборудования сосудов высокого давления.

#### ЭШП с подвижными кристаллизаторами и заготовкой

Для получения длинных полых слитков или заготовок используют способ ЭШП, при котором осуществляют относительное перемещение расплавленного металла и обоих кристаллизаторов. При этом конусный внутренний кристаллизатор располагают расширением вверх. Применяют разные варианты этого способа: например, выплавляемая полая заготовка остается неподвижной на поддоне, а по мере ее роста перемещают вверх кристаллизаторы рис. 4, а; неподвижными оставляют кристаллизаторы, а выплавляемую заготовку вместе с поддоном перемещают вниз рис. 4, б.

Технология получения полых длинномерных заготовок с использованием подвижных кристаллизаторов в большей части случаев реализуется с использованием набранного из нескольких штанг круглого, квадратного или прямоугольного сече-



**Рис. 4.** Схемы ЭШП с перемещением кристаллизаторов и полых заготовок: а – с неподвижной заготовкой и перемещающимся вверх блоком кристаллизаторов; б – с неподвижным блоком кристаллизаторов и перемещающейся вниз выплавляемой заготовкой; 1 – поддон; 2 – наружный кристаллизатор; 3 – заготовка; 4 – металлическая ванна; 5 – шлаковая ванна; 6 – расходный электрод; 7 – источник питания; 8 – дорн, соединенный в блок с наружным кристаллизатором; 9 – платформа для кристаллизатора

ния расходных электродов, к однофазному печному трансформатору по бифилярной схеме (электрод – электрод). Штанги располагают в кольцевом зазоре по окружности на некотором расстоянии одну от другой. Рабочий ток в ходе плавки протекает, в основном, между соседними штангами, что обеспечивает более равномерное, чем при монофилярной схеме (электрод – поддон), распределение температуры на поверхности шлаковой ванны.

При ЭШП с относительным перемещением выплавляемого полого слитка и кристаллизаторов скорость перемещения должна соответствовать скорости роста слитка. В случае, если скорость перемещения превысит скорость его роста, произойдет вытекание расплавленного металла через образовавшийся зазор между слитком и конусным дорном. Если же скорость перемещения окажется ниже скорости его роста, произойдет зажатие дорна выплавляемым полым слитком, и при своем дальнейшем движении кристаллизатор начнет отрываться от слитка обжимающую его корочку металла.

Для регулирования скорости взаимного перемещения кристаллизаторов и слитка в этом случае применяют специальные датчики, следящие за уровнем металлической ванны. Разработаны и используются датчики индукционного, теплового и

потенциального типов, которые устанавливают в стенке кристаллизатора ниже порога уширения.

При ЭШП в уширенном кристаллизаторе расплавленный металл с оплавляемых торцов расходных электродов стекает в узкую часть зазора, в котором формируется полая заготовка. Перемещающийся кристаллизатор или слиток со скоростью плавки, зеркало металлической ванны удерживают на заданном уровне ниже порога уширения. Поверхность шлаковой ванны в уширенной части кристаллизатора также остается практически неподвижной относительно его стенок [24].

Одной из главных проблем данного способа является разрушение медных водоохлаждаемых токоведущих элементов в шлаковом расплаве. Оно имеет двойной характер как электрокоррозии, так и электроэрозии, но преобладающей считается последняя. Электрический контакт на границе «расплавленный шлак – медный водоохлаждаемый элемент» характеризуется нелинейностью в полупериод питающего напряжения, когда медь становится анодом. В результате площадь кривых тока в разные полупериоды различна, что обуславливает возникновение в системе постоянной составляющей тока, которая для бифилярной схемы достигает 90 % [25].

Способами ЭШП с относительным перемещением обоих кристаллизаторов в промышленных условиях изготавливают длинные полые заготовки диаметром до 1500 мм, с толщиной стенки от 40 до 350 мм. Такие заготовки используются для изготовления различных труб, корпусов, колец и множества других изделий ответственного назначения, которые применяются для авиационной отрасли, автомобилестроения, железнодорожного транспорта, тяжелого машиностроения и станкостроения, ТЭК и других отраслей промышленности.

Таким образом, можно сделать вывод, что способ ЭШП, при котором осуществляют относительное перемещение выплавленного металла и обоих кристаллизаторов, позволяет получать длинные полые заготовки с различной толщиной стенки весьма высокого качества. Но данный способ имеет и недостатки, такие как неудовлетворительная поверхность заготовки (в том числе из-за неравномерной скорости вытягивания заготовок), также качество поверхности несколько ниже в областях, соответствующих межэлектродным промежуткам; необходимость контролировать уровень шлака; электроэрозионное разрушение поверхностей подвижного кристаллизатора и дорна.

#### Центробежное электрошлаковое литье

Центробежные машины разделяются на центробежные машины с вертикальной осью вращения и центробежные машины с горизонтальной осью вращения. Условно принято считать, что к центробежным машинам с вертикальной осью вращения относят центробежные машины с массой отливки до 2000 кг [26]. Центробежная машина состоит из станины, установленных на ней подшипниковых опор, в которых вращается вал-шпиндель, изложницы и защитного кожуха. По разработанной технологии ЦЭШЛ сначала в плавильной емкости при переплаве расходуемого электрода большого диаметра накапливается необходимое количество жидкого металла, который затем переливается вместе со шлаком в центробежную машину. Применение центробежного электрошлакового литья, обеспечивающего значительное снижение вторичного окисления жидкого металла при разливке, позволяет не только использовать для изготовления трубных заготовок сплавы с повышенной жаростойкостью, но и получать трубы с хорошим качеством поверхности, что снижает металлоемкость изделий и энергозатраты на их производство. Кроме того, такая технология обеспечивает высокую оперативность выпуска изделий различной номенклатуры и типоразмеров [27].

Наряду с достоинствами центробежное литье имеет ряд существенных недостатков, основными из которых являются ликвация сплава по удельному весу отдельных элементов и необходимость иметь значительный припуск на обработку внутренней поверхности отливки, поскольку в поверх-

ностном слое здесь сохраняется пористость и скапливаются неметаллические включения. Наиболее часто встречающимся дефектом поверхности центробежно-литых электрошлаковых заготовок являются горячие трещины, расположенные параллельно оси вращения. Также необходимые специальные машины, формы должны быть повышенной прочности и герметичности, необходимо дозирование металла для получения нужного размера внутреннего отверстия отливки.

Лучшее качество обеспечивается при отливке тонкостенных заготовок из сплавов с повышенной жидкотекучестью. Например, широко практикуется центробежная отливка чугуновых гильз двигателей внутреннего сгорания. В толстостенных же отливках металл более длительное время пребывает в жидком состоянии. Это приводит к образованию на внутренней поверхности заготовки усачных раковин и рыхлот.

Таким образом, можно сделать вывод, что получение полых заготовок методом ЦЭШЛ позволяет существенно снизить их себестоимость, а также металлоемкость и энергозатраты. Но применение данного способа ограничивается его недостатками: разнотолщинность, горячие трещины, ликвации, плохое качество внутренней поверхности и т. д. Также существенное влияние на качество заготовки оказывает скорость вращения формы и ее геометрические размеры.

#### Жидкая штамповка в электрошлаковом литье

Жидкая штамповка или литье выдавливанием (выжиманием) относится к разновидностям литья намораживанием. Главной особенностью литья способом жидкой штамповки является выжимание или выдавливание жидкого металла из литейной формы путем погружения в него пуансона требуемой конфигурации, причем металл во время течения между формой и пуансоном охлаждается и на поверхности пуансона образуется корочка затвердевшего металла. Эта корочка напоминает тонкостенную емкость, в которой впоследствии находится жидкий алюминий дорна, расплавляющегося от тепла отливки. Когда металл отливки затвердеет, жидкий алюминий сливают, в результате чего в отливке остается полость, которая очень точно повторяет конфигурацию алюминиевого дорна. Для повторного использования алюминия его можно сливать в форму для отливки следующего дорна.

Во всех случаях штамповки отливок алюминиевым дорном следует иметь в виду и избегать двух крайне неблагоприятных случаев: когда дорн чрезмерно массивен и не расплавляется из-за недостатка тепла отливки и когда дорн имеет недостаточно большую массу, чтобы образовать вокруг себя прочную затвердевшую корку основного металла [28].

Таким образом, применение жидкой штамповки в электрошлаковом литье для получения полых отливок из высококачественной рафинированной жидкой стали, а также для получения отливок ЭШП небольшого развеса с несковозной полостью позволяет существенно расширить возможности электрошлакового литья и широко применять его в машиностроении для производства высококачественных полых заготовок с минимальными потерями электрошлакового металла. Но данный способ подходит исключительно для отливок небольшой массы, и размеры используемого дорна находятся в узких пределах.

### Электрошлаковая подпитка

На основе технологии ЭШП разработан способ электрошлаковой подпитки, сочетающий в себе такие преимущества, как обработка металла синтетическим шлаком, разливка его в защитной среде и электрошлаковое рафинирование. Основное оборудование, используемое при электрошлаковой подпитке полых слитков, включает печь ЭШП со специальным электрододержателем, узел кристаллизатора и тигель для расплавления флюса. Водоохлаждаемый электрододержатель имеет шесть графитовых электродов, расположенных по окружности и соединенных с источником тока попеременно. Бифилярная короткая сеть существенно уменьшает индуктивные потери и перегрев кристаллизатора. Процесс электрошлаковой подпитки состоит из трех стадий: перегрев шлака, заливка металла и собственно подпитка. Перед первой стадией шлак перегревают в тигле, примыкающем к узлу кристаллизатора, затем заливают в кристаллизатор через желоб. На стадии перегрева шлака вводимая мощность поддерживается выше

максимально необходимого рабочего значения, так как поддон и кристаллизатор резко охлаждают шлак в процессе заливки. При температуре шлака 1700...1750 °С сила тока снижается до заданного рабочего значения. На стадии подпитки необходимо за несколько минут повысить напряжение от 40 до 50 В и силу тока от 3500 до 4500 А. Резкое изменение мощности может стать причиной нестабильной кристаллизации и ухудшения качества полых слитков. К концу стадии подпитки мощность постепенно (по заданной программе) снижается, при этом форма металлической ванны становится достаточно плоской.

Структура и свойства полых слитков, полученных способом электрошлаковой подпитки, заметно лучше, чем сплошных слитков, из-за дополнительного охлаждения внутренней поверхности. Полый слиток имеет очень хорошую поверхность благодаря наличию гарнисажа между стенкой кристаллизатора и слитком. Десульфурация металла достаточно эффективна и составляет 33...43 %. В процессе подпитки также удаляются включения большого размера [29].

Таким образом, процесс электрошлаковой подпитки полых слитков имеет такие достоинства, как простое оборудование, удобное управление, высокую производительность и отсутствие необходимости в датчике уровня. Водоохлаждаемый электрододержатель и бифилярная схема подключения позволяют избежать образования паразитных цепей и перегрева кристаллизатора. Но данный способ не подходит для высоко- и сложнелегированного сортамента и существенно уступает по качеству структуры и полноте удаления неметаллических включений электрошлаковому переплаву.

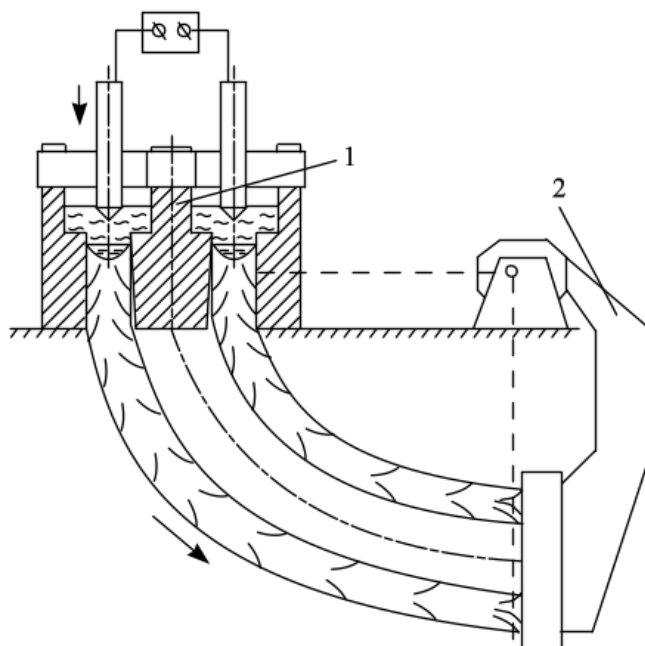


Рис. 5. Схема процесса ЭШП: 1 – дорн, соединенный в блок с наружным кристаллизатором; 2 – механизм вытягивания заготовки по дуге окружности

**Способ ЭШП с вытягиванием**

Способом ЭШП с вытягиванием получают полые заготовки с криволинейной осью, при этом формирующим частям кристаллизаторов придавали нужную кривизну, а заготовку вытягивали по дуге окружности необходимого радиуса. Схема процесса приведена на рис. 5. Этим способом ЭШП изготавливают трубные колена. Их используют для изготовления трубопроводов и теплообменников, работающих при высокой температуре и давлении. Полученные этим способом литые электрошлаковые колена могут иметь угол поворота до 180°.

Применяя схему с вытягиванием заготовки по окружности только из наружного кристаллизатора, отливают полукольца сплошного сечения; сваривая их попарно, получают литые электрошлаковые кольцевые заготовки. С помощью такой технологии изготавливают бандажи цементных печей Т-образного профиля из стали 35. Применение таких электрошлаковых бандажей позволило увеличить жесткость корпуса цементной печи и значительно повысить стойкость ее футеровки [19].

При отливке полых слитков в короткие кольцевые кристаллизаторы с вытягиванием возникают серьезные трудности, связанные с необходимостью обеспечения чистой поверхности гильзы без надрывов. Для выведения трещин полые слитки приходится обдирать на значительную глубину как снаружи, так и внутри [30].

**Заключение**

Есть основания полагать, что в ближайшее время в России обострится проблема получения качественного полого слитка ЭШП в ресурсодобывающих отраслях и энергетическом машиностроении. Следует ожидать, ужесточение требований к качеству металла при одновременном увеличении массы и размеров полого слитка. Технология ЭШП получения полого слитка позволит обеспечить производство высококачественного слитка.

**Литература**

1. Медовар, Л.Б. Новое в технологии ЭШП крупных полых слитков / Л.Б. Медовар, А.П. Стовпченко, Б.Б. Федоровский // *Электromеталлургия*. – 2013. – № 1. – С. 24–30.
2. Глебов, А.Г. Электрошлаковый переплав / А.Г. Глебов, Е.И. Мошкевич. – М.: *Металлургия*, 1985. – 343 с.
3. Митчелл, А. Кристаллизация металла в процессах переплава / А. Митчелл // *Современная металлургия*. – 2008. – № 2. – С. 4–13.
4. Патон, Б.Е. Совершенствование электрошлакового переплава сталей и сплавов / Б.Е. Патон, Л.Б. Медовар // *Сталь*. – 2008. – № 12. – С. 70–74.
5. Производство литой трубной заготовки

методом ЭШП / А.П. Герасимчук, Н.В. Костылева, Т.Д. Баева, Н.С. Шинкина // *Электromеталлургия*. – 2001. – № 1. – С. 30–32.

6. Медовар, Л.Б. Электрошлаковый переплав полых слитков. Новый подход к традиционной проблеме / Л.Б. Медовар, Б.Б. Федоровский, А.П. Стовпченко // *Металлургия машиностроения*. – 2012. – № 2. – С. 46–50.

7. Медовар, Б.И. Электрошлаковые технологии в XXI веке / Б.И. Медовар, Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко // *Проблемы специальной электromеталлургии*. – 2001. – № 1. – С. 12–17.

8. Цыкуленко, К.А. Некоторые новые области применения электрошлаковых технологий / К.А. Цыкуленко, Л.Б. Медовар, А.В. Чернец // *Проблемы специальной электromеталлургии*. – 2002. – № 2. – С. 9–11.

9. Повышение эффективности производства металла ЭШП / Б.Е. Патон, Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко, А.В. Чернец // *Проблемы специальной электromеталлургии*. – 2002. – № 3. – С. 3–9.

10. Оценка инвестиционной перспективы электрошлакового производства полых заготовок / С.В. Богданов, В.О. Черных, Д.А. Фролов и др. // *Электromеталлургия*. – 2008. – № 11. – С. 37–46.

11. Электрошлаковый переплав – перспектива производства высококачественной продукции из жаропрочных сплавов / Л.А. Волохонский, М.А. Кисельман, Ю.В. Савельев и др. // *Электromеталлургия*. – 2002. – № 12. – С. 26–30.

12. Протокивиллов, И.В. Изменение кристаллической структуры полых титановых слитков при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке / И.В. Протокивиллов // *Современная электromеталлургия*. – 2011. – № 4. – С. 3–5.

13. Медовар, Л.Б. Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков / Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко, А.П. Стовпченко // *Современная электromеталлургия*. – 2010. – № 3. – С. 5–10.

14. Федоровский, Б.Б. О новом способе ЭШП крупногабаритных слитков / Б.Б. Федоровский, Л.Б. Медовар, А.П. Стовпченко // *Современная электromеталлургия*. – 2011. – № 3. – С. 3–6.

15. Еремин, Е.Н. Получение заготовок малого диаметра путем электрошлакового переплава / Е.Н. Еремин, С.Н. Жеребцов // *Электromеталлургия*. – 2004. – № 6. – С. 18–20.

16. Медовар, Б.И. Концепция универсальной печи ЭШП для производства крупных слитков / Б.И. Медовар, А.П. Стовпченко, В.Я. Саенко // *Электromеталлургия*. – 2010. – № 11. – С. 12–18.

17. Федоровский, Б.Б. О новом способе ЭШП крупногабаритных полых слитков / Б.Б. Федоровский, Л.Б. Медовар, А.П. Стовпченко // *Современная электromеталлургия*. – 2011. – № 3. – С. 3–6.

18. Цыкуленко, К.А. Развитие электрошлаковых технологий и совершенствование конструкций кристаллизаторов ЭШП (Обзор) / К.А. Цы-

куленко // Современная электрометаллургия. – 2007. – № 4. – С. 8–18.

19. Жадкевич, М.Л. Электрошлаковое литье полых слитков и заготовок в промышленном производстве / М.Л. Жадкевич, В.Л. Шевцов, Л.Г. Пузрин // Современная электрометаллургия. – 2008. – № 3. – С. 7–14.

20. Южанин, Ж.И. Вспомогательное технологическое оборудование в производстве электрошлаковых отливок / Ж.И. Южанин // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1983. – № 19. – С. 29–32.

21. Эль Гаммаль, Т. Развитие математически обоснованной системы оптимизации процессов ЭШП при производстве полых слитков / Т. Эль Гаммаль, А. Штергиу // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1990. – № 4. – С. 18–27.

22. Кригер, Ю.Н. Электрошлаковая выплавка в энергетическом машиностроении / Ю.Н. Кригер, Е.А. Нечаев, О.С. Карпов // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1985. – № 3. – С. 24–28.

23. Аликин, А.П. Электрошлаковое литье в химическом машиностроении / А.П. Аликин, Е.А. Бойко // Электрошлаковая технология. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 123–128.

24. Волохонский, Л.А. Электрошлаковое литье полых стальных заготовок. Новый этап / Л.А. Волохонский, М.А. Киссельман, В.А. Демидов // Электрометаллургия. – 2006. – № 6. – С. 21–26.

25. Об особенностях эксплуатации кристаллизаторов и дорнов при электрошлаковом литье полых заготовок / Л.А. Волохонский, Л.Н. Кузнецов, М.А. Киссельман и др. // Электрометаллургия. – 2006. – № 11. – С. 28–35.

26. Помещиков, А.Г. Производство полых слитков с применением машин центробежного литья / А.Г. Помещиков, Т.С. Тренева, В.И. Байдаченко // Электрометаллургия. – 2010. – № 2. – С. 31–33.

27. Еремин, Е.Н. Электрошлаковое литье труб из жаростойких сплавов / Е.Н. Еремин, С.Н. Жеребцов // Электрометаллургия. – 2006. – № 2. – С. 23–26.

28. Кумыш, И.И. О применении жидкой штамповки в электрошлаковом литье для получения полых отливок / И.И. Кумыш, А.П. Игнатов, В.А. Драпей // Специальная электрометаллургия. – 1981. – № 40. – С. 44–49.

29. Жао Пей. Процесс электрошлаковой подпитки – новый метод производства высококачественных полых слитков / Жао Пей, Лю Хайхон, Жу Дзун // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1990. – № 1. – С. 28–31.

30. Патон, Б.Е. Электрошлаковая прошивка трубных заготовок / Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, Л.В. Чекотило // Специальная электрометаллургия. – 1968. – № 3. – С. 18–21.

**Пятыгин Дмитрий Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры общей металлургии, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, г. Златоуст, [piatyginda@susu.ru](mailto:piatyginda@susu.ru).

**Чуманов Илья Валерьевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой общей металлургии, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, г. Златоуст, [chumanoviv@susu.ru](mailto:chumanoviv@susu.ru).

Поступила в редакцию 22 апреля 2016 г.

DOI: 10.14529/met160306

## REVIEW OF METHODS OF OBTAINING HOLLOW BAR BY ELECTROSLAG REMELTING. PART I

**D.A. Pyatygin**, [piatyginda@susu.ru](mailto:piatyginda@susu.ru),

**I.V. Chumanov**, [chumanoviv@susu.ru](mailto:chumanoviv@susu.ru)

South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russian Federation

Brief overview of methods of obtaining hollow bars is presented. Interest to the potential of electroslag technologies in question of improving the quality of hollow bars is resumed in connection with the development of resource extraction industries and power engineering. The problem of increasing operational properties of hollow bars and reducing their cost is very important and requires further solving. The formation of a cavity by the method of hot deformation in production of hollow bars of the closed shape is a forced solution which was used by steelmakers because of the low quality of castings. Methods must be sought to obtain cast hollow bars



having the quality not inferior to hot deformed ones. This problem is successfully solved based on electroslag remelting technologies. The application of electroslag remelting (ESR) for the production of hollow ingots was implemented in the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine in the 1970s. Electroslag remelting is one of the most progressive ways to improve the structure and physico-chemical properties of metal through control of crystallization processes. The expediency of application of electroslag remelted hollow bars for the manufacture of equipment used in resource extraction industries and power engineering are shown. Advantages and disadvantages of the main types of ESR are presented, for example, the ones with movable mandrel, not movable reusable mandrel, movable mold and bars, centrifugal electroslag casting, liquid die forging in electroslag casting, electroslag composition and ESR extrusion.

*Keywords:* electroslag remelting; electrode; hollow bar; mandrel; crystallizer.

### References

1. Medovar L.B., Stovpchenko P. A., Fedorovskiy B. B. [News in ESR Technology of Large Hollow Bars]. *Elektrometallurgiya*, 2013, no. 1, pp. 24–30. (in Russ.)
2. Glebov A.G., Moshkevich E.I. *Elektroshlakovyy pereplav* [Electroslag Remelting]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 343 p.
3. Mitchell A. [Metal Crystallization in Remelting Processes]. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, 2008, no. 2, pp. 4–13. (in Russ.)
4. Paton B.E., Medovar L.B. [Improvement of Electroslag Refining of Steels and Alloys]. *Stal'*, 2008, no. 12, pp. 70–74. (in Russ.)
5. Gerasimchuk, P.A., Kostyleva N.V., Baeva T.D., Shinkina N.S. [Production of Cast Bars by ESR]. *Elektrometallurgiya*, 2001, no. 1, pp. 30–32. (in Russ.)
6. Medovar L.B., Fedorovskiy B.B., Stovpchenko A.P. ESR of hollow bars. A New Approach to the Traditional Problem. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2012, no. 2, pp. 46–50. (in Russ.)
7. Medovar B.I., Medovar L.B., Saenko V.Ya. [Electroslag Technologies in the XXI Century]. *Problemy spetsial'noy elektrometallurgii*, 2001, no. 1, pp. 12–17. (in Russ.)
8. Tsikulenko K.A., Medovar L.V., Chernets A.V. [Some New Areas of Application of Electroslag Technologies]. *Problemy spetsial'noy elektrometallurgii*, 2002, no. 2, pp. 9–11. (in Russ.)
9. Paton B.E., Medovar L.B., Saenko V.Ya., Chernets A.V. [Improving the Efficiency of Metal Production by ESR]. *Problemy spetsial'noy elektrometallurgii*, 2002, no. 3, pp. 3–9. (in Russ.)
10. Bogdanov S.V., Chernykh O.V., Frolov D.A., Lobachev V.V., Bogdanova T.V., Volokhonskiy L.A. [Evaluation of Investment Prospects of Electroslag Production of Hollow Bars]. *Elektrometallurgiya*, 2008, no. 11, pp. 37–46. (in Russ.)
11. Volokhonskiy L.A., Kissel'man M.A., Savel'yev Yu.V. et al. [Electroslag remelting – the Prospect of Production of High Quality Heat-Resistant Alloys]. *Elektrometallurgiya*, 2002, no. 12, pp. 26–30. (in Russ.)
12. Protokovilov I.V. [Change of the Crystal Structure of Hollow Titanium Bars in Magnetically-Controlled Electroslag Melting]. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, 2011, no. 4, pp. 3–5. (in Russ.)
13. Medovar L.B., Saenko V.Ya., Stovpchenko A.P. [Electroslag Technologies of Large Forging Bars]. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, 2010, no. 3, pp. 5–10. (in Russ.)
14. Fedorovskiy B.B., Medovar L.B., Stovpchenko A.P. [On a New Method of ESR of Large Bars]. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, 2011, no. 3, pp. 3–6. (in Russ.)
15. Eremin E.N., Zherebtsov S.N. [Production of Small Diameter Bars by Electroslag Remelting]. *Elektrometallurgiya*, 2004, no. 6, pp. 18–20. (in Russ.)
16. Medovar L.B., Saenko V.Ya., Stovpchenko A.P., Noshchenko G.V., Fedorovskiy B.B., Petrenko V.L., Lantsman I.A., Zhuravel' V. [The Concept of Universal ESR Furnace for the Production of Large Bars]. *Elektrometallurgiya*, 2010, no. 11, pp. 12–18. (in Russ.)
17. Fedorovskiy B.B., Medovar L.B., Stovpchenko A.P. [On a New Method of ESR of Hollow Large Bars by ESR]. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, 2011, no. 3, pp. 3–6. (in Russ.)
18. Tsykulenko K.A. [Development of Electroslag Technologies and Improvement of Designs of ESR Crystallizers (Review)]. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, 2007, no. 4, pp. 8–18. (in Russ.)
19. Zhadkevich M.L., Shevtsov V.L., Puzrin L.G. [Electroslag Casting of Hollow Ingots and Bars in Industrial Production]. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, 2008, no. 3, pp. 7–14 (in Russ.)
20. Yuzhanin Zh.I. [Ancillary Technological Equipment for the Production of Electroslag Castings]. *Problemy spetsial'noy elektrometallurgii*, 1983, no. 19, pp. 29–32. (in Russ.)
21. El Gammal T., Shterghiou A. [Development of Mathematically Based System of Optimizing ESR Processes in the Production of Hollow Ingots]. *Problemy spetsial'noy elektrometallurgii*, 1990, no. 4, pp. 18–27. (in Russ.)
22. Kriger Yu.N., Nechaev E.A., Karpov O.S. [Electroslag Casting in Power Engineering]. *Problemy spetsial'noy elektrometallurgii*, 1985, no. 3, pp. 24–28. (in Russ.)

23. Alikin A.P., Boyko E.A. [Electroslag Casting in Chemical Engineering]. *Elektroshlakovaya tekhnologiya* [Electroslag Technology]. Kiev, Nakova dumka Publ., 1983, pp. 123–128. (in Russ.)
24. Volokhonskiy L.A., Kissel'man M.A., Demidov V.A. [Electroslag Casting of Hollow Bars. A New Stage]. *Elektrometallurgiya*, 2006, no.6, pp. 21–26. (in Russ.)
25. Volokhonskiy L.A., Kuznetsov L.N., Kissel'man M.A., Demidov V.A., Pavlova N.P., Polovinkin V.N. [About Peculiarities of Exploitation of Crystallizer and Floating Plug in Electroslag Casting of Hollow Bars]. *Elektrometallurgiya*, 2006, no. 11, pp. 28–35. (in Russ.)
26. Pomeschchikov A.G., Greneva T.S., Baydachenko V.I., Berezin V.I. [Manufacture of Hollow Ingots Using Centrifugal Casting Machines]. *Elektrometallurgiya*, 2010, no. 2, pp. 31–33. (in Russ.)
27. Eremin E.N., Zherebtsov S.N. [Electroslag Casting of Tubes from Heat-Resistant Alloys]. *Elektrometallurgiya*, 2006, no. 2, pp. 23–26. (in Russ.)
28. Kumysh I.I., Ignatov A.P., Drapey V.A. [On Application of Liquid Forming in the Electroslag Casting for the Production of Hollow Castings]. *Spetsial'naya elektrometallurgiya*, 1981, no. 40, pp. 44–49. (in Russ.)
29. Zhao P., Liu H., Zhu Z. [Electroslag Replenishment Process – A New Method of Producing High-Quality Hollow Ingots]. *Problemy spetsial'noy elektrometallurgii*, 1990, no. 1, pp. 28–31. (in Russ.)
30. Paton B.E., Medovar B.I., Chekotilo L.V. [Electroslag Piercing of Tube Bars]. *Spetsial'naya elektrometallurgiya*, 1968, no. 3, pp. 18–21. (in Russ.)

*Received 22 April 2016*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Пятыгин, Д.А. Обзор способов получения полый заготовки электрошлаковым переплавом. Часть I / Д.А. Пятыгин, И.В. Чуманов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 39–48. DOI: 10.14529/met160306

### FOR CITATION

Pyatygin D.A., Chumanov I.V. Review of Methods of Obtaining Hollow Bar by Electroslag Remelting. Part I. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 39–48. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160306