



УДК 669.187.56.001.1

ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЕ ЛИТЬЕ ПОЛЫХ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ (Обзор)

М. Л. Жадкевич, В. Л. Шевцов, Л. Г. Пузрин

Рассмотрены получившие применение в промышленности способы изготовления полых слитков и заготовок путем электрошлакового литья (ЭШЛ). Проведена систематизация способов ЭШЛ по особенностям взаимного перемещения наружного и внутреннего кристаллизаторов и выплавляемой заготовки. Выполнен анализ возможностей, преимуществ и недостатков различных способов ЭШЛ полых заготовок и принципов управления процессом перемещения кристаллизаторов. Приведены примеры эффективного использования в промышленности полученных ЭШЛ полых слитков и заготовок, предназначенных для последующей деформации или применения в литом виде.

Methods of manufacture of hollow ingots and billets by electroslag casting (ESC), widely spread in industry, are considered. Systematization of ESC methods is made by specifics of mutual displacement of external and internal moulds and billet being melted. Capabilities, advantages and drawbacks of different methods of ESC of hollow billets and principles of control of moulds displacement process are analyzed. Examples of effective application in industry of hollow ingots and billets, produced by ESC and designed for next deformation or application in a cast form, are given.

Ключевые слова: электрошлаковое литье; полый слиток (заготовка); наружный, внутренний (дорн) кристаллизатор; регулирование уровня жидкого металла; виды полых заготовок

Полые заготовки из сталей и сплавов широко применяются в современной промышленности для производства путем прокатки, прессования или радиальнойковки бесшовных труб различного сортамента, а также для изготовления горячей и холодной раскаткой разнообразных колец и тонкостенных обечаек. Использование таких заготовок позволяет значительно упростить технологию получения готовых изделий. Сами полые заготовки производят с использованием механической обработки, горячей высадки или прошивки центральной части слитка сплошного сечения. Полые заготовки под раскатку получают также центробежным литьем.

Развитие электрошлаковой технологии привело к созданию способов получения полых заготовок непосредственно в процессе переплава. Эти заготовки предназначались для дальнейшего передела в изделия с особо высокими эксплуатационными свойствами. При производстве бесшовных труб и обечаек полая заготовка избавляет от операции прошивки монолитного электрошлакового слитка, что компенсирует затраты на электрошлаковый переплав (ЭШП) и дает возможность изготавливать трубы из сталей и сплавов, трудно поддающихся про-

шивке. Во многих случаях электрошлаковые полые заготовки можно использовать в литом виде без дальнейшей деформации, поскольку литой электрошлаковый металл не уступает в прочности деформированному металлу обычного производства, но

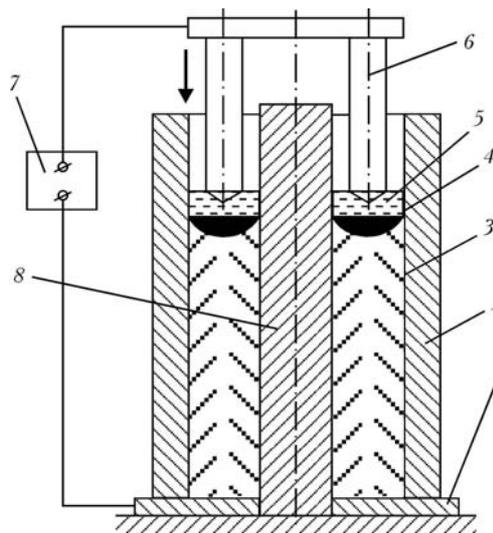


Рис. 1. Схема выплавки полых заготовок с неподвижным внутренним кристаллизатором: 1 — поддон; 2 — наружный кристаллизатор; 3 — заготовка; 4 — металлическая ванна; 5 — шлаковая ванна; 6 — расходный электрод; 7 — источник питания; 8 — внутренний кристаллизатор (дорн)

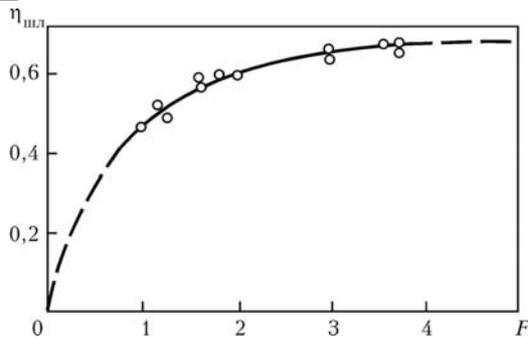


Рис. 2. Зависимость относительных потерь теплоты от шлаковой ванны $\eta_{шл}$ от параметра F

заметно превосходит его по пластичности и вязкости [1, 2].

Для формирования полости в электрошлаковом слитке внутрь кристаллизатора вводят дополнительную охлаждаемую поверхность, так называемый внутренний кристаллизатор или дорн. В этом случае процесс ЭШП осуществляют в пространстве между наружным и внутренним кристаллизаторами (рис. 1).

При выплавке полого слитка увеличивается площадь контакта расплавленного шлака со стенками кристаллизаторов, что приводит к повышенной потере теплоты, которая отбирается охлаждающей водой непосредственно от шлаковой ванны. Для компенсации этой потери при выплавке полого слитка выделяемая в шлаке удельная мощность должна быть больше, чем при выплавке сплошного слитка такого же наружного диаметра. Причем, чем меньше толщина стенки полого слитка, тем больше следует увеличивать удельную мощность. Относительные потери теплоты от шлаковой ванны к охлаждающей воде при выплавке полых слитков любых типоразмеров можно оценить исходя из рис. 2. С помощью безразмерного коэффициента F , равного отношению суммарной площади контакта расплавленного шлака с охлаждаемыми стенками к площади зеркала металлической ванны, можно определить долю теплоты, отбираемой охлаждающей водой непосредственно от шлака, на которую следует увеличивать подводимую мощность [3].

Кроме повышенных тепловых потерь от шлаковой ванны при выплавке полых слитков имеет место дополнительный теплоотвод к дорну от переплавленного металла. Усадка выплавляемого слитка приводит к обжатию им дорна. Поэтому характер изменения теплоотвода от наружной и внутренней поверхности затвердевающего полого слитка существенно отличается. По мере удаления от зеркала металлической ванны теплоотдача слитка к наружному кристаллизатору уменьшается вследствие увеличения зазора между ними, а к внутреннему — возрастает [3].

В связи с более интенсивным теплоотводом металл полого слитка кристаллизуется с большим переохлаждением, чем металл сплошного слитка такого же наружного диаметра [4, 5]. Это приводит к получению более мелкозернистой первичной структуры, а также к повышенным и стабильным значениям плотности полых слитков по сравнению

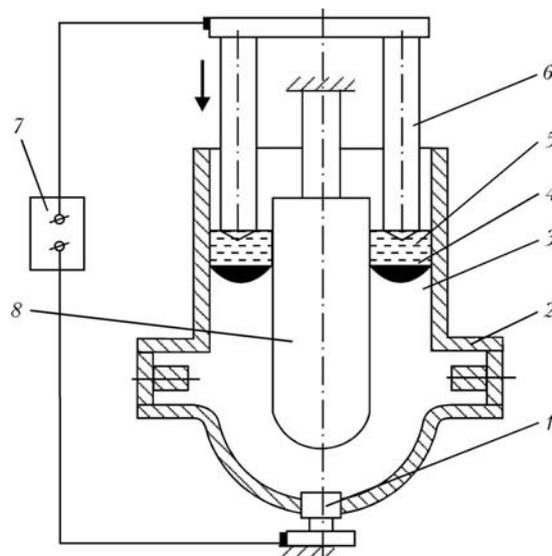


Рис. 3. Схема ЭШЛ полых заготовок корпусов энергетической арматуры с неподвижным многоразовым дорном: 1-7 — здесь и на рис. 4, 5 см. на рис. 1; 8 — неподвижный многоразовый дорн

со сплошными. Так, плотность металла по толщине стенки (220 мм) полого слитка диаметром 540 мм из стали марки 35ХНЗМ остается постоянной и составляет $7,85 \text{ г/см}^3$, а в сплошном слитке такого же диаметра она уменьшается к центру на $0,04 \text{ г/см}^3$. В результате металл полого слитка характеризуется более высокой пластичностью, чем сплошного [6].

Первый полый электрошлаковый слиток получен в Институте электросварки им. Е. О. Патона еще в 1955 г. [7]. Его выплавляли по схеме, приведенной на рис. 1, только вместо расходуемых электродов большого сечения применяли сварочную проволоку. Для реализации такой схемы выплавки использовали одноразовый внутренний кристаллизатор, который при «раздевании» слитка разрезали и удаляли. В дальнейшем развитии технологии электрошлакового литья (ЭШЛ) полых слитков было направлено на поиск способов извлечения из них внутренних кристаллизаторов без разрушения.

В промышленном производстве освоено три различных способа ЭШЛ полых заготовок, которые отличались особенностями формирования их наружной и внутренней поверхностей. При первом способе полая заготовка выплавляется при неподвижных наружном и внутреннем кристаллизаторах. При втором — наружный кристаллизатор остается неподвижным, а внутренний перемещается относительно выплавляемого слитка. Третий способ отличается тем, что осуществляется относительное перемещение обоих кристаллизаторов и выплавляемого слитка.

Первый способ ЭШЛ преимущественно используется для серийного производства литых электрошлаковых заготовок с полужамкнутыми полостями (рис. 3), которые формируют неподвижным дорном многоразового использования [8]. Такие дорны представляют собой жесткие водоохлаждаемые стержни, изготовленные из металла с тепловым расширением, заметно отличающимся от расширения металла отливки. Каналы для охлаждающей воды

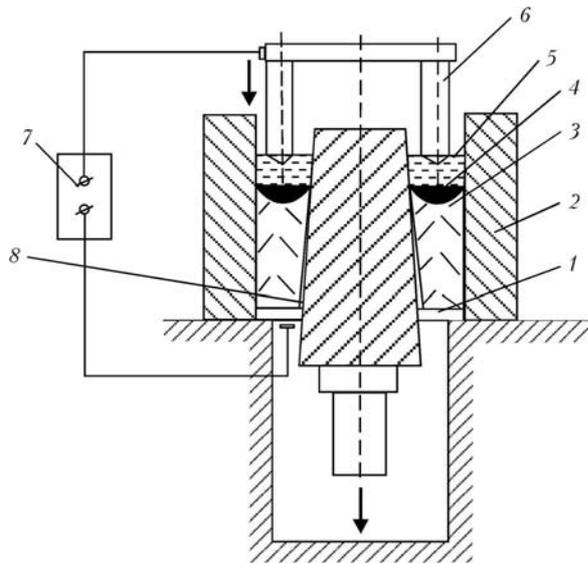


Рис. 4. Схема ЭШЛ полой заготовки с перемещением конического дорна вниз: 8 — подвижный конический дорн

прорезают на поверхности стержня и покрывают их тонкой медной рубашкой.

Для ЭШЛ полой заготовки из углеродистой стали используют дорн со стержнем из аустенитной стали. После плавки заготовку с закатом 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. При выплавке заготовки из аустенитной стали применяют стержень из углеродистой. В этом случае при нагреве в печи литая заготовка расширяется больше, чем дорн, и его извлекают в нагретом состоянии. Поскольку дорны после каждой плавки деформируются незначительно, то могут использоваться многократно [9].

Неподвижный жесткий дорн препятствует свободной усадке металла и вызывает в нем растягивающую деформацию, которая на участках, где металл еще не полностью закристаллизовался, может приводить к образованию горячих трещин. Абсолютное значение растягивающей деформации застывающего металла возрастает с увеличением диаметра полости, что повышает вероятность образования трещины. В связи с этим дорн, выполненный в виде жесткого водоохлаждаемого стержня, может использоваться для формирования внутренних полостей ограниченного диаметра (в некоторых случаях не более 200 мм).

С помощью неподвижных охлаждаемых дорнов получают заготовки с полостями и большего диаметра. В этом случае применяют внутренние кристаллизаторы, способные деформироваться в процессе плавки под действием усаживающегося металла отливки. Это могут быть водоохлаждаемые внутренние кристаллизаторы с одноразовой рубашкой, изготовленной из тонкой углеродистой стали, или разборные дорны. Благодаря взаимному перемещению деталей разборного дорна он в процессе усадки полого слитка не подвергается пластической деформации, что позволяет использовать его многократно [10, 11].

Наибольшее распространение способ ЭШЛ полых заготовок с применением неподвижных дорнов разной конструкции получил при изготовлении деталей энергетического оборудования. Так, из сталей марок 15Х1М1Ф и 0Х18Н10Т изготавливают корпуса задвижек с условным проходом от Ду 100 до 400 массой до 2,2 т для тепловых и атомных электростанций, а из стали марки 0Х18Н10Т — патрубки задвижек с Ду 500 [8, 12]. Из стали 20 производят корпуса клапанов с Ду 800 для второго контура энергоблоков АЭС [13].

Для других отраслей промышленности с помощью таких дорнов изготавливали заготовки контейнерных втулок из стали марки 5ХНМ диаметром 690 мм, имеющие толщину стенки 185 мм и массу 2,5 т [14], полые заготовки крупных гаек из стали 45 массой 175 кг и др. [10].

Для осуществления второго способа ЭШЛ 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 [15].

В серийном производстве получил применение только способ ЭШЛ с перемещающимся вниз внутренним кристаллизатором. Из-за конусности внутренней полости этот способ выплавки применяют для получения сравнительно коротких заготовок с отношением высоты к внутреннему диаметру, близким к единице. Схема этого процесса представлена на рис. 4. Поскольку 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 [15].

Особенность формирования полости при таком способе ЭШЛ позволяет допускать некоторое сдавливание дорна остывающей заготовкой. Значение усилия, необходимого для преодоления зажатия дорна, используют в качестве параметра для регулирования скорости вытягивания [16]. Несомненным достоинством указанного способа ЭШЛ полых заготовок является возможность его осуществления без применения специальных датчиков, определяющих положение уровня металлической ванны относительно подвижного дорна.

Таким способом ЭШЛ серийно изготавливают различные полые заготовки для последующей деформации или использования в литом виде взамен поковок. Для горячей раскатки на кольца и холод-

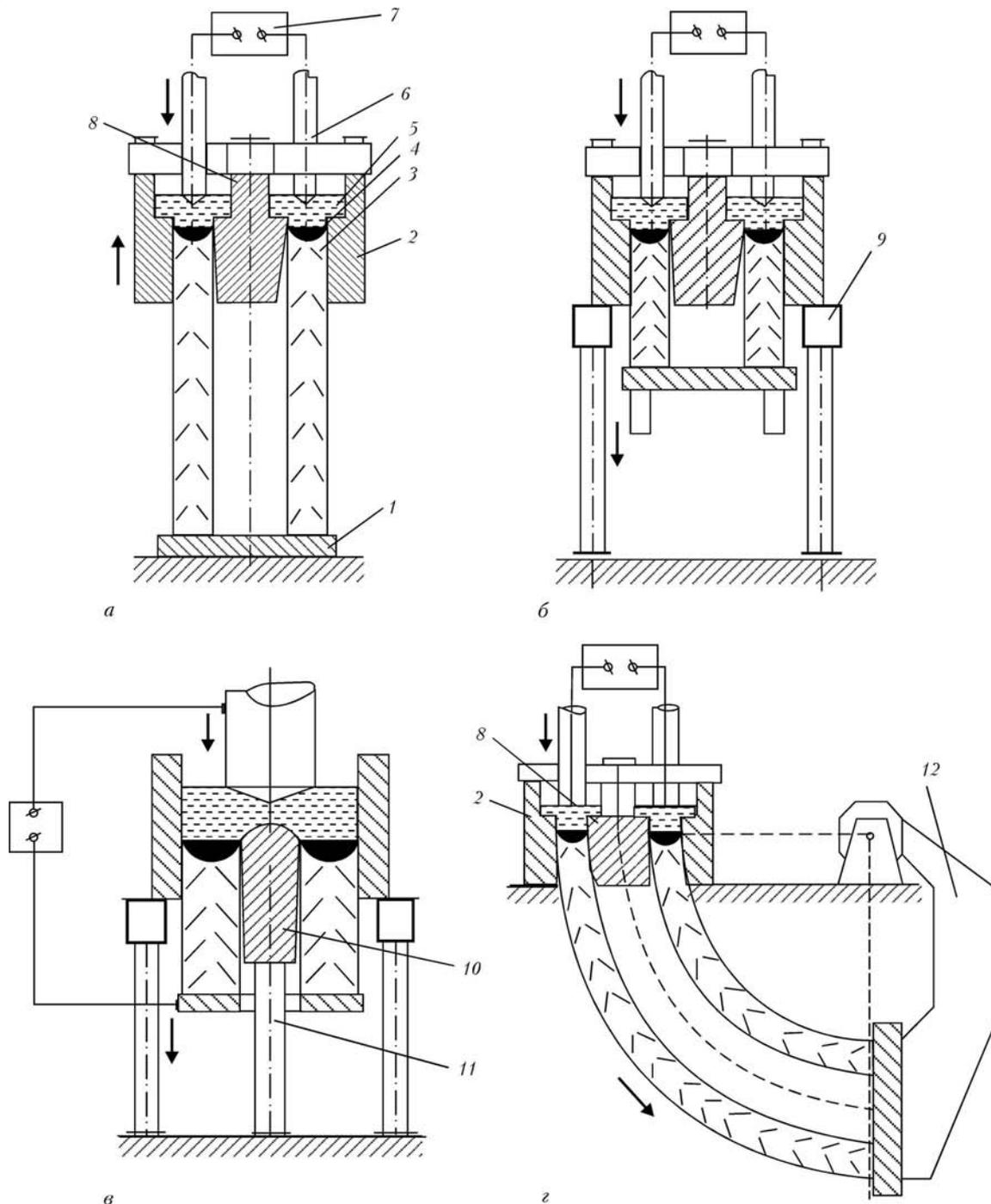


Рис. 5. Схемы ЭШЛ с относительным перемещением кристаллизаторов и полых заготовок: *а* — с неподвижной выплавляемой заготовкой и перемещающимся вверх блоком кристаллизаторов; *б* — с неподвижным блоком кристаллизаторов и перемещающейся вниз выплавляемой заготовкой; *в* — с перемещающейся вниз выплавляемой заготовкой и неподвижными отдельными наружным кристаллизатором и дорном (электрошлаковая прошивка); *г* — с неподвижным блоком кристаллизаторов и перемещающейся по дуге окружности выплавляемой заготовкой; 8 — дорн, соединенный в блок с наружным кристаллизатором; 9 — стационарная платформа для кристаллизатора; 10 — дорн для электрошлаковой прошивки; 11 — шток дорна; 12 — механизм вытягивания заготовки по дуге окружности

ной прокатки на трубы выплавляют полые заготовки диаметром до 440 мм с толщиной стенки до 140 мм и высотой до 500 мм из высоколегированных сталей марок ЭИ811, ЭИ961, ЭП57 и Х16Н6 [17]. Для использования в литом виде из сталей 10Г2, 09Г2С и 16ГС изготавливают патрубки с фланцами диаметром до 550 мм, имеющие толщину стенки 100 мм и высоту до 600 мм [18]. С использованием ЭШЛ также освоено производство из стали 45Г литых ве-

дущих зубчатых колес мощных промышленных тракторов размером 1180×860×140 мм, которые раньше изготавливали из поковок. Способ ЭШЛ позволил резко уменьшить объем механической обработки колес за счет отливки зубьев с минимальными припусками по их профилю [19].

Для получения длинных полых слитков или заготовок используют третий способ ЭШЛ, при котором осуществляют относительное перемещение



выплавленного 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. 5, а); неподвижными оставляют кристаллизаторы, а выплавляемую заготовку вместе с поддоном перемещают вниз (рис. 5, б) [20].

Для выплавки заготовок этим способом используемые электроды располагают в виде частокола из круглого или прямоугольного проката. Частокол электродов между кристаллизаторами размещают так, чтобы элементы конструкции, удерживающие дорн в заданном положении, находились в промежутках между отдельными электродами. Кристаллизаторы, объединенные в общий блок, могут иметь в верхней части уширение. В нем во время переплава находится шлаковая ванна и происходит процесс плавления расходуемых электродов [21, 22]. Кристаллизаторы с уширенной плавильной зоной позволяют применять более короткие электроды, поперечное сечение которых может превышать толщину стенки выплавляемой полой заготовки, что дает возможность увеличить длину заготовки не изменяя высоты электрошлаковой установки [23].

При ЭШЛ в уширенном кристаллизаторе расплавленный металл с оплаваемых торцов расходуемых электродов стекает в узкую часть зазора, в котором формируется полая заготовка. Перемещая 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. В этом случае при прямой схеме подключения источника питания электрод-слиток имеет место локальный износ стенки кристаллизатора в районе зеркала шлаковой ванны. Износ происходит в результате электроэрозии металла под действием той части рабочего тока, которая идет от электрода через шлаковую ванну непосредственно в стенку кристаллизатора [24]. При ЭШЛ слитков с заполнением неподвижного кристаллизатора это явление проявляется слабо, поскольку шлаковая ванна перемещается вдоль всей поверхности стенок кристаллизатора.

С целью борьбы с локальным износом стенок расходуемые электроды попарно соединяют с источником тока по бифилярной схеме. При этом значительно уменьшается доля рабочего тока, которая приходится на кристаллизатор, а соответственно, и локальный износ [25].

При ЭШЛ 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 отрывать от слитка обжима-

ющую его корочку металла. Поэтому усилие зажатия в данном случае не может использоваться для регулирования скорости взаимного перемещения таким же образом, как при плавке с вытягиванием дорна вниз. Для регулирования скорости взаимного перемещения кристаллизаторов и слитка в этом случае применяют специальные датчики, следящие за уровнем металлической ванны. Разработаны и используются датчики индукционного [26], теплового [27] и потенциального [28] типов, которые устанавливают в стенке кристаллизатора ниже порога уширения.

Способами ЭШЛ с относительным перемещением обоих кристаллизаторов в промышленных условиях изготавливают длинные полые заготовки диаметром до 1500 мм, с толщиной стенки от 40 до 350 мм [23, 29–31]. Наиболее типичные примеры использования таких заготовок из различных классов сталей приведены ниже.

Из углеродистой стали 20 производят полые заготовки диаметром 680 мм, имеющие толщину стенки 110 мм и длину 1,5 м. Из них изготавливают корпуса сервомоторов для гидроэлектростанций [12].

Из легированной конструкционной стали марки 38ХМ получают широкую номенклатуру полых заготовок, которые используются для последующей раскатки на кольца [29].

Из инструментальной стали марки 9ХФ отливают заготовки диаметром 1200 мм, с толщиной стенки 320 мм, имеющие длину до 2,4 м и массу свыше 16 т, для литых бандажей опорных валков прокатных станов [32].

Из штамповых сталей марок 4Х5МФС и 4Х4М2ВФС выплавляют втулки диаметром от 295 до 775 мм и внутренним диаметром от 145 мм до 365 мм для гидроконтейнеров горизонтальных трубных прессов [31]. Опыт эксплуатации литых электрошлаковых втулок показал, что их стойкость в 2 раза превышает стойкость кованных.

Из нержавеющей стали марки 07Х16Н6 выплавляют заготовки барабанов массой 6 т, длиной 2,5 м, диаметром 1460 мм, с толщиной стенки 80 мм [33]. Из стали марки 12Х18Н10Т изготавливают заготовки корпусов сосудов, работающих при температуре жидкого азота и давлении 7 МПа, длиной 2,5 м, диаметром 715 мм, с толщиной стенки 170 мм [34].

Существует разновидность технологии ЭШЛ, при которой слиток вытягивают вниз, а наружный кристаллизатор и дорн не соединяют в общий блок. В этом случае дорн устанавливают на жестком штоке, через который также осуществляется подвод и отвод охлаждающей воды. В процессе ЭШЛ верхний торец внутреннего кристаллизатора удерживают ниже уровня шлака так, чтобы он лишь немного выступал над металлической ванной. При этом пространство внутри кристаллизатора выше зеркала шлаковой ванны остается свободным для размещения расходуемых электродов [35, 36]. Схема такого процесса ЭШЛ приведена на рис. 5, в.

Преимуществом этого варианта ЭШЛ полых слитков является возможность применять для переплава один расходуемый электрод большого сечения. В ходе процесса ЭШЛ происходит как бы прошивка сплошного электрода и формирование по-



лой заготовки. Эта разновидность ЭШЛ получила название электрошлаковая прошивка.

При прошивке отпадает необходимость использовать для переплава тонкий прокат из требуемой марки металла и изготавливать из него расходный электрод в виде частокола прутков. Использование одного электрода упрощает процесс подготовки ЭШЛ и существенно снижает затраты на его проведение. Особенно эффективна прошивка при производстве полых заготовок из труднодеформируемых сталей и сплавов, из которых сложно получать тонкие прутки. При этом для выплавки полых заготовок можно использовать литые расходные электроды, изготовленные способами вакуумной индукционной плавки и вакуумного дугового переплава.

Промышленное освоение способа прошивки наталкивается на некоторые трудности, связанные со стойкостью технологической оснастки. Во-первых, максимальная длина полых заготовок, выплавляемой таким способом, ограничена жесткостью штока, сохраняющего с требуемой точностью расположение дорна относительно наружного кристаллизатора. Во-вторых, из-за прямой схемы подключения расходного электрода к источнику питания происходит не только локальный электроэрозионный износ стенки наружного кристаллизатора, но также интенсивное разрушение верхней части дорна. Износ дорна проходящим током усугубляется дождем капель перегретого металла, попадающим на него с оплаваемого торца расходного электрода.

Для уменьшения этих вредных явлений применяют составные кристаллизаторы и дорны, собранные из отдельных изолированных друг от друга частей. Кроме того, с помощью продувки шлаковой ванны инертными газами через дорн зону каплепадения смещают с верхнего торца дорна на зеркало кольцевой металлической ванны. Эти технологические приемы увеличивают срок службы кристаллизаторов до нескольких сотен плавов [37].

Электрошлаковой прошивкой выплавляли полые заготовки диаметром 525 мм, с толщиной стенки 135 мм, длиной до 1,5 м из стали марки 30ХН2М и никелевого сплава, имеющего следующий состав, мас. %: 20 Cr; 20 Fe; 5 Nb; 3 Mo и 1 Ti. Эти заготовки предназначены для последующей деформации [36]. Серийно изготавливали также из стали 20Х электрошлаковые литые заготовки продольных суппортов станков-автоматов. Выплавляли заготовки длиной 1,4 м с фасонной наружной поверхностью и полостью диаметром 135 мм [35, 37].

Способом ЭШЛ с вытягиванием получали также 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, г. Этим способом ЭШЛ изготавливают трубные колена из жаростойкой хромоникелевой стали типа 25–20 [38], отводы Ду 350 с толщиной стенки 60 мм, имеющие массу до 950 кг, из сталей марок 14ХГС и 30ХМА. Их используют для изготовления трубопроводов и теплообменников, работающих при высокой температуре и давлении. По-

лученные этим способом литые электрошлаковые колена могут иметь угол поворота до 180° [13].

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 бандаж цементных печей Т-образного профиля из стали 35. Эти кольца ввариваются в корпус печи и служат опорами при ее вращении. Они имеют ширину опорной части 900 мм, а общую — 1500 мм. Диаметр опорной части колец составляет 6 м, внутренний диаметр — 5 м, масса — 65 т. Применение таких электрошлаковых бандажей позволило увеличить жесткость корпуса цементной печи и значительно повысить стойкость ее футеровки [39].

Для использования в литом виде без последующей деформации можно получать не только цилиндрические заготовки с полостью, расположенной концентрично, но и заготовки с любой другой постоянной по длине формой поперечного сечения. Например, получены заготовки длиной 4 м с эксцентрично расположенной полостью и прямоугольным выступом снаружи со стороны наибольшей толщины стенки [40], а также цилиндрические заготовки корпуса двухчервячного гранулятора длиной 1,7 м с полостью в форме восьмерки, состоящей из двух окружностей диаметром 80 мм [41]. Выплавляли также заготовки в форме параллелепипеда размером 600×540×830 мм с прямоугольным отверстием 190×160 мм [42].

Для некоторых машиностроительных деталей, работающих в условиях нагрева, требуются длинные заготовки со сквозными отверстиями для охлаждения. Получение длинных отверстий путем механической обработки весьма сложно. Способ ЭШЛ с относительным перемещением кристаллизаторов значительно упрощает изготовление таких деталей. Для получения длинных заготовок с несколькими изолированными друг от друга продольными отверстиями внутри наружного кристаллизатора размещают соответствующее количество охлаждаемых конических дорнов. Примером такой литой заготовки является охлаждаемая направляющая длиной 3,7 м в виде фасонного профиля с четырьмя продольными сквозными отверстиями диаметром 23 мм из стали марки 3Х13 [43].

На рис. 6 показаны формы поперечного сечения некоторых литых фасонных заготовок, полученных рассмотренными выше способами ЭШЛ.

Для промышленного производства электрошлаковых полых слитков и заготовок разной массы была создана серия электрошлаковых печей [44]. Для конкретных изделий разработана водоохлаждаемая специализированная медная или стальная технологическая оснастка (кристаллизаторы, дорны, поддоны), с помощью которой можно выплавлять заготовки различных форм и размеров [10, 45, 46]. Разработаны методики расчета и проектирования разных типов кристаллизаторов с конвективным или кипящим режимами охлаждения [4].

Анализ возможностей различных способов получения полых литых электрошлаковых заготовок

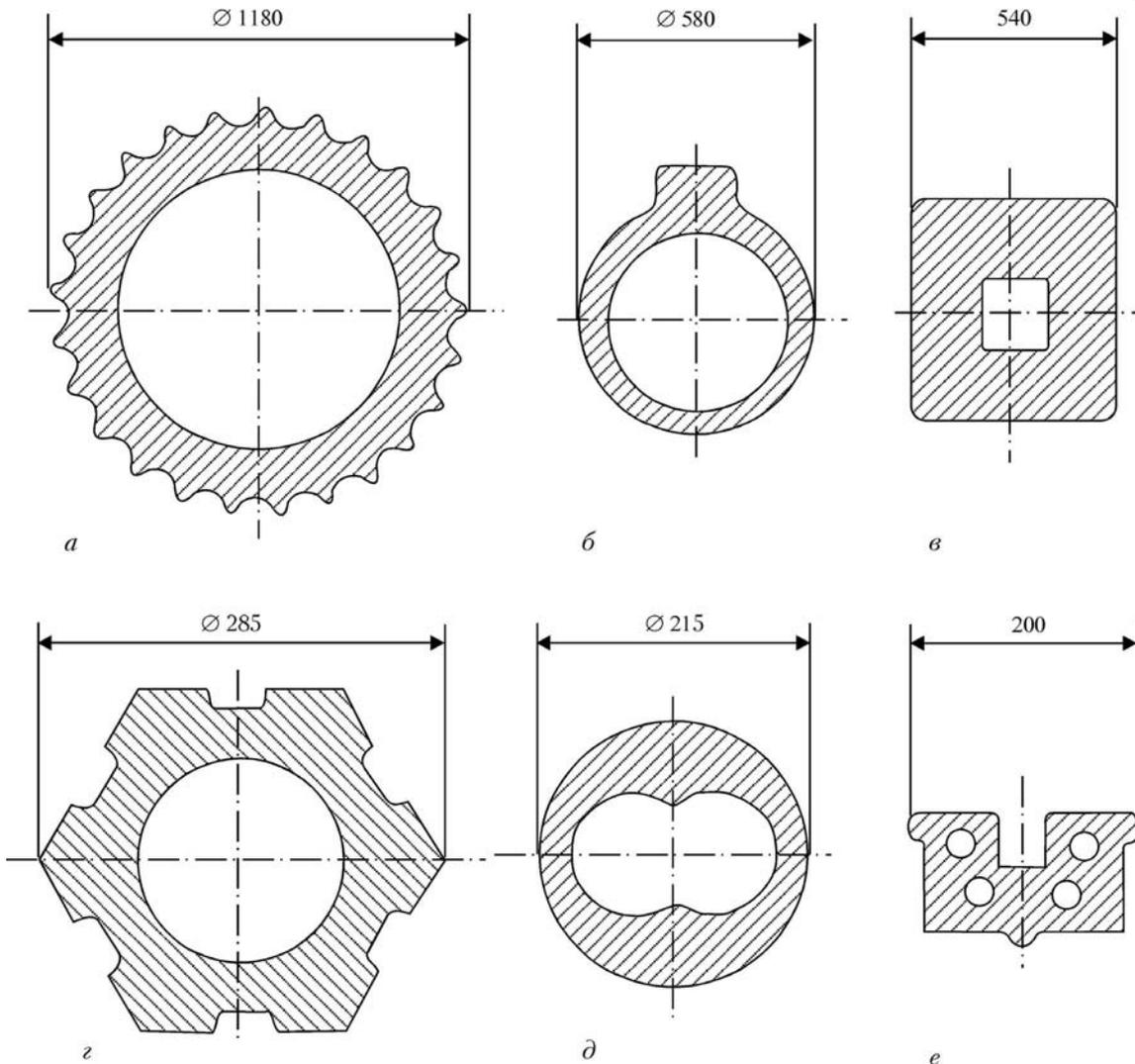


Рис. 6. Формы поперечного сечения некоторых ЭШЛ заготовок, используемых в литом виде: *a* — ведущего колеса тяжелого трактора; *b* — деталей с переменной толщиной стенки; *c* — детали с прямоугольным отверстием; *d* — продольного суппорта станка-автомата; *e* — корпуса двухчервячного гранулятора; *e* — направляющей с каналами для охлаждения

и опыт их использования в промышленности позволили дать следующие рекомендации:

Выплавку заготовок с полужамкнутыми полостями наиболее рационально производить способом ЭШЛ с использованием неподвижных наружного и внутреннего кристаллизаторов.

Выплавку полых заготовок ограниченной высоты можно осуществлять способом ЭШЛ с использованием неподвижного наружного кристаллизатора и подвижного относительно отливаемой заготовки внутреннего. При этом наружная поверхность получаемых заготовок может иметь сложную форму.

Для выплавки длинных заготовок постоянного поперечного сечения с одной или несколькими полостями следует использовать технологию ЭШЛ с относительным перемещением выплавляемой заготовки и кристаллизаторов.

Выводы

1. Специалистами разных стран создана и внедрена в промышленное производство особая разновидность электрошлакового процесса — ЭШЛ полых

слитков и заготовок. Эта технология позволяет получать непосредственно в процессе ЭШЛ полые литые заготовки, металл которых имеет более высокие служебные свойства, чем деформированный.

2. Электрошлаковые литые полые заготовки значительно упрощают изготовление из них многих уникальных деталей. Технология ЭШЛ решает также задачу получения полых заготовок сложного профиля из труднодеформируемых высоколегированных сталей и сплавов, которые находят все более широкое применение в промышленности.

1. *Электрошлаковый металл* / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
2. *Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Дяченко Д. М.* Качество электрошлакового металла. — Киев: Наук. думка, 1990. — 312 с.
3. *Исследование теплообмена при электрошлаковом переплаве по различным схемам* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов и др. // *Электрошлаковый переплав*. — Вып. 4. — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 237–244.
4. *Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве* / Под ред. Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1978. — 303 с.
5. *Митчелл А., Бэлентайн А. С.* Факторы, влияющие на кристаллизацию и температуру слитков при ЭШП //



- Электрошлаковый переплав. — Вып. 6. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 192–198.
6. Особенности структуры и свойств полых слитков электрошлаковой выплавки / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Л. В. Чекотило и др. // Специальная электрометаллургия. — Ч. 1. — Киев: Наук. думка, 1972. — С. 130–140.
 7. Медовар Б. И. Электрическая отливка слитков // Электрошлаковая сварка / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев-М.: Машгиз, 1956. — С. 155–158.
 8. Разработка и внедрение технологии электрошлаковой выплавки корпусов энергетической арматуры / В. И. Рабинович, Л. Д. Замошников, Ю. Н. Кригер и др. // Специальная электрометаллургия. — Ч. 1. — Киев: Наук. думка, 1972. — С. 173–177.
 9. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Бойко Г. А. Электрошлаковое литье (Обзор). — М.: НИИмаш, 1974. — 70 с.
 10. Южанин Ж. И. Освоение производства электрошлаковых отливок на Коломенском заводе тяжелого станкостроения // Проблемы электрошлаковой технологии. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 150–154.
 11. А. с. 361702 СССР, МПК С 21 С 5/56. Дорн / А. П. Белоглазов, Б. И. Медовар, И. И. Кумыш и др. — Оpubл. 05.06.80; Бюл. № 21.
 12. Кригер Ю. Н., Нечаев Е. А., Карнов О. С. Электрошлаковая выплавка в энергетическом машиностроении // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1985. — № 3. — С. 24–28.
 13. Аликин А. П., Бойко Г. А. Электрошлаковое литье в химическом машиностроении // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 123–128.
 14. Южанин Ж. И., Цытунова И. Р., Агафонов А. С. Изготовление заготовок контейнерных втулок из стали 5ХНМ с помощью электрошлакового литья // Металловедение и термич. обработка мет. — 1979. — № 6. — С. 53–55.
 15. Медовар Б. И., Чекотило Л. В., Павлов В. Л. Электрошлаковая выплавка полых слитков // Вопросы специальной электрометаллургии: Материалы Междунар. симп., г. Киев, июнь 1972 г. — Киев-М., 1973. — С. 42–46.
 16. Южанин Ж. И. Вспомогательное технологическое оборудование в производстве электрошлаковых отливок. — Пробл. спец. электрометаллургии. — 1983. — № 19. — С. 29–32.
 17. Электрошлаковый переплав на Кулебакском металлургическом заводе им С. М. Кирова / А. Я. Рабинович, Б. Р. Желнин, А. В. Маринин А.В. и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 43–49.
 18. Заводской опыт электрошлаковой отливки полых слитков фасонных заготовок по способу «конус» / Л. В. Чекотило, В. Л. Павлов, А. П. Аликин и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 137–144.
 19. Кумыш И. И., Десатов В. Т., Петров Ю. Б. Электрошлаковая отливка заготовок ведущих колес промышленных тракторов // Проблемы электрошлаковой технологии. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 154–158.
 20. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Латаш Ю. В. Электрошлаковая отливка и перспективы ее применения в литейном производстве // Механические свойства литого металла. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — С. 141–146.
 21. Пат. 1326579 Англии. Устройство для электрошлакового переплава металлов / Б. И. Медовар, В. М. Баглай, Б. Б. Федоровский и др. — Оpubл. 15.08.73; Пат. 920596 Италии. — Оpubл. 15.03.72; Пат. 36669 Канады. — Оpubл. 13.11.73; Пат. 2054529 ФРГ. — Оpubл. 10.05.72; Пат. 342258 Швеции. — Оpubл. 21.01.72.
 22. Развитие новой технологии для шлакового литья применительно к производству цилиндрических изделий // Электрошлаковый переплав. — Вып. 3: Материалы IV Междунар. симп. по процессам электрошлакового переплава, г. Токио, Япония, 1973 г. — Киев: Наук. думка, 1975. — С. 178–193.
 23. Медовар Б. И., Баглай В. М., Чекотило Л. В. Электрошлаковая отливка крупногабаритных труб высокого давления // Электрошлаковый переплав. — Вып. 5. — Киев: Наук. думка, 1979. — С. 215–218.
 24. Анодное разрушение кристаллизатора при ЭШП / Б. И. Медовар, В. Л. Артамонов, В. М. Баглай, В. П. Сокол // Рафинирующие переплавы. — Киев: Наук. думка, 1974. — С. 35–40.
 25. Электрошлаковая отливка труб / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. М. Баглай и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1977. — Вып. 7. — С. 3–9.
 26. Индуктивные датчики уровня металла для электрошлаковых печей / О. П. Бондаренко, А. М. Марченко, А. И. Кравчук и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1976. — Вып. 5. — С. 6–10.
 27. Температурный уровень для установок рафинирующих переплавок / О. А. Герашенко, В. Л. Шевцов, А. М. Пальти, Г. С. Маринский // Проблемы электрошлаковой технологии. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 100–104.
 28. Некоторые вопросы исследования потенциального поля шлаковой ванны в подвижных кристаллизаторах при электрошлаковом переплаве / Г. А. Тимашов, И. А. Генис, Б. Б. Федоровский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1981. — Вып. 14. — С. 25–27.
 29. Полые слитки ЭШП — заготовки для горячей раскатки на кольца и обечайки / Б. П. Васильев, Б. Б. Федоровский, В. И. Ус и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1991. — № 4. — С. 6–9.
 30. Баглай В. М., Федоровский Б. Б., Тимашов Г. А. Получение тонкостенных труб методом электрошлакового литья. — Пробл. спец. электрометаллургии. — 1976. — Вып. 5. — С. 34–40.
 31. Жадкевич М. Л., Федоровский Б. Б., Бородин А. И. Высококачественные литые полые электрошлаковые заготовки // Литейное пр-во. — 1988. — № 8. — С. 12–13.
 32. Применение полых электрошлаковых заготовок в тяжелом машиностроении / Б. Б. Федоровский, Г. А. Тимашов, Ю. Г. Емельяненко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1987. — № 2. — С. 24–27.
 33. Южанин Ж. И., Дубинский Р. С. ЭШЛ в ПО «Коломенский завод тяжелых станков» // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1988. — С. 94–97.
 34. Электрошлаковая выплавка заготовок сосудов высокого давления из аустенитной стали / Б. И. Медовар, А. Д. Чепурной, В. Я. Саенко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1981. — Вып. 15. — С. 13–16.
 35. Получение фасонных заготовок деталей станков способом электрошлаковой прошивки / Г. А. Тимашов, Б. Б. Федоровский, Б. А. Хлебников и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 99–101.
 36. Клейн Г. Дж., Венау У. В., Лав К. Л. Электрошлаковая выплавка полых слитков // Электрошлаковый переплав. — Вып. 5. — Киев: Наук. думка, 1979. — С. 155–169.
 37. Опыт внедрения технологии электрошлаковой прошивки при получении фасонных полых заготовок / Г. А. Тимашов, Б. Б. Федоровский, В. А. Крепак и др. // Спец. электрометаллургия. — 1984. — Вып. 54. — С. 44–46.
 38. Уджи А. Изготовление фасонных колец с помощью процесса ЭШЛ с вытягиванием и вращением // Электрошлаковый переплав. — Вып. 4. — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 165–175.
 39. Внедрение электрошлаковой технологии изготовления заготовок сварных бандажей на заводе «Волгоцеммаш» / В. К. Похлебаев, З. И. Дмитриев, А. П. Белоглазов и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 93–96.
 40. Применение ЭШЛ для получения длинных фасонных отливок с фланцами / Б. Б. Федоровский, Г. А. Тимашов, И. Д. Нагаевский и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 78–80.
 41. Электрошлаковая отливка заготовок корпусов двухчервячных грануляторов / Б. И. Медовар, Г. А. Тимашов, Б. Б. Федоровский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1979. — Вып. 11. — С. 41–43.
 42. Электрошлаковая выплавка полых слитков прямоугольного сечения / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Л. В. Чекотило и др. // Спец. электрометаллургия. — 1971. — Вып. 13. — С. 35–39.
 43. ЭШЛ длинных заготовок с получением одновременно нескольких отверстий малого диаметра / Б. Б. Федоровский, Г. А. Тимашов, Л. И. Бондаренко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1986. — № 3. — С. 38–39.
 44. Электрошлаковые печи / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1976. — 414 с.
 45. Бондаренко Л. И., Тимашов Г. А., Федоровский Б. Б. Секционные кристаллизаторы для ЭШЛ крупногабаритных полых заготовок // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1986. — № 1. — С. 26–30.
 46. К. А. Цыкуленко. Развитие электрошлаковых технологий и совершенствование конструкций кристаллизаторов ЭШП (Обзор) // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 8–18.

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

Поступила 17.03.2008