



ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЕ ЛИТЬЕ С ПРИПЛАВЛЕНИЕМ. Обзор

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

Выполнен обзор публикаций по ЭШЛ с приплавлением. Описаны особенности этого способа электрошлакового литья, приведены данные о качестве металла получаемых заготовок. Показано, что свойства металла в зоне приплавления после термической обработки не уступают таковым литого электрошлакового металла. Даны примеры успешного применения этого вида электрошлакового литья для получения заготовок из различных марок сталей. Сделан вывод о целесообразности применения способа ЭШЛ с приплавлением в современных экономических условиях для изготовления деталей сложной формы ответственного назначения.

A review of publications on electroslag casting with additional fusion is presented. Features of this method of electroslag casting are described; data on quality of metal of billets produced are cited. It is shown, that properties of metal in fusion zone after heat treatment are not inferior to those of electroslag cast metal. Examples of successful application of this method of electroslag casting for producing billets from different steel grades are given. A conclusion on expediency of application of electroslag casting with additional fusion in modern economic conditions for manufacturing complex-shaped critical components is drawn.

Ключевые слова: электрошлаковое литье; приплавление; качество металла зоны приплавления; крупные коленчатые валы; оборудование для АЭС; прокатные валки

Электрошлаковое литье (ЭШЛ) — способ получения фасонных заготовок ответственного назначения, в дальнейшем используемых в литом виде. Литые электрошлаковые заготовки зачастую применяют взамен поковок, поскольку по своим служебным свойствам они не уступают последним, а по ряду показателей даже превосходят их [1]. Высокое качество электрошлакового металла обеспечивается в результате рафинирования расплавленного металла в процессе переплава и его последующего направленного затвердевания в водоохлаждаемой литевой форме — кристаллизаторе [2].

При ЭШЛ применяют кристаллизаторы, внутренней конфигурация которых с необходимыми припусками соответствует форме наружной поверхности будущей фасонной заготовки. Их изготавливают разборными с более сложной конструкцией, чем у кристаллизаторов, используемых для выплавки передельных слитков способом классического электрошлакового переплава (ЭШП).

Процесс ЭШЛ отличается от ЭШП не только формой выплавляемых заготовок, но и рядом технологических особенностей. Так, по ходу плавки при ЭШЛ может в значительных пределах изменяться глубина шлаковой и металлической ванн, что существенно сказывается на режиме электрошлакового процесса и условиях формирования структуры выплавляемой заготовки [3]. Кроме того, процесс образования основного тела заготовки отличается от такового в местах формирования патрубков и других выступающих частей [4]. В этих местах при наличии дополнительных охлаждающих поверхностей образуется новый фронт кристаллизации,

направление движения которого не совпадает с основным. В зоне встречи этих фронтов могут образовываться дефекты усадочного происхождения [5].

Указанных выше недостатков лишен способ ЭШЛ с приплавлением, при котором в процессе электрошлаковой выплавки основной заготовки происходит ее соединение с заранее изготовленными частями. В этом случае сохраняются условия кристаллизации металла, близкие к классическому ЭШП, который стабильно обеспечивает наиболее высокое качество литого металла [3].

ЭШЛ с приплавлением дает возможность изготавливать заготовки значительно более сложной формы и большего размера, чем при обычном ЭШЛ. Применение этого способа позволяет повысить производительность литья, уменьшить расход вспомогательных материалов и энергозатраты. При этом способе используют кристаллизаторы простой формы и меньших размеров, что особенно важно в современных экономических условиях.

Бесспорным достоинством ЭШЛ с приплавлением является возможность получать композиционные заготовки, части которых изготавливают из сталей разных марок или чугунов. Кроме того, заготовки могут быть удачно приспособлены к различным условиям эксплуатации их отдельных частей, как например, композиционные валки прокатных станов [6].

В зависимости от взаимного расположения выплавляемой заготовки и приплавляемых к ней частей можно выделить три различных способа ЭШЛ с приплавлением.

Согласно первому, заранее изготовленные части будущей заготовки устанавливают в специальные отверстия, выполненные в стенках разборного кристаллизатора. При втором способе эти части устанавливают внутрь кристаллизатора.



При третьем, уже подготовленные части располагают под или над кристаллизатором, где производят электрошлаковую выплавку заготовки.

При ЭШЛ с приплавлением почти всегда происходит шунтирование рабочего тока, проходящего через металлическую ванну, приплавляемыми деталями. От тока, проходящего через приплавляемую деталь, зависит глубина ее провара. При разработке технологии ЭШЛ с приплавлением во многих случаях чрезвычайно важно иметь возможность управлять значением этого тока с тем, чтобы гарантировать качественное приплавление детали без ее чрезмерного провара.

Классическим примером первого способа ЭШЛ с приплавлением является электрошлаковая выплавка коленчатых валов или отдельных их частей (кривошипов). Коленчатый вал — одна из основных деталей поршневых машин (двигателей внутреннего сгорания, насосов, компрессоров). Конструктивно его выполняют из коренных и шатунных шеек и соединяющих их щек, расположенных в различных пространственных положениях.

На ПО «Брянский машиностроительный завод» по технологии Института электросварки им. Е. О. Патона освоено серийное производство кривошипов для коленчатых валов мощных судовых дизелей [7]. Кривошипы для них изготавливают способом ЭШЛ с приплавлением. Каждый кривошип представляет собой две щеки, соединенные между собой шатунной шейкой. Масса электрошлаковой литой заготовки кривошипа составляет около 5 т, а диаметр шейки — примерно 0,5 м. После термической и механической обработок кривошипы собирают в коленчатые валы на коренных шейках путем горячей посадки.

Кривошипы изготавливают в кристаллизаторе, имеющем форму щеки с водоохлаждаемой нишей на месте будущей шатунной шейки. Выплавляют сначала заготовку щеки с шейкой в виде прилива (рис. 1, а). Затем отливку извлекают из кристаллизатора и устанавливают рядом с ним снаружи таким образом, чтобы заготовка шейки вошла в нишу. Завершающая операция сводится к выплавке второй щеки с одновременным приплавлением к ней шатунной шейки, изготовленной вместе с первой щекой кривошипа (рис. 1, б).

Способом ЭШЛ с приплавлением путем последовательной выплавки щек с одновременным приплавлением к ним заранее изготовленных шеек можно получать не только отдельные кривошипы, но и весь коленчатый вал целиком. При этом коренные и шатунные шейки вставляют в соответствующие отверстия в стенках водоохлаждаемого кристаллизатора, предназначенного для ЭШЛ щек (рис. 2, а). После выплавки каждой второй щеки полученный кривошип разворачивают вокруг оси коренной шейки на требуемый угол и производят выплавку следующей щеки (рис. 2, б). Эту операцию повторяют до полного изготовления всего коленчатого вала. Таким способом получают коленчатый вал, предназначенный для газомотокомпрессора массой в несколько тонн [8].

На заводе в городе Тяньцзинь (КНР) используют подобную технологию для производства дизельных коленчатых валов длиной до 3 м [9].

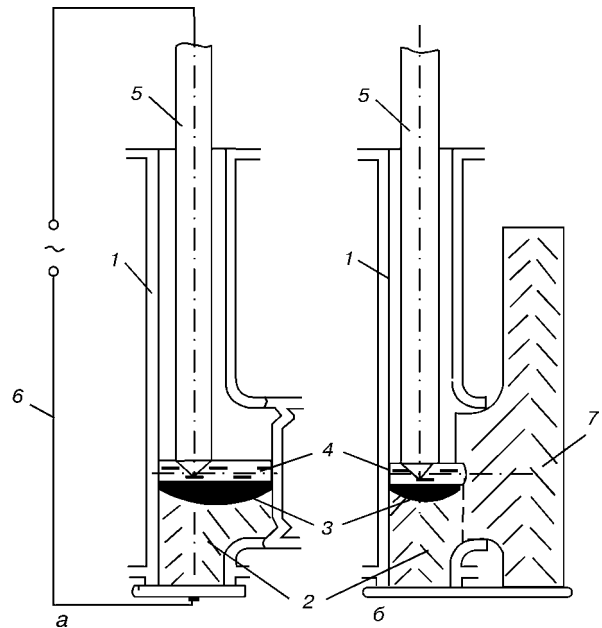


Рис. 1. Схема изготовления кривошипа: а — выплавка первой щеки кривошипа с шейкой; б — выплавка второй щеки с приплавлением к шейке; 1 — кристаллизатор; 2 — выплавляемая заготовка; 3 — металлическая ванна; 4 — шлаковая ванна; 5 — расходный электрод; 6 — источник питания; 7 — приплавляемая часть

Способом ЭШЛ с приплавлением предварительно изготовленных частей, вставленных в отверстие кристаллизатора, получают заготовки шатунов компрессорных установок из стали 40 [10], резцедержателей крупных станков [11], вилок ножей бульдозеров для тяжелых промышленных тракторов [12] и ряд других деталей сложной формы.

Примером другого применения способа ЭШЛ с приплавлением является электрошлаковая наплавка (ЭШН) толстым слоем наружной поверхности прокатных валков или других цилиндрических деталей, которая позволяет не только ремонтировать изношенные валки, но и изготавливать новые биметаллические. Первоначально такую наплавку осуществляли с помощью кольцевого подвижного кристаллизатора и расходных электродов в виде частотокола прутков, установленных посередине зазора между кристаллизатором и наплавляемой заготовкой [13].

При таком способе ЭШН в поперечном сечении наплавляемой заготовки зафиксировано неравномерное проплавление. Напротив расходных электродов проплавление намного больше, чем в промежутках между ними. Избежать этого явления можно, если вместо частотокола прутков применять сплошной трубчатый расходный электрод [14], изготавливаемый способом центробежного литья, канатные трубы.

Однако при использовании для ЭШН любых типов расходных электродов имеет место неравномерное по высоте проплавление наплавляемой заготовки. По ходу электрошлакового процесса глубина проплавления возрастает. Причем предотвратить это явление не удастся путем программируемого изменения мощности, поскольку в классическом процессе с использованием расходных электродов существует прямая связь между мощностью,

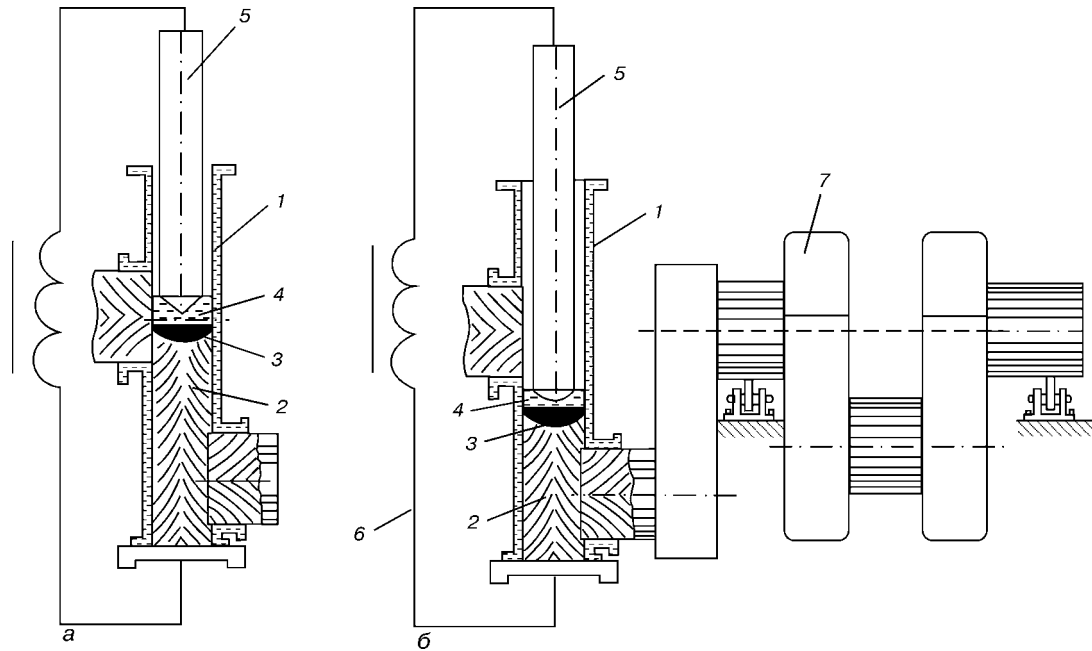


Рис. 2. Схема электрошлакового литья коленчатого вала целиком: *а* — выплавка первой щеки с приплавлением щеек; *б* — выплавка коленчатого вала; обозн. 1–6 см. на рис. 1; 7 — коленчатый вал

выделяемой в шлаковой ванне, и количеством металла, расплавляемого в ней [14].

Значительно изменить энергетическую ситуацию в шлаковой ванне удалось благодаря применению в ходе ЭШН токоподводящего кристаллизатора (ТПК), позволяющего вводить в шлаковую ванну энергию независимо от количества расплавляемого в ней металла и, таким образом, отказаться от использования расходуемых электродов. При ЭШН цилиндрических заготовок ТПК дает возможность проще поддерживать неизменной глубину проплавления по длине выплавляемой заготовки [15].

При помощи ТПК осуществляют ЭШН, используя кусковой присадочный материал в виде дробы, стружки, сечки или мелких кусков (рис. 3, *а*) [16],

а также подавая в шлаковую ванну отдельными порциями жидкий металл, предварительно расплавленный в другом агрегате, например в индукционной печи (рис. 3, *б*) [9].

С помощью ЭШЛ с приплавлением (третий способ), как правило, получают на полуфабрикате крупного изделия приливы в виде различных патрубков. Для этого кристаллизатор, предназначенный для формирования литого патрубка, устанавливают непосредственно на корпус будущего изделия (рис. 4). Предварительно в корпусе в местах расположения будущих патрубков высверливают технологические отверстия и над ними соосно устанавливают кристаллизатор. Патрубок формируют способом ЭШП расходуемого электрода, изготовленного из той же стали, что и корпус изделия. В процессе выплавки патрубка происходит его сплавление с корпусом. При дальнейшей обработке полученного полуфабриката по оси патрубков высверливают отверстия необходимого диаметра.

Этот способ ЭШЛ с приплавлением, созданный Институтом электросварки им. Е. О. Патона, нашел применение при серийном изготовлении сепараторов пара и компенсаторов объема для атомных электростанций. На одном корпусе сепаратора пара имеется 432 патрубка диаметром 105 мм из стали 22К, а на корпусе компенсатора объема — 108 патрубков диаметром 150 мм из той же стали. Для их выплавки применяют специальный стенд, обеспечивающий точное позиционирование кристаллизатора относительно оси будущего патрубка и осуществление в нем ЭШН [17, 18].

Подобным способом патрубки с фланцами выплавляют на корпусе клапана Ду 800 из стали 20 для второго контура энергоблока АЭС. Предварительно сам корпус выплавляют способом ЭШЛ [10]. Аналогично выплавляют цилиндрические патрубки на крышках задвижек Ду 400 из стали 20 для трубопроводов блока РБМК 1000 АЭС, а также на крышке паровой коробки из стали 15Х1М1Ф [19].

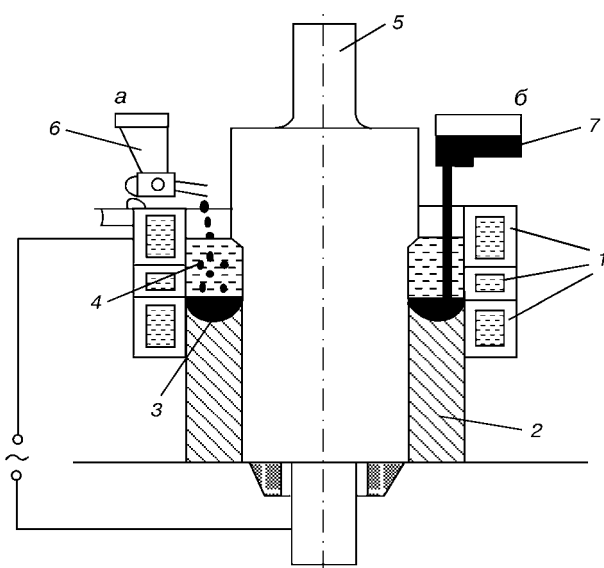


Рис. 3. Электрошлаковая наплавка валков в ТПК: *а* — с подачей в шлаковую ванну кускового присадочного материала; *б* — с подачей в шлаковую ванну жидкого металла; обозн. 1–4 см. на рис. 1; 5 — наплавляемая заготовка; 6 — дозатор подачи кускового материала; 7 — емкость для подачи жидкого металла



Подобным образом изготавливают детали типа ступицы на полем валу из стали 38 ХС, для чего заранее изготовленный полый вал вставляют в кристаллизатор и выплавляют в нем фланец с одновременным приплавлением к валу [20].

Широкому внедрению деталей ответственного назначения для судостроительной, химической, энергетической и других отраслей промышленности, полученных способом ЭШЛ с приплавлением, способствовало высокое качество этих изделий и экономическая эффективность их производства. Имеющиеся в литературе данные, полученные на основе различных исследований, и (что особенно важно) положительные результаты эксплуатации убедительно подтвердили это.

Способ ЭШЛ с приплавлением соединяет в одном технологическом процессе ЭШЛ и ЭШС. Заготовки, полученные этим способом, фактически состоят из двух частей с разной структурой металла (заранее изготовленные приплавляемые детали и основная отливка), а также зоны их соединения. Механические свойства такой заготовки прежде всего зависят от качества металла зоны соединения.

Приплавляемые детали, как правило, имеют простую форму и изготавливаются из поковок или проката, что обеспечивает их высокое качество, а в отдельных случаях — способом ЭШЛ и даже ЭШЛ с приплавлением.

Высокое качество литого электрошлакового металла основной части заготовки несомненно, поскольку оно многократно подтверждалось самыми тщательными и разнообразными исследованиями в течение уже многих десятилетий [1].

Особое внимание при разработке технологического процесса ЭШЛ с приплавлением уделяют получению требуемых свойств металла в зоне соединения, включая область термического влияния на металл приплавляемой детали. При ЭШЛ с приплавлением масса отливаемой части заготовки значительно превышает массу сварного шва при ЭШС. Поэтому несмотря на то, что при литье с приплавлением в шлаковой ванне выделяется значительно большее количество теплоты, чем при ЭШС, скорость приплавления мала и, по нашим оценкам, составляет 0,2... 0,4 м/ч, тогда как при ЭШС металла толщиной 100 мм она не менее 0,8 м/ч [21].

Низкая скорость приплавления способствует более растянутому во времени термическому циклу, чем при обычном ЭШС, и более длительному пребыванию металла приплавляемой детали в условиях высокой температуры. Такой термический цикл вызывает неблагоприятное изменение структуры металла переходного слоя и требует дополнительного изучения.

Имеющиеся данные свидетельствуют, что в условиях ЭШС низколегированных и легированных конструкционных сталей, как и при ЭШЛ с приплавлением заготовок из этих сталей, в зоне термического влияния зафиксированы значительный рост зерна, образование видманштеттовой структуры и ферритных оторочек по границам зерен. Это вызывает значительное снижение пластичности и вязкости металла в зоне перегрева. Для восстановления свойств металла в этой зоне после сварки низколегированных сталей с низким содержанием углерода

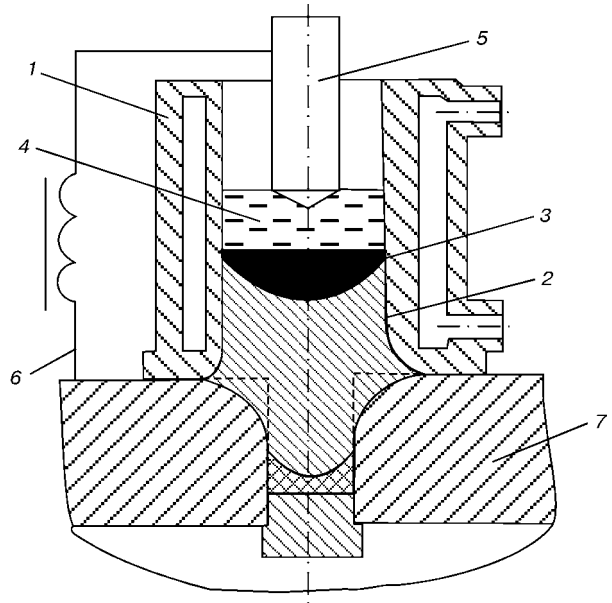


Рис. 4. Схема процесса электрошлаковой выплавки патрубков: обозн. 1–6 см. на рис. 1; 7 — основное изделие

иногда применяют лишь высокий отпуск. Однако в большинстве случаев для получения требуемых свойств необходимо нагревать изделие до температуры полного или частичного аустенитного превращения.

При ЭШЛ с приплавлением задача получения высоких параметров свойств в зоне перегрева успешно решена. Так, в кривошипных коленчатых валах из стали 20Г мощных судовых дизелей качество ЭШЛ металла щек и шеек в зоне приплавления после отжига и последующей нормализации с отпуском значительно превосходит качество металла кривошипов, изготавливаемых обычным литьем, по значениям не только прочности, пластичности и вязкости [7], но и усталостной прочности [22]. При этом свойства металла в зоне приплавления ничем не отличаются от электрошлакового литого металла щек, не подвергавшегося перегреву. При детальном исследовании качества ЭШЛ коленвалов после их длительной эксплуатации на судах не выявлено каких-либо дефектов [23].

В ходе многочисленных исследований качества металла переходной зоны и патрубков, выплавленных на корпусах оборудования АЭС из стали 22К зафиксировано, что и на этой стали после нормализации с отпуском достигают полного восстановления свойств металла в зоне перегрева. Исследования структуры металла переходной зоны, его механических свойств, склонности к охрупчиванию и сопротивлению малоциклового усталости показали полную идентичность свойств металла этой зоны и основного металла корпуса изделия и литого электрошлакового металла патрубка [17, 18].

Аналогичные результаты по устранению последствий перегрева получены и при изготовлении способом ЭШЛ с приплавлением заготовок деталей типа ступицы из легированной стали с повышенным содержанием углерода марки 38ХС [20]. После отжига и закалки в масле с последующим отпуском механические свойства металла в зоне сплавления не отличались от таковых металла в других местах заготовки и были выше требуемых стандартом для



этой марки стали. Более того, у некоторых образцов из зоны сплавления обнаружено заметно большее значение ударной вязкости, чем у образцов из участков заготовки, не подвергавшихся перегреву при изготовлении.

При производстве композиционных валков (сталь-чугун) путем наплавки в ТПК хромистого чугуна присадкой в виде дробы [24] значения скоростей наплавки и приплавления при ЭШЛ близки (около 0,4 м/ч). Поскольку температура плавления применяемого для наплавки хромистого чугуна ниже температуры плавления стали, зона термического влияния наплавки на стальной заготовке имеет более низкую максимальную температуру и в ней не обнаружено металла с видманштеттовой структурой. Механические свойства металла зоны термического влияния не указываются, сообщается лишь о некотором повышении его твердости.

Таким образом, последствия неблагоприятного воздействия растянутого термического цикла ЭШЛ на приплавляемые стальные детали, как показывает опыт, устраняет термическая обработка с нагревом отливки выше температуры аустенитного превращения и последующий отпуск. Во многих случаях она совпадает с режимом термической обработки используемой стали, требуемой для приобретения ею необходимых свойств.

При разработке технологии ЭШЛ с приплавлением следует учитывать разную чувствительность сталей к воздействию на них термических циклов и тщательно отрабатывать режим их термической обработки для достижения требуемого уровня механических свойств.

Выводы

1. Установлено, что наиболее универсальным способом получения высококачественных массивных стальных заготовок сложной формы является ЭШЛ с приплавлением, применение которого в настоящее время может оказаться весьма эффективным для развития многих отраслей машиностроения.

2. Показано, что способ ЭШЛ с приплавлением гарантирует получение механических свойств металла заготовок на уровне таковых литого электрошлакового металла.

3. Определено, что ЭШЛ с приплавлением является наиболее экономичным по сравнению с другими способами ЭШЛ по стоимости оснастки и вспомогательных материалов, расходу электроэнергии и использованию металла.

4. Показано, что при разработке технологических процессов ЭШЛ с приплавлением следует изыскивать возможность влиять на уровень части рабочего тока, который шунтируется приплавляемыми деталями.

5. Определено, что для каждой конкретной марки стали, используемой при изготовлении заготовок способом ЭШЛ с приплавлением, необходимо отработать режим термической обработки, обеспечивающий получение требуемых механических свойств.

1. *Электрошлаковый металл* / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
2. *Электрошлаковый переплав* / Б. И. Медовар, Ю. В. Латаш, Б. И. Максимович, Л. М. Ступак. — М.: Металлургиздат, 1963. — 170 с.

3. *Патон Б. Е., Медовар Б. И., Бойко Г. А.* Электрошлаковое литье. Обзор. — М.: НИИМАШ, 1974. — 70 с.
4. *Заполнение шлаком и металлом охлаждаемых кристаллизаторов при электрошлаковом литье изделий сложной формы* / В. Л. Шевцов, И. И. Кумыш, Г. С. Маринский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1975. — № 2. — С. 26–31.
5. *Электрошлаковое литье заготовок корпусов фонтанной арматуры высокого давления* / В. Л. Шевцов, В. Я. Майданник, М. Л. Жадкевич и др. // Там же. — 1998. — № 4. — С. 3–12.
6. *Ксендзык Г. В.* Возможности и перспективы электрошлаковой наплавки. // Новые способы механизированной наплавки. — Киев: ИЭС, 1968. — С. 49–57.
7. *Электрошлаковое литье в производстве коленчатых валов крупных судовых дизелей* / Б. И. Медовар, Г. А. Бойко, Л. В. Попов и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1979. — № 10. — С. 37–41.
8. *Получение заготовок коленчатых валов газомотокомпрессоров методом электрошлакового литья* / В. В. Бежин, Р. С. Дубинский, Б. И. Медовар и др. // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 101–106.
9. *Медовар Б. И., Медовар Л. Б., Маенко В. Я.* Развитие электрошлакового процесса в специальной электрометаллургии // Автомат. сварка. — 1999. — № 9. — С. 7–12.
10. *Аликин А. П., Бойко Г. А.* Электрошлаковое литье в химическом машиностроении // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 123–128.
11. *Южанин Ж. И.* Комбинированные (ЭШП+прокат) заготовки рецедержавок тяжелых карусельных станков // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1976. — № 5. — С. 45–46.
12. *Миронов Ю. М.* Электрошлаковые печи для плавки и литья. Учеб. пособие. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. унта, 2005. — 294 с.
13. *Ксендзык Г. В.* Кольцевая электрошлаковая наплавка цилиндрических деталей в вертикальном положении // Автомат. сварка. — 1966. — № 5. — С. 63–67.
14. *Ксендзык Г. В.* Некоторые закономерности проплавления основного металла при кольцевой электрошлаковой наплавке // Высокопроизводительные процессы наплавки и наплавочные материалы. — Коммунарск, 1973. — С. 26–33.
15. *Кусков Ю. М.* Наплавка в токоподводящем кристаллизаторе — перспективное направление развития электрошлаковой технологии // Автомат. сварка. — 1999. — № 9. — С. 76–80.
16. *Кусков Ю. М.* Электрошлаковый процесс и технология наплавки дискретными материалами в токопроводящем кристаллизаторе: Дис. ... д-ра техн. наук. — Киев: ИЭС, 2005. — С. 307 с. (Машинопись).
17. *Новый прогрессивный технологический процесс изготовления патрубков на корпусах оборудования АЭС методом электрошлаковой выплавки* / Б. Е. Патон, Л. В. Тулицын, Ю. В. Соболев и др. // Энергомашиностроение. — 1977. — № 1. — С. 27–29.
18. *Фойта А., Розкошны К.* Опыт электрошлаковой выплавки патрубков компенсатора объема // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1988. — № 1. — С. 37–43.
19. *Кризер Ю. Н., Нечаев Е. А., Карпов О. С.* Электрошлаковая выплавка в энергетическом машиностроении // Там же. — 1985. — № 3. — С. 24–28.
20. *Цыгуров Л. Г., Ковалев В. Г., Бойко Г. А.* Технологические схемы ЭШЛ заготовок деталей типа ступица // Там же. — 1991. — № 1. — С. 11–15.
21. *Электрошлаковая сварка и наплавка* / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
22. *Гончаров И. Т., Егоров С. П.* Исследование усталостной прочности кривошипов коленчатых валов судовых дизелей, изготовленных методом электрошлакового литья // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1984. — № 21. — С. 39–41.
23. *Опыт применения технологии электрошлакового литья в производственном объединении «Брянский машиностроительный завод»* / Л. В. Попов, С. С. Анциферов, Г. А. Бойко и др. // Электрошлаковая технология: Сб. ст. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 118–122.
24. *Ксендзык Г. В.* Переходная зона при электрошлаковой наплавке дробью хромистого чугуна на сталь // Новые процессы наплавки, свойства наплавленного металла и переходной зоны: Сб. ст. — Киев: ИЭС, 1984. — С. 120–124.

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

Поступила 07.05.2007