

ЭШП В НЕОХЛАЖДАЕМОЙ СТАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Ф.К. Биктагиров, В.А. Шаповалов, А.В. Веретильник,
А.П. Игнатов, А.В. Гнатушенко

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Опробован процесс ЭШП в неохлаждаемой стальной форме. Определены энергетические параметры плавки, при которых температура шлака поддерживается близкой к температуре плавления переплавляемого металла, а между выплавляемым слитком и формой образуется гарнисаж толщиной 1...2 мм. Выявлено, что по сравнению с ЭШП в водоохлаждаемом кристаллизаторе скорость плавки уменьшается в 4...5 раз, а удельный расход электроэнергии в 2 раза. Показано, что за счет снижения температуры перегрева металла и скорости плавки создаются благоприятные условия кристаллизации с формированием мелкозернистой структуры металла слитков, получаемых таким способом. Библиогр. 6, рис. 3.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; неохлаждаемая форма; режим; температура шлака; производительность; гарнисаж; слиток; структура

Одним из основных факторов, позволяющих получать качественные стальные слитки способом ЭШП, является постепенная направленная преимущественно снизу вверх кристаллизация металла при сравнительно неглубокой металлической ванне. При этом в условиях ЭШП имеется возможность варьирования такими технологическими параметрами плавки, как состав и температура шлака, напряжение и ток плавки, а также массовая скорость переплава, что важно при разработке технологии ЭШП в зависимости от состава металла и назначения слитка. Однако возможности воздействия на условия кристаллизации за счет изменения тепловых условий процесса при классическом ЭШП ограничены, т.к. при таком способе получения слитков существует достаточно жесткая связь между вводимой в шлак мощностью, которая определяет температуру шлака, и скоростью плавки.

Дело в том, что качественная поверхность слитка без дефектов в виде грубых гофр и заходящих вглубь слитка заполненных шлаком пережимов обеспечивается при формировании возле водоохлаждаемой стенки кристаллизатора ровного тонкого (1...3 мм) гарнисажа. Для этого необходимо поддерживать температуру шлака на 100...200 °С выше температуры плавления металла. А это предопределяет высокую скорость плавки и повышенные тепловложения в металлическую ванну как за счет обогрева металлической ванны шлаком, так и за счет перегрева плавящегося металла. Поэтому, особенно при производстве слитков большого диаметра, затруднительно поддерживать мелкую металлическую ванну и обеспечивать условия кристаллизации с подавлением развития в слитке различного вида неоднородности.

Обеспечение низких скоростей плавки возможно при ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе [1, 2]. В этом случае формирование шлакового гарнисажа и качество поверхности слитка определяются преимущественно процессами выделения тепла при прохождении тока по периферии шлаковой ванны возле стенок кристаллизатора, а скорость плавки определяется теплоэнергетическими параметрами переплава расходуемого электрода. Поэтому электрошлаковый процесс в токоподводящем кристаллизаторе (ЭШП ТПК) можно использовать не только для получения слитков, но и для наплавки [3, 4].

Несмотря на возможности ЭШП ТПК с точки зрения управления технологическими параметрами процесса, производство слитков таким способом энергетически более затратное по сравнению с обычным ЭШП. Кроме того с увеличением диаметра слитка и, соответственно, размеров токоподводящего кристаллизатора возникает необходимость большего тепловложения в центральную область шлаковой ванны для исключения ее захолаживания. А для этого требуется увеличение мощности, подводимой посредством расходуемого электрода, что ведет к увеличению скорости плавки.

Таким образом, одновременно поддерживать высокую температуру шлака и обеспечивать низкую скорость плавки при электрошлаковом переплаве расходуемого электрода в водоохлаждаемой форме (кристаллизаторе) крайне сложно, а порой невозможно. Для того, чтобы снизить температуру шлака, необходимо исключить охлаждение формы. В этом случае возле горячей стенки такой формы даже при незначительном перегреве шлака выше температуры его плавления не будет образовываться толстый гарнисаж. Тогда появляется возможность вести процесс с минимальным пере-

гревом шлака над температурой плавления металла, тем самым добиться низких скоростей плавки и при этом исключить образование дефектов поверхности с получением литого изделия, сформированного в виде слитка.

Принимая во внимание вышесказанное, цель настоящей работы — опробование процесса электрошлаковой плавки расходоуемого электрода в неохлаждаемой форме.

По своей сути процесс ЭШП в неохлаждаемую форму близок к разработанным в свое время процессам электрошлакового заплавления сердцевинной полой металлической заготовки [5, 6]. Только если при процессе МХКВ и ЭШП в расходоуемый кристаллизатор необходимо исключить образование гарнисажа между наплавляемым металлом и неохлаждаемой формой, то в нашем случае процесс нужно осуществлять на таких режимах, чтобы исключить отсутствие гарнисажа между получаемым слитком и формой.

Основной возможностью управления режимами ЭШП, в том числе температурой шлака и скоростью плавки, является изменение тепловложения в шлаковую ванну за счет выбора энергетических параметров процесса — величины рабочего тока и подводимого к шлаку от источника питания (трансформатора) напряжения. В электрометаллургии, в зависимости от назначения, используются трансформаторы различной конструкции. Помимо таких характеристик, как установленная мощность, пределы возможного изменения питающего тока и напряжения, важным показателем металлургических трансформаторов является их вольт-амперная характеристика. Обычно трансформаторы по данному показателю подразделяются на два типа — с крутопадающей и жесткой вольт-амперной характеристикой.

Источники питания с крутопадающей вольт-амперной характеристикой используют, например, в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) и при вакуумно-дуговой плавке (ВДП). При электрошлаковой плавке обычно используют источники питания с жесткой вольт-амперной характеристикой. Связано это с тем, что для электрошлакового процесса, когда энергия выделяется преимущественно в режиме сопротивления, а не в дуговом режиме, такие источники имеют более высокий КПД преобразования электрической энергии в тепловую, т. е. они более экономичны и в то же время позволяют в широких пределах варьировать величиной тока при почти неизменном напряжении и тем самым управлять вводимой в шлак мощностью. Однако при использовании таких источников возникает

сложность в осуществлении электрошлакового процесса на пониженных токах, что необходимо для снижения скорости плавки, особенно при работе со шлаками, имеющими повышенное электрическое сопротивление. Принципиально осуществлять электрошлаковый процесс на низких значениях тока с использованием источников питания с жесткой вольт-амперной характеристикой возможно при выходных напряжениях менее 10 В и при применении шлаков с достаточно высокой электропроводностью. Поэтому, несмотря на возможно более высокие потери при преобразовании электрической энергии в тепловую, для проведения исследований с низкими значениями скорости плавки в условиях ЭШП было предложено использовать источники питания с крутопадающей вольт-амперной характеристикой. При работе на ниспадающей части (ветви) взаимосвязи между напряжением и током, в случае заглубления плавящегося электрода в шлак и увеличении тока за счет уменьшения межэлектродного промежутка, происходит падение напряжения. В итоге выделяемая в шлаке мощность не только не увеличивается, но может даже уменьшаться, что обеспечивает низкое тепловложение в шлак и соответственно низкие скорости плавки.

На первом этапе исследований в качестве неохлаждаемой формы использовали стальную изложницу с внутренним диаметром 110 мм, толщиной стенки 20...25 мм и небольшой (1...2 %) обратной конусностью. Для переплава использовали заготовки из стали марки Ст3 диаметром от 60 до 80 мм. В качестве шлакообразующих использовали флюс АН-348А, применяемый при автоматической дуговой сварке (АДС), а также флюсы АНФ-6 и АН-295, применяемые при ЭШП и электрошлаковой тигельной плавке (ЭШТП).

Из опробованных флюсов для проведения процесса в неохлаждаемой емкости при низких скоростях плавки оказался пригоден только флюс АН-295. При плавках с использованием флюса АН-348А не удалось получить хорошо сформированный слиток. В экспериментах с использованием флюса АНФ-6 шлаковая ванна наводилась легко, но ввиду высокой электропроводности и сравнительно низкой температуры плавления этого шлака при тех электрических режимах процесса, которые необходимы для ЭШП в неохлаждаемой форме, металлический электрод не плавился. Использование смеси флюсов АНФ-6 и АН-295 (1:1, 1:2) также не дало положительного результата. Слитки получали с глубокими пережимами в поверхностном слое или в виде набора несвя-



Рис. 1. Вид торца переплавляемой металлической заготовки
занных между собой кусков металла. И только
использование флюса АН-295 обеспечило форми-
рование переплавляемого металла в виде слитка.
Поэтому в дальнейшем для осуществления про-
цесса ЭШП в неохлаждаемой форме на низких
скоростях плавки использовали флюс АН-295.

При классическом ЭШП плавка электрода происходит путем пленочного плавления металла по всей площади конуса, образовавшегося на погруженном в шлак конце электрода, с последующим достаточно частым отрывом крупной капли металла с вершины этого конуса. В экспериментальных плавках картина плавления была иной. В наиболее подогретых центральных зонах торца электрода первоначально начинает скапливаться жидкий металл, который постепенно растекается по всей площади электрода и затем лавинообразно стекает в месте, где в данное время появилась возможность отрыва. Таких зон падения капель может быть несколько, как это видно на фотографии извлеченного из шлака электрода

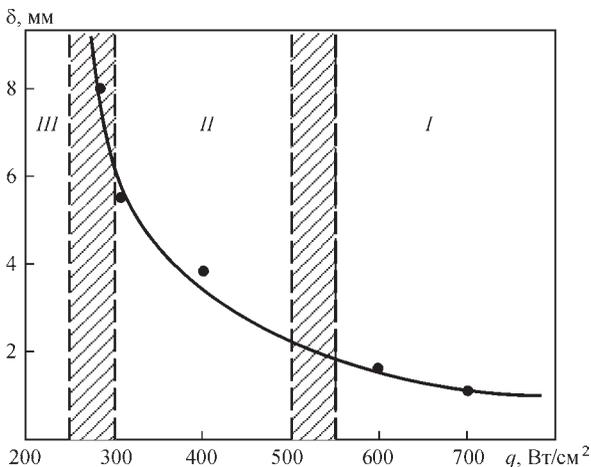


Рис. 2. Влияние плотности энергии (q) на толщину гарнисажа (δ) и качество поверхности слитка: *I* — хорошее; *II* — плохое; *III* — электрод не плавится

(рис. 1). Отмеченный характер плавления электрода способствует рассредоточению поступления плавящегося металла в металлическую ванну и является следствием того, что температура шлака при такой плавке близка к температуре плавления металла (1500...1550 °С).

В процессе плавки наружная поверхность металлического кокиля разогревается до 800...1000 °С, а между внутренней стенкой кокиля и выплавляемым слитком, при исключении чрезмерного перегрева шлака, образуется шлаковый гарнисаж. В случае ведения процесса с тепловложением, при котором образуется гарнисаж толщиной 1,0...1,5 мм, поверхность выплавляемого слитка имеет хорошее качество. Если же плавки проводили при недостаточной мощности, толщина гарнисажа увеличивалась и он был неравномерный по высоте наплавляемого слитка. Это приводило к получению слитков с неудовлетворительным формированием поверхности.

Анализ энергетических показателей плавки в условиях проводившихся экспериментов показал, что при отношении подводимой к шлаку мощности к поперечному сечению электрода (назовем это отношение плотностью энергии (q) порядка 500...550 Вт/см²), выплавляемые слитки имели хорошую поверхность (рис. 2). При меньших значениях q толщина гарнисажа увеличивалась, а качество поверхности ухудшалось, а при q менее 250...300 Вт/см² температура шлака настолько снижалась, что электрод не плавился.

Исходя из приведенных на рис. 2 данных, при диаметре переплавляемого электрода 70 мм достаточно поддерживать подводимую к шлаковой ванне мощность на уровне 19 кВт. Тогда при напряжении на шлаковой ванне 30...35 В необходимо поддерживать ток на уровне 550...630 А. При таком режиме процесса, как показали выполненные эксперименты, производительность плавки составляет около 20 кг/ч. Для сравнения, при классическом ЭШП подобного электрода подводимая к шлаковой ванне мощность обычно составляет порядка 120 кВт, а скорость плавки — около 60 кг/ч. Таким образом, удельный расход электроэнергии при ЭШП в неохлаждаемую форму в два раза меньше по сравнению с ЭШП в водохлаждаемом кристаллизаторе.

Низкие скорости плавки в сочетании с небольшим перегревом металла, имеющие место при ЭШП в неохлаждаемой форме, должны благоприятно отразиться на условиях кристаллизации металла. Исследования качества полученных слитков подтверждают это. Так, из анализа макро-

структуры металла осевого темплета слитка высотой 200 мм видно, что глубина металлической ванны в осевой зоне по всей его высоте поддерживается на уровне 15...17 мм. Для сравнения, при обычном ЭШП аналогичный показатель нередко достигает диаметра слитка. Кристаллическая структура металла такого слитка, за исключением небольшой по высоте донной части, где за счет охлаждающего действия поддона наблюдается направленная снизу вверх кристаллизация, имеет разоориетированное мелкозернистое строение. Причем величина зерна вблизи поверхности и в осевой зоне не сильно отличается и соответствует 7...8 баллу (рис. 3).

Однородность кристаллической структуры, образующаяся при ЭШП в неохлаждаемой форме, предопределяет и химическую однородность металла. Согласно анализу химического состава металла различие в содержании углерода, серы и фосфора по высоте и сечению рассматриваемого слитка и других, выплавленных подобным способом, находится в пределах погрешности анализа.

Результаты проведенных исследований и экспериментов свидетельствуют, что при ЭШП в неохлаждаемый стальной кокиль для достижения положительного результата с точки зрения качества получаемого металла, плавку следует вести с точным контролем температурных условий процесса. Это необходимо, с одной стороны, для достижения низких скоростей плавки при одновременном формировании хорошей поверхности слитка, а с другой, для исключения приваривания слитка к кокилю в случае чрезмерного утонения гарнисажа и даже его отсутствия.

Косвенно о характере условий плавки можно судить по температуре наружной поверхности плавильной емкости (кокиля) и при неизменных других параметрах, главным образом физических свойств шлака, поддерживая заданную температуру поверхности формы можно обеспечивать требуемую температуру шлака и условия формирования гарнисажа и слитка. Поэтому при принципиальной возможности проведения ЭШП в неохлаждаемом стальном кокиле следует учитывать все особенности такой плавки и при необходимости применять дополнительные мероприятия для исключения приваривания слитка к кокилю, например, использовать контролируемое охлаждение кокиля тем или иным способом в зоне шлакового пояса. Также для обеспечения квазистационарных условий плавки, облегчающих отработку технологии и контроль за режима-

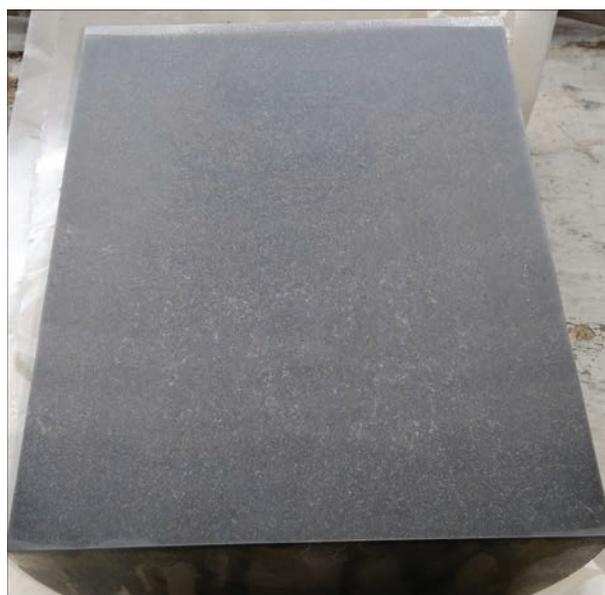


Рис. 3. Макрошлиф продольного осевого темплета слитка ЭШП, выплавленного в неохлаждаемой форме

ми процесса, может быть перспективным способом вытягиванием слитка из формы.

Выводы

1. Показана принципиальная возможность получения слитков ЭШП в неохлаждаемой форме. Установлено, что при такой плавке удельный расход электроэнергии в два раза ниже, чем при ЭШП в водоохлаждаемом кристаллизаторе.

2. Показано, что ЭШП в неохлаждаемой форме, по сравнению с классическим ЭШП, позволяет вести процесс при температуре шлака, близкой к температуре плавления переплавляемого металла, в несколько раз снизить скорость плавки, уменьшить глубину металлической ванны, получить слитки с мелкозернистой структурой и повысить их физическую и химическую однородность.

Список литературы

1. Цыкуленко А.К., Ланцман И.А., Медовар Л.Б. и др. (2000) Двухконтурная схема электрошлакового переплава расходоуемого электрода. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **3**, 16–20.
2. Медовар Л.Б., Цыкуленко А.К., Чернец А.В. и др. (2000) О формировании поверхности слитков из никелевых суперсплавов при ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе. *Там же*, **4**, 7–14.
3. Кусков Ю.М., Скороходов В.Н., Рябцев И.А., Сарычев И.С. (2000) *Электрошлаковая наплавка*. Москва, Наука и технология.
4. Кусков Ю.М., Соловьев В.Г., Лентюгов И.П., Жданов В.А. (2018) Роль шлаковой ванны в процессе наплавки в токоподводящем кристаллизаторе. *Современная электрометаллургия*, **2**, 41–44.
5. Медовар Б.И., Емельяненко Ю.Г., Козлитин Д.А. и др. (1974) Некоторые особенности ЭШП металла в расходоуемых кристаллизаторах. *Рафинирующие переплавы*. Киев, Наукова думка, сс. 96–100.

6. Купер Л., Могендорф В., Хейман Х. (1977) Заплавление центральной зоны слитков с использованием электрошлакового переплава. *Электрошлаковый переплав*. Киев, Наукова думка, **4**, 139–159.

References

1. Tsykulenko, A.K., Lantsman, I.A., Medovar, L.B. et al. (2000) Two-circuit scheme of electroslag remelting of consumable electrode. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 16–20 [in Russian].
 2. Medovar, L.B., Tsykulenko, A.K., Chernets, A.V. et al. (2000) On formation of surface of nickel superalloy ingots during ESR in current-carrying mould. *Ibid.*, **4**, 7–14 [in Russian].

3. Kuskov, Yu.M., Skorokhodov, V.N., Ryabtsev, I.A., Sarychev, I.S. (2000) *Electroslag surfacing*. Moscow, Nauka i Tekhnologiya [in Russian].
 4. Kuskov, Yu.M., Solovjev, V.G., Lentuygov, I.P., Zhdanov, V.A. (2018) Role of slag pool in process of surfacing in current-carrying mould. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 41–44 [in Russian].
 5. Medovar, B.I., Emelyanenko, Yu.G., Kozlitin, D.A. et al. (1974) Some peculiarities of ESR metal in consumable moulds. In: *Refining remelting*. Kiev, Naukova Dumka, 96–100 [in Russian].
 6. Kuper, L., Mogendorf, V., Kheiman, H. (1977) Meltdown of central zone of ingots using electroslag remelting. In: *Electroslag remelting*. Kiev, Naukova Dumka, **4**, 139–159 [in Russian].

ЕШП В НЕОХОЛОДЖУВАНІЙ СТАЛІВІЙ ФОРМІ

Ф.К. Біктагіров, В.О. Шаповалов, О.В. Веретільник, А.П. Ігнатів, О.В. Гнатушенко
 ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.
 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Випробувано процес ЕШП в неохолоджуваній сталевій формі. Визначено енергетичні параметри плавки, при яких температура шлаку підтримується близькою до температури плавлення металу, що переплавляється, а між зливком, який виплавляється, і формою утворюється гарнісаж товщиною 1...2 мм. Виявлено, що в порівнянні з ЕШП в водоохолоджуваному кристалізаторі швидкість плавки зменшується в 4...5 разів, а питома витрата електроенергії в 2 рази. Показано, що за рахунок зниження температури перегріву металу і швидкості плавки створюються сприятливі умови кристалізації з формуванням дрібнозернистої структури металу зливоків, що отримуються таким способом. Бібліогр. 6, рис. 3.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; неохолоджувана форма; режим; температура шлаку; продуктивність; гарнісаж; зливки; структура

ESR IN UNCOOLED STEEL MOULD

F.K. Biktairov, V.A. Shapovalov, A.V. Veretilnik, A.P. Ignatov, A.V. Gnatushenko
 E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The process of ESM in an uncooled steel mould was tried out. Energy parameters of melting were determined, at which the slag temperature is kept close to that of the metal being remelted, and 1...2 mm thick skull forms between the produced ingot and the mould. It is found that compared to ESM in a water-cooled mould, the melting rate decreases 4 to 5 times, while specific energy consumption is reduced 2 times. It is shown that due to lowering of metal overheating temperature and melting speed, favourable conditions are in place for crystallization with formation of fine-grained metal structure of the ingots produced by such a method. Ref. 6, Fig. 3.

Key words: electroslag remelting; uncooled mould; mode; slag temperature; efficiency; skull; ingot; structure

Поступила в редакцію 03.04.2019

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО В УКРАИНЕ В 2019 г.



За первое полугодие текущего года производство чугуна в Украине выросло на 0,4 % по сравнению с аналогичным периодом 2018 г., стали — на 5 %, металлопроката — на 3,2 %. Об этом сообщается на сайте объединения предприятий Металлургпром.

По их данным за январь–июнь 2019 г. в Украине произведено 10,18 млн. т чугуна (на 0,4 % больше, чем за I полугодие 2018 г.), 10,9 млн. т стали (на 5, 0 % больше), 9,39 млн. т металлопроката (на 3,2 % больше).

<https://t.me/korrespondentnet>