



УДК 621.74

Поступила 14.01.2015

ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЕ ЛИТЬЕ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ХРОМА

ELECTROSLAG CASTING OF CHROMIUM BASED ALLOYS

ДЖОН-ХУН ЛИ, Корейский институт материаловедения, Е. И. МАРУКОВИЧ, КИ-ЙОНГ ЧОЙ, А. М. БРАНОВИЦКИЙ, И. О. САЗОНЕНКО, Ю. В. МАКСИМОВИЧ, ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», г. Могилев, Беларусь

DZHON-HUN LI (KIMS), KOREA Institute of materials science, E. MARUKOVICH, KI-JONG CHOJ, A. BRANOVICKIJ, I. SAZONENKO, Ja. MAKSIMOVICH, SSI «Institute of Technology of Metals of NAS of Belarus», Mogilev, Belarus

Проведен анализ схем процесса электрошлакового переплава. Для получения жаропрочного материала на основе хрома выбрана схема тигельного электрошлакового переплава с неплавящимися бифилярными электродами. Разработана и изготовлена лабораторная установка для изучения процессов электрошлакового тигельного переплава сплавов на основе хрома. Получены образцы из сплава на основе хрома.

The analysis of the electroslag remelting (ESR) process schemes was carried out. For heat-resistant material on the basis of chromium chosen scheme crucible ESR with nonconsumable bifilar electrodes. Developed and manufactured laboratory plant for studying the processes of electroslag remelting crucible chromium-based alloys. Samples from chromium based alloy were obtained.

Ключевые слова. Электрошлаковое литье, кокиль, сплавы на основе хрома, жаропрочность.

Keywords. Electroslag casting, chill mould, chromium-based alloys, heat-resistance.

Цель данных исследований – получение сплавов для работы в условиях циклического нагружения при высоких температурах (до 1300°C), характерных для работы толкателей печи для нагрева стальных слитков. Заготовки должны иметь стабильную микроструктуру, высокую температуру плавления, жаропрочность и обладать исключительным сопротивлением окислению. Перспективным материалом для такого рода заготовок являются сплавы на основе хрома.

Электрошлаковый переплав – электрометаллургический процесс, при котором металл переплавляется в ванне электропроводного синтетического шлака под действием тепла, выделяющегося в шлаке при прохождении через него электрического тока. Электрошлаковый переплав позволяет производить высококачественный материал за счет химической очистки (рафинирования) и управляемой кристаллизации. Процесс характеризуется простотой оборудования, высокой экономической эффективностью [1]. При этом качество получаемого металла практически равноценно вакуумно-дуговому переплаву, а по характеру измельчения структуры, диспергирования неметаллических включений и структурных составляющих во многих случаях превосходит его.

ЭШП имеет следующие преимущества перед другими способами получения стали [2]:

- хорошее качество слитка, отсутствие усадочной раковины и пористости;
- меньшее количество и меньший размер включений;
- однородность структуры и химического состава;
- отсутствие слоистости и зональной ликвации;
- высокий выход годного металла;
- возможность регулируемого снижения содержания таких нежелательных элементов, как сера, кислород, а в некоторых условиях и азот;

- возможность сохранения легирующих элементов, которые могут быть окислены, таких, как кремний и титан;
- возможность корректирования состава металла путем применения соответствующего флюса;
- общее улучшение характеристик пластичности и ударной вязкости;
- улучшение свойств при высоких температурах;
- улучшение свариваемости;
- обеспечение качества поверхности, которое исключает необходимость в зачистке при горячей обработке;
- возможность управления направлением и скоростью затвердевания;
- возможность регулирования величины зерен и карбидов, особенно в быстрорежущих и инструментальных сталях;
- улучшение коррозионной стойкости;
- расплавленный металл защищен от атмосферного окисления.

Наибольшее распространение получил процесс электрошлакового переплава металла в кристаллизатор (рис. 1). Расплавленный шлак является эффективным рафинирующим средством [3]: в результате электрошлаковой обработки металла он очищается от серы, кислорода, неметаллических включений. Кроме того, шлак – это источник образования тонкой шлаковой прослойки – шлакового гарнисажа между внутренней поверхностью кристаллизатора и наружной поверхностью слитка. Этот гарнисаж обеспечивает гладкую поверхность слитка, позволяющую в последующем осуществлять горячий передел электрошлаковых слитков без всякой зачистки поверхности. Данная схема дает возможность получать качественные отливки в основном круглого и прямоугольного сечений. Обычно высота отливки равняется нескольким диаметрам или нескольким десяткам диаметров отливки. По схеме электрошлакового переплава в водоохлаждаемый кристаллизатор нецелесообразно отливать плоские детали, у которых высота значительно меньше остальных размеров. Другим фактором, сдерживающим широкое применение электрошлакового переплава, является проблема расходуемых электродов. Существующая практика электрошлакового переплава отслуживших свой срок штампов и другой оснастки предполагает предварительную их проковку либо использование сортового проката для получения расходуемых электродов. Вызвано это, в первую очередь, тем, что при электрошлаковом переплаве в водоохлаждаемый кристаллизатор необходимо обеспечить равномерное сечение расходуемого электрода по всей его длине с коэффициентом заполнения кристаллизатора, обычно не превышающим 0,6. Вследствие этих причин экономически целесообразно использовать электрошлаковый переплав в водоохлаждаемый кристаллизатор для получения отливок свыше 200 кг, где они успешно могут конкурировать с аналогичными поковками.

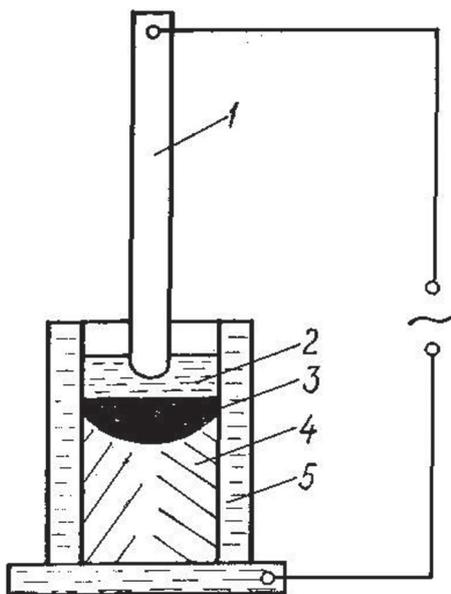


Рис. 1. Схема проведения электрошлакового переплава в кристаллизатор: 1 – расходуемый электрод; 2 – шлаковая ванна; 3 – расплавленный металл; 4 – отливка; 5 – кристаллизатор

Более приемлемой схемой проведения электрошлакового переплава для получения фасонных отливок от 20 до 200 кг является электрошлаковая плавка в футерованный тигель [4].

Существенным отличием электрошлаковой тигельной плавки от плавки в кристаллизатор является накопление жидкого металла в объеме тигля в течение всего процесса плавления расходуемого электрода и последующего совместного слива шлака и металла в кокиль. При электрошлаковом тигельном переплаве отпадает необходимость в строгом контроле постоянства электрических параметров процесса в течение всего времени плавки. Достаточным условием является поддержание электрических параметров процесса на уровне, при котором общее количество тепла, выделившегося в шлаковой ванне, достаточно для плавления расходуемого электрода и поддержания металла в жидком состоянии. Сохраняя все преимущества рафинирующего взаимодействия жидкого металла и шлака, характерные для электрошлакового переплава в кристаллизатор, тигельный переплав после накопления жидкого металла позволяет отливать в кокиль различного рода фасонные детали.

Существуют две разновидности проведения процесса электрошлакового тигельного переплава: с помощью расходуемых электродов (рис. 2, а) и не расходуемых электродов (рис. 2, б).

При электрошлаковом переплаве расходуемых электродов основной химический состав металла в результате переплава изменений не претерпевает, удаляются лишь некоторые вредные примеси и неметаллические включения, наблюдается окисление некоторых элементов.

При получении сплавов с заданным химическим составом не обойтись без корректировки химического состава ванны жидкого металла, раскисления и ввода в расплав микролегирующих элементов и модификаторов.

Преимущества способа электрошлакового тигельного переплава с не расходуемыми электродами с использованием кусковой шихты заключаются в том, что он позволяет в широких пределах изменять подводимую к шлаковой ванне мощность, температуру, количество и состав шлака, состав получаемого сплава [5]. Благодаря большой температуре шлака и высокой удельной поверхности кусковой шихты металл плавится очень быстро, практически за время прохождения его через шлак. При этом одновременно создаются благоприятные условия для его рафинирования, уменьшения окисления и восстановления оксидов. Все это обеспечивает глубокую степень очистки при высокой производительности. Существенным недостатком данной схемы тигельного переплава является наличие подового электрода, обычно изготовленного из металла того же химического состава что и получаемый жидкий металл.

Использование схемы бифилярного подвода тока к неплавящимся электродам [3] обеспечивает возможность обходиться при электрошлаковой тигельной плавке без применения подового электрода (рис. 3).

Отсутствие подового электрода позволяет получать данным способом сплавы, изготовление из которых подового электрода затруднительно, или в общем случае невозможно. Также при данной схеме возможно получение в одном тигле сплавов различного химического состава без боязни загрязнения его материалом подового электрода другого состава.

Исторически сложилось, что промышленное освоение ЭШП началось на печах с твердым стартом [3]. Наведение шлаковой ванны в кристаллизаторе в этом случае осуществляется непосредственно расходуемым электродом одновременно с процессом формирования слитка. Выделяемого в этот момент тепла недостаточно для перегрева шлака и формирования качественного слитка. Поэтому донная часть таких слитков получается ступенчатой с пережимами, а в металле обнаруживаются нерасплавленные частицы шлака. Наличие дуговых разрядов при наведении шлаковой ванны вызывает повышенное окисление легирующих элементов переплавляемого металла. Этими причинами обусловлены высокие (8–15%) нормы обрезки донной части при переделе электрошлаковых слитков, полученных по такой технологии.

В начальный период плавки процесс ведется в дуговом режиме, поэтому, кроме указанных недостатков, имеется еще опасность прожига затравки и поддона [6]. Чтобы избежать этого, требуется высокая квалификация оператора. Для ликвидации указанных недостатков был разработан способ ЭШП на жидком старте, т. е. с использованием заранее приготовленного жидкого шлака.

Применение жидкого старта позволило упростить технологию электрошлакового переплава и одновременно повысить качество выплавляемого металла, увеличить выход годного, сократить время плавки, а также резко повысить культуру производства. Кроме того, для процессов, в которых используется бифилярное подключение плавящихся электродов к источнику питания, организация «сухого» старта представляется технически невозможной.

Применяются два метода приготовления жидкого шлака: непосредственно в кристаллизаторе; в флюсоплавильных печах с использованием в качестве накопительной емкости для расплавленного флюса различного рода ковшей и тиглей. Наибольшее

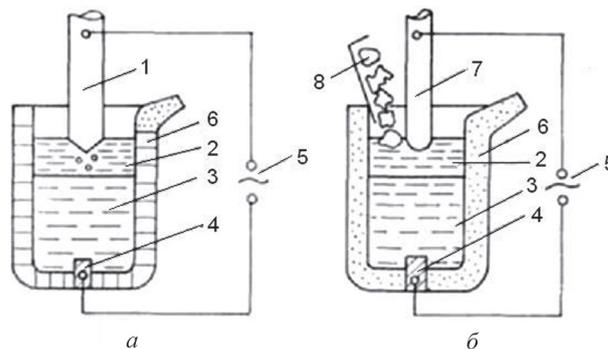


Рис. 2. Схема проведения процесса электрошлакового тигельного переплава: а – с расходуемым электродом; б – с не расходуемым электродом: 1 – расходуемый электрод; 2 – жидкий шлак; 3 – жидкий металл; 4 – подовый электрод; 5 – источник питания; 6 – тигель; 7 – не расходуемый электрод; 8 – кусковая шихта

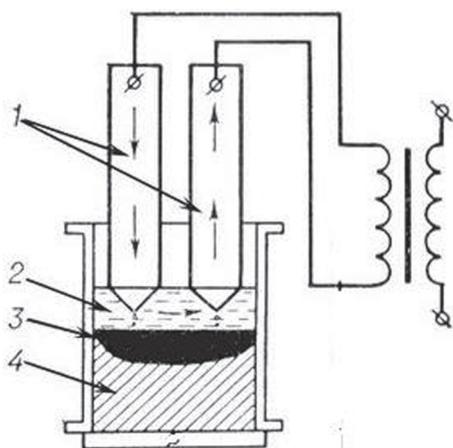


Рис. 3. Схема бифилярного подвода электрического тока к электродам

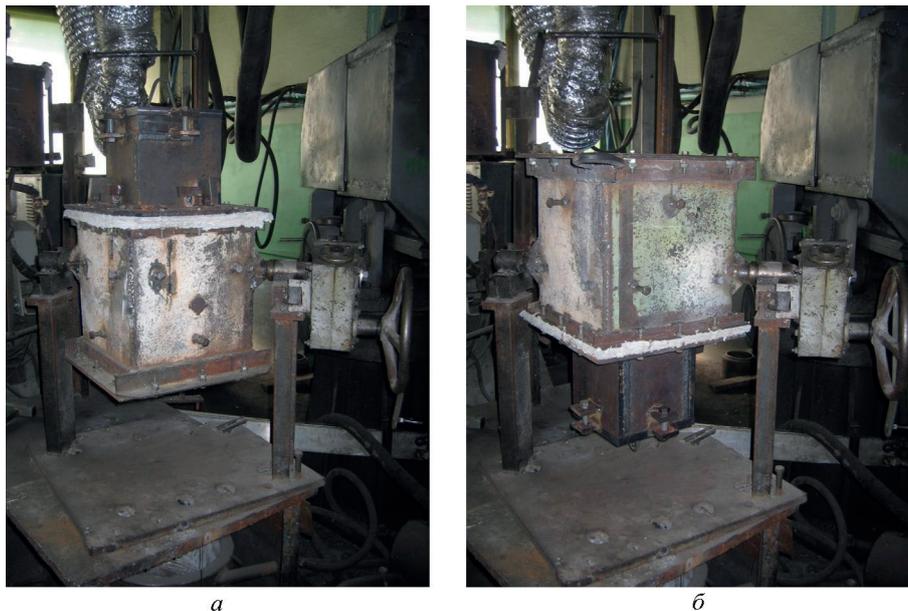


Рис. 4. Тигель-кантователь и кокиль для совместной заливки шлакометаллического расплава: *а* – кокиль, закрепленный на тигле перед заливкой; *б* – кокиль и тигель в положении заливки

распространение в технике получил второй способ приготовления жидкого шлака отдельно от кристаллизатора [6, 7].

В ИТМ НАН Беларуси создана лабораторная установка для исследования процесса электрошлакового переплава сплавов на основе хрома. Установка состоит из механизма подачи и корректировки электрода, источника питания, тигля-кантователя, бифилярных неплавящихся электродов и флюсоплавильной печи для жидкого старта. Подающий механизм оснащен асинхронным двигателем и устройством векторного управления скоростью вращения. Выбор бифилярной схемы подвода электрической энергии к электродам обусловлен сложностью изготовления расходуемых электродов требуемого химического состава из сплавов на основе хрома.

Изготовлена технологическая оснастка для получения цилиндрических отливок при совместной заливке шлакометаллического расплава, состоящая из тигля-кантователя и неохлаждаемого кокиля.

Тигель-кантователь предназначен для накопления, удержания и последующего слива шлака или шлакометаллического расплава. На рис. 4 показан экспериментальный образец тигля-кантователя. Неохлаждаемый тигель представляет собой стальной сварной кожух, футерованный изнутри магнезитовым изделием № 2. По боковым сторонам кожуха предусмотрены стяжные болты, фиксирующие кладку от смещения в процессе работы. Зазоры между кожухом и кладкой заполнялись магнезитовым порошком зернистостью 50–600 мкм. К днищу стального корпуса приварена штанга, на которой устанавливается противовес. Противовес предназначен для обеспечения плавного поворота тигля вокруг горизонтальной оси. Механизм поворота представляет собой червячный редуктор с передаточным отношением 40. Вы-



Рис. 5. Кокиль для получения цилиндрических отливок при совместной заливке шлакометаллического расплава

ходной вал редуктора механически соединен с осью сварного тигля. Входной вал редуктора снабжен рукоятью для осуществления ручного поворота тигля.

Кокиль представляет собой сварную конструкцию из стали Ст20 со съемным дном (рис. 5) и позволяет получать отливки диаметром 30 мм и высотой 50 мм. В кокиле имеется специальная полость для удаления излишков расплава сплава и флюса. Тигель-кантователь и кокиль имеют специальные пазы для крепления кокиля на тигле с помощью клиньев. После расплавления сплава кокиль крепится на тигле (см. рис. 4, а) и осуществляется поворот тигля-кантователя в положение заливки на 180° (см. рис. 4, б).

На рис. 6 показан бифилярный электрододержатель для подвода электрической мощности к шлаковому расплаву по цепи электрод – электрод. Он состоит из следующих основных частей: двух водоохлаждаемых электродов 1, поворотного узла 3, токоподводов 4 и штанги 2. Водоохлаждаемые электроды 1 представляют собой паяно-сварную биметаллическую конструкцию. Электроды изготовлены из стальных труб, к нижней части которых припаяны медные наконечники, а верхняя часть приварена к кронштейну и имеет систему подвода и отвода охлаждающей воды.

Поворотный узел 3 представляет собой несущую пластину с диэлектрической втулкой, к которой снизу и сверху крепятся кронштейны водоохлаждаемых электродов. Штанга 2 изготовлена из отрезка круглого стального проката диаметром 60 мм. К нижней части штанги приварена несущая пластина поворотного узла, а к верхней – инвентарная головка для крепления штанги в электрододержателе электрошлаковой установки. Токоподводы 4 представляют собой гибкие медные шины с наконечниками.

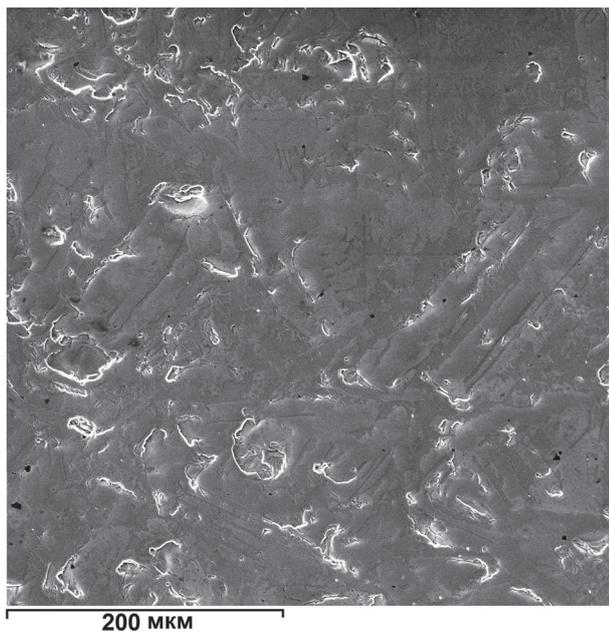


Рис. 8. Микроструктура образцов, полученных методом ЭШП из сплава на основе хрома



Рис. 6. Бифилярный электрододержатель: 1 – водоохлаждаемые электроды; 2 – штанга; 3 – поворотный узел; 4 – токоподводы



Рис. 7. Образцы из сплава на основе хрома

Использовали электроды диаметром 40 мм, расстояние между электродами составляло 85 мм. Для проведения плавки использовали шлак АМ-295, в качестве шихты применяли 80% феррохрома, хром и силикокальций.

Были получены образцы (рис. 7) следующего состава: С – 7,78%; Si – 0,82; Мо – 2,26; Cr – 69,78; Fe – 19,36%. На рис. 8 показана микроструктура полученных образцов.

Таким образом, проведен анализ схем процесса электрошлакового переплава. Для получения жаропрочного материала на основе хрома выбрана схема тигельного электрошлакового переплава с неплавящимися бифилярными электродами. Разработана и изготовлена лабораторная установка для изучения процессов электрошлакового тигельного переплава сплавов на основе хрома. Получены образцы из сплава на основе хрома.

Литература

1. Медовар Б. И., Ступак Л. М., Бойко Г. А. и др. Электрошлаковый металл. Киев: Наукова думка, 1981. 680 с.
2. Дакуорт У. Э., Хойл Дж. Электрошлаковый переплав / Пер. с англ. М.: Metallurgia, 1973. 192 с.
3. Медовар Б. И., Ступак Л. М., Бойко Г. А. и др. Электрошлаковые печи. Киев: Наукова думка, 1976. 414 с.
4. Медовар Б. И., Шевцов В. Л., Мартын В. М. и др. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла. Киев: Наукова думка, 1988. 216 с.
5. Латаш Ю. В., Яковенко В. А., Лютый И. Ю. ЭШР марганца. Электрошлаковая технология / Под ред. Б. Е. Патона и др. Киев: Наукова думка, 1988. С. 62–66.
6. Переборщиков С. И., Хабаров А. Н., Калужный Г. В. Особенности изготовления полых заготовок электрошлаковым литьем // Литейное производство. 1999. № 4. С. 16–18.
7. Цыгуров Л. З., Галков А. Г., Офицеров Е. М., Кузнецов В. Н. и др. ЭШЛ в ПО «Чебоксарский завод промышленных тракторов». Электрошлаковая технология / Под ред. Б. Е. Патона и др. Киев: Наукова думка, 1988. С. 87–90.

References

1. Medovar B. I., Stupak L. M., Boyko G. A. i dr. *Jeletroshlakovyj metall* [Electroslag metal]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981. 680 p.
2. Duckworth W. E., Hoyle G. Electroslag refining. Chapman & Hall, 1969. 178 p. (Russ. ed.: Parcevskij A. B. *Jeletroshlakovyj pereplav*. Moscow, Metallurgija Publ., 1973. 192 p.).
3. Medovar B. I., Stupak L. M., Boyko G. A. i dr. *Jeletroshlakovyje pechi* [Electroslag furnace]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1976. 414 p.
4. Medovar B. I., Shevcov V. L., Martyn V. M. i dr. *Jeletroshlakovaja tigel'naja plavka i razlivka metalla* [Electroslag crucible melting and casting metal]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 216 p.
5. Latash Ju. V., Jakovenko V. A., Ljutyj I. Ju. *JeShR marganca. Jeletroshlakovaja tehnologija* [Electroslag technology] / Pod red. B.E. Patona i dr. Kiev: Naukova dumka Publ., 1988. pp. 62–66.
6. Pereborshhikov S. I., Habarov A. N., Kaljuzhnyj G. V. *Osobennosti izgotovlenija polyh zagotovok jeletroshlakovym lit'em* [Features of manufacturing hollow billets electroslag casting]. Litejnoe proizvodstvo, 1999, no. 4. pp. 16–18.
7. Cygurov L. Z., Galkov A. G., Oficerov E. M., Kuznecov V. N. i dr. *JeShL v PO «Cheboksarskij zavod promyshlennyh traktorov»*. *Jeletroshlakovaja tehnologija* [Electroslag technology] / Pod red. B.E. Patona i dr. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. pp. 87–90.

Сведения об авторах

Джон-Хун Ли, Корейский институт материаловедения, 797 Changwondaero, Seongsangu, Changwon, Gyeongnam, 642–831, Korea.

Марукович Евгений Игнатьевич, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», г. Могилев, ул. Бялыницкого-Бирули, 11, e-mail: info@itm.by.

Information about the authors

Jong-Hoon Lee (KIMS) Korea institute of materials science, 797 Changwondaero, Seongsangu, Changwon, Gyeongnam, 642–831, Korea.

Marukovich Eugene, Academician of NAS of Belarus, Dr. of Technical Sciences, Professor, SSI «Institute of technology of metals of NAS of Belarus», Bialynitskogo-Biruli, 11, Mogilev, Belarus, e-mail: info@itm.by.