



УДК 669.187.56.002.2

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ ЭШП В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

И. В. Протокилов, В. Б. Порохонько

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Разработана физическая модель для исследования особенностей плавления расходуемого электрода при электрошлаковом переплаве в условиях действия внешнего магнитного поля. Модель представляет собой оптически прозрачную цилиндрическую емкость, заполненную электролитом на основе раствора $ZnCl_2$, имитирующим шлаковую ванну, в который погружен электрод из сплава Вуда. Плавление электрода происходит за счет тепла, выделяющегося в электролите при пропускании электрического тока. Внешнее магнитное поле создается системой из двух соленоидов, охватывающих емкость и электрод. Для исследования особенностей плавления электрода используется метод видеосъемки с частотой записи 240 кадров в секунду. Установлено, что наложение внешнего продольного магнитного поля индукцией 0,2 Тл способствует увеличению скорости плавления электрода на 8...12 %. При этом частота отрыва капель электродного металла увеличивается на 18...22 %, а средняя масса капли снижается на 8...10 %. Указанные эффекты достигаются благодаря интенсификации гидродинамических течений возле оплавленной поверхности электрода и активизации процессов теплообмена на границе двух фаз. Вызванное наложением продольного поля горизонтальное вращение расплава также способствует рассредоточению места падения капель на дно емкости. Библиогр. 13, табл. 1, ил. 3.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; магнитное поле; физическое моделирование; расходуемый электрод; плавление; электродная капля; гидродинамика

Электрошлаковый переплав (ЭШП) характеризуется капельным переносом переплавляемого материала в металлическую ванну. Размер и форма капля, частота их отрыва и траектории движения в шлаковой ванне определяют площадь поверхности и время реагирования металла с рафинирующей средой, и тем самым — степень удаления примесей из переплавляемых металлов и сплавов. От особенностей процесса плавления расходуемого электрода, особенно в случае использования электродов, спресованных из разнородной некомпактной шихты, зависит химическая однородность выплавляемых слитков.

Значительная часть тепла, поступающего в металлическую ванну, передается с каплями электродного металла. Поэтому место очагов образования капель на торце расходуемого электрода существенно влияет на форму металлической ванны и условия кристаллизации слитка.

Таким образом, особенности плавления расходуемого электрода и капельного переноса металла при ЭШП оказывают непосредственное влияние на качество выплавляемых слитков.

Исследованию закономерностей капельного переноса при ЭШП посвящены работы [1–7]. Установлено влияние основных технологических параметров процесса (тока, напряжения, скорости плавления, рода и полярности тока, диаметра электрода и др.) на размер и время образования капель. Изучено влияние на капельный перенос механических воздействий и ультразвуковых колебаний [8, 9].

В работах [10–11] показано положительное влияние внешних электромагнитных воздействий на структуру и свойства выплавляемых электрошлаковых слитков. Отмечается, что механизм воздействия магнитных полей заключается в создании в жидкометаллической ванне под действием объемных электромагнитных сил электровихревых течений и вибраций расплава, которые способствуют



ют гомогенизации и измельчению структуры литого металла.

Очевидно, что изменение гидродинамической обстановки в шлаковой ванне под действием внешнего магнитного поля влияет на особенности плавления расходуемого электрода и капельный перенос металла. Поэтому исследование данных процессов представляет научный и практический интерес.

Высокие материало- и энергоемкость ЭШП в сочетании с высокими температурами и химической агрессивностью шлаковой и металлической ванн осложняют натурные исследования процессов плавления расходуемого электрода и каплеобразования. Поэтому естественным представляется путь физического моделирования этих процессов на «холодных» моделях.

Цель данной работы заключалась в разработке физической модели плавления расходуемого электрода при ЭШП в условиях воздействия внешнего магнитного поля и изучении влияния продольного магнитного поля на плавление и каплеобразование электродного металла.

При разработке физической модели необходимо прежде всего обеспечить идентичность физической природы натурального процесса и модели. При ЭШП — это плавление расходуемого электрода под действием джоулева тепла, выделяющегося в жидкой среде при прохождении в ней электрического тока. Также необходимо обеспечить геометрическое подобие натурального и модельного объектов и привести в соответствие критерии подобия, характеризующие основные процессы при реальном ЭШП и в модели [1, 10, 12]. При соблюдении этих условий результатом физического моделирования могут быть как качественные, так и количественные данные о натурном процессе.

Анализ возможности физического моделирования ЭШП показывает, что нельзя добиться соответственного равенства всех чисел подобия модели и натурального процесса (числа Эйлера Eu , Грасгофа G_r , параметра электровихревого течения S и др.) [10, 13]. Тем не менее, физические модели позволяют оценить качественные характеристики процесса и в ряде случаев полученные экспериментальные данные можно экстраполировать до значения натуральных параметров.

В качестве рабочих жидкостей для моделирования движения расплавов шлаковой и металлической ванн используют ртуть, галлий, легкоплавкую эвтектику $67Ga-20,5In-12,5Sn$ и др., которые наиболее близко удовлетворяют критериям подобия [10, 12]. Однако для исследования процессов каплеобразования важно, чтобы модельная жидкость была оптически прозрачной.

Существующие модели плавления расходуемого электрода при ЭШП основаны преимущественно на использовании электрода, изготовленного из сплава Вуда, который плавится в электролите на основе солевого раствора [1–4].

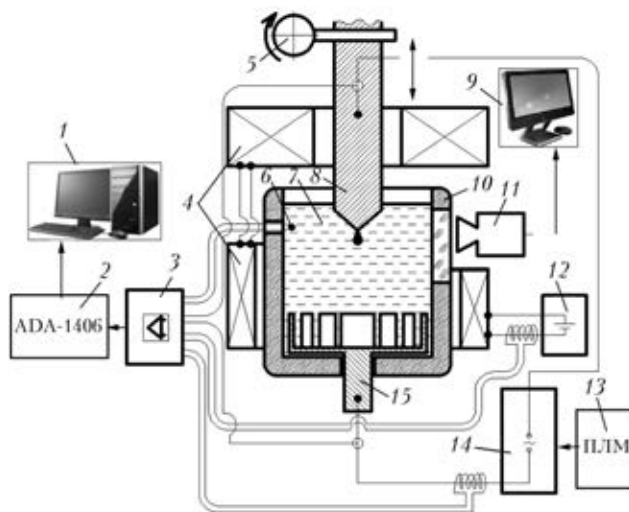


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для моделирования плавления расходуемого электрода при ЭШП: 1 — компьютер; 2 — аналого-цифровой преобразователь; 3 — преобразователь с гальванической изоляцией; 4 — электромагнитная система; 5 — механизм подачи электрода; 6 — термопара; 7 — электрод; 8 — электрод; 9 — монитор; 10 — емкость из оптически прозрачного материала; 11 — видеокамера; 12 — источник питания электромагнитной системы; 13 — программируемый логический модуль; 14 — источник питания модели; 15 — донный токоподвод

Для выбора состава электролита исследовали насыщенные водные растворы $CaCl_2$, $NaCl$, $ZnCl_2$, $NaOH$, которые нагревали путем пропускания переменного электрического тока при помощи погруженных в них электродов. Оценивали электрические параметры процесса, температуру раствора и визуальное состояние жидкости.

Эксперименты показали, что для моделирования процесса плавления электрода при ЭШП больше подходит насыщенный раствор $ZnCl_2$, который имеет высокую температуру кипения (около $130^\circ C$) и длительное время сохраняет оптическую прозрачность.

Разработанная физическая модель плавления расходуемого электрода при ЭШП представляет собой цилиндрическую емкость, выполненную из прозрачного материала, на дне которой расположен чашеобразный токоподвод из листового титана (рис. 1). Емкость заполняется электролитом на основе водного раствора $ZnCl_2$, имитирующим расплав шлаковой ванны. Электродом служит стержень диаметром 32 мм из сплава Вуда ($12,5Sn-25Pb-50Bi-12,5Cd$, $T_{пл} = 68,5^\circ C$), который погружается в раствор по центру ванны.

Вертикальное перемещение электрода осуществляется электроприводом, позволяющим плавно изменять скорость подачи и регулировать глубину погружения электрода в раствор $ZnCl_2$. Температура раствора контролируется с помощью термопары хромель–алюмель (ТХА).

Электропитание модели осуществляется с использованием лабораторного трансформатора с рабочим током до 40 А. Внешнее магнитное поле создается системой из двух последовательно соединенных соленоидов, которые питаются от источника постоянного тока (до 200 А). Данная система поз-

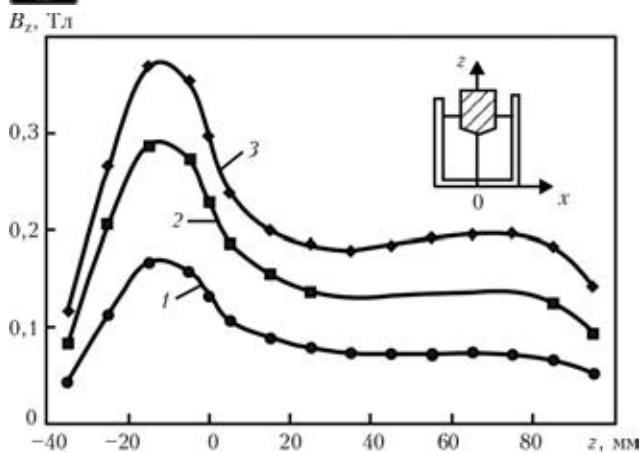


Рис. 2. Распределение индукции внешнего магнитного поля по оси модельной емкости ($x = 0$) при разных значениях тока в обмотке соленоида, А: 1 – 100; 2 – 150; 3 – 200

воляет создавать в рабочей зоне ($z = 20...70$ мм) однородное магнитное поле индукцией до 0,2 Тл (рис. 2).

Плавление электрода из сплава Вуда происходит за счет джоулева тепла, выделяющегося в растворе $ZnCl_2$ при прохождении в нем электрического тока, т. е. аналогично процессу ЭШП. Размеры модели подобраны с учетом критерия геометрического подобия. Форма донного токоподвода обеспечивает наличие в жидкой ванне осевой и радиальной составляющих электрического тока и тем самым наиболее адекватно воспроизводит его распределение в расплаве.

Для исследования особенностей плавления расходуемого электрода, образования на его торце капель металла и их отрыва использовали методы видеонаблюдения с частотой записи 240 кадров в секунду и осциллографирования. Основные параметры процесса регистрировали с помощью преобразователя с гальванической изоляцией, аналого-цифрового преобразователя и компьютерной техники с программными продуктами LabView и PowerGraph.

При помощи созданной модели исследовали характер каплеобразования в условиях отсутствия и действия внешнего магнитного поля индукцией 0,2 Тл. В процессе экспериментов поддерживали на заданном постоянном уровне ток в модели (12 А) и глубину погружения электрода в электролит (10 мм). Начальная температура электролита составляла 60 °С. Под действием проходящего электрического тока электролит нагревался до 125...128 °С, затем температура стабилизировалась и устанавливался квазистационарный процесс плавления электрода.

На рис. 3 приведены основные фазы развития капли при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля.

Результаты экспериментов показали, что внешнее магнитное поле изменяет структуру течений электролита, что в свою очередь влияет на особенности плавления электрода. При отсутствии внешнего магнитного поля жидкость в ванне движется преимущественно в вертикальной плоскости (вниз

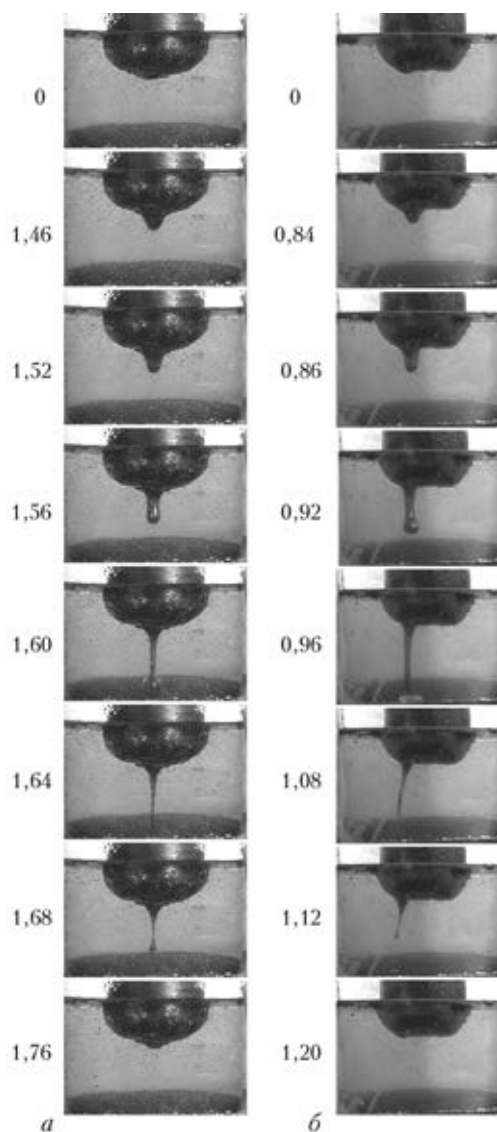


Рис. 3. Динамика процесса каплеобразования: а – без внешнего магнитного поля; б – с наложением внешнего поля индукцией 0,2 Тл (цифрами указано время от начала формирования капли, с)

по оси ванны и вверх у стенок емкости). Максимальная скорость этих течений составляет $v_{max} \approx 20$ мм/с. При наложении внешнего продольного поля к этому движению добавляется горизонтальное вращение вокруг оси ванны, в результате чего образуются объемные течения раствора, интенсивность которых значительно выше ($v_{max} \approx 80$ мм/с), чем при отсутствии поля.

Следует отметить, что взаимодействие переменного тока в электролите с внешним постоянным магнитным полем создает вибрацию модельной жидкости с частотой 50 Гц. Появление горизонтальной закрутки жидкости, вероятно, связано с нарушением строгой осевой симметрии процесса (за счет смещения электрода от оси ванны и действия магнитного поля от горизонтальных участков токоподводов) и частичным выпрямлением рабочего тока вследствие электролитических процессов.

При отсутствии внешнего магнитного поля зарождение капли происходит преимущественно у вер-



Данные капельного переноса, полученные при физическом моделировании и натурном эксперименте*

Характеристики	Моделирование		Натурный эксперимент	
	без внешнего магнитного поля	с полем	без внешнего магнитного поля	с полем
Частота отрыва капель, Гц	0,62	0,75	2,64	4,45
Масса капли, г	1,40	1,28	1,53	0,96
Диаметр капли, мм	6,50	6,30	8,60	7,40
Скорость плавления, г/с	0,87	0,96	4,04	4,27

*Приведены средние значения.

шины конуса оплавления по оси электрода. По мере роста капли между ней и электродом образуется перемычка, которая постепенно вытягивается и затем разрушается в нижней части. Часть металла, образующего перемычку, задерживается на электроде и вновь растягивается на оплавляемой поверхности за счет сил поверхностного натяжения. В большинстве случаев в момент разрушения перемычки образуется одна или несколько дополнительных малых капель диаметром менее 1 мм. В жидкости капли движутся преимущественно вертикально вниз по оси ванны. Средняя частота отрыва капель составляет 0,62 Гц при средних значениях массы 1,4 г и диаметра 6,5 мм (таблица).

В случае наложения внешнего магнитного поля зарождение капли также происходит преимущественно по оси электрода. Однако по мере роста капли под действием горизонтального вращения электролита она постепенно начинает перемещаться по оплавляемой поверхности электрода и смещаться от его оси. В результате отрыв капель происходит в разных участках на торце электрода и место их падения на дно емкости становится более рассредоточенным. После отрыва капли перемычка, оставшаяся на электроде, закручивается за счет вращения жидкости и затем разрушается с образованием дополнительных малых капель, количество которых обычно больше, чем в случае отсутствия внешнего поля. Частота отрыва капель в экспериментах с наложением внешнего магнитного поля индукцией 0,2 Тл составила в среднем 0,75 Гц при их массе 1,28 г (таблица).

Таким образом, использование магнитного поля привело к увеличению на 18...22 % частоты отрыва капель электродного металла при уменьшении их средней массы на 8...10 %. При этом скорость плавления электрода повысилась на 8...12 %.

Увеличение частоты отрыва капель металла, очевидно, связано с увеличением силы вязкого трения, действующей на каплю в результате движения модельной жидкости. При этом интенсификация гидродинамических течений возле оплавляемой поверхности электрода также способствует активизации процессов теплообмена на границе двух фаз, что приводит к увеличению скорости плавления электрода.

Необходимо отметить, что при ЭШП плотность тока в ванне значительно превосходит используемую при моделировании. В натурном процессе перегрев электродного металла (разница между температурой шлака и температурой плавления металла) также значительно выше и соответственно более высокая скорость плавки. Поэтому в реальном процессе эффекты от воздействия магнитного поля могут проявляться в большей степени.

Для оценки адекватности результатов моделирования проводили их сравнение с результатами натурных экспериментов. Капельный перенос в условиях реального ЭШП изучали с помощью метода осциллографирования, основанном на изменении тока плавки при образовании и отрыве капли [6]. Исследования проводили при выплавке слитков диаметром 65 мм с использованием электродов из технического титана диаметром 35 мм. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Полученные данные показывают, что частота отрыва капель (2,64...4,45 Гц) и скорость плавления металла (4,04...4,27 г/с) в натурном процессе существенно выше значений, полученных при моделировании (соответственно 0,62...0,75 Гц и 0,87...0,96 г/с). Однако тенденции увеличения частоты отрыва капель электродного металла, снижения их массы и повышения скорости плавления при наложении внешнего магнитного поля, полученные на модели, сохранились и при натурных экспериментах.

Это свидетельствует об адекватности разработанной физической модели и правомерности качественной оценки влияния внешнего магнитного поля на капельный перенос металла при ЭШП. При визуальном наблюдении за процессом выясняется, что физическое моделирование позволяет получать дополнительную информацию о месте и особенностях формирования капли на торце электрода, особенностях разрушения перемычки при отрыве капли, траекториях перемещения капель в жидкости и других параметрах, которые сложно получить путем натурных экспериментов. Эти данные позволят оптимизировать режимы электромагнитного воздействия на электрошлаковый процесс с целью повышения его эффективности и качества выплавляемого металла.



В последующих работах планируется исследовать влияние импульсных магнитных полей, их частотных и амплитудных характеристик и рода тока на капельный перенос металла.

Выводы

1. Разработана физическая модель для исследования процессов плавления расходоуемого электрода при ЭШП в условиях действия внешнего магнитного поля.

2. Показано, что внешнее магнитное поле изменяет структуру гидродинамических течений модельной жидкости, что в свою очередь влияет на особенности плавления электрода. Наложение магнитного поля приводит к рассредоточению мест отрыва капель на торце электрода и мест их падения на дно емкости.

3. Использование продольного магнитного поля индукцией 0,2 Тл привело к увеличению на 18...22 % частоты отрыва капель электродного металла, уменьшению на 8...10 % их массы при повышении на 8...12 % скорости плавления электрода.

1. Медовар Б. И., Бойко Г. А., Сердюкова В. П. Физическое моделирование процесса ЭШП расходоуемых электродов // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1978. — № 9. — С. 38–48.
2. Исследование модели плавления расходоуемого электрода при ЭШП / Ю. Кожима, М. Като, Т. Тойода, М. Иноце // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1975. — Вып. 3. — С. 54–62.
3. Гаммаль Т., Хаген И., Мюлленберг Р. Влияние электрического тока на каплеобразование при ЭШП // Там же. — С. 62–69.

4. Исследование на модели характера оплавления расходоуемых электродов при выплавке горизонтальных слитков ЭШП / Б. И. Медовар, А. А. Троянский, А. Н. Казимиров и др. // Спец. электрометаллургия. — 1977. — Вып. 33. — С. 28–32.
5. Особенности процессов массообмена в пленочной стадии процесса ЭШП / А. А. Троянский, А. Х. Дымнич, Л. Б. Медовар, А. Д. Рябцев // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 4. — С. 6–9.
6. Клюев М. М., Каблуковский А. Ф. Metallurgy электрошлакового переплава. — М.: Metallurgy, 1969. — 256 с.
7. Metallurgy электрошлакового процесса / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, В. Л. Шевцов и др.; Под ред. Патона Б. Е. — Киев: Наук. думка, 1986. — 248 с.
8. Воздействие ультразвуковых колебаний на капельный перенос металла при электрошлаковом переплаве / В. П. Куделькин, М. М. Клюев, С. И. Филиппов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1969. — № 3. — С. 54–59.
9. Чуманов И. В. Повышение тепловой эффективности электрошлакового переплава и качества металла путем воздействия на процессы плавления, транспортировки и кристаллизации вращением расходоуемого электрода: Автореф. дис. ... д-р. техн. наук. — Челябинск, 2002. — 40 с.
10. Компан Я. Ю., Щербинин Э. В. Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
11. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протокопилов И. В. К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 3–7.
12. Магнитогидродинамические явления при ЭШП и кристаллизация электрошлаковых слитков / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Ю. Г. Емельяненко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1984. — Вып. 20. — С. 11–15.
13. Правомерность физического моделирования процесса ЭШП / В. К. Лебедев, Н. Ф. Медведенко, Б. И. Медовар и др. // Рафинирующие переплавы. — Киев: Наук. думка, 1974. — С. 21–31.

Physical model has been developed for investigation of peculiar features of consumable electrode melting in electroslag remelting under conditions of the external magnetic field. The model represents an optically transparent cylindrical vessel, filled with an electrolyte on base of solution $ZnCl_2$, simulating a slag pool, into which an electrode of Wood's alloy was immersed. Electrode melting occurs due to heat, generating in electrolyte during the electric current passing. The external magnetic field is created by a system of two solenoids, embracing the vessel and electrode. To investigate the peculiarities of electrode melting, the method of video filming is used at the frequency of 240 frames per a second. It was found that superposition of external longitudinal magnetic field of 0.2 T induction contributes to increase in electrode melting speed by 8...12 %. Here, the frequency of electrode metal drop detachment is increased by 18...22 %, and the average mass of drop is reduced by 8...10 %. The mentioned effects are attained due to intensification of hydrodynamic flows near the electrode surface being melted and activation of the heat and mass exchange processes at the interface of two phases. The horizontal rotation of melt, caused by superposition of the longitudinal field also contributes to relocation of place of drops falling onto the vessel bottom. 13 Ref., 1 Table, 3 Figures.

Key words: electroslag remelting; magnetic field; physical modeling; consumable electrode; melting; electrode drop; hydrodynamics

Поступила 19.11.2014