

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ШЛАКОВОЙ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВАНН ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПРОЦЕССЕ В ТОКОПРОВОДИТЕЛЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Ю. М. КУСКОВ, В. Г. СОЛОВЬЕВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведены эксперименты по изучению вращения шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом процессе в токоподводящем кристаллизаторе. Установлено, что вращение металлической ванны может происходить как за счет сил трения от вращающейся шлаковой ванны, так и за счет электромагнитных сил, действующих на расплавленный металл. Определяющее влияние на возникновение вращательного эффекта в ваннах оказывает рабочий ток, проходящий через токоведущую секцию кристаллизатора. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: вращение, шлаковая и металлическая ванны, электрошлаковый процесс, токоподводящий кристаллизатор

Электромагнитное воздействие на электрошлаковый процесс показало, что при определенных условиях с его помощью удастся не только увеличить коэффициент плавления расходуемого электрода, но и изменять структуру кристаллизующегося металла [1–3]. При этом основной целью большинства исследований является решение именно второй задачи, без оценки физических явлений, происходящих во время взаимодействия рабочего тока и тока магнитного поля.

Практически первой работой, в которой рассматривался процесс возникновения вращения в металлической ванне, является работа [4]. На основании исследований, выполненных на физической модели и оценки полученных результатов в ней, был сделан следующий вывод: «металлическая ванна может приводиться во вращение только за счет сил трения, возникающих на границе контакта с вращающейся шлаковой ванной».

С другой стороны, в работах [1, 5, 6] показано, что с помощью внешних магнитных полей в металлической ванне за счет воздействия объемных электромагнитных сил можно создавать электро-вихревые течения и вибрацию расплава, а также его вращение независимо от движения шлака по его поверхности.

Разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона токоподводящий кристаллизатор (ТПК) представляет собой секционное устройство, состоящее из нерасходуемого электрода кольцевого типа, выполненного в виде одновиткового индуктора, и формирующей секции, являющейся, по сути, обычным кристаллизатором [7, 8]. Между этими секциями может быть установлена дополнительная промежуточная секция, предупреждающая по-

падение жидкого металла из формирующей секции на токоведущую.

Электрошлаковый процесс в ТПК должен сопровождаться теми же электромагнитными явлениями, которые происходят в обычном кристаллизаторе при использовании любой технологии плавления металла — сварке, наплавке, переплаве и воздействии дополнительного внешнего магнитного поля. Тем не менее применение ТПК, в котором его токоведущая секция не является внешним источником магнитных полей и представляет собой элемент электрической цепи, обеспечивающей протекание электрошлакового процесса с плавлением подаваемого в шлаковую ванну переплавляемого металла того или иного вида, может влиять на характер взаимодействия рабочего тока и магнитного поля ТПК.

Изучению этого влияния, в частности, на особенности вращения шлаковой и металлической ванн, и посвящена эта статья.

В общем виде в случае электрошлакового процесса в ТПК, взаимодействие осевой составляющей магнитного поля B_z (формируемого токоподводящей секцией) с радиальной составляющей электрического тока в шлаковой ванне I_r должно приводить к формированию азимутально-направленной электромагнитной силы F_φ , вращающей шлак вокруг оси ванны.

Причем этот эффект может проявляться не только в виде углового перемещения слоев шлака, но и в формировании воронки в шлаке по центру кристаллизатора. Так, например, при торцевой электрошлаковой наплавке (ЭШН) в ТПК диаметром 180 мм с использованием расходуемого электрода диаметром 40 мм и при токе кристаллизатора порядка 2,4...2,6 кА глубина воронки составляла более 50 мм (при глубине шлаковой

Влияние режима кольцевой ЭШН на скорость вращения шлаковой ванны (флюс АН-75)

Режим наплавки		Скорость вращения, об./мин
U, В	I _{тпк} , кА	
28	2,0...2,6	30
40	3,4...3,7	35...40
42	3,6...3,9	36...45
38	3,5...4,0	40...50
32	4,6...4,9	60

ванны приблизительно 110 мм) с ее максимальным диаметром под торцом электрода, равном около 50...70 мм. В связи с такими размерами воронки электрод приходилось вводить вовнутрь воронки до соприкосновения его поверхности со шлаковой ванной.

Аналогичная ситуация имеет место и в металлической ванне. Однако вращательный эффект проявляется в значительно меньшей мере, так как составляющие B_z и I_r в металлической ванне значительно меньше, чем в шлаковой.

Вращательный эффект наблюдается при использовании расходоуемых электродов, бестоковых заготовок, а также дискретной присадки как при торцевой, так и при кольцевой ЭШН. Определяющим фактором, влияющим на вращение шлаковой ванны, является ток ($I_{тпк}$), проходящий через токоведущую секцию кристаллизатора.

В таблице представлены результаты кольцевой ЭШН дискретной присадкой заготовки диаметром 170 мм в уширенном ТПК диаметром 255/215 мм.

Разработчик конструкции ТПК Г. В. Ксендзык считал, как и в работе [4], что вращение металлической ванне передается за счет сил трения от вращающейся шлаковой ванны [9].

Сравнительные плавки электрода большого сечения в обычном кристаллизаторе и дискретной присадки в ТПК показали, что в структуре металла, полученного переплавом присадки, величина зерна имеет примерно в три раза меньшие размеры [10]. Однако следует отметить, что при плавке в ТПК сложно установить, какая доля влияния на эти структурные изменения приходится на инокулирующее воздействие частиц присадки, а какое

происходит за счет магнитного вращения металлической ванны.

Применение при наплавке жидкого присадочного металла (ЭШН ЖМ) [11, 12] позволило показать, что даже без инокуляции расплава структура получаемых слитков характеризуется мелкозернистым строением [13]. Однако авторы статьи не рассматривают влияния вращения на структурообразование кристаллизующегося металла. Более того, металл, полученный ЭШН ЖМ, сравнивается не с металлом электрошлаковой плавки с расходоуемым электродом, а с металлом, выплавленным по традиционной технологии литья. Поэтому основное преимущество металла ЭШН ЖМ связывают с высокой скоростью его кристаллизации.

Для более глубокого понимания поведения шлаковой и металлической ванн в условиях плавки в ТПК было решено провести эксперименты на физической модели согласно рис. 1. ТПК диаметром 60 мм с нижней секцией, выполненной в виде заглушки-поддона с выемкой по ее центру, заполняли ртутью глубиной около 40 мм. Источником питания служил трансформатор ТШП-10. Величину тока $I_{кр}$ регулировали балластным сопротивлением РБ-300. Было установлено, что при подаче с клемм источника питания напряжения $U_{кр-плд}$ от 15 до 30 В на токоведущую секцию ТПК и заглушку происходит вращение ванны ртути с небольшим ее пульсированием.

Таким образом, взаимодействие магнитных полей, формируемых протекающим в ртути рабочим током и токоведущей секцией кристаллизатора, способствует появлению вращательного эффекта в ртути (металлическая ванна) совместно со шлаковой ванной. Дополнительные данные были получены в реальном электрошлаковом процессе. С этой целью в ТПК диаметром 180 мм на стальной заправке диаметром 170 мм и толщиной 20 мм была наведена шлаковая ванна, обеспечивающая нормальную работу кристаллизатора и стабиль-

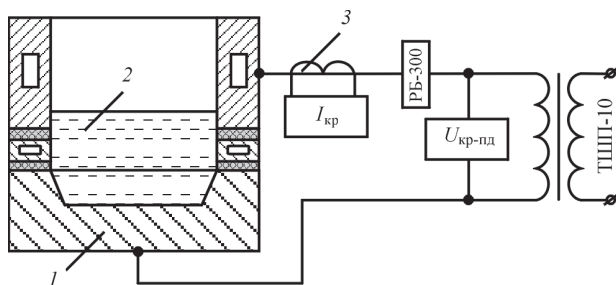


Рис. 1. Схема физической модели оценки поведения шлаковой и металлической ванн в ТПК: 1 — заглушка-поддон; 2 — ртуть; 3 — измерительный трансформатор тока

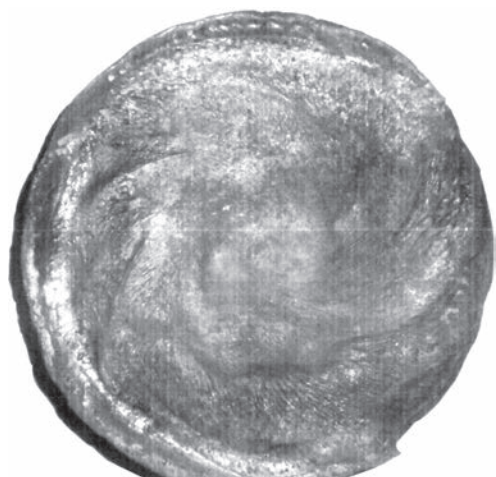


Рис. 2. Расплавленная поверхность заправки поддона после 10-минутного электрошлакового процесса в ТПК



Рис. 3. Форма металлической ванны в наплавляемом металле, образующейся при электрошлаковом переплаве (наплавке) дискретной присадки в ТПК

ное ее существование при токах 2,3...2,5 кА. При этом угловую скорость вращения шлака АНФ-29 изменяли от 72 до 106 об./мин в течение 10 мин. После этого источник питания ТШП-10 отключали, шлаковую шапку после ее остывания удаляли из кристаллизатора и проводили осмотр затравки. Осмотр показал, что за время эксперимента поверхность затравки оплавляется приблизительно на 8...10 мм и формируется в виде «блюдца» с поднятыми по периферии приблизительно на 10 мм краями. При виде сверху на оплавленную поверхность затравки (рис. 2) видны полосы от вращения оплавленного металла, причем центральная часть затравки мало затронута вращательным движением, т. е. практически наблюдается вращение по кольцу. Такой характер вращения отражается и на формировании металлической ванны наплавляемого металла — она может приобретать форму типа «сомбреро» (рис. 3).

Выводы

1. Вращение металлической ванны в ТПК может происходить как за счет сил трения от вращающейся шлаковой ванны, так и за счет электромагнитных сил, непосредственно воздействующих на расплавленный металл.

2. Определяющее влияние на возникновение вращательного эффекта в металлической ванне оказывает рабочий ток, проходящий через тоководящую секцию ТПК.

3. Центробежные силы, перемещающие расплавленный металл к периферии (стенкам) кристаллизатора имеют минимальную величину в его центре, что приводит к неодинаковым условиям формирования металлической ванны и ее кристаллизации.

Список литературы

1. Трочук И. П., Черныш В. П. (1965) Магнитное управление кристаллизацией при электрошлаковом процессе. *Сварочное производство*, **11**, 3–5.
2. Топилин В. В., Ключев М. М., Фомичева Н. П., Гребцов Ю. Г. (1968) Измельчение макроструктуры слитков при электрошлаковом переплаве сплавов. *Спец. электроталлургия*, **1**, 23–8.
3. Патон Б. Е. и Медовар Б. И. (ред.) (1986) *Металлургия электрошлакового процесса*. Киев, Наукова думка.

4. Максимович Б. И. (1962) Влияние электромагнитного вращения шлаковой ванны на кристаллизацию металла при электрошлаковом переплаве высоколегированных сталей и сплавов. *Электротермия*, **5**, 9–12.
5. Компан Я. Ю., Щербинин Э. В. (1989) *Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами*. Москва, Машиностроение.
6. Протоковиллов И. В., Порохонько В. Б. (2015) Физическое моделирование процесса плавления расходоуемого электрода при ЭШП в условиях внешнего электромагнитного воздействия. *Современная электроталлургия*, **1**, 8–12.
7. Ксендзык Г. В., Фрумин И. И., Ширин В. С. (1964) *Токоподводящий кристаллизатор*. СССР, А. с. № 264427.
8. Ксендзык Г. В., Фрумин И. И., Ширин В. С. (1969) *Устройство для электрошлакового переплава*. СССР, А. с. № 337026.
9. Ксендзык Г. В. (1975) Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Спец. электроталлургия*, **27**, 32–40.
10. Кусков Ю. М., Скороходов В. Н., Рябцев И. А., Сарычев И. С. (2001) *Электрошлаковая наплавка*. Москва, ООО «Наука и технологии».
11. Кусков Ю. М. (1996) Электрошлаковая наплавка цилиндрических заготовок жидким присадочным материалом в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **6**, 52.
12. Медовар Б. И., Чернец А. В., Медовар Л. Б. и др. (1995) Электрошлаковая наплавка жидким присадочным металлом. *Пробл. спец. электроталлургии*, **1**, 6–11.
13. Медовар Б. И., Чернец А. В., Медовар Л. Б. и др. (1997) ЭШН ЖМ — как способ получения тонкой структуры наплавленного слоя из быстрорежущей стали. *Там же*, **1**, 3–4.

References

1. Trochun, I.P., Chernysh, V.P. (1965) Magnetic control of solidification in electroslag process. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 3-5 [in Russian].
2. Topilin, V.V., Klyuev, M.M., Fomicheva, N.P. et al. (1968) Refinement of microstructure of ingots in electroslag remelting of alloys. *Spets. Elektrometallurgiya*, **1**, 23-8 [in Russian].
3. Paton, B.E., Medovar, B.I. (eds) (1986) *Metallurgy of electroslag process*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Maksimovich, B.I. (1962) Influence of electromagnetic rotation of slag pool on solidification of metal in electroslag remelting of high-alloy steels and alloys. *Elektrotermiya*, **5**, 9-12 [in Russian].
5. Kompan, Ya.Yu., Shcherbinin, E.V. (1989) *Electroslag welding and melting with controlled MGD-processes*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B. (2015) Physical modeling of process of consumable electrode melting in ESR under conditions of external magnetic action. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 8-12 [in Russian].
7. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. (1964) *Current-supplying mold*. USSR author's cert. 264427 [in Russian].
8. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. (1969) *Device for electroslag remelting*. USSR author's cert. 337026 [in Russian].
9. Ksyondzyk, G.V. (1975) Current-supplying mold providing rotation of slag pool. *Spets. Elektrometallurgiya*, **27**, 32-40 [in Russian].
10. Kuskov, Yu.M., Skorokhodov, V.N., Ryabtsev, I.A. et al. (2001) *Electroslag surfacing*. Moscow, ООО «Наука и Технологии» [in Russian].
11. Kuskov, Yu.M. (1996) Electroslag surfacing of cylindrical billets with liquid filler material in current-supplying mold. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 52 [in Russian].
12. Medovar, B.I., Chernets, A.V., Medovar, L.B. et al. (1995) Electroslag surfacing with liquid filler metal. *Probl. Spets. Elektrometallurgiya*, **1**, 6-11 [in Russian].
13. Medovar, B.I., Chernets, A.V., Medovar, L.B. et al. (1997) ESS LM as a method for producing of thin structure of deposited layer from rapid steel. *Ibid.*, **1**, 3-4 [in Russian].

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИВЧЕННЯ ОБЕРТАННЯ ШЛАКОВОЇ ТА МЕТАЛЕВОЇ ВАНН ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ ПРОЦЕСІ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Ю. М. КУСКОВ, В. Г. СОЛОВЬОВ

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено експерименти по вивченню обертання шлакової і металевої ванн при електрошлаковому процесі в струмопідвідному кристалізаторі. Встановлено, що обертання металевої ванни може відбуватися як за рахунок сил тертя від обертової шлакової ванни, так і за рахунок електромагнітних сил, що впливають на розплавлений метал. Визначальний вплив на виникнення обертального ефекту в ваннах надає робочий струм, що проходить через струмоведучу секцію кристалізатора. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: обертання, шлакова і металева ванни, електрошлаковий процес, струмопідвідний кристалізатор

EXPERIMENTAL STUDY OF SLAG AND METAL POOL ROTATION IN THE ELECTROSLAG PROCESS IN CURRENT-SUPPLYING MOULD

Yu.M. KUSKOV, V.G. SOLOVJOV

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Experiments on studying the rotation of slag and metal pools in the electroslag process in current-supplying mould were conducted. It is found that metal pool rotation can occur both due to the forces of friction from the rotating slag pool, and due to electromagnetic forces applied to the molten metal. Working current flowing through the mould current-conducting section, has a decisive influence on generation of the rotating effect. 13 Ref., 1 Tabl., 3 Fig.

Keywords: rotation, slag and metal pool, electroslag process, current-conducting mould

Поступила в редакцію 07.05.2018



60 лет электрошлаковому переплаву

Начало развития способа ЭШП приходится на середину 1940-х гг. В то время специалисты Института электросварки им. Е. О. Патона АН УССР вопреки мнению многочисленных оппонентов показали, что решением проблемы надежности сварных конструкций является повышение чистоты и однородности структуры основного металла [Медовар Б. И., Латаш Ю. В. (1965) *Электрошлаковый переплав*. Киев, Наукова думка]. Эта идея послужила толчком для проведения систематических работ по улучшению качества стали. Начиная с 1954 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона под руководством академика Б. Е. Патона группа ученых в лице д-ра техн. наук Б. И. Медовара, канд. техн. наук Ю. В. Латаша и инженера Б. Н. Максимовича проводила исследования по разработке способов улучшения качества стали. Результаты глубоких научных исследований качества металла слитков в несколько килограммов, наплавленных на аппаратах электрошлаковой сварки, стали началом по внедрению в производство способа ЭШП.

В 1957 г. в г. Свердловске (сейчас г. Екатеринбург) на Всесоюзном совещании сталеплавильщиков Б. Е. Патон, Б. И. Медовар и Ю. В. Латаш сделали доклад «Электрическая выплавка высоколегированной стали сплавов в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе». Так, на стыке двух областей техники — сварки и металлургии родился новый прогрессивный процесс — электрошлаковый переплав.

К юбилею ЭШП издан специальный выпуск журнала «Современная электрометаллургия» № 2, 2018, полностью посвященный исследованиям электрошлакового процесса, который можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».