

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАПЛАВКИ ДИСКРЕТНОЙ ПРИСАДКОЙ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ НА СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ШЛАКОВОЙ ВАННЫ

Ю. М. КУСКОВ

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

Использование при наплавке наиболее перспективного наплавочного материала — дискретной присадки — вносит существенное отличие в процессы наплавки с токоподводящим кристаллизатором. Исследовано влияние электрических параметров наплавки на угловую скорость вращения шлаковой ванны при использовании промышленно выпускаемых флюсов трех марок. Установлено, что флюс АНФ-29 позволяет получать достаточно большой вращательный эффект как в период формирования шлаковой ванны, так и в процессе наплавки. Флюс АНФ-32 менее эффективен в период формирования шлаковой ванны. Флюс АН-26 обеспечивает активное вращение шлаковой ванны во время наплавки, но при этом необходимо вводить в ванну повышенную электрическую мощность. На угловую скорость вращения шлаковой ванны влияет как вводимая в шлаковую ванну электрическая мощность, так и ток наплавки, но влияние последнего определяющее. Библиогр.16, табл. 1, рис. 2.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, токоподводящий кристаллизатор, флюсы, шлаковая ванна, угловая скорость вращения шлака, ток наплавки, электрическая мощность, дискретная присадка

Одним из направлений повышения качества электрошлакового металла за счет ускорения тепло-массообменных реакций, улучшения условий кристаллизации жидкого металла является оказание внешнего воздействия на плавильную зону (конец электрода–шлак–металлическая ванна). Это воздействие чаще всего осуществляется механическим [1, 2], электромагнитным [3, 4] и ультразвуковым [5] способами.

Несмотря на то, что большинство исследований подтверждают положительное влияние внешнего воздействия на структуру и свойства наплавленного металла, тем не менее оно не нашло широкого применения, главным образом, за счет усложнения технологии электрошлакового процесса.

Устранить это противоречие можно при использовании в электрошлаковых технологиях разработанного в ИЭС им. Е.О. Патона секционного токоподводящего кристаллизатора (ТПК), одной из основных функций которого является обеспечение при его эксплуатации вращения в горизонтальной плоскости шлаковой ванны [6]. Это вращение осуществляется электромагнитным способом благодаря специальной конструкции токоподводящей секции. В результате взаимодействия продольного магнитного поля кристаллизатора с полями силовых линий рабочего тока внутри шлаковой ванны возникают пондеромоторные силы, которые механически создают в шлаке вращатель-

ный эффект. Вращение шлаковой ванны вследствие сил трения между шлаком и жидким металлом передается металлической ванне.

Помимо отмеченных ранее достигаемых при внешнем воздействии целей при электрошлаковой наплавке (ЭШН) и электрошлаковом переплаве (ЭШП) в ТПК можно решать и другие задачи. В частности, за счет вращения шлака улучшаются условия выравнивания температур во всем объеме шлаковой ванны и ускоряется стабилизация электрошлакового процесса; исключается образование микродуг на границе шлак–неплавящийся электрод (стенка токоподводящей секции), что предотвращает быстрый локальный износ последнего; появляется возможность использования в электрошлаковых технологиях дискретных материалов, равномерно распределяемых по поверхности шлаковой ванны, благодаря чему создаются примерно одинаковые условия плавления в шлаке гранул присадки; активное перемещение шлака относительно наплавляемой поверхности должно положительно влиять на ее качественное соединение с наплавляемым металлом.

Если исходить из требований, предъявляемых к флюсам (шлакам) для ЭШП как наиболее близкого к торцевой ЭШН электрошлакового процесса, то они делятся на две основные группы [7]: технологические и металлургические. К технологическим требованиям относятся: легкость возбуждения и высокая стабильность электрошлакового процесса; возможность получения умеренных скоростей наплавления металла, гаранти-

рующих осевую направленность кристаллизации; минимальный удельный расход электроэнергии; хорошее формирование поверхности наплавляемого металла; легкая отделимость шлаковой корки; постоянство состава шлака при длительном хранении и в процессе ЭШП; минимальная трудоемкость изготовления шлака; отсутствие в составе шлака дорогих и дефицитных компонентов; защита расплавленного металла от доступа воздуха; обеспечение запаса тепла над расплавленным металлом, предупреждающее образование в слитке усадочных раковин и внутренних трещин.

Применительно конкретно к торцевой ЭШН в ТПК следует к этим требованиям добавить следующие: желательно использовать относительно легкоплавкие и «длинные» шлаки; у шлаков должна быть невысокая вязкость и повышенная жидкотекучесть (особенно для случая «жидкого» старта); состав шлаков должен обеспечивать формирование гарнисажа минимальной толщины и повышенной электропроводимости для его «пробивания» в начальный период стабилизации электрошлакового процесса при относительно низком напряжении источника питания.

К металлургическим требованиям относят формирование в наплавленном металле более пластичных неметаллических включений, желательно округлой формы; повышенную десульфуризирующую способность; низкую водородопроницаемость.

Со времени разработки технологии ЭШН и ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе [8, 9] появились различные ее варианты. В настоящее время на базе известной конструкции ТПК предложены четыре технологических способа: наплавка и переплав жидким металлом [10,11]; так называемая двухконтурная схема переплава электрода с использованием двух источников питания [12]; наплавка с подачей в шлаковую ванну нетоковедущей [13] и токоведущей [14] порошковой проволоки; наплавка по двухконтурной схеме с использованием дополнительного полого графитового электрода и нетоковедущей заготовки (проволоки) [15].

В данной статье мы не рассматриваем достоинства и недостатки вновь предложенных способов наплавки в ТПК. Рассмотрим лишь взаимосвязь способа наплавки и применяемого для него флюса (шлака) с точки зрения возможности осуществления стабильного вращения шлаковой ванны.

Прежде всего следует отметить, что вопросы вращения шлаковой ванны во всех этих способах не рассматриваются, оценивают лишь технологические особенности процесса. Но так как сам электрошлаковый процесс и движение потоков шлака, происходящее при его осуществлении, это единое электрофизикохимическое явление, прежде всего следует понять, из каких соображе-

ний происходит выбор флюса для того или иного предлагаемого способа наплавки (переплава) и насколько критерии этого выбора могут быть использованы для решения поставленной задачи ЭШН дискретной присадкой с обеспечением активного вращения шлаковой ванны.

По имеющейся информации выбор флюса для каждого предложенного способа наплавки либо имеет некоторое обоснование, либо для наплавки просто используют флюс известной марки.

Для наплавки жидким металлом в зависимости от наплавляемого металла применяют флюсы АНФ-94, АНФ-32, АН-75 [10, 11] и различные композиции на основе фторидов и оксидов. Главное отличие ЭШН дискретным материалом от жидкой присадки состоит в том, что в первом случае в шлаковую ванну подаются гранулы холодной присадки, во втором – порции перегретого металла. Соответственно, температурные условия существования шлаковой ванны и физические свойства шлака как в каждой локальной зоне ванны, так и во всем ее объеме в этих технологиях будут отличаться. Поэтому флюс, используемый в одном способе наплавки, не обязательно будет пригоден для другого, особенно с точки зрения создания в шлаковой ванне активного вращательного эффекта.

Что касается наплавки с подачей в шлаковую ванну небольшого объема токоведущей или нетоковедущей проволоки [13, 14], то применение относительно тугоплавкого флюса АНФ-6, по-видимому, не всегда позволяет получить качественное соединение основного и наплавленного металлов, причем сам процесс наплавки, по заявлению разработчиков способа, необходимо вести в узких пределах вводимой электрической мощности. Видимо, по этой причине все последующие работы авторы стали проводить на том же самом флюсе, но с дополнительным вводом в центральную часть шлаковой ванны полого графитового электрода с особой формой рабочего торца [15]. В этом случае весь объем шлаковой ванны (особенно под электродом) достаточно хорошо прогревается. Пока что проверена лишь торцевая наплавка цилиндрических деталей относительно небольшого диаметра 30...90 мм (в основном, диаметр составляет около 30 мм). Возможность применения этого флюса для наплавки изделий большего диаметра и с подачей в шлаковую ванну дискретной присадки вызывает сомнения.

Переплав электродов по двухконтурной схеме [12], как и наплавка жидкой присадкой, позволяет обеспечить в шлаковой ванне более равномерное тепловое поле, что, естественно, не соответствует условиям ЭШН дискретной присадкой. Поэтому

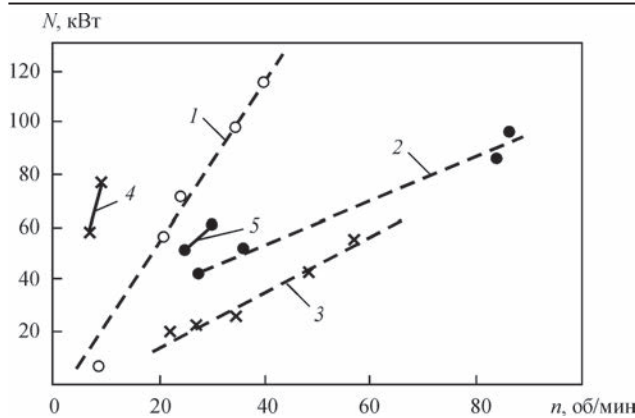


Рис. 1. Влияние на скорость вращения n шлаковой ванны вводимой в нее электрической мощности N : 1 — АН-26; 2 — АНФ-29; 3 — АНФ-32; 4 — АНФ-32 ($L = 94$ мм); 5 — АНФ-29 ($L = 94$ мм)

для этого способа, по-видимому, требования к выбору флюса будут несколько иные, более жесткие.

Исходя из изложенного выше, а также с учетом ранее выполненных исследований [16], оценку влияния состава флюса на угловую скорость вращения шлаковой ванны проводили на флюсах АНФ-29, АНФ-32 и АН-26. Наряду с установленной технологической возможностью использования этих флюсов необходимо оценить их возможности в качестве жидкой шлаковой среды, способной вращаться в процессе наплавки при подаче на ее поверхность наплавочной дискретной присадки.

Методика выполнения экспериментов была принята аналогичной, описанной в работе [16]. Расстояние от наплавляемой торцевой поверхности заготовки до верхнего торца формирующей секции L постепенно изменялось от первоначального, равного 94 мм (для флюса АН-26 — 70 мм), до меньших размеров за счет подачи в шлаковую ванну переплавляемой стальной стружки и, соответственно, приращения на торце заготовки наплавленного слоя. Вращение шлаковой ванны в горизонтальной плоскости оценивали путем опускания на ее поверхность небольших кусочков древесного угля и замеров их углового перемещения с помощью секундомера. За результат измерений бралось среднее значение показаний трех-пяти опытов. Большое количество измерений проводилось при низких скоростях вращения ванны (пониженное теплонасыщение шлака) из-за образования на ее поверхности локальных зон охлаждения, мешающих стабильному вращению кусочков угля.

Отдельно оценивали влияние на вращение шлаковой ванны вводимой в нее электрической мощности N и тока наплавки I . Результаты измерений представлены на рис. 1 и 2.

Анализ этих результатов позволяет сделать следующие выводы.

Для флюсов АНФ-29 и АНФ-32, имеющих относительно близкий химический состав, измене-

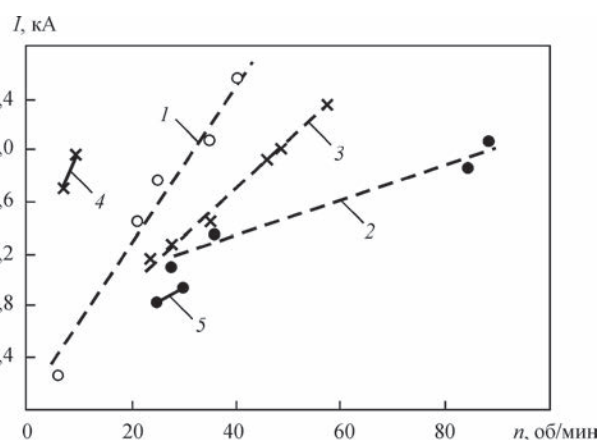


Рис. 2. Влияние на скорость вращения n шлаковой ванны тока наплавки I (обозначения те же, что и на рис. 1)

ние скорости вращения шлака n от величины вводимой в шлаковую ванну электрической мощности N на этапе ее формирования и стабилизации электрошлакового процесса ($L = 94$ мм) заметно отличается (см. рис. 1). У флюса АНФ-29 прямая зависимость N - n примерно соответствует прямо пропорциональному соотношению (при изменении N с 50 до 60 кВт n изменяется с 25 до 30 об/мин). В то время, как у флюса АНФ-32, в этих же условиях (IV ступень источника, $L = 94$ мм) выполнения эксперимента изменение мощности с 60 до 80 кВт (около 33 %) приводит к изменению угловой скорости вращения шлаковой ванны с 7 до 9 об/мин (приблизительно 29 %).

После достижения минимальных значений L (за счет подачи в шлаковую ванну стружки и прироста наплавленного слоя), соответственно, для АНФ-29 — 22 мм, АНФ-32 — 28 мм и АН-26 — 25 мм осуществляли постепенный переход с IV ступени источника питания на более низкие ступени (III и II). При этих величинах L наклон прямых флюсов АНФ-29 и АНФ-32 становится примерно одинаковым. Зависимость N - n для флюса АН-26 характеризуется более резким изменением n при снижении вводимой электрической мощности.

Как отмечалось выше, возникновение и скорость вращения шлаковой ванны определяется, главным образом, рабочими токами наплавки. И хотя характер прямых зависимостей N - n и I - n примерно одинаков (см. рис. 1, 2), но влияние со-

Влияние доли тока I (%) в вводимой в шлаковую ванну электрической мощности N на скорость вращения шлаковой ванны n

Флюс	Режим наплавки		n , об/мин	Доля I в N , %
	I , кА	N , кВт		
АНФ-29	1,34	52,4	36	2,64
	0,82	50,8	25	1,56
АНФ-32	2,00	44,0	48	4,55
	1,93	42,5	46	4,54
АН-26	2,06	98,9	40	2,08
	1,77	72,9	24	2,43

ставляющей тока в вводимой в шлак различного химического состава электрической мощности можно оценить исходя из следующих данных (таблица).

Выводы

1. Обеспечение оптимального вращения шлаковой ванны как в начальный период ее формирования (характеризуется временем, необходимым для минимального углового движения расплава по периметру кристаллизатора), так и при стабилизации электрошлакового процесса (неизменность величины тока наплавки до подачи в шлаковую ванну присадки, постоянная скорость вращения ванны, выстрое погружение присадки в шлаковую ванну без образования на ее поверхности конгломератов шлака и наплавочного материала) является важной характеристикой флюсов, применяемых для ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе.

2. Угловая скорость вращения шлаковой ванны зависит как от электрической мощности, вводимой в нее при осуществлении электрошлакового процесса в ТПК, так и непосредственно от рабочего тока наплавки. Причем наиболее существенную роль в этом влиянии играет ток наплавки.

3. Из трех рассмотренных в экспериментах флюсов наилучшие условия для осуществления вращения шлаковой ванны могут быть получены при использовании флюса АНФ-29. Шлаковая ванна, получаемая при расплавлении флюса АНФ-29, позволяет достичь достаточно большого вращательного эффекта как в период формирования шлаковой ванны, так и в процессе наплавки. Флюс АНФ-32 близок к флюсу АНФ-29 по своей способности к вращению шлаковой ванны в период ведения стабильного электрошлакового процесса, но менее эффективен в период формирования шлаковой ванны. Флюс АН-26 может обеспечить активное вращение шлаковой ванны во время наплавки, но требует для этого введения в нее повышенной электрической мощности.

Список литературы

1. Вачугов Г. А., Чуманов В. И., Хасин Г. А. и др. (1975) Влияние вращения переплавляемого электрода на процесс электрошлакового переплава. *Спец. электроталлургия*, **28**, 31–36.
2. Кодама Х., Кандро И., Акахори К. и др. (1987) Свойства плакированных валков, полученных методом электрошлаковой наплавки с вращением. *Электрошлаковый переплав. Материалы VIII международной конференции по вакуумной металлургии, специальным видам наплавки и металлургическим покрытиям*, **9**, сс. 139–145.
3. Максимович Б. И. (1962) Влияние электромагнитного вращения шлаковой ванны на кристаллизацию металла при электрошлаковом переплаве высоколегированных сталей и сплавов. *Электротермия*, **5**, 9–12.
4. Топилин В. В., Клюев М. М., Фомичева Н. П., Гребцов Ю. Г. (1968) Измельчение макроструктуры слитков при электрошлаковом переплаве сплавов. *Спец. электроталлургия*, **1**, 23–28.

5. Куделькин В. П., Клюев М. М., Филиппов С. И. и др. (1969) Воздействие ультразвуковых колебаний на кристаллизацию при электрошлаковом переплаве. *Изв. вузов. Черная металлургия*, **11**, 64–70.
6. Ксендзык Г. В. (1975) Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Спец. электроталлургия*, **7**, 33–40.
7. Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г. (1988) *Сварочные шлаки*. Справочное пособие. Киев, Наукова думка.
8. Ксендзык Г. В., Фрумин И. И., Ширин В. С. (1964) *Токоподводящий кристаллизатор*. СССР, А. с. 264427.
9. Ксендзык Г. В., Фрумин И. И., Ширин В. С. (1969) *Устройство для электрошлакового переплава*. СССР, А. с. 337026.
10. Кусков Ю. М. (1969) Электрошлаковая наплавка цилиндрических заготовок жидким присадочным материалом в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **6**, 52–53.
11. Медовар Б. И., Чернец А. В., Медовар Л. Б. и др. (1995) Электрошлаковая наплавка жидким присадочным металлом. *Пробл. спец. электроталлургии*, **1**, 6–11.
12. Цыкуленко А. К., Лакуман И. А., Медовар Л. Б. и др. (2000) Двухконтурная схема электрошлакового переплава расходуемого электрода. *Там же*, **3**, 16–20.
13. Соколов Г. Н., Лысак В. И. (2005) *Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего формирования сталей*. Волгоград, РПК «Политехник».
14. Соколов Г. Н., Зорин И. В., Цурихин С. Н. (2004) Технология ЭШН оправок трубопрокатного агрегата. *Сварщик*, **1**, 15.
15. Соколов Г. Н. (2007) *Формирование композиционной структуры наплавленного металла для работы в условиях термошлакового воздействия и разработка технологии ЭШН прессовых штампов и инструмента*. Автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук. Волгоград.
16. Кусков Ю. М. (2018) Влияние состава флюса на процесс торцевой электрошлаковой наплавки с отдельной подачей присадочного материала. *Автоматическая сварка*, **1**, 44–49.

References

1. Vachugov, G.A., Chumanov, V.I., Khasin, G.A. et al. (1975) Influence of rotation of remelted electrode on electroslag remelting process. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **28**, 31-36 [in Russian].
2. Kodama, H., Kandro, I., Akahori, K. et al. (1987) Properties of clad rolls produced by method of electroslag surfacing with rotation. In: Proc. of 8th Intern. Conf. on Vacuum Metallurgy, *Special Kinds of Surfacing and Metallurgical Coatings*, **9**, 139-145.
3. Maksimovich, B.I. (1962) Effect of electromagnetic rotation of slag pool on crystallization of metal in electroslag remelting of high-alloy steels and alloys. *Elektrotermiya*, **5**, 9-12 [in Russian].
4. Topilin, V.V., Klyuev, M.M., Fomicheva, N.P., Grebtsov, Yu.G. (1968) Refining of macrostructure of ingots in electroslag remelting of alloys. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 23-28 [in Russian].
5. Kudelkin, V.P., Klyuev, M.M., Filippov, S.I. et al. (1969) Impact of ultrasonic oscillations on crystallization in electroslag remelting. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, **11**, 64-70 [in Russian].
6. Ksyondzyk, G.V. (1975) Current-supplying mold insuring rotation of slag pool. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **7**, 33-40 [in Russian].
7. Podgaetsky, V.V., Kuzmenko, V.G. (1988) *Welding fluxes: Refer. book*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
8. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. (1964) *Current-supplying mold*. USSR author's cert. 264427 [in Russian].
9. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. (1969) *Device for electroslag remelting*. USSR author's cert. 337026 [in Russian].

10. Kuskov, Yu.M. (1969) Electroslag surfacing of cylindrical billets with liquid filler material in current-supplying mold. *Avtomatich.Svarka*, **6**, 52-53 [in Russian].
11. Medovar, B.I., Chernets, A.V., Medovar, L.B. et al. (1995) Electroslag surfacing with liquid filler metal. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 6-11 [in Russian].
12. Tsykulenko, A.K., Lakuman, I.A., Medovar, L.B. et al. (2000) Two-loop circuit of electroslag remelting of consumable electrode. *Ibid.*, **3**, 16-20 [in Russian].
13. Sokolov, G.N., Lysak, V.I. (2005) *Surfacing of wear-resistant alloys on press tools and instruments for hot forming of steels*. Volgograd, RPK Politekhnik [in Russian].
14. Sokolov, G.N., Zorin, I.V., Tsurikhin, S.N. (2004) Technology of electroslag surfacing of mandrels of tube-rolling unit. *Svarshchik*, **1**, 15 [in Russian].
15. Sokolov, G.N. (2007) Formation of composite structure of deposited metal for operation in thermoslag impact conditions and development of ESS of press tools and instruments. In: *Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree*. Volgograd [in Russian].
16. Kuskov, Yu.M. (2018) Influence of flux composition on the process of electroslag surfacing of end faces with discrete feeding of filler material. *The Paton Welding J.*, **1**, 33-37.

Ю. М. Кусков

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

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
НАПЛАВЛЕННЯ ДИСКРЕТНОЮ ПРИСАДКОЮ
В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ
НА ШВИДКІСТЬ ОБЕРТАННЯ ШЛАКОВОЇ ВАННИ

Використання при наплавленні найбільш перспективного наплавного матеріалу — дискретної присадки — вносить суттєву відмінність даного процесу від відомих, що застосовують струмопідвідний кристалізатор. Досліджено вплив електричних параметрів наплавлення на кутову швидкість обертання шлакової ванни при використанні флюсів трьох марок, що промислово випускаються. Встановлено, що флюс АНФ-29 дозволяє отримувати досить великий обертальний ефект як в період формування шлакової ванни, так і в процесі наплавлення. Флюс АНФ-32 менш ефективний в період формування

шлакової ванни. Флюс АН-26 забезпечує активне обертання шлакової ванни під час наплавлення, але при цьому необхідно вводити в ванну підвищену електричну потужність. На кутову швидкість обертання шлакової ванни впливає як електрична потужність, що вводиться в шлакову ванну, так і струм наплавлення, але вплив останнього визначальний. Бібліогр.16, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, струмопідвідний кристалізатор, флюси, шлакова ванна, кутова швидкість обертання шлаку, ток наплавлення, електрична потужність, дискретна присадка

Yu.M. Kuskov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

INFLUENCE OF ELECTRIC PARAMETERS
OF SURFACING WITH DISCRETE FILLER IN
CURRENT-SUPPLYING MOULD ON VELOCITY
OF SLAG POOL ROTATION

Application of the most promising surfacing material — discrete filler makes a significant difference in the processes of surfacing with current-supplying mould. Influence of surfacing current and electric power applied to the slag pool, on its angular velocity of rotation at application of three commercial flux grades was studied. It is found that ANF-29 flux allows producing a sufficiently large rotating effect both during the period of slag pool formation, and during surfacing. ANF-32 flux is less effective during the period of slag pool formation. AN-26 flux provides active rotation of the slag pool during surfacing, but this requires applying higher electric power to the pool. Angular velocity of slag pool rotation is affected both by electric power applied to the slag pool, and surfacing current, but the latter has a determinant influence. 16 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

Keywords: electroslag surfacing, current-supplying mould, fluxes, slag pool, angular velocity of slag rotation, surfacing current, electric power, discrete filler

Поступила в редакцію 12.01.2018



**Международный балтийский форум DVS и GSI
«Мобильность через постоянное обучение и четвертая
промышленная революция «Индустрия 4.0»**

7–8 июня 2018

г. Таллинн

Тематика

- Новые директивы Международного института сварки по квалификации сварочного надзорного персонала. Новые цели обучения и компетентность
- Вопросы квалификации специалистов в области технологий соединения с учетом конкретных требований к сварке и склеиванию
- Индустрия 4.0
- Инновационное производство

Контакты: Лариса Кантор, e-mail: larissa.kantor@qsi-boltikum.ee