



17. *Proc. 4th Intern. symp. on ESR* / H. Kajioaka, K. Yamaguchi, N. Sato et al. / Ed. T. Muraji. — Tokyo: ISIJ, 1973. — P. 102–114.
18. *Auburtin P.* PhD Thesis metallurgical engineering UBC. — Vancouver, 1996.
19. *Proc. 2001 Intern. symp. on liquid metal processing* / K. Morita, W. Yang, W. Chen et al. — San Diego: American Vacuum Society, 2001. — P. 314–323.
20. *Ibid* / T. Suzuki, T. Shibata, K. Morita et al. — P. 325–333.
21. *Proc. 1999 Symp. on liquid metal processing* / W. Chen, W. H. Yang, K.-M. Chang et al. — San Diego: American Vacuum Society, 1999. — P. 122–130.
22. *Bouse G. K., Mihalisin J.* Superalloys, supercomposites and superceramics / Ed. J. Tien et al. // J. Wiley. — 1989. — P. 99–148.
23. *Mills K. C., Quested P.* Proc. Intern. symp. on liquid metal processing / Ed. A. Mitchell, J. Fernihough. — Sandia National Laboratories, NM, 1994. — P. 226–235.
24. *Sawa S., Shibuya S., Kinbara S.* // Proc. 4th Intern. symp. on vacuum metallurgy / Ed. T. Saoti. — Tokyo: Iron and Steel Institute, 1974. — P. 129–136.
25. *P. O. Mellberg* / Proc. 6th Intern. on vacuum metallurgy conf. / Ed. G. K. Bhat, R. Schlatter. — San. Diego: American Vacuum Society, 1979. — P. 535–541.
26. *Holzgruber W., Holzgruber H., Boh M.* // Proc. 2001 Intern. symp. on liquid metal processing. — Sandia National Laboratories, NM, 2001. — P. 82–92.
27. *Rawson J. D. W., Dawson D. I., Kirkham N.* // Proc. 4th Intern. symp. on ESR / Ed. T. Muraji. — Tokyo: ISIJ, 1973. — P. 55–61.
28. *Mitchell A., Joshi S.* // Met Trans, 1971. — P. 449–456.
29. *Choudhury M., Szekeley J.* // Proc. 6th Intern. vacuum metallurgy conf. / Ed. G. K. Bhat, R. Schlatter. — San. Diego: American Vacuum Society, 1979. — P. 484–496.
30. *Heilman J. E., Damkroger B. K.* // Proc. Intern. symp. on liquid metal processing / Ed. A. Mitchell, J. Fernihough. — Sandia National Laboratories, NM, 1994. — P. 1–10.
31. *Kelkar K., Mitchell A.* // Proc. symp. on modeling in processing metallurgy. — Tours: SF2M, 2003. — P. 446–452.
32. *Hans S., Jardy A., Ablitzer D.* // Proc. Intern. symp. on liquid metal processing / Ed. A. Mitchell, J. Fernihough. — Sandia National Laboratories, NM, 1994. — P. 143–152.
33. *Ward R. M., Jacobs M. H.* // Proc. 2003 symp. on liquid metal processing. — Paris: SF2M, 2003. — P. 49–59.
34. *A. Mitchell* // Proc. «COST 50» conf. — Liege: CNRM, 1986. — № 2. — P. 1417–1431.
35. *Hosamini L. G., Wood W. E., Devletian J. H.* // Special melting and process technologies / Ed. G. K. Bhat. — San Diego: Noyes Corp., 1988. — P. 460–466.
36. *Proc. 2003 symp. on liquid metal processing.* / A. Kermanpur, D. G. Evans, R. J. Siddall et al. — Paris: SF2M, 2003. — P. 39–46.
37. *Proc. 6th World conf. on titanium* / N. Fukada, H. Okano, M. Koizumi et al. — Cannes: Soc Francaise de Metallurgie, 1988. — II. — P. 631–638.

Ун-т Британ. Колумбии, Ванкувер, Канада

Поступила 08.10.2007

УДК 669.187.56.001.3

## ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ВЫПЛАВКА ГАЛОГЕНИДНЫХ БЕСКИСЛОРОДНЫХ ФЛЮСОВ\*

И. В. Протокилов

Предложено осуществлять выплавку галогенидных бескислородных флюсов электрошлаковым способом в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе с использованием нерасходуемого титанового электрода. Показано, что принудительное вращение расплава ванны при помощи внешнего продольного магнитного поля интенсифицирует плавление шихты и позволяет увеличить производительность процесса выплавки флюса.

It was suggested to realize the melting of halogenide oxygen-free fluxes by electroslag method in a copper water-cooled mould using a non-consumable titanium electrode. It is shown that the forced rotation of the pool molten metal by means of a longitudinal magnetic field intensifies the charge melting and allows increasing the efficiency of the flux melting process.

**Ключевые слова:** электрошлаковая плавка; флюс; шлак; нерасходуемый электрод; магнитное поле

При электрошлаковой сварке и плавке титана и сплавов на его основе применяют бескислородные галогенидные флюсы (шлаки) [1–4], основу которых составляет  $\text{CaF}_2$ . В качестве добавок, способствующих улучшению тех или иных технологических и металлургических свойств флюса, использу-

ют фториды и хлориды щелочных и щелочноземельных металлов (табл. 1). При этом одним из основных требований к флюсам для электрошлаковой сварки (ЭШС) и электрошлакового передела (ЭШП) титана является полное отсутствие оксидов, поскольку наличие во флюсе даже в небольшом количестве таких стойких оксидов, как  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}$ ,  $\text{TiO}_2$ , не исключает возможность загрязнения титана кислородом [2–3].

\* В работе принимали участие инженеры Д. А. Петров, А. М. Белов.



Таблица 1. Химический состав (мас. %) флюсов для ЭШС (ЭШП) титана и его сплавов

Марка флюса	CaF <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>	SrCl <sub>2</sub>	BaF <sub>2</sub>	MgF <sub>2</sub>	CaCl	KCl	CsI	K <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub>
АН-Т2	100	–	–	–	–	–	–	–	–
АН-Т4	85	–	15	–	–	–	–	–	–
АН-Т6	85	15,0	–	–	–	–	–	–	–
АН-Т8	85	14,5	–	–	–	0,5	–	–	–
АН-Т10	13	–	–	73	13,5	–	0,5	–	–
АН-Т12	95	–	–	–	–	–	–	–	5
АН-Т14	95	–	–	–	–	–	–	5	–

Бескислородные флюсы изготавливают путем плавления шихты из исходных компонентов с последующим их дроблением до необходимой грануляции. С целью обеспечения максимальной чистоты флюсов (в первую очередь в отношении оксидов) для их изготовления применяют чистые химические компоненты (квалификации ХЧ или Ч). Это же условие ограничивает возможность выплавки флюса во флюсоплавильных печах, футеровка которых содержит оксиды, поэтому такие флюсы изготавливают в основном в графитовых тиглях с использованием индукционного нагрева. Недостатком указанного способа получения флюсов является вероятность загрязнения флюса углеродом, который может попасть в него в процессе выплавки из материала тигля.

Целью данной работы было исследование возможности получения бескислородных флюсов электрошлаковым способом с помощью имеющегося модернизированного оборудования — установки А-1494 и трансформатора ТШП-10000/1 [5]. Предложено выплавку флюса осуществлять в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе с использованием нерасходуемого (неплавящегося) электрода.

В качестве нерасходуемых электродов при электрошлаковой плавке применяют графитовые или водоохлаждаемые электроды с рабочей частью, выполненной из различных тугоплавких металлов [6]. Недостатком графитового электрода применительно к выплавке флюса является возможность загрязнения флюса углеродом, а водоохлаждаемых электродов — относительно высокая стоимость их изготовления.

Кроме упомянутых электродов, при плавке бескислородных флюсов в качестве нерасходуемого электрода можно использовать титановый электрод. Температура плавления титана составляет 1660 °С, а фторида кальция (наиболее тугоплавкого компонента флюса) — 1410 °С. При этом температура плавления многокомпонентных солевых систем, как правило, еще ниже [4]. Таким образом, при определенных электрических режимах плавки (прежде всего при напряжении на шлаковой ванне) можно добиться устойчивого электрошлакового процесса без плавления титанового электрода. Например, при переплаве титанового электрода под флюсом АН-Т4 при снижении напряжения на ванне до 6... 14 В электрод практически не оплавляется, при этом поддерживается стабильная шлаковая ванна. Это явление, в частности, использовали при заварке усадочной раковины [5].

В связи с указанным выше предложено выплавку флюса осуществлять с применением нерасходуемого титанового электрода.

Исследуемый флюс АН-Т4 выплавляли в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе диаметром 140 мм (рис. 1). Нерасходуемый электрод диаметром 60 мм был изготовлен из технического титана ВТ1. В качестве исходных компонентов спользова-

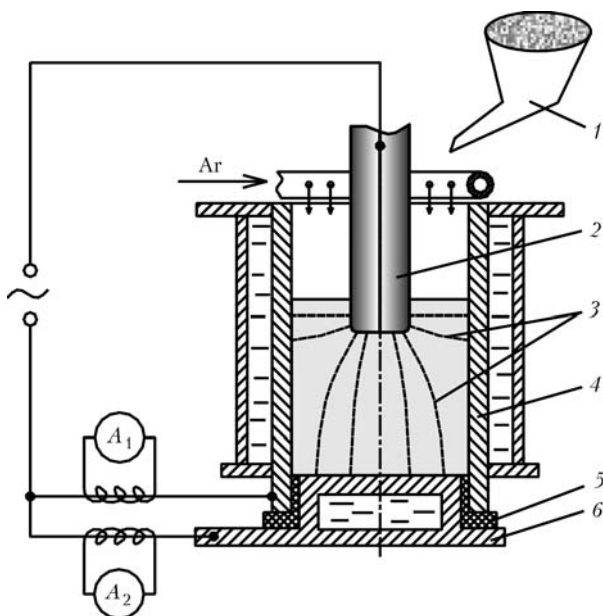


Рис. 1. Схема электрошлаковой выплавки флюса: 1 — устройство засыпки флюсовых компонентов; 2 — нерасходуемый титановый электрод; 3 — линии электрического тока; 4 — кристаллизатор; 5 — электроизолятор; 6 — поддон; А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub> — амперметры

Напряжение на шлаковой ванне, В	Глубина шлаковой ванны, мм	I <sub>под</sub> , А	I <sub>кр</sub> , А	I <sub>общ</sub> , А
10	40	1500	180	1680
10	80	650	400	1050
12	120	400	780	1180
14	160	250	1000	1250
15	200	100	1500	1600



ли фторид кальция и хлорид стронция квалификации Ч. Общая масса шихты на одну плавку составляла 10 кг. Для определения характера прохождения электрического тока в шлаковой ванне (флюсовом расплаве) поддон электрически изолировали от кристаллизатора. Для дополнительной защиты шлаковой ванны и разогретого до высоких температур электрода от взаимодействия с атмосферными газами осуществляли местную защиту плавильного пространства инертным газом (аргоном).

Наведение шлаковой ванны выполняли с использованием «холодного старта» при напряжении на ванне 38 В. Практически сразу после начала протекания в цепи стабильного электрического тока напряжение снижали до 10 В и осуществляли дальнейшее наведение шлаковой ванны. После расплавления первоначальной порции шихты массой 2 кг производили непрерывную засыпку флюсовых компонентов в зону плавки. С целью поддержания постоянной глубины погружения электрода в расплав и обеспечения более эффективных условий тепловыделения в шлаковой ванне по мере увеличения ее глубины выполняли подъем электрода. При этом напряжение на ванне варьировали в пределах 10... 15 В. Режимы выплавки флюса АН-Т4 представлены в табл. 2.

Результаты экспериментов показали, что на начальном этапе плавки доля тока кристаллизатора  $I_{кр}$  была незначительной и составляла около 10 % (табл. 2). По мере увеличения глубины шлаковой ванны доля  $I_{кр}$  возрастала и в конце плавки при глубине ванны 200 мм составляла более 90 %. Это вызвано увеличением межэлектродного промежутка (расстояния между торцом электрода и поддоном), а соответственно и сопротивления участка цепи электрод-поддон. В результате общий ток плавки  $I_{общ}$  перераспределился в сторону снижения доли тока поддона  $I_{под}$  и увеличения доли тока кристаллизатора  $I_{кр}$ .

Следует подчеркнуть, что протекание электрического тока по цепи кристаллизатора является более благоприятным с точки зрения технологии, поскольку обеспечивает равномерное тепловыделение в верхних слоях ванны, т. е. непосредственно в тех областях, куда поступает переплавляемая шихта.

Визуальный осмотр торца электрода показал, что в процессе выплавки флюса при напряжении на ванне 10... 15 В плавление электрода практически не происходило. Наблюдалось лишь частичное оплавление наконечника, который приваривался к торцу электрода для осуществления «холодного старта» электрошлакового процесса (рис. 2). Оплавление имело место на начальном этапе при напряжении на ванне 38 В. Сформировавшийся в результате этого «блинчик» титана впоследствии, легко отделяется от общей массы выплавленного флюса.

В процессе выплавки флюса происходило его неравномерное плавление, что вызвано несиммет-



Рис. 2. Вид торца электрода до (а) и после (б) выплавки флюса

ричной относительно оси ванны засыпкой флюсовых компонентов в плавильное пространство. В результате на поверхности ванны со стороны засыпного устройства образовался настил из нерасплавленной шихты в то время, как с противоположной стороны кристаллизатора шихта полностью расплавилась (рис. 3).

Для интенсификации плавления шихты и увеличения производительности процесса выплавки флюса осуществляли принудительное вращение расплава за счет использования внешнего продольного магнитного поля [7]. Это не потребовало создания специальных электромагнитных устройств, поскольку используемые при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов кристаллизаторы [5, 7] уже были оборудованы устройствами для создания в зоне плавки продольного магнитного поля.

Экспериментальным путем была установлена зависимость частоты азимутального (вокруг оси ванны) вращения расплава от индукции продольного магнитного поля (рис. 4). Частоту вращения расплава определяли визуально по частоте вращения частиц нерасплавленной шихты на поверхности ванны. Установлено, что интенсивность вращения расплава зависит не только от индукции магнитного

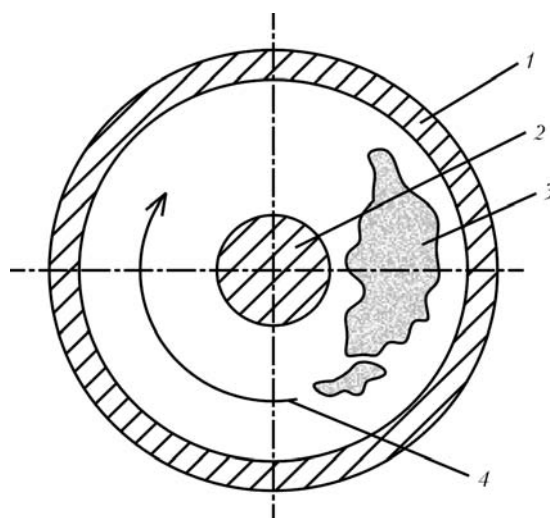


Рис. 3. Вид зеркала шлаковой ванны: 1 — стенка кристаллизатора; 2 — нерасходуемый электрод; 3 — нерасплавленная шихта; 4 — направление принудительного вращения расплава

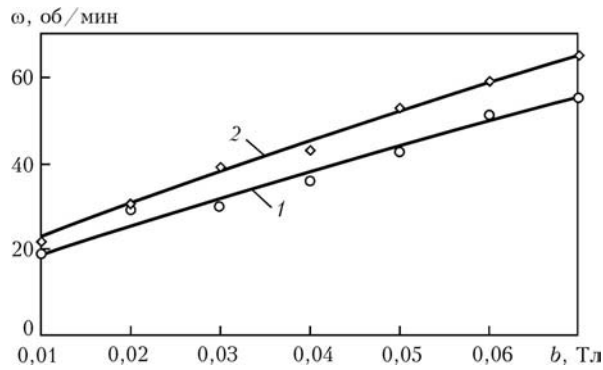


Рис. 4. Зависимость частоты  $\omega$  вращения расплава от индукции  $b$  продольного магнитного поля: 1 –  $I_{\text{под}} = 600$  А,  $I_{\text{кр}} = 850$  А; 2 –  $I_{\text{под}} = 450$  А,  $I_{\text{кр}} = 1000$  А

поля, но и от соотношения тока  $I_{\text{под}}$  и  $I_{\text{кр}}$ . При увеличении тока кристаллизатора частота вращения расплава также увеличивается (рис. 4). Это вызвано тем, что продольное магнитное поле взаимодействует с радиальной составляющей тока плавки, доля которой преобладает в токе кристаллизатора и незначительна в токе поддона.

Использование принудительного вращения приводило к тому, что шихта, попадая на поверхность ванны, увлекалась потоками расплава, и это способствовало более интенсивному ее плавлению. Так, магнитное поле с индукцией в зоне плавки 0,06 Тл обеспечивало азимутальное вращение расплава с частотой 50...60 об/мин (рис. 4). При этом максимальная линейная скорость вращения достигала 40 см/с, что позволило увеличить производительность процесса выплавки флюса с 22 до 28 кг/ч (на 25 %).

Приведенные выше результаты исследований свидетельствуют о возможности выплавки галогенидных бескислородных флюсов электрошлаковым способом с использованием нерасходуемого титанового электрода. Указанные флюсы (шлаки) используются при ЭШС (ЭШП) титановых сплавов и для их изготовления предложенным способом не требу-

ется применение дополнительного технологического оборудования. К преимуществам данного способа выплавки флюса, по сравнению с индукционной плавкой в графитовом тигле, можно также отнести и отсутствие загрязнения флюса углеродом.

### Выводы

1. При электрошлаковой выплавке галогенидных бескислородных флюсов в качестве нерасходуемого электрода можно использовать электрод, изготовленный из технического титана ВТ1.

2. При выплавке флюса АН-Т4 для предотвращения плавления титанового электрода напряжение на шлаковой ванне не должно превышать 15 В.

3. Принудительное вращение расплава ванны при помощи внешнего продольного магнитного поля интенсифицирует плавление шихты и позволяет увеличить производительность процесса выплавки флюса на 25 %.

1. *Компан Я. Ю., Щербинин Э. В.* Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
2. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / Под ред. В. Н. Замкова. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
3. *Подгаецкий В. В., Люборец И. И.* Сварочные флюсы. — Киев: Техніка, 1984. — 167 с.
4. *Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г.* Сварочные шлаки. — Киев: Наук. думка, 1988. — 256 с.
5. *Протоковілов І. В.* Магнітокерована електрошлакова плавка багатоконпонентних титанових сплавів: Дис. ... канд. техн. наук. — К., 2006. — 178 с.
6. *Биктагіров Ф. К.* Применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для плавки, рафинирования и обработки металлов. Сообщ. 1 // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 4. — С. 11–17.
7. *Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протоковілов І. В.* К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 3–7.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

Поступила 17.03.2008