

УДК 621. 791.G21.73

Власов А. Ф., Цветков А. И., Гринь В. А.

ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ФЛЮСЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Существующие электрошлаковые процессы (электрошлаковая сварка, электрошлаковый переплав, электрошлаковое литье) осуществляются на твердом или жидком старте. При твердом старте расплавление рабочего флюса, наведение шлаковой ванны необходимого объема осуществляется в дуговом режиме. Данный способ характеризуется нестабильностью (частыми короткими замыканиями), неравномерным и длительным расплавлением флюса (низкой производительностью) [1].

При твердом старте флюс, засыпанный в кристаллизатор, расплавляется расходуемым электродом. Расплавление флюса и наведение шлаковой ванны при этом выполняется различными способами: применением электропроводного в твердом состоянии флюса АН-25, использованием прессованных экзотермических брикетов или самоплавящихся флюсовых смесей. Расход самоплавящихся флюсов обычно невелик и не превышает 2 % от массы рабочего флюса. Основная роль таких флюсов заключается в обеспечении начала расплавления флюса путем быстрого перехода от дугового к бездуговому процессу. При этом на полное расплавление флюса тратится значительное количество времени, в результате чего снижается производительность печи. За рубежом для ускорения твердого старта используется способ [2] с использованием экзотермической смеси, содержащей плавиковый шпат, алюминий, молотую окалину и перхлорат аммония. Из-за отсутствия в смеси легирующих элементов и небольшого количества окалины (20...30 %) он не позволяет существенно снизить время на расплавление всего флюса и повысить выход годного металла.

Электрошлаковое литье крупных заготовок осуществляется на печах бифилярного или трехфазного типа с использованием жидкого старта путем сифонной заливки расплавленного за пределами печи шлака в карман (при электрошлаковой сварке), в нижнюю часть кристаллизатора (при электрошлаковом переплаве) или тигля (при электрошлаковом кокильном литье). Однако трудоемкость выплавки заготовки с учетом времени расплавления флюса во флюсоплавильных печах значительно выше по сравнению с твердым стартом и потери металла донной части слитка, идущего в обреш, составляют от 5 до 10 % от общей массы слитка [1].

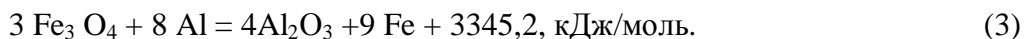
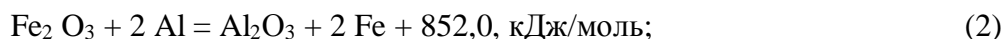
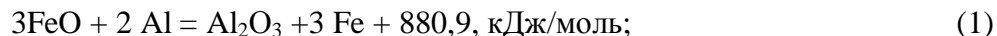
Недостатки вышеуказанных способов наведения шлаковой ванны необходимого объема могут быть устранены разработанными способами электрошлаковой сварки [3] и электрошлакового переплава [4].

Целью настоящей работы является разработка экзотермических флюсов применительно к электрошлаковым процессам, обеспечивающих соответствие при их расплавлении физико-химических свойств электрошлакового металла основному; низкое содержание водорода, серы, фосфора, неметаллических включений; электропроводность в твердом состоянии и возможность проведения по моно- и бифилярной (или трехфазной) схемам на твердом старте.

В данной работе поставленная цель решалась применением экзотермических металлофлюсовых смесей (экзотермического флюса), представляющих собой механическую смесь окалины, алюминиевого порошка, легирующих элементов в виде ферросплавов или порошков и стандартного флюса (АНФ-6 или др.).

При плавлении экзотермического флюса происходит восстановление железа (до 70 % от массы окалины), оседающего на затравку и образующего донную часть слитка. При этом устраняется расход переплавляемого электродного металла на образование этой части слитка. При введении в состав экзотермического флюса легирующих элементов в виде ферросплавов

или порошков происходит легирование восстановленного железа. Для полного расплавления вводимых в состав флюса легирующих элементов необходимо затратить соответствующее количество тепла. Таким дополнительным источником тепла является теплота, выделяющаяся при взаимодействии в основном оксидов железа с алюминием по реакциям:



Проведенными исследованиями [5] установлено, что при изменении содержания в покрытии электродов экзотермической смеси, состоящей из окалины и алюминиевого порошка, от 35 до 64 % прирост температуры составил 1280 °С и является достаточным для полного расплавления ферросплавов.

С целью определения влияния гранулометрического состава ферросплавов на их растворимость в восстанавливаемом металле из окалины и на физико-химические свойства электрошлакового металла производилось дробление FeMn, FeSi, FeCr, FeV, FeMo и просев их через соответствующие сита. Экспериментальные плавки выполнялись с применением ферросплавов с размером частиц: 0,10–0,16; 1,6–2,5 и 4,0–6,0 мм. В качестве компонента экзотермической смеси использовалась окалина, являющаяся отходом кузнечно-прессового производства с размером частиц 0,10–2,5 мм.

Расплавление экзотермического флюса производилось в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе диаметром 170/160 мм нерасходуемым электродом на твердом старте (применение расходуемого электрода нецелесообразно из-за трудно учитываемого его влияния на восстановленный металл при их перемешивании). Количество экзотермического флюса (12 кг) и флюса АНФ-6 (4 кг) обеспечивало получение слитков диаметром 160 мм и высотой 50...60 мм (рис. 1).

Приведенная на рис. 1 макроструктура исследованных слитков показывает, что полученный металл является плотным, однородным и характеризуется отсутствием в нем пор, флокенов или других дефектов.

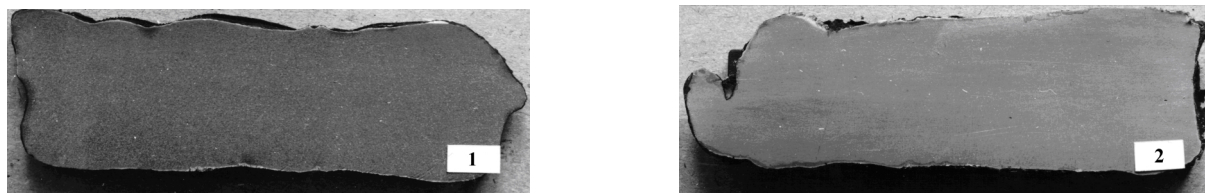


Рис. 1. Макроструктура продольных темплетов из слитков, выплавленных нерасходуемым электродом с применением ферросплавов различного гранулометрического состава: размер частиц, мм: 1 – 0,10...0,15; 2 – 4,0...6,0

Приведенные на рис. 2 серные отпечатки полученных слитков, а также данные химического анализа (табл. 1) показывают, что содержание серы в них незначительно при использовании нерасходуемого электрода. Изменение химического состава шлака за счет увеличения содержания в нем оксида алюминия не снижает десульфурующую способность фторидных флюсов. Основным поставщиком серы в электрошлаковый металл является расходуемый электрод.

В табл. 1 приведен химический состав металла исследуемых слитков, полученного при переплаве экзотермического флюса расходуемым и нерасходуемым электродом. В качестве расходуемого электрода использовались заготовки из стали 9ХФ диаметром 90 мм. Также был опробован вариант расплавления экзотермического флюса, помещенного в тонкостенную трубу. Состав экзотермического флюса во всех случаях был одинаков.

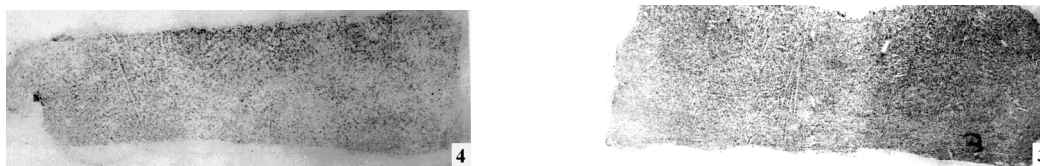


Рис. 2. Серные отпечатки продольных темплетов из слитков, выплавленных с применением ферросплавов с размером частиц 4–6 мм нерасходуемым (4) и расходуемым электродом (3)

Из табл. 1 следует, что химический состав электрошлакового металла зависит как от гранулометрического состава ферросплавов, так и способа расплавления экзотермического флюса. При применении расходуемого электрода влияние гранулометрического состава ферросплавов на химический состав металла незначительно, поэтому дальнейшие исследования проводились при размере частиц ферросплавов 0,1–6,0 мм.

Таблица 1
Влияние гранулометрического состава ферросплавов на химический состав электрошлакового металла

Зона отбора металла	Содержание элементов, масс. %						Размер частиц, мм	Примечание
	C	Si	Mn	Cr	V	S		
Торец донной части слитка	0,80	0,07	0,06	1,19	0,30	0,015	0,10...0,16	Нерасходуемый электрод
	0,86	0,13	0,11	1,31	0,27	0,016	1,60...2,50	
	0,89	0,16	0,16	1,89	0,35	0,012	4,0...6,0	
То же	0,80	0,21	0,22	1,59	0,18	0,040	0,10...0,16	Расходуемый электрод
30 мм от торца	0,84	0,17	0,18	1,65	0,15	0,038	0,10...0,16	
Торец донной части слитка	0,84	0,18	0,20	1,54	0,18	0,037	1,60...2,50	То же
	0,85	0,14	0,17	1,69	0,18	0,044	1,60...2,50	То же
То же	0,82	0,14	0,15	1,57	0,15	0,044	4,0...6,0	То же
30 мм от торца	0,84	0,14	0,15	1,67	0,15	0,040	4,0...6,0	То же
Торец донной части слитка	0,99	0,33	0,37	1,89	0,30	0,016	4,0...6,0	Труба
Расходуемый электрод	0,84	0,30	0,30	1,85	0,18	0,046	–	–

Полученные данные согласуются с результатами, приведенными в работе [6]: использование гранулированного флюса (доля фракции 0,2–5,0 мм составляла 95,6 %) по сравнению с молотым (доля фракции 0,2–5,0 мм составляла менее 67 %) увеличивает производительность установки на 15–30 % в связи с сокращением времени расплавления флюса в кристаллизаторе за счет более высокой степени гомогенности состава. Было также отмечено улучшение качества поверхности нижней части слитка и более низкое содержание газов и неметаллических включений в стали.

Известно [7], что основным источником водорода при электрошлаковом переплаве является шлаковая ванна и окружающая плавильное пространство атмосфера. Однозначно мнение исследователей [8–9] о более высоком содержании водорода в нижней части слитка.

Учитывая важность данного вопроса, исследовалось влияние способа старта, марки рабочего флюса, прокалки составляющих экзотермического флюса, соотношения масс экзотермического и рабочего флюсов на содержание в электрошлаковом металле диффузионного водорода.

Количественное определение водорода в жидком и твердом металле производилось методом вакуум-нагрева на установке Баталина. Для анализа использовались цилиндрические образцы с гладкой и чистой поверхностью без пор, раковин, ржавчины и других дефектов, видимых невооруженным глазом. Отбор жидкого металла производился кварцевыми трубками с внутренним диаметром 8,0 мм после полного расплавления флюса АНФ-1 или АНФ-6 (11 минут от начала плавки) и перед подпиткой слитка (18–19 минут от начала плавки). После взятия пробы расплавленного металла кварцевая трубка помещалась в проточную холодную воду до полного охлаждения. Закристаллизовавшийся металл в виде прутка извлекался из кварцевой трубки, делился на образцы длиной 20...25 мм и помещался в пробницы с глицерином. Продолжительность времени с момента отбора пробы жидкого металла и до погружения в эвдиометр с глицерином не превышала трех минут. Установлено, что содержание диффузионного водорода зависит в основном от способа старта, марки рабочего флюса и прокалики составляющих расплавляемой массы. Наименьшее содержание диффузионного водорода после полного расплавления флюсов (11 минут от начала плавки) достигается при жидком старте с применением флюсов АНФ-1 и АНФ-6 ($2,0...3,2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла), а также на твердом старте с применением экзотермической смеси и флюса АНФ-1 ($0,9...2,4 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла). Увеличение содержания экзотермической смеси в расплавляемой массе (экзотермическая смесь + рабочий флюс) также снижает концентрацию диффузионного водорода в электрошлаковом металле.

По данным авторов [8] при ЭШП на твердом старте содержание водорода в нижней части слитка выше, чем в середине или головной части. Эта разница достигала 3–4-х и $2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла при использовании соответственно непрокаленного и прокаленного флюсов. Повышение содержания водорода в нижних горизонтах переплавляемого металла происходит из-за поступления его из флюса.

Одним из путей ограничения поступления водорода из газовой фазы в металлическую ванну является снижение активности ионов кислорода в шлаковой ванне, которое в данной работе достигается повышением содержания в шлаковой ванне сильного комплексообразующего оксида Al_2O_3 , образующегося в результате протекания экзотермической реакции между оксидами железа и алюминием и повышающего вязкость шлакового расплава и снижающего его основность и водородопроницаемость. Кислые флюсы в меньшей степени растворяют кислород. Оксид алюминия (Al_2O_3) во флюсе АНФ-6 играет роль кислого компонента [10]. Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами работы [11], в которой установлено, что увеличение размера зерен раскислителей, вводимых в жидкий шлак, приводит к небольшому, но закономерному уменьшению содержания FeO в шлаке из-за сокращения потери их при контакте с кислородом воздуха.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что твердый старт с применением экзотермического флюса обеспечивает низкое содержание в донной части слитка диффузионного водорода.

При расплавлении экзотермического легированного флюса образуется шлак, содержащий 55–60 % CaF_2 и 40–45 % Al_2O_3 и соответствующий рекомендациям применения для электрошлакового переплава флюсов системы $\text{CaF}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$, содержащих 40...45 % Al_2O_3 .

В работе [12] приведены сведения, что наиболее эффективной оказалась смесь, состоящая из 60 % CaF_2 и 40 % Al_2O_3 , использование которой значительно улучшило макроструктуру нижней части слитка и позволило снизить донную обрезь на 1 %.

Исследования влияния экзотермического легированного флюса на физико-химические свойства (химический и газовый состав, содержание неметаллических включений, микроструктуру) восстановленного легированного металла в нижней части слитка валковых сталей марок 9ХФ, 9Х2МФ и 60Х2СМФ применительно к их электрошлаковому переплаву на твердом старте показали, что они соответствуют тем же показателям в средней и верхней части слитка [13].

В работе [14] приведены результаты исследования качества стали 5ХНМ из выплавленного штампового кубика на твердом старте по бифилярной схеме ведения процесса

с использованием электропроводного слоя экзотермического флюса. Установлено, что литой металл донной части слитка плотный; трещины, пустоты и другие дефекты отсутствуют, столбчатые кристаллы направлены почти параллельно осевой линии темплета. Испытания механических свойств исследуемого кубика показали, что они находятся на уровне ковального металла открытой выплавки, а высокие значения коэффициента анизотропии (0,91...0,98) свидетельствуют о высокой однородности литого электрошлакового металла. Химический анализ осадка, полученного способом электролитического растворения образцов, изготовленных из исследуемого штампового кубика, показал, что металл как по высоте, так и по сечению характеризуется более низким содержанием неметаллических включений, чем ковальный металл.

ВЫВОДЫ

1. Эффективным способом повышения производительности электрошлаковых процессов является использование экзотермической смеси или экзотермического флюса (окалины, ферросплавов и алюминиевого порошка в количествах достаточных для протекания экзотермических реакций).

2. В качестве компонента экзотермического флюса целесообразно использование окалины, являющейся отходом прокатного или кузнечно-прессового производства с размером частиц 0,1–2,5 мм и легирующих элементов – 0,1–6,0 мм.

3. Наличие электропроводного слоя экзотермического флюса позволяет вести электрошлаковый процесс по бифилярной или трехфазной схеме с использованием твердого старта.

4. Применение экзотермического легированного флюса не оказывает отрицательного влияния на качество металла и позволяет использовать высвобождающиеся флюсоплавильные печи под электрошлаковые процессы изготовления крупногабаритных деталей ответственного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Латаш Ю. В. Электрошлаковый переплав / Ю. В. Латаш, Б. И. Медовар. – К. : Металлургия, 1970. – 239 с.
2. Патент 1225783 МКИ В22Д, 23/06. Англия. Способ электрошлакового переплава. – №1181663 ; заявл. 26.04.1967 ; опубл. 24.03.1971.
3. Декларационный патент 36618А, Україна, МКИ В23К 25/00. Спосіб електрошлакового зварювання / Карпенко В. М., Власов А. Ф. – № 200001024 ; заявл. 13.01.00 ; опубл. 16.01.01, Бюл. № 3.
4. А. с. № 1396618 СССР, МКИ С22 В 9/18. Способ старта электрошлакового переплава / А. Ф. Власов, Г. А. Молодан, А. С. Волков, А. И. Боровков, С. С. Анциферов. – № 4090560/23-02 ; заявл. 09.07.86.
5. Власов А. Ф. Экспериментальное определение экзотермического процесса, протекающего при нагреве и плавлении электродов / А. Ф. Власов // Вісник ДДМА. – № 2 (4). – 2006. – С. 65–68.
6. Яковлев Н. Ф. Влияние гранулированного флюса на качество электрошлаковой стали / Н. Ф. Яковлев [и др.] // Сталь. – 1971. – № 3. – С. 231.
7. Интенсификация процессов дегазации и рафинирования металла при ЭШП / Б. Е. Патон и др. // Спец-электрометаллургия. – 1971. – № 13. – С. 19–23.
8. Коваль А. Е. Влияние способов дегазации флюса и защиты плавильного пространства на поведение водорода при ЭШП / А. Е. Коваль, К. К. Лямцев // Проблемы специальной металлургии. – 1979. – № 11. – С. 13–19.
9. Ребров Л. В. Изучение массопереноса водорода из газовой фазы в металл при электрошлаковом переплаве / Л. В. Ребров [и др.] // Проблемы специальной металлургии. – № 11. – С. 8–13.
10. Латаш Ю. В. О газопроницаемости сварочных шлаков при электрошлаковом процессе / Ю. В. Латаш, Б. И. Медовар // Автоматическая сварка. – 1959. – № 3. – С. 45–50.
11. Восстановление окислов железа и хрома из жидких шлаков / А. А. Плышевский [и др.] // Межвузовский сборник : Физико-химические исследования металлургических процессов металлургические расплавы, свойства и взаимодействие. – Свердловск : УПИ, 1981. – С. 37–82.
12. Кейс Н. В. Применение графитового электрода для предварительного расплавления шлаковых смесей / Н. В. Кейс, А. И. Комисаров // Сталь. – 1966. – С. 620.
13. Власов А. Ф. Физико-химические свойства валковых сталей 9ХФ, 9Х2МФ и 60Х2СМФ / А. Ф. Власов [и др.] // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ, 2004. – С. 643–646.
14. Власов А. Ф. Исследование качества литой электрошлаковой штамповой стали 5ХНМ / В. М. Карпенко, В. К. Лыса // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць ДДМА. – Краматорськ, 2004. – С. 139–144.