

УДК 621. 791.

Власов А. Ф., Заблоцкий В. К.

ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ ПЕРЕПЛАВ НА ТВЕРДОМ СТАРТЕ ПРИ МОНОФИЛЯРНОЙ СХЕМЕ ВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА

Существующие электрошлаковые процессы (электрошлаковая сварка, электрошлаковый переплав, электрошлаковое литьё) 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 [3].

Целью настоящей работы является повышение производительности стартового периода наведения шлаковой ванны необходимого объема путем применения экзотермического флюса, проводящего электрический ток в твердом состоянии, и исследование качества выплавленного электрошлакового металла.

В данной работе исследовалось влияние экзотермического флюса, представляющего собой механическую металлофлюсовую смесь окалины, алюминиевого порошка, легирующих элементов в виде ферросплавов или порошков и рабочего флюса (АНФ-6).

Основной составляющей экзотермических смесей, применяемых в сварочном и металлургическом производстве, является окалина, которая обычно составляет 70...80 массовых процентов экзотермической смеси и от её физико-химических свойств зависит, в конечном счете, качество металла шва или выплавленного металла донной части слитка.

Для исследования влияния гранулометрического состава окалины, входящей в состав экзотермического флюса, на качество литого электрошлакового металла производилась выплавка слитков (рис. 1) в стальном стационарном кристаллизаторе диаметром 170/160 мм на твердом старте [4].

Количество экзотермического и рабочего флюса (АНФ-6) в проведенных плавках было одинаково и соответственно равнялось 2,5 и 5,0 кг. Для исследований использовалась окалина с размерами частиц, мм: 0,1...2,5 (1-й слиток), 0,1...0,7 (2-й слиток) и 2,0...2,5 (3-й слиток).

Электрошлаковый процесс отливки слитков велся при монофилярной схеме подключения источника питания на режиме: $I = 4$ кА, $U = 40$ В. Шлаковая ванна в процессе электрошлакового переплава не раскислялась. Подпитка отливок в конце переплава выполнялась путем периодического изменения силы тока от 0 до 4 кА в течение 7 мин. После затвердевания шлаковой ванны слитки извлекались из кристаллизатора и остывали на воздухе.

В качестве расходуемого электрода использовался прокат диаметром 100 мм и длиной 2,3 м из стали 40, химический состав которого и электрошлакового металла приведен в табл. 1.



Рис. 1. Внешний вид электрошлаковых слитков из стали 40

Таблица 1

Химический состав исходного и электрошлакового металла

Номер отливки	Содержание элементов, %						Место отбора проб
	C	Mn	Si	S	P	Al	
Расходуемый электрод	0,42	0,67	0,28	0,021	0,021	–	–
1	0,41	0,69	0,25	0,016	0,021	0,012	низ
	0,45	0,70	0,26	0,014	0,020	0,008	середина
	0,40	0,71	0,28	0,021	0,011	0,013	верх
2	0,43	0,73	0,25	0,021	0,016	0,012	низ
	0,44	0,69	0,26	0,017	0,012	0,008	середина
	0,45	0,70	0,28	0,015	0,019	0,007	верх
3	0,41	0,67	0,29	0,011	0,018	0,009	низ
	0,41	0,67	0,25	0,011	0,019	0,007	середина
	0,41	0,67	0,30	0,012	0,015	0,012	верх
ГОСТ 977-75	0,37–0,45	0,40–0,90	0,20–0,52	≤0,06	≤0,06	–	–

Процесс наведения шлаковой ванны при выплавке 1 и 2-го слитка – стабильный и поверхность донной части слитков гладкая, а при выплавке 3-го слитка – не стабильный и не гладкая поверхность донной части слитка.

Оценка качества литой электрошлаковой стали 40 по сравнению с ковальной сталью этой же марки обычной выплавки в состоянии после нормализации с отпуском производилась по следующим критериям: стандартным механическим свойствам образцов (σ_B , σ_T , δ_5 , ψ и КСЧ) вырезанных из заготовок в продольном и поперечном направлении фронта кристаллизации; химическому составу и содержанию газов (O_2 , N_2 и $H_{ост}$) в металле; макро- и микроструктуре; концентрации серы (серным отпечаткам).

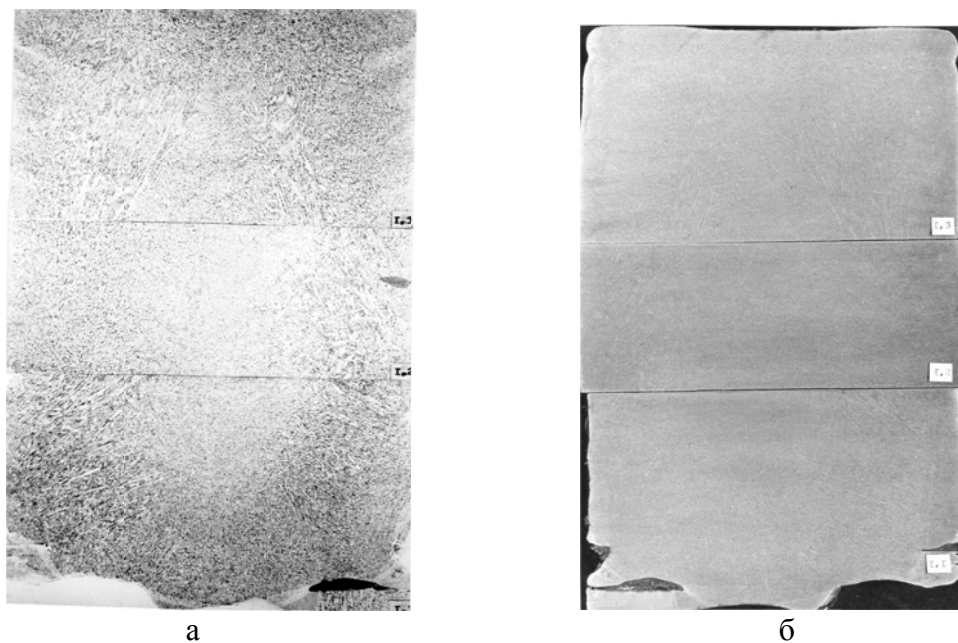
На рис. 2 в качестве примера приведено влияния гранулометрического состава окислы на концентрацию серы и микроструктуру литой стали 40.

Ликвационная неоднородность всех трех слитков (рис. 2) идентична и выражена с одной стороны в виде рассеянных точек с некоторым увеличением их числа от поверхности к центру. С другой стороны – в виде междендритной ликвации с расположением точек в межосных участках в соответствии с направлением развития кристаллизации. При междендритной ликвации точки более четкие с небольшим увеличением размеров.

Для макроанализа из исследуемых слитков вырезались продольные темплеты. Макроструктура исследовалась после травления темплетов в 50-процентном растворе соляной кислоты и воде в течение 25 мин при температуре 333...353 К в соответствии с требованиями ГОСТ 10243-75. Осмотр макротемплетов производился осмотром невооруженным глазом, а также при четырехкратном увеличении.

Физическая неоднородность во всех трех слитках идентична. Металл плотный. Химическая неоднородность выражена в виде дендритной ликвации (рис. 2, б).

Структурная неоднородность выражена в виде трех зон кристаллизации: поверхностная зона – зона мелких кристаллов; зона транскристаллизации в виде тонких игольчатых кристаллов с сильно развитыми осями 1-го порядка с различной ориентацией относительно оси слитка на различных уровнях; центральной зоны – мелких равноосных кристаллов.



(уменьшено в 2 раза)

Рис. 2. Серный отпечаток (а) и макроструктура (б) продольного темплета слитка № 1

Верхняя часть слитка у поверхности ограничена зоной тонких игольчатых кристаллов. Зона мелких равноосных кристаллов характерна для донной части слитка и суживается по направлению к затравке. Усадочная раковина отсутствует.

Из приведенного следует, что гранулометрический состав экзотермического флюса заметного влияния на макроструктуру стали не оказывает, однако с увеличением размера частиц появляются зоны мелких игольчатых кристаллов с различной их ориентацией.

Для исследования микроструктуры металла выплавленных слитков из ударных образцов поперечных темплетов изготавливались образцы размером $10 \times 10 \times 10$ мм. Исследования проводились после травления образцов в 4-процентном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Анализ микроструктур проводился на микроскопе НЕОРНОТ-21 при увеличении $\times 50$ и $\times 500$ методом сравнения. На рис. 3 в качестве примера приведены микроструктуры металла из выплавленного слитка № 1.

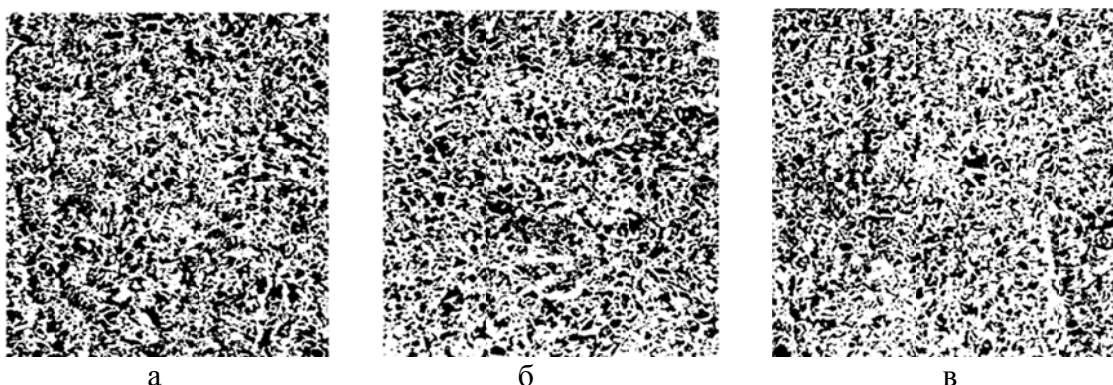


Рис. 3. Микроструктура литой электрошлаковой стали 40 (слиток № 1)

В нижней части слитка № 1 (рис. 3, в) структура равномерная, плотная, более дисперсная по сравнению со средней и верхней частью слитка. В верхней части слитка (рис. 3, а) структура более плотная и равномернее, чем в средней части слитка. В средней части слитка (рис. 3, б) структура неравномерная, встречаются крупные участки феррита.

Для определения влияния гранулометрического состава экзотермического флюса на химический состав сталей из исследуемых слитков при изготовлении образцов на статическое растяжение из поперечных темплетов бралась стружка. Полученные результаты приведены в табл. 1, из которой следует, что, в целом, химический состав исследуемых слитков характеризуется высокой однородностью и соответствует требованиям ГОСТ 977-75 для данной стали.

Обращает внимание отсутствие угара легирующих элементов: Mn и Si. Очевидно естественный угар этих элементов, присущий процессу ЭШП, компенсируется взаимодействием с оксидами железа только алюминия и возможным восстановлением марганца и кремния из шлака, в котором данные элементы находятся в виде соединений SiO_2 и MnO . Из приведенных в табл. 1 данных следует, что гранулометрический состав экзотермического флюса практически не влияет на химический состав металла по высоте слитка.

Для определения содержания газов в исследуемых слитках изготавливались образцы на газовый анализ, который проводился методом вакуум – плавки на установке конструкции ЦНИИТмаш. Средние значения полученных данных приведены в табл. 2, из которой следует, что содержание газов в исследуемых слитках изменяется незначительно. Наименьшее содержание газов наблюдалось в первом и третьем слитке, а наибольшее во втором. Очевидно, это связано с ухудшением газопроницаемости шлака с размерами частиц окалина 0,1...0,7 мм.

Металлографические исследования неметаллических включений в рассматриваемых слитках проводились на микроскопе НЕОРНОТ-2I при увеличении $\times 100$ в соответствии с ГОСТ 1778-70.

Таблица 2

Влияние гранулометрического состава экзотермического флюса на газовый состав стали 40

Номер		Содержание газов						
темплета	слитка	в см^3 на 100 г металла				%		
		окись углерода	азот	водород	всего	кислород	азот	водород
верх	1	1,70	5,01	1,38	8,09	0,0012	0,0062	0,00012
середина		0,80	4,73	2,64	8,17	0,0005	0,0060	0,00023
низ		1,28	3,94	1,13	6,35	0,0009	0,0049	0,00010
верх	2	2,74	4,68	2,51	9,93	0,0020	0,0058	0,00022
середина		1,00	5,38	3,24	9,62	0,0007	0,0067	0,00028
низ		2,44	5,54	1,51	9,49	0,0017	0,0069	0,00013
верх	3	1,19	6,49	1,26	8,94	0,0008	0,0081	0,00011
середина		0,71	5,09	1,89	7,69	0,0005	0,0053	0,00017
низ		0,80	5,42	1,98	8,20	0,0005	0,0067	0,00018

Химический анализ осадка, полученного способом растворения образцов, показал, что металл выплавленных слитков характеризуется общим низким содержанием неметаллических включений (табл. 3), представляющих собой алюмосиликатные включения с небольшим содержанием закисей железа и марганца. Гранулометрический состав экзотермического флюса не влияет на загрязненность электрошлаковой стали неметаллическими включениями.

Для определения влияния механических свойств металла исследуемых слитков из продольных и поперечных темплетов изготавливались соответствующие образцы.

Результаты испытаний приведены в табл. 4, из которой следует, что изменение гранулометрического состава экзотермического флюса в целом не оказывает существенного влияния на механические свойства литой электрошлаковой стали 40, превышают аналогичные показатели ковальной стали и находятся на уровне показателей, характерных для проката данной стали (за исключением показателей ψ и KCU из-за повышенной прочности).

Таблица 3

Состав неметаллических включений в исследуемых слитках

Номер слитка	Общее кол-во немет. включений, %	Свободная Fe ₃ O ₄ , %	Силикат, %	Состав силиката, %					Шпинель, %	Состав шпинели, %			
				SiO ₂	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃		FeO	MnO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
1	0,0070	6,87	64,97	79,29	2,64	8,81	8,81	0,44	28,16	1,22	1,22	95,53	2,03
	0,0067	10,24	55,12	78,57	3,57	7,86	9,28	0,71	34,65	20,45	0,68	78,41	0,45
	0,0063	24,27	44,50	72,72	2,73	10,00	13,64	0,91	31,23	3,88	1,55	93,26	1,30
2	0,0060	11,45	57,23	72,72	2,73	11,82	11,82	0,91	31,22	9,96	2,00	86,38	1,66
	0,0061	10,04	59,20	80,35	2,68	4,46	11,61	0,89	30,76	10,31	2,06	85,91	1,72
	0,0041	12,61	41,14	58,39	4,08	17,52	18,98	0,73	46,24	11,69	0,78	87,01	0,52
3	0,0054	10,96	48,51	72,16	3,09	10,31	13,40	1,03	40,74	7,33	2,20	89,24	1,22
	0,0055	10,45	49,22	70,80	2,65	6,19	19,50	0,88	40,33	6,48	0,65	91,29	1,08
	0,0067	7,86	58,74	78,74	2,36	7,87	10,24	0,78	33,39	6,92	1,66	90,03	1,38

Таблица 4

Механические свойства литой электрошлаковой стали 40 в зависимости от гранулометрического состава экзотермического флюса

Номер образца	Показатели механических свойств						Размер частиц, мм
	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	Ψ , %	KCU, Дж/см ²	НВ	
1	678	380	23,5	39,0	50	170	0,1...2,5
	673	386	23,6	42,4	49	170	
	663	379	21,4	39,0	50	170	
2	649	355	22,6	34,9	50	170	0,1...0,7
	637	362	22,9	34,5	50	170	
	655	363	20,4	34,0	44	170	
3	637	344	20,5	39,0	40	156	2,0...2,5
	651	365	23,1	43,0	44,0	170	
	652	346	21,8	35,0	47,0	165	
Кованая	540	280	17	38	35	156-197	ГОСТ 8479-70
Прокат	580	340	19	45	60	197	ГОСТ 1050-74

При этом различие в показателях механических свойств продольных и поперечных образцов незначительно. Несколько выше значения механических свойств металла слитка № 1 по сравнению с металлом других слитков.

Механические свойства металла исследуемых слитков характеризуются высокой однородностью как по высоте, так и по сечению слитка.

Таким образом, приведенные выше результаты исследования показывают, что гранулометрический состав экзотермического флюса в основном оказывает влияние только на процесс наведения шлаковой ванны.

В работе [5] приведены результаты исследования качества стали 5ХНМ из выплавленного штампового кубика на твердом старте с использованием 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 кованого металла открытой выплавки, а высокие значения коэффициента анизотропии (0,91...0,98) свидетельствуют о высокой однородности литого электрошлакового металла. В работе [6] приведены результаты 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 при электрошлаковом переплаве этих сталей на твердом старте, которые соответствуют тем же показателям в средней и верхней части слитка.

Результаты сравнительного испытания оптимального варианта предлагаемого способа старта и применяемых в настоящее время твердого и жидкого стартов электрошлакового переплава приведены в табл. 5.

Таблица 5

Технико-экономические показатели сравниваемых способов старта электрошлакового переплава

Технико-экономические показатели рассматриваемых способов старта		Способ старта			
		твердый		жидкий	
		металлическая стружка, алюминиевый порошок, флюс АНФ-6	предлагаемый	жидкий	предлагаемый
диаметр, мм	кристаллизатора	235/240	235/240	350	350
	электрода	150	150	190	190
режим плавки	ток, кА	5,5	5,5	7,2...7,4	7,2...7,4
	напряжение, В	48	48	48	48
время установления устойчивого режима плавки, мин		15	4	75	63
длина расплавленного электрода, мм		260	435	3080	3080
масса выплавленной отливки, кг		35,5	60,0	650	652
время плавки, мин		24	20	325	305
время полного расплавления флюса, мин		23	16	–	–
масса расплавленного флюса, кг		12	12	31	31
удельная производительность флюса, кг/мин		1,48	3,0	2,0	2,1
массовая скорость расплавления флюса, кг/мин		0,52	0,75	–	–
выход годного металла, %		85	95	90	92

ВЫВОДЫ

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). Разработан технологический процесс ускоренного наведения шлаковой ванны на твердом старте при монофилярной схеме ведения процесса. Гранулометрический состав экзотермического флюса в основном оказывает влияние только на процесс наведения шлаковой ванны. Предлагаемый способ старта ЭШП не оказывает отрицательного влияния на качество донной части слитка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латаш Ю. В. Электрошлаковый переплав / Ю. В. Латаш, Б. И. Медовар. – К. : Металлургия, 1970. – 239 с
2. Патент 1225783 Англия, МКИ В22Д, 23/06. Способ электрошлакового переплава. – №1181663 ; заявл. 26.04.1967 ; опубли. 24.03.1971.
3. Власов А. Ф. Применение окалины в электродном производстве / А. Ф. Власов, В. М. Карпенко // Сварочное производство. – 1982. – № 2. – С. 6–8.
4. А. с. 1200581 СССР, МКИ В22Д, 27/02. Способ старта электрошлакового переплава / А. Ф. Власов, Г. А. Молодан, А. С. Волков, В. В. Бежин, В. А. Волвенко (СССР). – № 3421264/25 ; заявл. 12.04.82.
5. Власов А. Ф. Исследование качества литой электрошлаковой штамповой стали 5ХНМ / В. М. Карпенко, В. К. Лысак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 139–144.
6. Физико-химические свойства валковых сталей 9ХФ, 9Х2МФ и 60Х2СМФ / сост. : А. Ф. Власов [и др.] // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 643–646.