

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ФЛЮСА НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКЕ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ

О. Г. КУЗЬМЕНКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведена оценка влияния фторидных бескремнистых флюсов АНФ-6, АНФ-25, АНФ-1П и низкремнистых АН-15, АН-15М на теплофизические и физико-химические процессы при электрошлаковой наплавке жидким металлом (ЭШН ЖМ) штампов. По результатам экспериментов можно сделать вывод о том, что для ЭШН ЖМ штампового инструмента предпочтительно использовать флюс АН-15М. Это позволяет быстро и равномерно подплавлять поверхность штампа, а также сохранить состав наплавленного металла практически неизменным в сравнении с исходным металлом стружки стали 5ХНМ при степени десульфурации до 50%.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, штампы, жидкий металл, теплофизические процессы, науглероживание, десульфурация

Возможность образования качественного соединения при электрошлаковой наплавке жидким металлом (ЭШН ЖМ) во многом определяется теплофизическими свойствами используемого флюса, от которых зависит устойчивость электрошлакового процесса, характер токораспределения в шлаковой ванне, интенсивность тепловыделения в ней и теплопередачи к металлической ванне, продолжительность и равномерность нагрева наплавляемой поверхности основного металла, степень очистки ее от оксидов [1].

Кроме того, в период ЭШН ЖМ шлак, наплавляемый металл и графит неплавящихся электродов, которыми поддерживается электрошлаковый процесс, длительное время взаимодействуют между собой при высоких температурах (до 1900 °С). Это может привести к значительному изменению состава и свойств как шлака, так и наплавленного металла, что недопустимо.

Известно, что использование основных флюсов позволяет рафинировать жидкий металл [2], однако

при этом возможно его науглероживание [3]. Степень науглероживания возрастает с увеличением содержания оксида кальция и уменьшается с повышением концентрации кремнезема в шлаке [4, 5]. По данным [4] при введении 15...20 % SiO₂ в шлак системы CaF₂-Al₂O₃-CaO науглероживание металла не происходит, а рафинирующие свойства шлака остаются хорошими. Отмечается также, что равновесное содержание углерода в жидком металле зависит от его состава [6].

Поэтому в данной работе была поставлена задача провести оценку влияния различных флюсов на теплофизические и физико-химические процессы при ЭШН, обуславливающие изменение состава металла и шлака, и определить наиболее пригодный флюс для процесса ЭШН ЖМ.

Для исследований были выбраны фторидные бескремнистые флюсы АНФ-6, АНФ-25, АНФ-1П и низкремнистые АН-15 и АН-15М (табл. 1). Температурные зависимости вязкости и электропроводности этих флюсов приведены на рис. 1, 2 [7-9].

Эксперименты проводили в ИЭС им. Е. О. Патона на установке А-550 и на Токмакском кузнечно-штамповочном заводе на установке ОБ-2213 при

Таблица 1. Стандартный химический состав исследуемых флюсов, мас. %

№ п/п	Марка флюса	CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	S	C
1	АН-15	20...23	14...18	22...25	24...29	8...11	1,5...2,5	≤ 0,85	≤ 0,05	—
2	АН-15М	16...20	29...33	36...40	6...10	≤ 2	≤ 0,9	≤ 0,8	≤ 0,07	—
3	АНФ-1П	≥ 90	≤ 5	≤ 3	≤ 2,5	—	—	≤ 0,5	≤ 0,05	≤ 0,1
4	АНФ-6	Основа	≤ 8	25...31	≤ 2,5	—	—	≤ 0,5	≤ 0,05	≤ 0,1
5	АНФ-25	50...60	10...15	12...20	2...7	10...15	—	≤ 0,5	≤ 0,07	≤ 0,1

Примечание. В состав флюса АН-15М входит 2,0...5,5 % NaF.

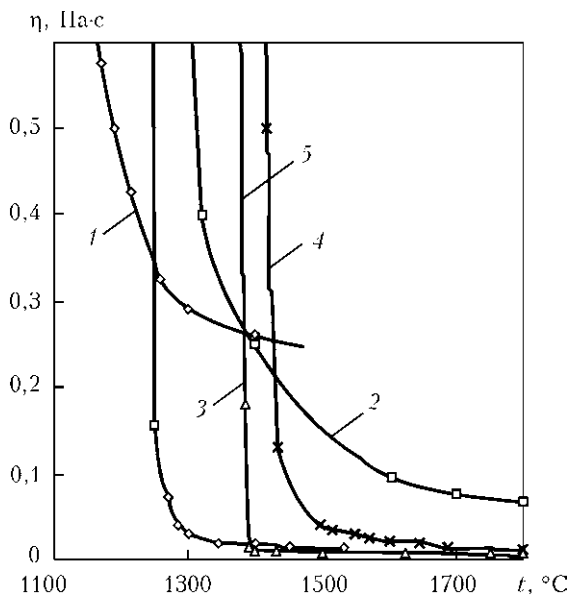


Рис. 1. Зависимость вязкости флюсов от температуры: 1-4 — здесь и далее марки флюсов по табл. 1

наплавке жидкой сталью 5ХНМ заготовок различных типоразмеров из стали той же марки. На поверхности твердой заготовки (поковка, изношенный штамп), установленной в медный водоохлаждаемый кристаллизатор, заливали предварительно расплавленный флюс—шлак и с помощью графитированных электродов производили электрошлаковый нагрев заготовки до подплавления. Затем на подготовленную таким образом поверхность через слой расплавленного шлака заливали выплавленный в индукционной печи жидкий металл. После заливки необходимого количества металла его кристаллизовали под слоем шлака, постепенно снижая мощность электрошлакового процесса.

При ЭШН температуру шлака поддерживали в пределах 1550...1800 °С при глубине шлаковой ванны 50...60 мм. Температуру шлака измеряли с помощью вольфрам-рениевой термопары с наконечником из карбонитрида бора. Температуру наплавляемой заготовки измеряли в центре и по

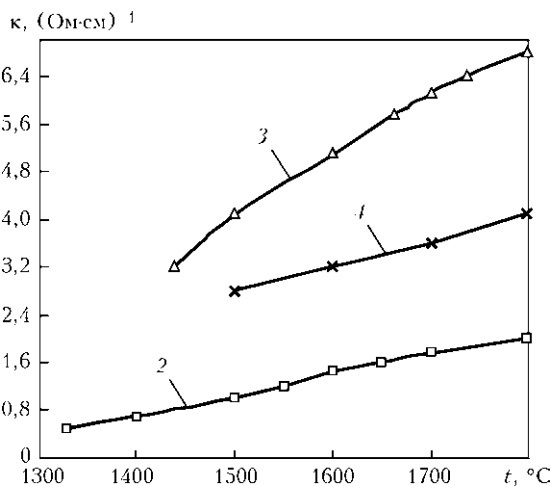


Рис. 2. Зависимость электропроводности флюсов от температуры

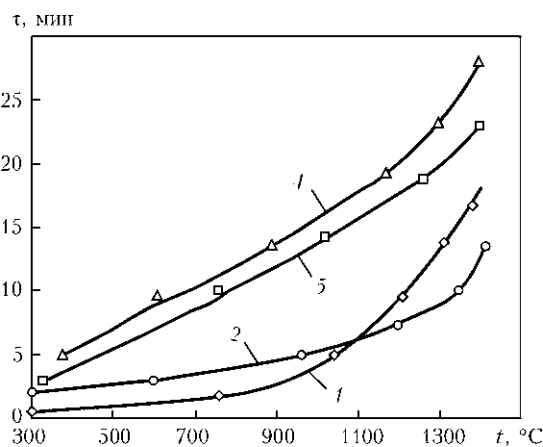


Рис. 3. Интенсивность электрошлакового нагрева поверхности штампов размерами 210×210×50 мм. Удельная мощность — $150 \cdot 10^4$ Вт/м², напряжение — 35 В

краям такими же термопарами, зачеканенными под ее поверхностью на глубине 5 мм. Пробы для химического анализа металла и шлака отбирали до и после эксперимента.

Как показали эксперименты, в случае применения более электропроводных фторидных флюсов АНФ-1П, АНФ-6, АНФ-25 электрошлаковый процесс на тех же режимах, что и при использовании низкокремнистых флюсов — неустойчив и часто переходит в дуговой. Это явление усиливается при повышении напряжения и особенно проявляется при использовании флюса АНФ-1П, имеющего наибольшую электропроводность. Кроме того, вследствие резкого изменения тока при заглублении электродов в шлаковую ванну его плавное регулирование затруднено. Поэтому при использовании фторидных флюсов для обеспечения плавного регулирования тока, повышения стабильности процесса его необходимо вести при более глубокой шлаковой ванне, чем при использовании низкокремнистых флюсов.

В сравнении с более электропроводными фторидными флюсами при использовании низкокремнистых флюсов процесс нагрева поверхности штампов идет быстрее и с меньшим расходом электроэнергии (рис. 3). Это различие наблюдается при нагреве в широком диапазоне удельных мощностей (см. рис. 4). Меньшая электропроводность низкокремнистых флюсов обуславливает

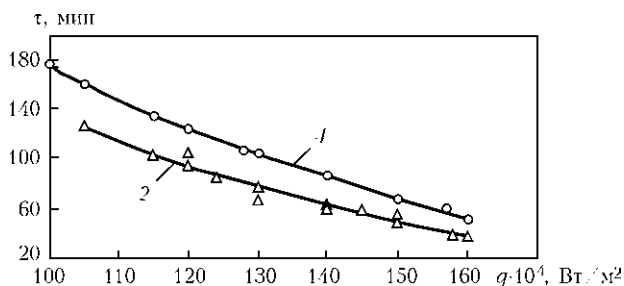


Рис. 4. Влияние удельной мощности q на продолжительность электрошлакового нагрева заготовок штампов размерами 400×200×180 мм до подплавления

Таблица 2. Изменение химического состава наплавленного металла за время процесса ЭШН ЖМ в зависимости от марки флюса

Тип наплавленного металла	Марка флюса	Массовая доля элементов и ее относительное изменение η , %							
		C	η_C	Si	η_{Si}	Mn	η_{Mn}	S	η_S
5XHM	АН-15	$\frac{0,58}{0,59}$	+1,7	$\frac{0,41}{0,53}$	+29,3	$\frac{0,48}{0,65}$	+35,4	$\frac{0,025}{0,020}$	-20
	АН-15М	$\frac{0,55}{0,56}$	+1,8	$\frac{0,40}{0,39}$	-2,5	$\frac{0,52}{0,53}$	+1,9	$\frac{0,023}{0,013}$	-43,5
	АНФ-1П	$\frac{0,55}{0,63}$	+14,5	$\frac{0,21}{0,01}$	-95,2	$\frac{0,55}{0,19}$	-65,5	$\frac{0,019}{0,009}$	-52,6
	АНФ-6	$\frac{0,52}{0,58}$	+11,5	$\frac{0,37}{0,16}$	-56,8	$\frac{0,58}{0,29}$	-50	$\frac{0,025}{0,015}$	-40,0
	АНФ-25	$\frac{0,52}{0,55}$	+5,8	$\frac{0,33}{0,18}$	-45,5	$\frac{0,61}{0,29}$	-52,5	$\frac{0,021}{0,009}$	-57,1
Сталь 5XHM (ДСТУ 3953-2000)	—	0,5...0,6	—	0,1...0,4	—	0,5...0,8	—	≤0,03	—

Примечания. 1. $\eta_s = \frac{[Э_k] - [Э_n]}{[Э_n]} \cdot 100\%$, где $[Э_n]$, $[Э_k]$ — содержание элемента соответственно до начала и после окончания процесса. 2. В числителе приведены значения для $[Э_n]$, в знаменателе — для $[Э_k]$. 3. η_C , η_S — степень науглероживания и десульфурации соответственно. 4. Знак «+» означает увеличение содержания элемента, а знак «-» — уменьшение. 5. Поскольку существенного изменения содержания хрома, никеля, молибдена не произошло, то в таблице они не указаны.

необходимость большего погружения электродов в шлаковую ванну для прохождения заданного тока и, следовательно, возможность приближать зоны активного тепловыделения к поверхности нагреваемого основного металла.

По равномерности нагрева наплавленной поверхности исследуемые флюсы можно разместить в следующей последовательности: АН-15М, АН-15, АНФ-6, АНФ-25, АНФ-1П. Так, разница температур по поверхности штампа (размером в плане 550×380 мм) при нагреве до начала подплавления под шлаком АН-15М составляет 240 °С, а под шлаком АНФ-6 — 400 °С. Это связано с тем, что при использовании менее электропроводных низкокремнистых флюсов достигается более высокая температура шлаковой ванны и происходит более интенсивное перемешивание последней, что и обеспечивает повышение равномерности нагрева.

Возможность быстрого и одновременного установления электрошлакового процесса на всех электродах, чем в значительной мере определяется равномерность нагрева наплавленной заготовки, также зависит от теплофизических свойств и состава применяемого флюса. При использовании тугоплавких флюсов после их расплавления и заливки в кристаллизатор поверхность шлаковой ванны быстро покрывается коркой, что затрудняет заглубление электродов и задерживает установление электрошлакового процесса.

При использовании более легкоплавких флюсов выполнение этих операций облегчается. Для исследуемых флюсов возможность быстрого установления электрошлакового процесса возрастает в следующем порядке: АНФ-1, АНФ-6, АН-15М, АН-15.

Анализ наплавленного металла показывает, что в результате взаимодействия с фторидными

Таблица 3. Изменение химического состава шлака за время процесса ЭШН ЖМ в зависимости от марки флюса

Марка флюса	CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	S	C
АН-15	$\frac{21,0}{18,9}$	$\frac{17,3}{18,7}$	$\frac{22,7}{22,4}$	$\frac{26,9}{24,9}$	$\frac{9,5}{9,3}$	$\frac{2,4}{2,3}$	$\frac{0,51}{0,44}$	$\frac{0,007}{0,006}$	$\frac{0,030}{0,025}$
	$\frac{20,8}{19,8}$	$\frac{29,2}{29,7}$	$\frac{39,3}{37,5}$	$\frac{9,3}{9,9}$	$\frac{0,6}{0,4}$	$\frac{0,20}{0,16}$	$\frac{0,28}{0,37}$	$\frac{0,008}{0,019}$	$\frac{0,040}{0,035}$
АНФ-1П	$\frac{90,1}{82,8}$	$\frac{5,0}{6,7}$	$\frac{1,8}{1,6}$	$\frac{2,6}{4,6}$	—	$\frac{0,25}{0,83}$	$\frac{0,11}{0,36}$	$\frac{0,007}{0,014}$	$\frac{0,040}{0,035}$
	$\frac{65,5}{62,6}$	$\frac{6,8}{8,6}$	$\frac{28,3}{26,1}$	$\frac{2,6}{5,2}$	—	$\frac{0,16}{0,30}$	$\frac{0,16}{0,29}$	$\frac{0,008}{0,018}$	$\frac{0,035}{0,030}$
АНФ-25	$\frac{55,8}{52,6}$	$\frac{13,8}{19,9}$	$\frac{14,2}{11,3}$	$\frac{2,2}{5,2}$	$\frac{12,6}{11,7}$	$\frac{0,29}{0,72}$	$\frac{0,27}{0,45}$	$\frac{0,008}{0,020}$	$\frac{0,040}{0,035}$

Примечание. В числителе приведены данные до начала, а в знаменателе — после окончания процесса.



Таблица 4. Влияние температуры и состава шлака на процесс науглероживания и десульфурации металла при ЭШН ЖМ

Марка флюса	Температура шлака, °С	Массовая доля углерода и степень науглероживания $\eta_C, \%^*$				Массовая доля серы и степень десульфурации $\eta_S, \%^{**}$			
		Расстояние от поверхности, мм				Расстояние от поверхности, мм			
		исходное	3	10	90	исходное	3	10	90
АНФ-6	1550	0,52	0,58 (11,5)	0,53 (1,9)	0,52	0,025	0,015 (40,0)	0,018 (28,0)	0,025
	1750	0,59	0,72 (22,0)	0,61 (3,4)	0,59	0,021	0,011 (47,6)	0,013 (38,1)	0,023
АН-15М	1550	0,55	0,56 (1,8)	0,55	0,55	0,023	0,013 (43,5)	0,016 (30,4)	0,023
	1800	0,58	0,6 (3,4)	0,59 (1,7)	0,58	0,020	0,010 (50,0)	0,012 (40,0)	0,020

* В скобках приведены значения степени науглероживания. ** В скобках указаны значения степени десульфурации.

шлаками АНФ-1П, АНФ-6 и АНФ-25 за время процесса произошли существенные изменения химического состава наплавленного металла (см. табл. 2). Так, содержание серы, кремния, марганца уменьшилось, а углерода — возросло. Наибольшие изменения состава металла по углероду, кремнию и марганцу отмечены при использовании флюса АНФ-1П, содержащего 95 % CaF_2 . При использовании флюса АН-15 происходит восстановление кремния, марганца и их содержание в металле возрастает на 30...35 %. Степень десульфурации и науглероживания металла не высока, что хорошо согласуется с известными данными [4].

При использовании флюса АН-15М содержание углерода, кремния и марганца в наплавленном металле практически остается неизменным. Одновременно примерно на 44 % снижается содержание серы. Описанные изменения химического состава металла согласуются с соответствующими изменениями состава шлака за время процесса наплавки (см. табл. 3).

Так, если при использовании фторидных флюсов содержание кремния и марганца в металле уменьшилось, то в шлаке содержание их оксидов возросло. Аналогично изменилось содержание серы — в металле оно уменьшилось, а в шлаке — возросло. Исключение составляет углерод, содержание которого в шлаках всегда уменьшается по сравнению с исходным, что связано с окислением его кислородом воздуха или компонентами шлака [5].

При повышении температуры шлака АНФ-6 до 1800 °С происходит интенсификация процессов науглероживания и десульфурации металла (табл. 4). Десульфурация металла усиливается также при повышении температуры шлака АН-

15М, но при этом появляется тенденция к повышению степени науглероживания металла.

Таким образом, при ЭШН ЖМ штампового инструмента предпочтительно использовать флюс АН-15М, который позволяет быстро и равномерно подплавлять поверхность штампа, а также сохранять состав наплавленного металла практически неизменным по сравнению с исходным металлом стружки стали 5ХНМ при степени десульфурации до 50 %.

1. *Электрошлаковая наплавка* / Ю. М. Кусков, В. Н. Скороходов, И. А. Рябцев, И. С. Сарычев. — М.: ООО «Наука и технологии», 2001. — 180 с.
2. *Рафинирование* стали синтетическими шлаками / С. Г. Воинов, А. Г. Шалимов, Л. Ф. Косой, Е. С. Калинин. — М.: Металлургия, 1970. — 464 с.
3. *Пономарев А. Г., Козлов Ю. Е.* О растворимости углерода в шлаках // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. — 1974. — № 5. — С. 10–14.
4. *Исследование* науглероживания металла при электрошлаковом процессе с графитированным электродом / А. Е. Воронин, Ю. В. Латаш, В. А. Николаев и др. // Спец. электрометаллургия. — 1976. — № 32. — С. 22–27.
5. Особенности процесса науглероживания чугуна при электрошлаковой обработке / Н. Н. Волкотруб, И. Ю. Лютый, А. Е. Воронин и др. // Там же. — 1978. — № 37. — С. 24–30.
6. *Биктаиров Ф. К.* Поведение углерода при электрошлаковой обработке металлов // Пробл. сварки, металлургии и родственных технологий: Сб. тр. VIII Междунар. конф., окт. 2003 г., Тбилиси. — Тбилиси: Ассоциация сварщиков Грузии, 2003. — С. 255–265.
7. *Металлургия* электрошлакового процесса / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, В. Л. Шевцов и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 248 с.
8. *Макара А. М., Мосендз Н. А.* Сварка высокопрочных сталей. — Киев: Техніка, 1971. — 140 с.
9. *Латаш Ю. В., Фетисова Т. Я., Воронин А. Е.* Исследование электропроводности и вязкости шлаков (флюсов) системы $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, применяемой в электрошлаковой технологии. Сообщение 3 // Спец. электрометаллургия. — 1985. — № 58. — С. 11–17.

Assessment of the influence of fluoride no-silicon fluxes ANF-6, ANF-25, ANF-1P and low-silicon fluxes AN-15, AN-15M on thermophysical and physico-chemical processes at electroslag surfacing with liquid metal (ESS LM) of stamping dies was performed. Experimental results lead to the conclusion that application of AN-15M flux is preferable for ESS LM of stamping dies. Its application allows quickly and uniformly melting the die surface, as well as preserving practically unchanged composition of the deposited metal compared to the initial metal of 5KhNM steel chips with the degree of desulphurization of up to 50%.

Поступила в редакцию 20.05.2012