

ЗВАРЮВАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

УДК 621.791.927

Памяти профессора, д-ра техн. наук
Константина Владимировича Багрянского

© Лещинский Л.К.¹, Матвиенко В.Н.²

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФЛЮСОВ ДЛЯ НАПЛАВКИ ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Показано, что при разработке состава флюса для наплавки ленточным электродом необходимо учитывать перемежающийся характер процесса, связанный с изменением геометрии электрода и теплофизическими свойствами шлаковой ванны. Дополнительные требования к свойствам шлакообразующей основы легирующего керамического (агломерированного) флюса определяются влиянием используемой системы легирования и содержанием введённых во флюс легирующих элементов.

Ключевые слова: наплавка, ленточный электрод, флюс, шлакообразующая основа, расплавленный шлак, вязкость, ток шунтирования, формирование валика, легирующие элементы.

Лещинський Л.К., Матвієнко В.М. Вплив складу на фізичні властивості флюсів для наплавлення стрічковим електродом. Показано, що при розробці складу флюсу для наплавлення стрічковим електродом необхідно враховувати характер процесу, що перемежається, пов'язаний із зміною геометрії електроду і теплофізичними властивостями шлакової ванни. Додаткові вимоги до властивостей шлакотворної основи легуючого керамічного (агломерованого) флюсу визначаються впливом використаної системи легування і змістом введених у флюс легуючих елементів.

Ключові слова: наплавлення, стрічковий електрод, флюс, шлакотворна основа, розплавлений шлак, в'язкість, струм шунтування, формування валика, легуючі елементи.

L.K. Leshchinskiy, V.M. Matviyenko. The influence of the flux composition on the physical properties of the fluxes used in submerged arc surfacing with strip electrode. The results of the investigation of the influence of the flux composition on the physical properties of the fluxes used in submerged arc surfacing with strip electrode are presented. The flux composition, viscosity of the molten slag and its melting rate all affect the bypass current value, the stability of the process, and the quality of the weld shape. Additional requirements to the physical properties of the ceramic fluxes used in submerged arc surfacing depend on the alloying element content of the flux.

Keywords: submerged arc surfacing, strip electrode, flux, molten slag, viscosity, bypass current, weld shape, alloying element.

Постановка проблеми. Влиянием состава флюса на стабильность процесса наплавки и формообразование сварочной ванны, формирование валика и образование дефектов в наплавленном металле определяется необходимость использования результатов изучения их физических свойств при выборе состава керамических (агломерированных) флюсов для наплавки ленточным электродом.

¹ д-р техн. наук, профессор, г. Бостон, США

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, matviyenkovn@mail.ru

Анализ последних исследований и публикаций. При наплавке ленточным электродом под флюсом значительно сложнее обеспечить стабильность процесса и качество формирования металла, чем в случае применения электродной проволоки. Резкое увеличение площади контакта электрода с расплавленным шлаком, размеров и массы шлаковой ванны приводит к росту доли тока, шунтирующего дугу через шлак, до $I_{ш} / I_H \geq 30 \dots 40 \%$, вследствие чего процесс становится смешанным (перемежающимся). Поэтому одной из важнейших характеристик флюсов для наплавки ленточным электродом, в особенности при увеличении ширины ленты, являются теплофизические свойства расплава шлака [1]. Для наплавки лентой износостойких и коррозионно-стойких слоёв во многих случаях успешно применяются сварочные флюсы АН-438А, АН-60, АН-26, АН-20. Относящийся к шлаковой системе $MgO - CaF_2 - Al_2O_3 - SiO_2$ высококремнистый (до 30 % SiO_2) активный флюс АН-26 является намного более “длинным” и вязким, чем во многих случаях обеспечивается высокое качество формирования валика и отделимость шлаковой корки.

В то же время, освоение технологии наплавки чугуновой и стальной легированной лентой потребовало создания специального низкокремнистого безмарганцовистого флюса. Флюс АН-28 солеоксидного типа разработан Г. В. Ксёндзыком на базе шлакообразующей системы $Al_2O_3 - CaO - CaF_2 - SiO_2$. С введением до 10 % диоксида кремния сохраняется низкая химическая активность флюса, однако, несколько снижается склонность к абсорбции влаги и улучшаются сварочно-технологические свойства. Проведенные нами исследования температурной зависимости вязкости флюса АН-28 показали, что несмотря на высокое содержание Al_2O_3 (36...45 %) и CaO (35...44 %), в присутствии до 15 % CaF_2 снижается температура плавления шлака (~1270 °С) и его вязкость (0,3...0,4 Па·с). Для наплавки коррозионно-стойких слоёв одним и двумя ленточными электродами предназначены флюсы АН-72 и АН-90, относящиеся к шлаковой системе $CaO - CaF_2 - Al_2O_3 - SiO_2$ с добавками MgO , TiO_2 и ZrO_2 . Высоким содержанием во флюсе АН-90 фтористого кальция CaF_2 (до 40...45 %), а также основных оксидов Ca и Mg , определяется низкая вязкость и высокая электропроводность расплава. Замеры тока шунтирования при наплавке ленточным электродом $60 \times 0,5$ мм ($I_H = 830$ А, $U = 32 \dots 34$ В, $v_H = 10,8$ м/ч) показали, что при использовании флюса АН-90 доля $I_{ш} / I_H$ достигает 50...60 %, в то время как для более вязкого и менее электропроводного флюса ОФ-10 – не более 40...45 %. Ещё выше вязкость и ниже электропроводность флюса ФЦ-18, который относится к той же шлаковой системе, что и АН-90, но с добавками Cr_2O_3 [2, 3]. Отличие вязкости, электропроводности и доли тока шунтирования дуги через шлак для флюсов АН-90 и ФЦ-18, однако, не приводит к существенному различию в качестве формирования валика при наплавке ленточным электродом. Здесь высокое качество формирования валика сочетается с хорошей отделимостью шлаковой корки (особенно, для флюса АН-90). По этим показателям флюсы АН-90 и ФЦ-18 значительно превосходят малоактивный флюс ОФ-10 шлаковой системы $MgO - CaF_2 - Al_2O_3 - SiO_2$ (диоксида кремния не более 10...12 %). Для наплавки ленточным электродом коррозионно-стойких слоёв предназначен высокоосновной агломерированный флюс ESAB ОК Flux 10.10 [4]. Шлакообразующая основа флюса, содержащая 63 % CaF_2 , 25 % Al_2O_3 , 8 % ($MgO + SiO_2$), отличается низкой вязкостью и высокой электропроводностью. Процесс наплавки в электрошлаковом режиме обеспечивает низкие значения доли участия основного металла, что позволяет осуществлять однослойную наплавку на теплостойкую сталь 2,25 % $Cr - 1$ % Mo , не опасаясь образования хрупких структур в зоне сплавления.

Цель статьи – изучение влияния состава на физические свойства флюсов для наплавки ленточным электродом.

Изложение основного материала. Результаты проведенных нами исследований и аналитического обзора свидетельствуют о важнейшей роли физических свойств шлаковой системы флюса в обеспечении требуемых характеристик процесса наплавки и качества формирования наплавленного металла. От структурно-чувствительных свойств флюса, к которым, прежде всего, относится вязкость и электропроводность (электросопротивление), зависит соотношение тока дуги и тока шлаковой проводимости. Количественно оценить это влияние целесообразно на модельном шлаке двойной системы $CaF_2 - SiO_2$ с переменным содержанием компонентов. С этой целью обработаны результаты замеров тока шунтирования, полученные при наплавке ленточным электродом $40 \times 0,5$ мм на режиме: ток 550...600 А, напряжение 30...32 В, скорость на-

плавки 12 м/ч [5]. Как видно из полученных экспериментальных данных (табл. 1), с увеличением концентрации SiO₂ в шлаке системы CaF₂ – SiO₂ повышается вязкость и уменьшается массовая скорость плавления флюса. Согласно представлениям о структуре шлаковых расплавов, с ростом содержания SiO₂ в шлаке системы CaF₂ – SiO₂ возрастает доля и усложняется структура крупных кремнекислородных комплексных анионов типа Si_xO_y^{z-} (в частности, SiO₄⁴⁻, Si₂O₇⁶⁻, Si₃O₉⁶⁻), отличающихся малой подвижностью и препятствующих перемещению более простых и подвижных ионов. При этом уменьшается число частиц – переносчиков электричества (например, Ca²⁺), снижается электропроводность шлака. Уменьшение доли тока шунтирования с ростом вязкости η шлака системы CaF₂ – SiO₂ описывается полиномом: $-0,95 \cdot \eta^3 + 1,29 \cdot \eta^2 - 0,89 \cdot \eta + 0,497$.

Таблица 1

Влияние вязкости и скорости плавления шлака системы CaF₂ – SiO₂ на долю тока шунтирования при наплавке ленточным электродом

Свойства шлака	Содержание SiO ₂ в шлаке, масс. %			
	5	15	25	35
Вязкость шлака (Па·с) при 1540 °С	0,10	0,30	0,40	0,60
Скорость плавления шлака, г/с	4,10	3,60	3,00	2,40
Доля тока шунтирования I _ш / I _н	0,42	0,34	0,27	0,22

Переходя от модельного шлака к реальным многокомпонентным шлаковым системам флюсов для наплавки ленточным электродом, влияние состава на вязкость расплавленного шлака и долю тока шунтирования целесообразно сопоставлять с качеством формирования валика и отделимостью шлаковой корки. С этих позиций целесообразно рассмотреть систему Al₂O₃ – MgO – CaF₂ – SiO₂, относящуюся к алюминатно-основно-фторидно-силикатному типу (ABFS) и являющуюся одной из наиболее перспективных для создания сварочных флюсов. Основополагающие исследования флюсов этой системы с целью выбора шлаковой основы проведены В. А. Бесхлебным [6]. Разработанные на этой основе легирующие керамические флюсы ЖСН-1 и ЖСН-2 характеризуются высокими металлургическими, сварочно-технологическими и экологическими свойствами [7]. Такая же шлакообразующая основа используется в наиболее широко известном из флюсов марки ЖСН – керамическом флюсе ЖСН-5 (ТУ 1718-043-11142306-2004).

При выборе шлакообразующей основы керамического флюса для наплавки ленточным электродом исследовались составы, которые на диаграмме плавкости системы Al₂O₃ – MgO – CaF₂ (при 10 % SiO₂) [7] расположены выше линии, соединяющей вершину CaF₂ с противоположной гранью в точке, соответствующей составу шпинели MgO·Al₂O₃ (Al₂MgO₄) с температурой плавления 2135 °С. С целью повышения вязкости и получения более «длинного» шлака (по сравнению с основой флюса ЖСН-1) в разработанных составах (№ 3 и 7, табл. 2) увеличено содержание SiO₂ за счёт уменьшения содержания Al₂O₃.

Таблица 2

Составы шлакообразующих основ исследованных флюсов

Наименование компонентов	Содержание компонентов в шлакообразующей основе, масс. %			
	№ 1	№ 3	№ 7	№ 4
Магнезит обожжённый	26	26	25	30
Глинозём	39	26	25	25
Кварцевый песок (полевой шпат)	10	22	25	20
Плавиковошпатовый концентрат	25	26	25	25

Наряду с составами шлаков № 3 и 7, в таблице 2 представлены составы шлаковой основы керамических флюсов ЖСН-1 (№ 1), а также № 4, рассматриваемого в работе [8] в качестве оптимального. Для температурной зависимости вязкости этого шлака характерна плавная, переменная («со ступеньками») скорость нарастания вязкости по закону, который описывается ку-

сочно-линейной функцией. Появление “ступенек” в работах [8, 9] объясняется дополнительным образованием шпинели Al_2MgO_4 в шлаковом расплаве при температуре выше 1200 °С. Как видно из таблицы 2, составы № 3 [10], № 7 [11] и № 4 [8] достаточно близки, значительно отличаюсь от шлакообразующей основы флюса № 1 (ЖСН-1). При этом суммарное содержание $MgO + Al_2O_3$ в составе флюса № 4 такое же, как и во флюсах № 3 и № 7. Однако отношение $MgO \div Al_2O_3$ для флюсов № 3 и № 7 составляет 1,0 (для флюса № 4 равно 1,2). Это может влиять как на образование шпинели Al_2MgO_4 , так и на изменения физических свойств флюса, вызванные другими причинами, некоторые из которых рассматривались в работе [12].

Анализ зависимости вязкости η шлака от температуры T (в координатах $\eta - T$) позволяет лишь качественно оценить скорость изменения вязкости. Количественная оценка может быть получена из графической зависимости $\lg \eta - 1/T^2$, которая носит линейный характер. Для исследованных составов керамических и плавящихся флюсов значения относительной скорости изменения вязкости шлаков получены с использованием графиков зависимости $\lg \eta - 1/T^2$, приведенных в работе [13, рис. 1]. Относительная скорость изменения вязкости шлаков определяется значением $\tg \alpha$, где α – угол наклона графической зависимости для участка, где температура шлака $T_{шл} > T_{пл}$ (табл. 3).

Таблица 3

Расчётные значения скорости изменения вязкости расплавленного шлака

Шлаковая основа (флюс)	Суммарное содержание $MgO + Al_2O_3$	Отношение $MgO \div Al_2O_3$	Температура плавления $T_{пл}$ шлака, °С	Относительная скорость изменения вязкости ($\tg \alpha$)
1	65	0,67	1475	0,64
3	52	1,00	1520	0,59
7	50	1,00	–	–
4	55	1,20	–	–
АН-26С	–	–	1080	0,83
АН-28	–	–	1260	0,48
ОФ-10	–	–	1350	0,70

Шлак № 3 характеризуется не только высокой вязкостью [13], но как видно из табл. 3, повышенной температурой плавления и низкой скоростью изменения вязкости. За счёт этого повышается технологическая стабильность керамического флюса и обеспечивается возможность наплавки ленточным электродом шириной до 60...65 мм. Более того, шлакообразующая основа позволяет (без резкого ухудшения сварочно-технологических свойств) использовать в легирующей части флюса более высокое содержание элементов (углерода, ванадия, бора), ухудшающих формообразование ванны, формирование валика и отделимость шлаковой корки. Легирующая часть керамических флюсов ЖСН-1, ЖСН-2, ЖСН-5 позволяет получить наплавленный металл типа 55Х6Г2С1 (ЖСН-1), 30Х3Г1С (ЖСН-2), 18Х6ГМФС (ЖСН-5). В отличие от этого, для наплавки изделий, работающих в условиях интенсивного абразивного износа, легирующая часть разработанного флюса [10] обеспечивает получение составов, износостойкость которых определяется высоким содержанием углерода (100Х5ГС), а также углерода и бора (70Х4Г2С2Р), что однако, не вызывает значительного ухудшения технологической стабильности процесса наплавки. Последнее особенно важно в случае длительного процесса наплавки крупных прокатных валков, когда появление дефектов в наплавленном слое строго ограничено. Выбранная шлаковая основа в керамическом флюсе [11] обеспечивает выполнение этих требований при легировании наплавленного металла из ленточного электрода и долегиrowании из флюса.

Выводы

1. На характер и показатели процесса наплавки ленточным электродом влияет зависимость доли тока шунтирования $I_{ш} / I_n$ от вязкости расплавленного шлака.
2. Для сравнительной оценки скорости изменения вязкости («длины шлака») предложено использовать графическую зависимость $\lg \eta - 1/T^2$ на участке, где температура шлака $T_{шл}$

больше температуры плавления $T_{пл}$.

3. Разработанная шлакообразующая основа флюса для наплавки ленточным электродом (система $Al_2O_3 - MgO - CaF_2 - SiO_2$) отличается повышенной вязкостью и низкой скоростью её изменения (большей «длиной шлака»).
4. Физические свойства выбранной шлакообразующей основы керамического флюса позволяют сохранить удовлетворительные сварочно-технологические свойства для широких пределов изменения состава легирующей части, а также в случае легирования из ленточного электрода с долеванием из флюса.

Список использованных источников:

1. Лещинский Л.К. Слоистые наплавленные и упрочнённые композиции / Л.К. Лещинский, С.С. Самотугин. – Мариуполь: Новый мир, 2005. – 392 с.
2. Подгаецкий В.В. Сварочные флюсы / В.В. Подгаецкий, И.И. Люборец. – К: Техніка, 1984. – 167 с.
3. Справочные материалы для дуговой сварки: Справочное пособие в 2-х т. Т. 1. Защитные газы и сварочные флюсы / Под общ. ред. Н.Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
4. Электрошлаковая наплавка ленточным электродом с использованием специальных флюсов деталей атомно-энергетического и нефтехимического оборудования / Е.Г. Старченко, В.Ю. Мастенко, Ю.С. Волобуев, В.Д. Ходаков // Сварочное производство. – 2011. – № 10. – С. 22-27.
5. Влияние шунтирования дуги расплавленным флюсом на устойчивость процесса наплавки лентой / Л.К. Лещинский, П.Ф. Лаврик, В.В. Тарасов, В.А. Бесхлебный // Сварочное производство. – 1970. – № 6. – С. 7-9.
6. Бесхлебный В.А. Исследование легирования металла при наплавке под керамическим флюсом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / В.А. Бесхлебный; Киевский политехн. ин-т. – Киев, 1970. – 24 с.
7. Бесхлебный В.А. Керамические флюсы ЖСН для износостойкой наплавки / В.А. Бесхлебный, Л.К. Лещинский // Сварочное производство. – 1973. – № 2. – С. 25-27.
8. Образование шпинели в расплаве агломерированного сварочного флюса системы $MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - CaF_2$ и её влияние на вязкость шлака / И.А. Гончаров [и др.] // Автоматическая сварка. – 2012. – № 12. – С. 21-28.
9. X-ray diffraction and SEM/EDX studies on technological evolution of the oxide-fluoride ceramic flux for submerged arc surfacing / V.E. Sokolsky [et al.] // Journal of Mining and Metallurgy. Sect. B-Metall. 48 (1) B (2012). – P. 101-113.
10. А.с. 407696 СССР, МКИ В 23 К 35/36. Керамический флюс / Л.К. Лещинский, К.В. Багрянский, П.Ф. Лаврик, В.А. Бесхлебный [и др.]. – № 1778793/25-27; заявл. 29.04.72; опубл. 10.12.73, Бюл. № 47.
11. Пат. 61711 Україна, МПК В 23 К 35/362. Керамічний флюс для зносостійкого наплавлення / В.С. Бойко, К.К. Степнов, Е.М. Шибаніц, В.М. Матвієнко [та ін.]. – № 2003042833; заявл. 01.04.03; опубл. 17.11.03; Бюл. № 11.
12. Физико-химические и технические свойства флюсов системы $CaF_2 - SiO_2 - Al_2O_3 - MgO$ / А.М. Сливинский, В.Н. Коперсак, А.М. Солоха, К.А. Ющенко // Автоматическая сварка. – 1981. – № 7. – С. 31-35.
13. Лещинский Л.К. Выбор оптимального состава керамического флюса для широкослойной наплавки / Л.К. Лещинский, В.Н. Матвиенко, К.К. Степнов // Вісник Приазов. держ. техн. у-ту. Серія: технічні науки: Зб. наук. праць – Мариуполь: ДВНЗ «Приаз. держ. техн. ун-т», 2012. – Вип. 24. – С. 211-217.

Bibliography:

1. Leshchinskiy L.K. Multilayer compositions: surfacing and hardening / L.K. Leshchinskiy, S.S. Samotugin. – Mariupol: Noviy mir, 2005. – 392 p. (Rus.)
2. Podgaeskiy V.V. Submerged arc fluxes / V.V. Podgaeskiy, I.I. Lyuborec. – K: Technika, 1984. – 167 p. (Rus.)
3. Welding materials for arc welding: Handbook Vol. 1. The shielding gases and welding fluxes / Ed.

- by N.N. Potapov. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 544 p. (Rus.)
4. Electroslag tape surfacing with special fluxes of the atomic-power and petrochemical equipment components / Ye.G. Starchenko, V.Yu. Mastenko, Yu.S. Volobuyev, V.D. Khodakov // Svarochnoe Proizvodstvo. – 2011. – № 10. – P. 22-27. (Rus.)
 5. The effect of the bypass current through molted slag on the submerged-arc surfacing process using strip electrode / L.K. Leshchinskiy, P.F. Lavrik, V.V. Tarasov, V.A. Beskhlebny // Svarochnoe proizvodstvo. – 1970. – № 6. – P. 7-9. (Rus.)
 6. Beskhlebny V.A. The investigation of the alloying of the deposited metal in submerged-arc surfacing using ceramic flux : Avtoreferat Diss. – Kiev, 1970. – 24 p. (Rus.)
 7. Beskhlebny V.A. Ceramic fluxes ZhSN for wear-resistant building-up / V.A. Beskhlebny, L.K. Leshchinskiy // Svarochnoe proizvodstvo. – 1973. – № 2. – P. 25-27. (Rus.)
 8. The influence of the hard spinel formation in the molted slag of agglomerated flux of the $MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - CaF_2$ – system on the slag viscosity / I.A. Goncharov [et al.] // Paton Welding Journal. – 2012. – № 12. – P. 21-28. (Rus.)
 9. X-ray diffraction and SEM/EDX studies on technological evolution of the oxide-fluoride ceramic flux for submerged arc surfacing / V.E. Sokolsky [et al.] // Journal of Mining and Metallurgy. Sect. B-Metall. 48 (1) B (2012). – P. 101-113.
 10. A.c. 407696 USSR, Int. Cl. B 23 K 35/36. Agglomerated flux / L.K. Leshchinskiy, K.V. Bagryanskiy, P.F. Lavrik, V.A. Beskhlebny [et al.]. – № 1778793/25-27; stated 29.04.72; publ. 10.12.73, Byul. № 47. (Rus.)
 11. Pat. 61711 Ukraine, Int. Cl. B 23 K 35/362. Agglomerated flux for surfacing / V.S. Boyko, K.K. Stepnov, E.M. Shebanits, V.M. Matvienko [et al.]. – № 2003042833; stated 01.04.03; publ. 17.11.03, Byul. № 11. (Ukr.)
 12. The physical, chemical and technical properties of the molted fluxes of the $CaF_2 - SiO_2 - Al_2O_3 - MgO$ – system / A.M. Slivinskiy, V.N. Kopersak, A.M. Solokha, K.A. Yushchenko // Paton Welding Journal. – 1981. – № 7. – P. 31-35. (Rus.)
 13. Leshchinskiy L.K. Selection of the composition of agglomerated flux for surfacing with strip electrodes / L.K. Leshchinskiy, V.N. Matviyenko, K.K. Stepnov // Bulletin of Pryazovskyi State Technical University: collection of scientific works. – Mariupol: PSTU, 2012. – V. 24. – P. 211-217. (Rus.)

Рецензент: В.И. Щегина
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 04.06.2014

УДК 621.791.927

© Матвиенко В.Н.*

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИЙ НАПЛАВКОЙ СОСТАВНЫМ ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Показано, что за счёт рассредоточения тепловложения по пятну нагрева при наплавке ленточным электродом под флюсом удаётся регулировать долю участия основного металла в наплавленном. Для процесса наплавки ленточным электродом, протекающего в перемежающемся (смешанном) режиме, характерна закономерность – уменьшение доли участия основного металла в наплавленном при увеличении тепловой мощности источника (величины тока).

Ключевые слова: широкослойная наплавка, флюс, ленточный электрод, составной ленточный электрод, глубина проплавления, слоистые композиции, доля участия основного металла.

* д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, matviyenko@mail.ru