

УДК 621.791.92

©Лещинский Л.К.¹, Матвиенко В.Н.², Степнов К.К.³**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА КЕРАМИЧЕСКОГО ФЛЮСА
ДЛЯ ШИРОКОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКИ**

Показано, что выбор шлакообразующей основы керамического флюса для широко-слойной наплавки ленточными электродами должен осуществляться с учётом дополнительных требований к теплофизическим свойствам шлака. Высокая температура плавления и вязкость флюса обеспечивают не только хорошее формирование шва, но повышают максимально допустимую токовую нагрузку и снижают расход флюса.

Ключевые слова: керамический флюс, шлакообразующая основа, температура плавления флюса, допустимая токовая нагрузка, широкослойная наплавка, ленточный электрод, формирование шва, параметры режима.

Лещинський Л.К., Матвієнко В.М., Степнов К.К. Вибір оптимального складу керамічного флюсу для широкошарового наплавлення. Показано, що вибір шлакоутворюючої основи керамічного флюсу для наплавлення стрічковими електродами повинен виконуватися, беручи до уваги додаткові вимоги до теплофізичних властивостей шлаку. Висока температура плавлення і в'язкість флюсу не тільки забезпечують добре формування шва, а також збільшують максимально можливе струмове навантаження флюсу, знижують витрати флюсу.

Ключові слова: керамічний флюс, шлакоутворююча основа, температура плавлення флюсу, припустиме струмове навантаження, наплавлення, стрічковий електрод, формування шва, параметри режиму.

L.K. Leshchinskiy, V.M. Matvienko, K.K. Stepnov. Selection of the optimal composition of ceramic flux for broad-zoned surface deposition. It was shown that selection of fired (ceramic) flux for broad-zoned surface deposition with band electrodes was to be done with due regard to additional requirements for the physical properties of the molten slag. Higher melting temperature and viscosity of the slag increased the current-carrying capacity and decreased flux consumption.

Keywords: agglomerated flux, melting point, current-carrying capacity, strip electrode, shape of the bead, operating conditions of surfacing.

Постановка проблемы. Проблема повышения качества формирования наплавленного металла и производительности процесса широкослойной наплавки под флюсом во многом связана с выбором состава шлакообразующей основы флюса.

Анализ последних исследований и публикаций. В последнее десятилетие в Украине и России резко возросло число публикаций, посвящённых разработке, изготовлению и применению агломерированных (керамических) флюсов [1, 2]. Это вызвано, прежде всего, тем, что с использованием таких флюсов достигаются требуемые характеристики сварных труб большого диаметра, изготавливаемых из высокопрочных низколегированных сталей (ВНЛС) и предназначенных для магистральных трубопроводов. Вместе с тем, создаются и изготавливаются неплавленные флюсы для сварки других изделий, для наплавки износостойких и коррозионно-стойких слоёв [3]. Преимущества керамических флюсов могут быть реализованы, если обеспечивается высокая стабильность процесса сварки (наплавки), качественное формирование шва, отделимость шлаковой корки с горячего металла, отсутствуют трещины, поры, шлаковые включения. С дополнительными требованиями к свойствам флюса связано применение широко-слойной наплавки ленточными электродами [4], что усложняет выбор шлакообразующей ос-

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

² канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ ст. научн. сотр., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

новы керамического флюса.

Изложение основного материала. При разработке новых составов агломерированных флюсов в качестве одной из перспективных рассматривается шлакообразующая система алюминатно-основного типа (АВ): $Al_2O_3 - MgO - CaF_2 - SiO_2$ [2]. С этим согласуется опыт разработки и многолетнего применения керамических флюсов типа ЖСН, основа которых содержит те же шлакообразующие компоненты и отличается высокими сварочно-технологическими свойствами [5-8]. Шлакообразующую основу флюса ЖСН (№ 1, табл. 1) можно отнести к алюминатно-основно-фторидному типу (АВФ) (точнее – к алюминатно-основно-фторидно-силикатному типу (АВФС)). Наиболее широко известный из легирующих флюсов этого типа керамический флюс ЖСН-5 изготавливается на ряде заводов сварочных материалов (ТУ 1718-043-11142306-2004). Вместе с тем, при использовании ленточных электродов шириной более 60 мм, а также расщеплённых и составных ленточных электродов возрастают требования к технологической стабильности процесса наплавки, к способности флюса обеспечить высокое качество формирования шва и отделимость шлаковой корки.

Таблица 1

Составы шлакообразующих основ керамических флюсов

Наименование компонентов	Содержание компонентов в шлакообразующей основе, масс. %			
	№ 1	№ 2	№ 5	№ 6
Магnezит обожённый	26	16	15	10
Глинозём	39	44	40	65
Полевой шпат	10	–	10	–
Плавиковошпатовый концентрат	25	40	25	25
Рутиловый концентрат	–	–	10	–

С целью улучшения технологических характеристик, состав шлакообразующей основы № 1 изменён таким образом, что увеличено содержание SiO_2 при одновременном уменьшении Al_2O_3 [9]. Однако с возрастанием концентрации SiO_2 в процессе наплавки развивается кремневосстановительный процесс, вследствие которого может снижаться технологическая прочность из-за обогащения междендритных прослоек металла шва продуктами ликвации, а также образуются неметаллические включения остроугольной формы. Такие включения провоцируют зарождение микродефектов и возникновение трещин. Поэтому важнейшей задачей является поиск путей уменьшения активности оксида кремния. Исследования термодинамических свойств шлаков системы $Al_2O_3 - MgO - CaF_2 - SiO_2$ позволили установить [10], что среди двойных систем наибольшим отрицательным значением энергии Гиббса смешения при 1800 К характеризуется система $MgO - SiO_2$. В этой системе могут образовываться твёрдые квазибинарные соединения типа Mg_2SiO_4 . Перейдя к четверной системе и рассматривая её сечение для 25% CaF_2 , удалось рассчитать [10], что в тройной системе $Al_2O_3 - MgO - SiO_2$ активность оксида кремния при 1800 К резко снижается с ростом содержания MgO в шлаке (по линиям изоактивности это снижение составляет от 0,6 до 0,1). С этих позиций получено дополнительное обоснование необходимости высокой концентрации MgO в случае повышенного содержания SiO_2 в шлакообразующей основе $Al_2O_3 - MgO - CaF_2 - SiO_2$ керамического флюса для широкослойной наплавки [9]. Кроме того, при содержании 20...25% оксида кремния в шлаковой основе, близкой к алюминатно-основному типу, состав неметаллических включений в металле шва изменяется. Образующиеся включения типа муллита ($3 Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2$), имеют не угловатую, а округлую форму [11], что в значительно меньшей степени способствует концентрации напряжений и появлению микротрещин.

В изучении теплофизики шлаковых расплавов плавяных и керамических флюсов (тем-

пературы плавления, поверхностного и межфазного натяжения, вязкости, плотности), значительный интерес представляет анализ характера изменения вязкости в диапазоне температур сварочной ванны. Так, условное понятие «длины» шлака $S_{ш}$, используется в работе [12] для математической обработки экспериментальных данных, иллюстрирующих изменение вязкости от температуры шлака. Это позволило получить численные значения границ между «короткими» ($0 < S_{ш} < 2 \text{ Па}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C}$), «средними» или «промежуточными» ($2 < S_{ш} < 20 \text{ Па}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C}$) и «длинными» ($S_{ш} > 20 \text{ Па}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C}$) шлаками. Значительно больше информации может дать анализ изменений, происходящих при нагреве и плавлении флюса. В момент, когда наступают структурные превращения, изменяется энергия активации вязкого течения, что может быть отражено на графике зависимости вязкости шлака от температуры в системе координат $\lg \eta - 1/T$ или $\lg \eta - 1/T^2$. Наличие излома на графике позволяет определить температуру плавления флюса. На рис. 1 в этой системе координат представлены данные для ряда шлакообразующих основ керамических флюсов (табл. 1), а также для плавящихся флюсов: АН-26С – алюминатно-силикатного типа (АС), АН-348А – марганец-силикатного типа (МС) и ОФ-10 – фторидно-алюминатного типа (ФА).

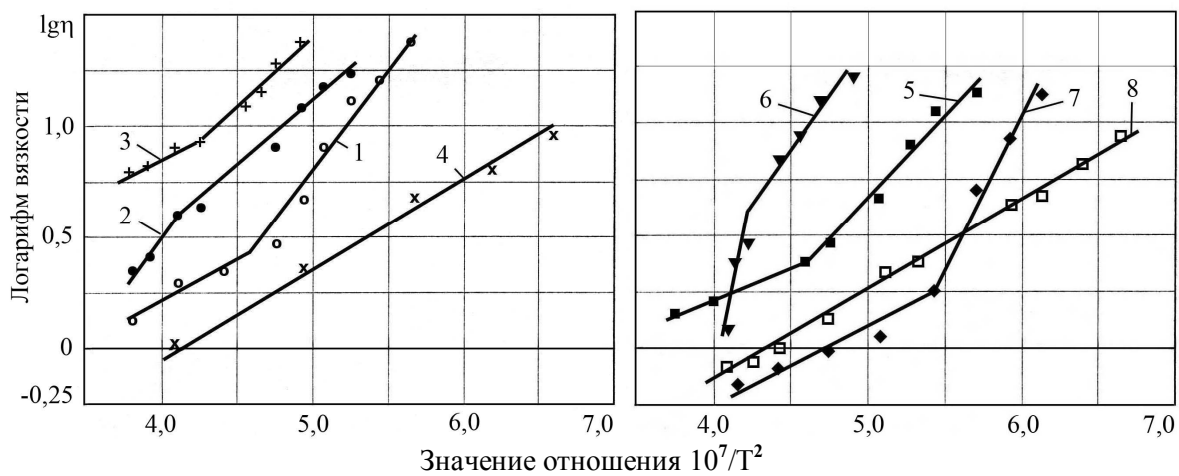


Рис. 1 – Температурная зависимость вязкости керамических и плавящихся флюсов: № 1, 2, 5, 6 – см. табл. 1; № 3 – основа флюса для широкослойной наплавки; № 4 – флюс АН-348А; № 7 – флюс ОФ-10; № 8 – флюс АН-26С

Вязкость плавящихся флюсов АН-348А (№ 4, рис. 1) и АН-26С (№ 8) с повышением температуры изменяется монотонно, что связано с образованием во время охлаждения стекловидной структуры. На графике температурной зависимости $\lg \eta - 10^7/T^2$, включая стадии размягчения и плавления, отсутствуют изломы. При нагреве преобладает влияние ковалентных межатомных связей, доля подвижных атомов растёт постепенно, а интервал плавления составляет $960...1175$ и $970...1095^\circ\text{C}$, соответственно для флюса АН-348А и АН-26С. Температура их полного расплавления $T_{пл}$, определённая по измерению электрического сопротивления, равна 1150 и 1080°C [13].

Гетерогенностью структуры неплавленных (агломерированных, керамических) флюсов, включающей как кристаллическую фазу, так и стекловидную, определяется резкое изменение их состояния при нагреве. Структурные превращения, приводящие к разрушению кристаллической фазы, вызваны лавинообразным ростом числа движущихся атомов, что отражается в появлении излома на графике $\lg \eta - 10^7/T^2$. В табл. 2 приведены значения $T_{пл}$ для шлаковых основ керамических флюсов, а также для плавящегося флюса ОФ-10. Температура плавления шлаковой основы флюса для наплавки ленточными электродами (№ 3) – 1520°C , что заметно выше, чем основы № 1. Кроме того, при наплавке ленточными электродами под керамическим флюсом со шлакообразующей основой № 3 высокому качеству формирования шва может способствовать повышенный уровень кислородного потенциала [1]. Под его влиянием на градиент поверхностного натяжения изменяется характер и интенсивность гидродинамических потоков в ванне, улучшается форма и условия кристаллизации шва [4].

При широкослойной наплавке ленточным электродом под слоем флюса понятие критического значения тока (плотности тока на единицу ширины или площади сечения ленты) часто используется для оценки минимального значения, обеспечивающего удовлетворительное формирование шва, отсутствие в нём дефектов. Вместе с тем, с увеличением ширины и толщины ленты требуемая величина тока возрастает.

Таблица 2

Температура плавления и максимальная токовая нагрузка флюса

Шлакообразующая основа (марка флюса)	Температура плавления, °С	Максимальная токовая нагрузка, А
№ 1	1475	1310
№ 2	1550	1430
№ 3	1520	1380
№ 5	1480	1320
№ 6	1540	1410
№ 7	1350	1120

Примечание: Номер шлакообразующей основы соответствует табл. 1 и рис. 1.

На рис. 2 представлены обобщённые данные экспериментальных исследований и применения в промышленности технологии наплавки под плавными и керамическими флюсами ленточными электродами Св-0Х19Н11МЗ, Св-0Х25Н13, Св-Х18Н10Т, Св-08кп. Если при наплавке лентой шириной 40...60 мм и толщиной 0,5 мм, величина тока 550...750 А, то с увеличением толщины ленты до 0,7 мм ток повышается до 650...850 А (для ленты 75 × 0,7 мм – до 1000 А). При наплавке двумя лентами 60 × 0,5 мм или составным ленточным электродом (75 × 0,5 мм) + 2·(25 × 0,7 мм) [11] величина тока достигает 1250...1300 А.

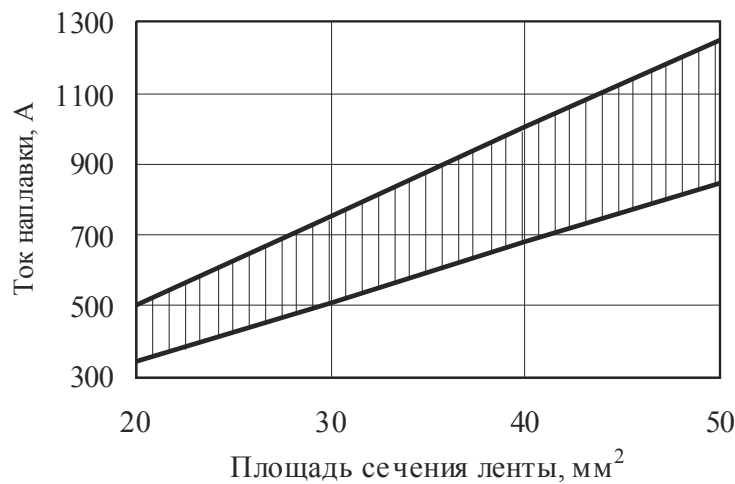


Рис. 2 – Зависимость тока от площади поперечного сечения ленточных электродов

Развитая контактная поверхность ленты облегчает подвод тока такой величины, однако в процессе наплавки под флюсом максимально допустимое значение тока, в значительной степени, ограничивается свойствами шлака. По мнению авторов работы [12], это связано с образованием в зоне горения дуги и условиями существования шлакового пузыря. Поскольку давление контрагированной дуги растёт пропорционально квадрату тока, возможность предотвратить его разрушение с ростом тока зависит от вязкости, удельной теплопроводности, теплоёмкости и плотности шлакового расплава, влияющих на толщину оболочки пузыря, а также от насыпной плотности флюса. Однако более важную роль играет температура размягчения и плавления

флюса. Используя эмпирическую зависимость $I_{\max} = 1,53 \cdot T_{\text{пл}} - 944$, полученную в работе [12], для рассматриваемых в статье флюсов рассчитаны максимально допустимые значения тока. Как видно из табл. 2, для шлаковой основы № 3, разработанной для процесса наплавки ленточными электродами [9], величина I_{\max} превышает 1520 А. Это лишь несколько ниже значений для более тугоплавких тройных шлакообразующих основ аюминатно-фторидного типа (АФ) (№ 2 и № 6), однако, заметно выше, чем для остальных составов с высокими технологическими свойствами. Тем самым расширяется возможность использовать электроды большого сечения, не ограничивая величину тока, существенно сокращая время изготовления (восстановления) крупногабаритных изделий путём наплавки.

На взаимодействие металла с керамическим флюсом влияют процессы, происходящие во время наплавки при нагреве флюса до температуры выше температуры прокали, но ниже $T_{\text{пл}}$. Комплексный термический анализ и масс-спектрокопия газовой фазы подтверждают [16], что термическая диссоциация компонентов с выделением газообразных продуктов, окисление легирующих элементов (прежде всего, раскислителей и модификаторов) сопровождаются тепловыми эффектами с образованием расплавленной фазы – металлической и шлаковой. Снизить влияние этих процессов позволяет использование в составе шихты флюса плавящихся компонентов, в частности, синтетического шлака [17], а также комплексных металлических сплавов. Эффективность и перспективность такого подхода согласуются с положениями, развиваемыми авторами работы [1].

С повышением температуры плавления шлака снижается расход флюса в процессе наплавки, связанный с образованием шлаковой корки и влияющий на объём выделений сварочного аэрозоля в зоне наплавки. С увеличением тока расход возрастает, вместе с тем, влияние тугоплавкости шлака сохраняется. Для керамических флюсов, представленных на рис. 3, снижение расхода по сравнению с флюсом ОФ-10 (№ 7) составляет ~20 %, однако, в сравнении с другими флюсами (например, АН-348А) может достигать 50...80 %. Это связано со строением плавящихся флюсов (стекловидный, пемзовидный, стеклопемзовидный) и размерами зёрен (0,25...4,0 мм), определяющими насыпную массу флюса (0,7...1,8 г/см³).

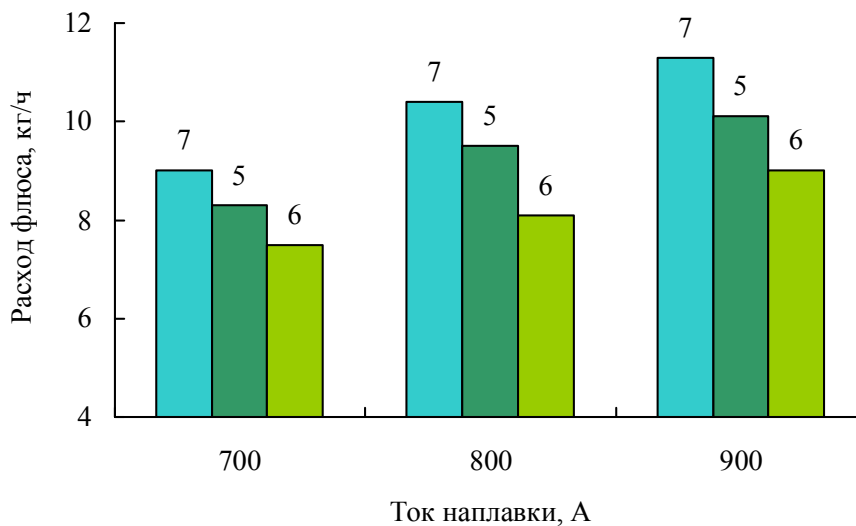


Рис. 3 – Влияние тока на расход флюсов с разной температурой плавления (обозначения – см. табл. 1 и рис. 1)

Выводы

1. На основании анализа зависимости логарифма вязкости от квадрата обратной температуры определена температура плавления шлакообразующей основы керамических флюсов.
2. Шлакообразующая основа керамического флюса, разработанного для широкослойной наплавки ленточными электродами, отличается повышенной температурой плавления и вязкостью расплава.
3. С повышением температуры плавления флюса возрастает максимальная допустимая величина

чина тока, что позволяет осуществлять наплавку составными ленточными электродами большего сечения.

4. С повышенной температурой плавления связано снижение расхода флюса и объёма выделений сварочного аэрозоля в зоне наплавки.

Список использованных источников:

1. Головки В. В. Применение агломерированных флюсов при сварке низколегированных сталей (Обзор) / В. В. Головки // Автоматическая сварка. – 2003. – № 6. – С. 37 – 44.
2. Головки В. В. Агломерированные флюсы – новая продукция ОАО «Запорожстеклофлюс» / В. В. Головки, В. И. Галинич, И. А. Гончаров, Н. Я. Осипов и др. // Автоматическая сварка. – 2008. – № 10. – С. 41 – 44.
3. Волобуев Ю. С. Разработка и опыт использования керамического флюса ФКН-7 при восстановлении деталей железнодорожного подвижного состава / Ю. С. Волобуев, А. В. Сурков, О. С. Волобуев, П. Н. Кипиани и др. // Сварочное производство. – 2008. – № 9. – С. 24 – 26.
4. Лещинский Л. К. Слоистые наплавленные и упрочнённые композиции / Л. К. Лещинский, С. С. Самотугин – Мариуполь: Новый мир, 2005. – 392 с.
5. Бесхлебный В. А. Керамические флюсы ЖСН для износостойкой наплавки / В. А. Бесхлебный, Л. К. Лещинский // Сварочное производство. – 1973. – № 2. – С. 25 – 27.
6. Багрянский К. В. Керамические флюсы для наплавки коррозионностойкого слоя ленточными электродами / К. В. Багрянский, Л. К. Лещинский, И. В. Павлов // Автоматическая сварка. – 1974. – № 11. – С. 46 – 48.
7. Подгаецкий В. В. Сварочные флюсы / В. В. Подгаецкий, И. И. Люборец – К: Техніка, 1984, 167 с.
8. 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.
9. Патент № 61711 Україна, МПК В23К 35/362 / В. С. Бойко, К. К. Степнов, Э. Н. Шебаниц, В. Н. Матвиенко и др. Керамічний флюс для зносостійкого наплавлення. № 2003042833; Заявл. 01.04.2003; Опубл. 17.11.2003; Бюл. № 11.
10. Гончаров И. А. Прогнозирование термодинамических свойств расплавов системы MgO-Al₂O₃-SiO₂-CaF₂ / И. А. Гончаров, В. И. Галинич, Д. Д. Мищенко, М. А. Шевченко // Автоматическая сварка. – 2011. – № 10. – С. 3 – 6.
11. Рымкевич А. И. Влияние химической активности флюса на свойства наплавленного металла при электрошлаковой сварке и электрошлаковом переплаве / А. И. Рымкевич, Н. Н. Потапов, М. Б. Рошин // Сварочное производство. – 2011. – № 3. – С. 3 – 8.
12. Петров С. Ю. Классификация сварочных шлаков по изменению вязкости от температуры / С. Ю. Петров, Е. А. Тимакова // Сварочное производство. – 1998. – № 8. – С. 21 – 23.
13. Кузьменко В. Г. Определение температурного интервала плавления сварочных флюсов по данным их электротермического анализа / В. Г. Кузьменко // Автоматическая сварка. – 1992. – № 10 – 11. – С. 34 – 41.
14. Авт. свид. № 1561348, СССР, МКИ В23К 9/04 / В. Н. Матвиенко, Л. К. Лещинский, В. А. Егоров, В. Е. Зеленский и др. Способ наплавки расщеплённым ленточным электродом. № 4488183/25-27; Заявл. 28.09.1988; Опубл. 03.01.1990; Бюл. № 16.
15. Devis M. L. E. Have we the right ideas about fluxes? / M. L. E. Devis, N. Bailey // Trends in steel and consumables for welding – an International Conference, London, 14 – 16 November, 1978. – Abington. – 1979. – Vol. 1. – P. 231 – 247.
16. Шлепаков В. Н. Исследование термохимических характеристик смесей дисперсных материалов методами дифференциального термического анализа / В. Н. Шлепаков, А. С. Котельчук // Автоматическая сварка. – 2011. – № 12. – С. 16 – 19.
17. Авт. свид. № 1091451, СССР, МКИ В23К 35/362 / К. К. Степнов, Л. К. Лещинский, А. И. Олдаковский, А. А. Фильчаков. Керамический флюс для наплавки. № 3504827; Заявл. 28.10.1982; Опубл. 08.01.1984; Бюл. № 17.

Bibliography:

1. Golovko V. V. Application of agglomerated fluxes in welding low-alloyed steels (Review) / V. V. Golovko // *Avtomaticheskaya Svarka*. – 2003. – № 6. – P. 37 – 44 (Rus.)
2. Golovko V. V. Agglomerated fluxes are the new products of OJSC «Zaporozhsteklolyus» plant / V. V. Golovko, V. I. Galinich, I. A. Goncharov, N. Ya. Osipov et al. // *Avtomaticheskaya Svarka*. – 2008. – № 10. – P. 41 – 44 (Rus.)
3. Volobuyev Yu. S. Development and actual experience with ceramic flux OKH-7 at reconditioning components of the consist equipment / Yu. S. Volobuyev, A. V. Surkov, O. S. Volobuyev, P. N. Kipiani et al. // *Svarochnoe Proizvodstvo*. – 2008. – № 9. – P. 24 – 26 (Rus.)
4. Leshchinskiy L. K. Multi-layer compositions: surfacing and hardening / L. K. Leshchinskiy, S.S.Samotygin. – Mariupol: Noviy mir, 2005. – 392 p. (Rus.)
5. Beskhlebny V. A. Ceramic fluxes ЖСН for wear-resistant building-up / V. A. Beskhlebny, L. K. Leshchinskiy // *Svarochnoe Proizvodstvo*. – 1973. – № 2. – P. 25 – 27 (Rus.)
6. Bagryanskiy K. V. Ceramic fluxes for corrosion-resistance surfacing by strip electrode / K. V. Bagryanskiy, L. K. Leshchinskiy, I. V. Pavlov // *Avtomaticheskaya Svarka*. – 1974. – № 11. – P. 46 – 48 (Rus.)
7. Podgaeskiy V. V. Submerged arc fluxes / V. V. Podgaeskiy., I. I. Lyuborec – K: Technika, 1984 – 167 p. (Rus.)
8. 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.)
9. Patent of Ukraine № 61711, Int. Cl. B23K 35/362 / V. S. Boyko, K. K. Stepnov, E. N. Shebanits, V. N. Matvienko et al. Agglomerated flux for surfacing // Publ. 17.11.2003 (Rus.)
10. Goncharov I. A. Prediction of thermodynamic properties of melts of $MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - CaF_2$ system / I. A. Goncharov, V. I. Galinich, D. D. Mishchenko, M. A. Shevchenko et al. // *Avtomaticheskaya Svarka*. – 2011. – № 10. – P. 3 – 6 (Rus.)
11. Rimkevich A. I. The influence of flux chemical activity on properties of deposited metal in electroslog welding and electroslog remelting / A. I. Rimkevich, N. N. Potapov, M. B. Roshchin // *Svarochnoe Proizvodstvo*. – 2011. – № 3. – P. 3 – 8 (Rus.)
12. Petrov S. Yu. Classification of submerged arc fluxes by slag viscosity / S. Yu. Petrov, E. A. Timakova // *Svarochnoe Proizvodstvo*. – 1998. – № 8. – P. 21 – 23 (Rus.)
13. Kuz'menko V. G. Determination of the temperature range of welding fluxes melting by the data of their electrothermal analysis / V. G. Kuz'menko // *Avtomaticheskaya Svarka*. – 1992. – № 10-11. – P. 34 – 41 (Rus.)
14. USSR author's cert. № 1561348, Int. Cl. B23K 9/04. / V. N. Matvienko, L. K. Leshchinskiy, V. A. Egorov, V. E. Zelenskiy et al. Method of surfacing // Publ. 03.01.1990 (Rus.)
15. Devis, M. L. E. Have we the right ideas about fluxes? / M. L. E. Devis, N. Bailey // *Trends in steel and consumables for welding – an International Conference, London, 14 – 16 November, 1978. – Abington. – 1979. – Vol. 1. – P. 231 – 247.*
16. Shlepakov V. N. Investigation of thermochemical characteristics of mixtures of disperse materials using methods of differential thermal analysis / V. N. Shlepakov, A. S. Kotelchuk // *Avtomaticheskaya Svarka*. – 2011. – № 12. – P. 16 – 19 (Rus.)
17. USSR author's cert. № 1091451, Int. Cl. B23K 35/362. / K. K. Stepnov, L. K. Leshchinskiy, A. I. Oldakovskiy, A. A. Filchakov. Agglomerated flux for surfacing // Publ. 08.01.84 (Rus.)

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

Статья поступила 22.03.2012