Статья поступила в редакцию: 14.10.2026
Статья принята к публикации: 31.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 621.791+666.3+519.6

Разработка классификационной схемы компонентов керамических флюсов и математической модели формирования химического состава металла шва при автоматической дуговой сварке

Эрматов Зиядулла Досматович
проф.
д-р. техн. наук, Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: dziyodulla@gmail.com

Гальперин Леонид Владимирович
PhD, доц.
зам. директора СП ООО «PO'LAT-QUVURSERVIS»
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: galperin74@mail.ru

Рахматуллаева Нозима Тоир кизи
старший преподаватель
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: n.raxmatullayeva@mail.ru

Development of a classification scheme for the components of ceramic fluxes and a mathematical model for the formation of the chemical composition of the weld metal in automatic arc welding

Ermatov Ziyadulla Dosmatovich
professor
DSc Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Galperin Leonid Vladimirovich
PhD, Associate Professor
Deputy Director of PO'LAT-QUVURSERVIS LLC JV
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Rakhmatullaeva Nozima Toir kizi
senior Lecturer
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Эрматов З.Д., Гальперин Л.В., Рахматуллаева Н.Т. кизи Разработка классификационной схемы компонентов керамических флюсов и математической модели формирования химического состава металла шва при автоматической дуговой сварке // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23677

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы совершенствования составов керамических сварочных флюсов для автоматизированной дуговой сварки на основе анализа свойств минерального сырья и разработки математической модели формирования металла шва. Актуальность исследования обусловлена высокой зависимостью рынка Узбекистана от импортных сварочных флюсов, отличающихся высокой стоимостью и нестабильным качеством, что определяет необходимость создания эффективных отечественных материалов. В работе проведён комплексный анализ термических характеристик сырьевых компонентов, включая температуры стеклования, плавления, протекания физико-химических процессов, затвердевания и коэффициентов температурного расширения. Предложена классификация компонентов керамических флюсов по их функциональному назначению, включающая стабилизаторы, модификаторы, газообразующие и шлакообразующие компоненты. На основе классификационной схемы разработана математическая модель, описывающая процессы легирования и формирования структуры металла шва на различных стадиях сварки. Создан модернизированный состав агломерированного флюса, обеспечивающий улучшение пластических и ударных свойств сварного соединения за счёт измельчения структуры металла и повышения степени его рафинирования по сере и фосфору. Сравнение расчётных данных модели с экспериментальными результатами показало их высокую сходимость: максимальное расхождение не превышает 5 %. Полученные результаты подтверждают возможность практического применения разработанного состава и модели при проектировании новых сварочных материалов и совершенствовании технологий автоматизированной сварки.

Abstract

The article examines the improvement of ceramic welding flux compositions for automated submerged arc welding based on the analysis of mineral raw materials and the development of a mathematical model describing weld metal formation. The relevance of the study is determined by the significant dependence of the Uzbek welding materials market on imported fluxes characterized by high cost and unstable quality, which necessitates the development of efficient domestic alternatives. A comprehensive thermal analysis of the raw materials was carried out, including the determination of glass transition, melting, solidification temperatures, physicochemical transformation intervals, and thermal expansion coefficients. A functional classification of ceramic flux components is proposed, dividing them into stabilizers, alloying modifiers, gas-forming agents, and slag-forming materials. Based on this classification, a mathematical model describing alloying processes and weld metal structure formation at different welding stages was developed. An improved agglomerated flux composition was designed, providing enhanced impact toughness and plasticity of the weld metal through grain refinement and more effective purification from sulfur and phosphorus impurities. A comparison between the calculated model predictions and experimental results demonstrated good agreement, with deviations not exceeding 5 %. The obtained findings confirm the reliability of the proposed model and the practical applicability of the developed flux composition for designing advanced welding materials and improving the efficiency and quality of automated welding technologies.

Ключевые слова: автоматическая дуговая сварка, плавленый флюс, минерально-сырьевые ресурсы, ферросплавы, минеральное сырье, коэффициент перехода элемента.

Keywords: automatic arc welding, fused flux, mineral resources, ferroalloys, mineral raw materials, elemental transfer coefficient.

Введение

Сварочное производство можно считать ключевым в сфере промышленности в разных странах мира. Именно оно обеспечивает свыше 50 % ВВП государств с развитой промышленностью. [6,2]. На внутреннем рынке сварочных материалов Узбекистана преобладает стабильность функционирования и развития. Одна н сегодняшний день на нем присутствует высокий объем флюсов для сварки иностранного производства. Это влечет за собой высокую стоимость и нестабильное (зачастую низкое) качество продукции. [3,1]

Используемые сегодня флюсы, по сути, представляют собой системы, включающие множество компонентов. Многокомпонентные составы максимизируют их необходимые свойства. Это позволяет применять готовую продукцию для решения широкого спектра задач технологического и металлургического характера. Типовые компоненты рассматриваемой продукции характеризуются высокой степенью разнородности шихтовых частиц. Это относится к размерам фракции, морфологическим свойствам, вязкости и плавкости при обработке. Разница в свойствах на всех уровнях нередко влечет за собой сложности. Последние связаны прежде всего с тем, чтобы обеспечить необходимые характеристики на выходе – для готовой продукции. Речь идет, например о стабильном горении дуги. Газовая и шлаковая функции также должны иметь заранее определенные показатели. Причем последние существенно различаются в зависимости от того о какой продукции идет речь. [5,4]

Материалы и методы исследования

Базовые характеристики сырья проанализированы методом термического анализа – был выполнен анализ температур таковых на разных стадиях. Исследованы наиболее значимые свойства сырьевых составляющих: температура стеклования (T_g), плавления ($T_{пл}$), течения химических и физических реакций при обработке, интервала затвердевания. В работе проанализирован процесс расплава с учетом заданных темпов охлаждения. Данный шаг позволил в том числе установить коэффициенты (K) температурного расширения. Оценка показателей формирования сварного шва и отделимости шлаковой корки производилась посредством изучения технической документации.

Результаты и обсуждение

Производство керамических сварочных флюсов происходит на основе применения специальной базы сырья (минерально-сырьевая). Ее можно условно разделить на такие категории как: сплавы железа, синтетические химические материалы, минеральное сырье.

При изучении шихтовых компонентов для производства рассматриваемого типа была использована специальная классификация. Для наглядности она отражена на рисунке 1 далее в статье. Готовые флюсы применяются для автоматизированной сварки.

Минералы и сырье в этом контесте можно поделить на группы. При этом основным критерием является то, для чего именно используются составляющие материалов. Исходя из этого они категоризированы на: стабилизаторы, модификаторы (для легирования), газообразователи и шлакообразующие агенты.

Что касается критериев необходимых для оптимального минерального сырья, шихта огранивается таким показателем как содержание фосфора (P) и серы (S). Если последние являются примесями, то железо (Fe) – ключевой элемент, который также учитывается. [7,8]

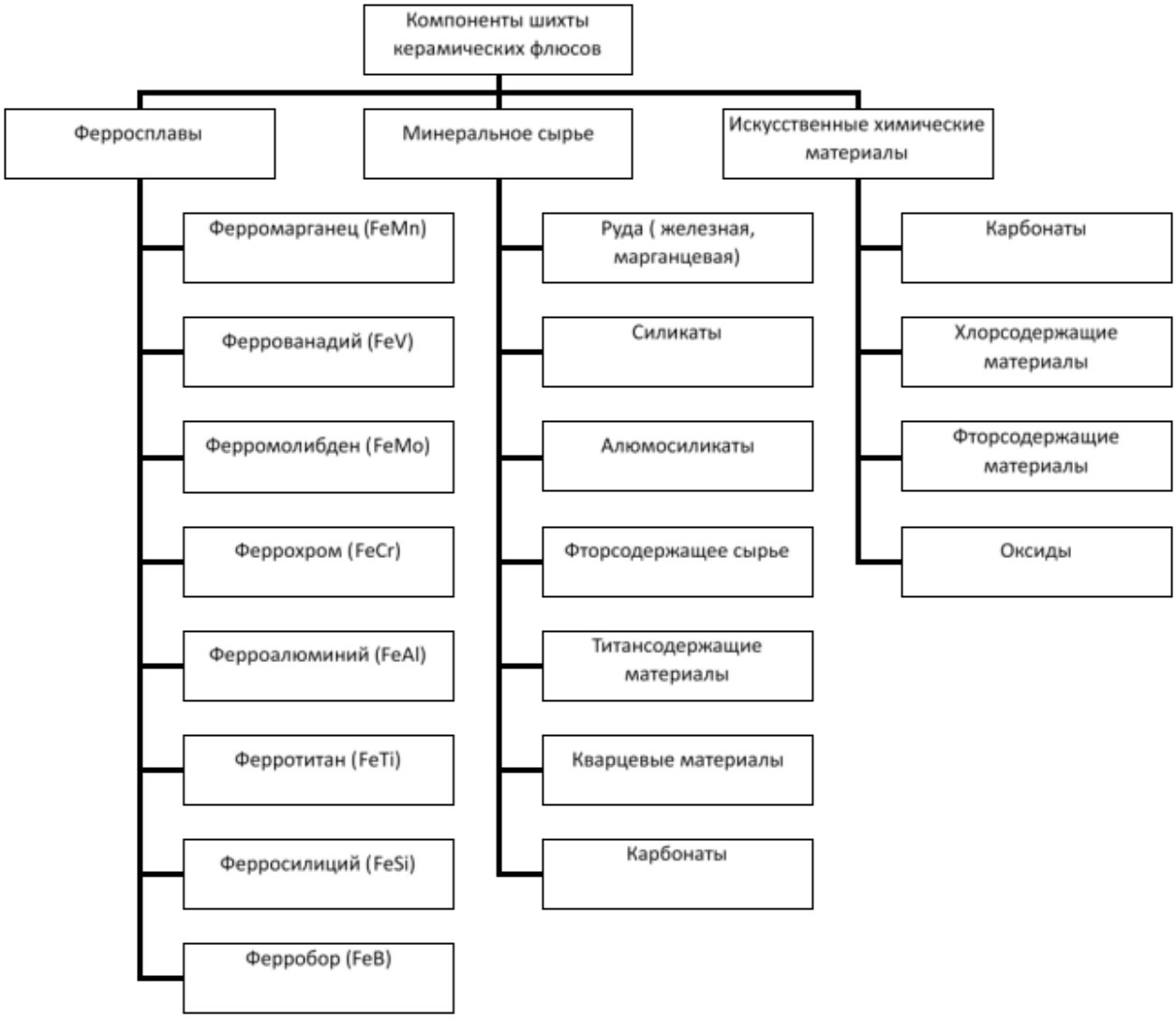

Рисунок 1. Классификация компонентов, входящих в состав керамических сварочных флюсов

Хотя в настоящее время уже достигнуты немалые результаты в сфере разработки и производства рассматриваемой продукции, в этой области до сих пор присутствует широкий спектр задач, требующих решения. В частности, требуется углубленное изучение моделей и методов применяемых для создания прогнозов относительно будущего состава шва при выполнении сварки рассматриваемым способом.

В данной статье представлены материалы по итогам исследования. Оно было выполнено для того, чтобы максимально быстро и точно (с учетом возможного масштабирования) решить актуальные задачи промышленного производства. Это,

в частности, позволило оценить процессы, протекающие на разных стадиях. Так представляется возможным объективно оценить и итоги непосредственно сварки. Речь идет о фазах:

- твердая;
- капля;
- жидкая.

Оценка такого рода позволяет установить точные значения, при которых компоненты реализуют переход. Так устанавливаются частные и средние *K*.

Разработка базируется на классификации материалов покрытия электродов. За счет нее была смоделирована рабочая матрица.

1. Средний *K* легирования $\overline{\eta}_{E_z}$. Обозначен как % (доля) массы элемента E_z, сохраняемая в присадке:

$$\overline{\eta}_{E_z} = \frac{m_{E_z}^{\text{напл}}}{m_{E_z}^{\text{смеш}}} \quad (1)$$

$m_{E_z}^{\text{напл}}$ - % E_z в металле по итогу реакции (в кг);

$m_{E_z}^{\text{смеш}}$ - % E_z в металле без учета реакций.

2. Средний *K* легирования E_z:

$$\overline{\eta}_{E_я} = a\eta_{E_z}^{\text{стер}} + b\eta_{E_z}^{\text{ч.м.}} + c\eta_{E_z}^{\text{фер}} + d\eta_{E_z}^{\text{шл.мин}} + e\eta_{E_z}^{\text{щл.иск.вещ}} \quad (2)$$

$$a + b + c + d + e = 1 \quad (3)$$

Здесь: a, b, c, d и e – показатели долевого участия компонентов в формировании присадки. Это: проволока, синтетические химические компоненты, сплавы на базе Fe, минералы и восстановленный металл.

$$\eta_{E_z}^{\text{св. пр}} = 1 - k_1^{E_z}, \quad (4)$$

$$\eta_{E_z}^{\text{ч.м.}} = 1 - k_2^{E_z}, \quad (5)$$

$$\eta_{E_z}^{\text{фер}} = 1 - k_3^{E_z}, \quad (6)$$

$$\eta_{E_z}^{\text{шл.мин.}} = k_4^{E_z}, \quad (7)$$

$$\eta_{E_z}^{\text{шл.иск.вещ}} = k_5^{E_z}, \quad (8)$$

$\eta_{E_z}^{\text{св.пр}}$,$\eta_{E_z}^{\text{фер}}$, $\eta_{E_z}^{\text{шл.мин.}}$ и $\eta_{E_z}^{\text{шл.иск.вещ}}$ - частные *K* легирования E_z в присадку из проволоки, шлака и сплавов. Шлаки являются побочным продуктом реакций минералов и синтетических составляющих.

Где:$k_1^{E_z}$ - трактуется как % E_z проволоки. Последняя подвергается окислению за счет влияния на нее шлаков и газов.

$k_2^{E_z}$ - % E_z металлической составляющей. Она также, окисляется за счет влияния факторов, указанных выше.

$k_3^{E_z}$- описывает % оксида E_z неметаллической составляющей (мин. сырье). $k_3^{E_z}$ легируется в результате течения восстановительных процессов на этапе 2 (капля).

$k_4^{E_z}$- характеризует аналогичный предыдущему показатель для синтетических химикатов. Легирование здесь производится таким же образом.

3. Масса элемента в присадке:

$$m_{E_z}^{\text{напл}} = m^{\text{св.пр.}} \cdot \frac{E_z^{\text{св. пр}}}{100} + \sum_{k=1}^{l} m_k^{\text{фер}} \cdot \frac{E_z^{\text{фер}}}{100} + \sum_{k=1}^{p} m_k^{\rightleftarrows \text{шл.мин}} \cdot \frac{E_z^{\text{шл.мин}}}{100} +$$

$$+ \sum_{k=1}^{s} m_k^{\rightleftarrows \text{шл.иск.вещ.}} \cdot \frac{E_z^{\text{шл.иск.вещ.}}}{100} = m_{E_z}^{\text{св. пр.}} + m_{E_z}^{\text{фер}} + m_{E_z}^{\text{шл.мин.}} + m_{E_z}^{\text{шл.иск.вещ.}}, \quad (9)$$

$m_{E_z}^{\text{св.пр.}}$, $m_{E_z}^{\text{фер}}$, $m_{E_z}^{\text{шл}}$ масса E_z в проволоке, Fe-сплавах, масса, восстановленная из прочих компонентов без включения Fe.

4. *K* легирования E_z.:

$$\bar{\eta}_{E_z} = \frac{[E_z]_{\text{н.м.}}}{a[E_z]_{\text{св.пр.}} + b[E_z]_{\text{фер.}} + \text{c}[E_z]_{\text{шл.мин.}} + d[E_z]_{\text{шл.иск.вещ.}}} \quad (10)$$

$[E_z]_{\text{н.м.}}$- исходный % E_z в присадке по итогам химического анализа;

$[E_z]_{\text{стер}}$- % на входе E_z в проволоке;

$[E_z]_{\text{фер}}$- первоначальный % E_z Fe-сплава, интегрированного в состав флюса;

$[E_z]_{\text{шл.мин}}$- базовый % E_z при 100 % восстановлении оксида $E_{zn}O_m$ из минералов шлака;

$[E_z]_{\text{иск.вещ.}}$- изначальный % E_z в химически чистых веществах, интегрированных в состав;

5. Масса компонента в расплаве:

$$m_{E_z} = \frac{m_{\text{св.ванны}} \cdot [E_z]_{\text{распл}}}{100} \quad (11)$$

$m_{\text{св.ванны}}$– масса расплава (в кг); $[E_z]_{\text{распл}}$– содержание E_z в нем же (в % от массы).

В ходе работы создан модернизированный состав агломерированного флюса. Он отличается от традиционных аналогов более совершенными показателями относительно ударных и пластических качеств шовного металла на выходе. Это очень важно для повышения качества и конкурентоспособности готовой продукции. Новый состав (в %): мрамор – 16,0–19,0, кварцевый песок (SiO_2) – 42,6–44,8, плавиковый шпат (CaF_2) – 10,3–12,4, каолин обогащенный – 9,8–11,4, ферросиликомарганец (FeMnSi)– 20,9–21,1.

Необходимый эффект обеспечен за счет того, что состав разработки обеспечивает значительное изменение структуры продукта на уровне компонентов. В итоге она становится более мелкой. Также таким образом формируются новые локации кристаллизации и шовного рафинирования по примесям. Последние обозначены в начале статьи. Таким образом разработка может использоваться в промышленных масштабах.

Заключение

Созданная и описанная в статье классификационная схема шихтовых компонентов керамических флюсов, используемых при автоматизированной дуговой сварке, реализует возможность первичного анализа компонентов шихты. Сравнительные расчетные показатели математической модели, которая отражает процесс формирования структуры шовного металла при сварке указанного типа, полностью соответствуют экспериментальным данным. Максимальные расхождения между ними составляют до 5 %, что допустимо. Показатели модели получены на основе классификационной схемы составных компонентов керамических флюсов.

Разработанный состав обеспечивает оптимальные характеристики металла шва в контексте пластичности и ударных свойств. Данная цель достигнута благодаря рафинированию шва по сере и фосфору. Способствует ее достижению и измельчение его структуры через создание дополнительных центров кристаллизации.

Список литературы

1. Кузнецов М.А. Нанотехнологии и наноматериалы в сварочном производстве (Обзор) / М.А. Кузнецов, Е.А. Зернин // Сварочное производство. – 2010. – № 12. – С. 23–26.
2. Моравецкий С.И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке (обзор)Ч. 1. Механизм химического сцепления шлаковой корки с металлом шва // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – С. 32–37.
3. Моравецкий С.И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке (Обзор). Ч. 2. Характер влияния основных факторов на отделимость шлаковой корки // Автоматическая сварка. – 2011. – № 2. – С. 22–27.
4. Подгаецкий В.В., Кузьменко В.Г. Сварочные шлаки. Справочное пособие. –Киев. – 1988. – 253 с.
5. С.В. Наумов, А.Е. Канина, А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов. О фракционном составе сварочных флюсов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 2. – С. 166–169.
6. Ю.В. Адкина, А.И. Николаев, В.Б. Петров, Н.М. Путинцев. Легирующие элементы в минеральных и синтетических компонентах сварочных материалов // Журн. прикл. химии. – 1964. – Т. 83, № 12. – С. 1960–1964.
7. Khudoyorov S.S., Galperin L. V, Dunyashin N.S., Ermatov Z.D., Rahmatullayeva N.T., Abdullaev M.Z. Investigation of the interaction of metal with complex gases in the development of the composition of ceramic fluxes for automatic arc welding of low-carbon and low-alloy steels // International Journal Of Advanced Research in Science, Engineering and Technology – India. – 2022. – T. 9, № 10. – P. 19908–19913.
8. Khudoyorov S.S., Galperin L. V, Dunyashin N.S., Ermatov Z.D., Saidakmatov A.S., Abdurakhmonov M.M. Study interaction of molten metal and slag in arc welding // International Journal Of Advanced Research in Science, Engineering and Technology – India. – 2022. – T. 9, № 9. – P. 19771–19775.

References

1. Kuznetsov M.A., Zernin E.A. [Nanotechnologies and nanomaterials in welding production (Review)] // Svarochnoe proizvodstvo. – 2010. – No. 12. (In Russ.).
2. Moravetskij S.I. [Detachability of the slag crust in arc welding (Review). Part 1. Mechanism of chemical adhesion of the slag crust to the weld metal] // Avtomaticheskaya svarka. – 2011. – No. 1. (In Russ.).
3. Moravetskij S.I. [Detachability of the slag crust in arc welding (Review)]. Ch. 2. Kharakter vliyaniya osnovnykh faktorov na otdelimost' shlakovoj korki // Avtomaticheskaya svarka. – 2011. – No. 2. (In Russ.).
4. Podgaetskij V.V., Kuz'menko V.G. [Welding Slags. Reference Manual. – Kiev]. – 253 s. – 1988. (In Russ.).
5. S.V. Naumov, A.E. Kanina, A.M. Ignatova, M.N. Ignatov. O fraktsionnom sostave svarochnykh flyusov // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya. – 2013. – No. 2. (In Russ.).
6. Yu.V. Adkina, A.I. Nikolaev, V.B. Petrov, N.M. Putintsev. Legiruyushchie elementy v mineral'nykh i sinteticheskikh komponentakh svarochnykh materialov // Zhurn. prikl. khimii. – 1964. – Vol. 83, No. 12. (In Russ.).
7. Khudoyorov S.S., Galperin L. V, Dunyashin N.S., Ermatov Z.D., Rahmatullayeva N.T., Abdullaev M.Z. Investigation of the interaction of metal with complex gases in the development of the composition of ceramic fluxes for automatic arc welding of low-carbon and low-alloy steels // International Journal Of Advanced Research in Science, Engineering and Technology – India. – 2022. – Vol. 9, No. 10. – P. 19908–19913.
8. Khudoyorov S.S., Galperin L. V, Dunyashin N.S., Ermatov Z.D., Saidakmatov A.S., Abdurakhmonov M.M. Study interaction of molten metal and slag in arc welding // International Journal Of Advanced Research in Science, Engineering and Technology – India. – 2022. – Vol. 9, No. 9. – P. 19771–19775.