

**УДК 621.326**

**Дмитро Васильєв; Сергій Максимов; Галина Фадєєва; Алла Радзівська**  
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

### **ВПЛИВ ГАЗО-ШЛАКОВИХ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОДНИХ МАТЕРІАЛІВ НА СТАБІЛЬНІСТЬ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ДУГИ ПРИ МОКРОМУ ПІДВОДНОМУ ЗВАРЮВАННІ**

Анотація. Стаття присвячена питанню забезпечення стійкого горіння дуги при мокрому підводному зварюванні, що є ключовим для створення ефективних електродних матеріалів та вдосконалення технологічного процесу. Основна увага приділяється підбору оптимального складу шихти зварювальних матеріалів з використанням методів планування експериментів. Розглянуто три шлакові системи:  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$ ,  $\text{CaCO}_3\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$ ,  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-CaCO}_3$ . За допомогою програмного забезпечення STATISTICA та симплекс-центроїдного плану досліджено вплив компонентів на зварювально-технологічні характеристики покриттів, такі як формування валиків, розбризкування, відділення шлакової кірки. Результати показали, що найкращими властивостями володіють склади системи  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$  зі співвідношенням  $\text{CaF}_2/\text{TiO}_2$  близько 1/1. Додавання флюоритового концентрату та польового шпату до рутилової шихти покращило зовнішній вигляд швів, легкість відокремлення шлакової кірки та зменшило розбризкування. Досліджено також рутиловмісну систему  $\text{TiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-K}_2\text{O-3Al}_2\text{O}_3\text{-6SiO}_2$ , де компоненти  $\text{K}_2\text{O-3Al}_2\text{O}_3\text{-6SiO}_2$  представлені польовим шпатом і слюдою. Підібрані склади покриттів доповнено нікелевим та марганцевим порошками для компенсації втрати легуючих елементів під час зварювання. Отримані результати допоможуть підібрати ефективні склади електродних покриттів для забезпечення стійкого горіння дуги при мокрому підводному зварюванні.

Ключові слова: дуплексні сталі, мокре підводне зварювання, стабільність процесу горіння дуги, газшлакова складова електродних матеріалів, система легування металу шва.

**Dmytro Vasilyev; Serhii Maksimov; Galina Fadeyeva; Alla Radziewska**

### **THE INFLUENCE OF GAS-SLAG COMPONENTS OF ELECTRODE MATERIALS ON THE STABILITY OF THE ARC BURNING PROCESS DURING UNDERWATER WELDING OF DUPLEX STEELS**

Abstract. The article is dedicated to ensuring stable arc burning during underwater wet welding, which is crucial for developing effective electrode materials and improving the technological process. The main focus is on selecting the optimal composition of the welding material charge using experimental design methods. Three slag systems were considered:  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$ ,  $\text{CaCO}_3\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$ , and  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-CaCO}_3$ . With the help of STATISTICA software and a simplex-centroid design, the influence of components on the welding-technological characteristics of coatings, such as bead formation, spatter, and slag removal, was investigated. The results showed the best properties of the  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$  system compositions with a  $\text{CaF}_2/\text{TiO}_2$  ratio of approximately 1/1. The addition of fluorite concentrate and feldspar to the rutile charge improved the appearance of the welds, ease of slag removal, and reduced spatter. A rutile-containing system,  $\text{TiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-K}_2\text{O-3Al}_2\text{O}_3\text{-6SiO}_2$ , was also studied. The components  $\text{K}_2\text{O-3Al}_2\text{O}_3\text{-6SiO}_2$  were represented by feldspar and mica. The selected coating compositions were supplemented with nickel and manganese powders to compensate for the loss of alloying elements during welding. The significant findings of this research will play a crucial role in the selection of effective

electrode coating compositions, ensuring stable arc burning during the challenging process of underwater wet welding.

Keywords: duplex steels, wet underwater welding, stability of the arc burning process, gas slag component of electrode materials, weld metal alloying system.

Забезпечення стійкого горіння дуги – є одним із ключових питань при створенні електродних матеріалів, розробки або удосконалення технологічного процесу зварювання. Це особливо актуально для мокрого підводного зварювання, коли дуга горить безпосередньо у водному середовищі. Стійкість процесу зварювання визначається перш за все стійкістю горіння зварювальної дуги. Під стійкістю горіння дуги зазвичай розуміють сталість у часі її основних електричних параметрів: зварювального струму ( $I_{зв}$ ) та напруги дуги ( $U_{д}$ ). В свою чергу стійкість горіння дуги залежить як від зовнішніх факторів, так і від внутрішніх, тобто від складу самої плазми дуги. Стійкість горіння зварювальної дуги при інших рівних умовах значною мірою визначається видом статичних і динамічних характеристик джерела живлення дуги. Для стабільного горіння дуги потрібна рівність струму і напруги дуги струму і напрузі джерела живлення.

Для вибору складів покриттів, придатних для мокрого підводного зварювання з'єднань дуплексної сталі 2205, були досліджені три шлакових системи  $CaF_2$ - $TiO_2$ - $KAlSi_3O_8$ ,  $CaCO_3$ - $TiO_2$ - $KAlSi_3O_8$ ,  $CaF_2$ - $TiO_2$ - $CaCO_3$ .

Використання методів планування експериментів [1] дозволяє значно скоротити обсяг експериментів при вивченні багатокомпонентних систем, при цьому випадає нагода графічної інтерпретації результатів. У нашому випадку трикомпонентної суміші ми скористалися методом планування експериментів за програмою STATISTICA.

На стартовій панелі вибираємо Плани для сумішей і далі вибираємо Симплекс-центроїдний план з мінімальною кількістю дослідів, рівною 10. Як 10 відгуків служать отримані експериментальним шляхом значення зварювально-технологічних характеристик покриттів (рис. 1-2):

- формування зварних валиків (схильність до розбризкування).
- запис режимів зварювання і статистична обробка результатів вимірювань  $I_{зв}$  і

$U_{д}$ .

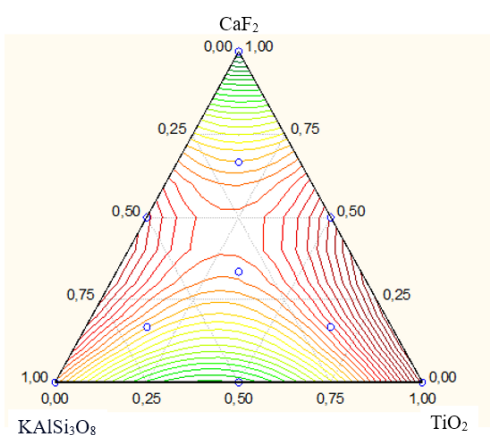


Рисунок 1 – Розбризкування при наплавленні

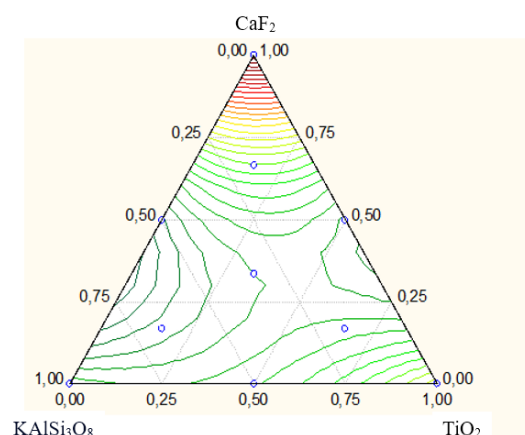


Рисунок 2 – Коефіцієнти варіації напруги дуги

Аналіз представлених досліджень показав, що найкращими інтегральними показниками володіють склади системи  $CaF_2$ - $TiO_2$ -  $KAlSi_3O_8$ , а співвідношення  $CaF_2/TiO_2$  наближається до 1/1.

Дослідні наплавлення виконувалися в лабораторному басейні на глибині 0,5 м. Джерело живлення – PS-5000. Струм зварювання – 200 А, полярність зворотна.

Запис режимів зварювання виконувався за допомогою комп'ютерної програми, яка дозволяла отримувати статистичні дані про електричні параметри процесу зварювання.

В процесі дослідження впливу газо-шлакових компонентів на властивості електродних матеріалів для підводного зварювання ми працювали над вирішенням наступних питань:

1. Підбір оптимального складу шихти зварювальних матеріалів, а саме:
  - вибір компонентів складу шихти ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та інших);
  - варіювання вмісту компонентів;
  - дослідження стійкості горіння дуги під водою.
2. Дослідження металургійних властивостей:
  - вплив складу флюсу на перенесення електродного металу в зварну ванну;
  - фазовий склад металу шва;
  - структуроутворення в зоні термічного впливу.

За результатами комплексного тестування був обраний оптимальний склад шлакової системи для електродів.

Метод планування досліджень дозволив скоротити обсяг експериментів при дослідженні багатокомпонентних систем. В даному випадку для трикомпонентної суміші було обрано симплекс-центроїдний план з 10 експериментами. Як 10 відгуків використані експериментально отримані значення зварювально-технологічних характеристик покриттів (рис. 3-4).

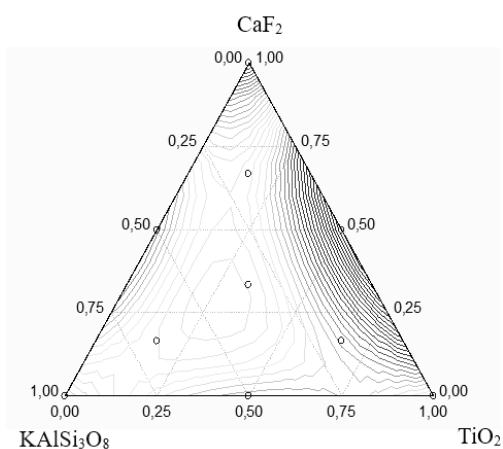


Рисунок 3 – Формування наплавлених валиків

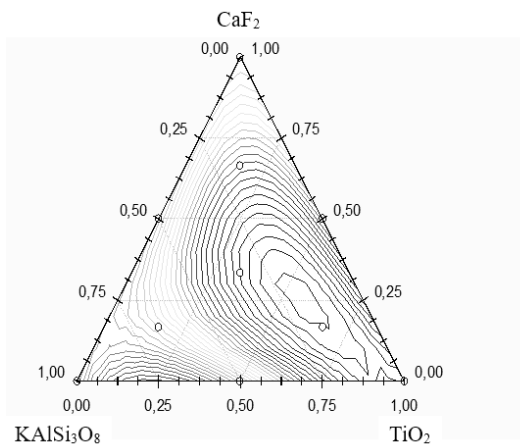


Рисунок 4 – Відділення шлакової кори

З описаних результатів попередніх дослідів можна зробити наступні висновки:

1. Високий вміст рутилу в покритті електродів призводить до поганого формування наплавлених валиків. Це може бути пов'язано зі збільшенням переходу рутилу з покриття в метал шва, що ускладнює управління формою валика.
2. Трикутна форма наплавлених швів вказує на недостатнє проплавлення основного металу по ширині. Можливо потрібно збільшити силу струму або зменшити швидкість зварювання.
3. Відсутність підрізів свідчить про адекватний об'єм перенесення електродного металу в зварювальну ванну.

4. Напруга дуги 25 В є оптимальною для отримання стабільного горіння. Але для покращення формування швів може знадобитися її збільшення.

Отже, для виправлення ситуації потрібно скорегувати режими зварювання та зменшити вміст рутилу в покритті. Це має покращити формування швів.

Додавання в рутилову шихту флюоритового концентрату у різних співвідношеннях з рутилом відразу дозволило покращити зовнішній вигляд швів, дрібнолускова поверхня швів забезпечувала досить легку відокремленість шлакової корки, розбризкування зменшилось. Валики придбали більш полого форму. Підрізи були відсутні. Однак процес запалювання електродів погіршився. Напруга на дузі ~ 30В.

Подальше поліпшення зварювально-технологічних властивостей дослідних електродів пов'язано з введенням в шихту польового шпату, що дозволило покращити запалювання електродів, а також зовнішній вигляд валиків (дрібнолускова блискуча поверхня) і легке відділення шлакової корки. Валики пологі. Напруга на дузі ~ 30В.

Введення мармуру викликало досить сильне газове виділення, що супроводжувалося розбризкуванням і зменшенням стабільності процесу.

Введення до складу шихти металевих компонентів, таких як хром, нікель, марганець, молібден, що дозволило компенсувати їх вигорання в процесі зварювання, показало, що нікель (у вигляді металевого порошку) при введенні його до 20% від ваги шихти не погіршує зварювально-технологічних властивостей дослідних електродів (теж саме і марганець), в той час, як хром і молібден впливають негативно на процес формування валиків, які наплаваються.

Після додаткових випробувань серії покриттів на базі  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$  встановлений базовий варіант покриття.

Електроди з таким покриттям мають задовільні зварювально-технологічні властивості при підводному мокрому зварюванні в нижньому положенні.

#### Висновок

Представлено результати досліджень, спрямованих на вдосконалення технології мокрого підводного зварювання шляхом підбору оптимального складу шихти електродних покриттів. Основна увага приділена забезпеченню стійкого горіння зварювальної дуги під водою, що є ключовим фактором для якісного формування зварних з'єднань.

Отримані результати є важливими для розробки ефективних електродних матеріалів, здатних забезпечити стабільне горіння дуги та формування якісних зварних швів в умовах мокрого підводного зварювання. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення металургійних процесів у зварювальній ванні та структуроутворення в металі шва та зоні термічного впливу.

#### Перелік посилань

1. Толок В.А. Метод конечных элементов: теория, алгоритмы, реализация / В.А.Толок [и др.]. – К.: Наук. думка, 2003. – 316 с.
2. Игнатов В.А., Земзин В.Н., Петров Г.Л. Влияние никеля в аустенитных швах на миграцию углерода в сварных соединениях разнородных сталей. Автомат. сварка, 1964, № 4