

## ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 691.791.75

DOI:

Малигіна С. В., Бережна О. В., Малигін М. О.

**РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ АВТОМАТИЧНОГО І МЕХАНІЗОВАНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПО ЗАХИСНОМУ ПОКРИТТЮ**

Складально-зварювальне виробництво в важкому машинобудуванні характеризується великою питомою трудомісткістю і складністю виконуваних технологічних операцій, особливо при використанні механізованого зварювання [1]. Так, на зачистку від бризок і надання зварному з'єднанню товарного вигляду приходиться до 35-40% трудомісткості всього процесу зварювання в умовах промислового виробництва. Технологія захисту металоконструкцій від їх ураження при зварюванні бризками розплавленого електродного металу, передбачає операцію попереднього нанесення на основний метал спеціальних захисних покриттів, що має забезпечити задовільну якість зварних з'єднань. Ефективність застосування захисних покриттів і можливість зварювання по ним залежать від загальної стабільності процесу, яка визначається постійністю формування шва, характером перенесення і втратами електродного металу [2]. З точки зору експлуатації захисного покриття, формування якісного кутового з'єднання є особливо складним і не завжди задовольняє вимогам: присутнє підсмоктування газу в зварювальну ванну; кінетична енергія бризок, що потрапляють на покриття, максимальна; співвідношення площ поперечних перерізів покриття і основного металу найбільша. Експерименти по впливу різних покриттів на формування і властивості зварних з'єднань [3] показали, що якість шва забезпечується при певних швидкостях зварювання. При збільшенні кількості покриття в шві і зменшенні теплової потужності дуги допустимі швидкості знижуються.

Метою роботи є – розробка фізико-математичної моделі процесу автоматичного і механізованого дугового зварювання з використанням захисних покриттів і розробка алгоритму вирішення задачі оптимізації параметрів режиму автоматичного і механізованого зварювання в функції товщини шару захисного покриття.

Основним параметром режиму, що визначає характер процесу зварювання, є величина струму. В результаті проведених експериментів встановлено, що в залежності від характеру перенесення і величини розбризкування електродного металу можна говорити про струми  $I_1$  і  $I_2$ :

$$I_1 = 160 \cdot d_3^{0,875}, \quad (1)$$

$$I_2 = 240 \cdot d_3^{0,75}, \quad (2)$$

де  $d_3$  – діаметр електродного дроту, мм.

При струмах  $I_{зв} < I_1$  має місце перенесення електродного металу періодичними короткими замиканнями, при цьому спостерігається невелике розбризкування металу, коефіцієнт втрат  $\psi$  не перевищує 5%. В діапазоні  $I_1 < I_{зв} < I_2$  спостерігається велике крапельне перенесення при безперервному горінні дуги, розбризкування електродного металу досягає максимальної величини і  $\psi = 14 \dots 15\%$ .

При зварювальному струмі  $I_{зв} > I_2$  відбувається подрібнення крапель електродного металу, зниження коефіцієнта втрат  $\psi$  до 7%. Характер перенесення електродного металу і ступінь занурення зварювальної дуги в основний метал впливає на ефективність використання теплової потужності дуги, яка оцінюється величиною ефективного к.к.д. нагріву виробів

$\eta_u$ . При  $I_{зв} < I_1$  кратер неглибокий, полум'я дуги мало поглиблюється в основний метал і  $\eta_u \approx 0,65$ . В діапазоні  $I_1 < I_{зв} < I_2$  у зв'язку зі значними втратами електродного металу на розбризування величина ефективного к.к.д. також невелика:  $\eta_u \approx 0,72$ . І тільки в міру збільшення зварювального струму ( $I_{зв} > I_2$ ), зміни характеру перенесення електродного металу ефективний к.к.д. зростає по залежності:

$$\eta_u = 0,87 - 0,15 \cdot e^{-4 \sqrt{I_{зв} - I_2} / I_2}. \quad (3)$$

Напруга дуги  $U_d$  визначається наступною емпіричною формулою:

$$U_d = 24 - \frac{12}{d_3} + 0,37 \frac{I_{зв}}{\sqrt{d_3}}. \quad (4)$$

Методики розрахунку режиму зварювання [3, 4] передбачають роздільне рішення питання проплавлення основного металу і розплавлення електроду, що не дозволяє оптимізувати режими. В основі запропонованої методики лежить рішення рівняння теплового балансу:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_u, \quad (5)$$

де  $Q_1$  – кількість тепла, що йде на проплавлення основного металу і утворення зони проплавлення площею  $F_{np}$ :

$$Q_1 = (S_{пл} - S_0) F_{np} \rho V_{зв};$$

$S_{пл}$  – тепловміст розплавленого металу;

$S_0$  – тепловміст основного металу в початковий момент часу;

$\rho$  – щільність розплавленого металу;

$V_{зв}$  – швидкість зварювання;

$Q_2$  – кількість тепла, що йде на перегрів розплавленого металу вище температури плавлення:

$$Q_2 = C \Delta T F_{np} \rho V_{зв};$$

$C$  – теплоємність рідкого металу;

$\Delta T$  – перегрів рідкого металу над точкою плавлення;

$Q_3$  – кількість тепла, що втрачається за рахунок теплопровідності в основний метал;

$Q_u$  – ефективна теплова потужність зварювальної дуги:

$$Q_u = \eta_u I_{зв} U_d.$$

Якщо скористатися законом теплопровідності Фур'є і розрахувати градієнт температури, прийнявши схему швидкого руху точкового джерела [1], то:

$$Q_3 = 3,4 \frac{Q_u}{r^3} \cdot L, \quad (6)$$

де  $L$  – довжина лінії сплавлення;

$r$  – радіус-вектор, що виражає відстань від лінії сплавлення до точкового джерела.

Оскільки при прийнятій схемі кутового шва радіус  $r$  – величина змінна, то його можна розрахувати з деякою погрішністю з умови рівності розрахункової площі зварного шва  $F_p$  площі півкола:

$$r = \sqrt{\frac{2F_p}{\pi}} = 0,8 \sqrt{F_p}. \quad (7)$$

За даними експерименту встановлено, що захисне покриття впливає на якісне формування шва з площею поперечного перерізу не менше 25-30 мм<sup>2</sup>, що відповідає мінімально можливому катету 7–8 мм.

За наведеними залежностями [3] зроблено розрахунок режиму зварювання кутових швів по захисному покриттю. Були проведені дослідження при зварюванні на технологічно рекомендованих режимах для з'єднання металів малої товщини як на контрольних пластинах, так і на реальних конструкціях в умовах промислового виробництва. Встановлено, що метал шва має високі механічні характеристики, а властивості зварних з'єднань визначаються характеристиками основного металу. Характер плавлення торця електродного дроту стабільний. Метал шва виходить щільним, пори, раковини, тріщини та інші дефекти відсутні.

Отримані дані лягли в основу програмних засобів розрахунку режимів автоматичного та механізованого дугового зварювання по захисним покриттям, що передбачає спільне вирішення питання проплавлення основного металу і розплавлення електрода з урахуванням якісного формування металу шва стосовно конкретного з'єднання. В якості вихідних даних для розрахунку прийняті: катет шва, товщина стінки таврового з'єднання, товщина шару захисного покриття. Обмежуючими параметрами є: ряд діаметрів електродів, для яких слід провести розрахунок; діапазон швидкостей зварювання, при яких з технологічних міркувань може виконуватися процес (мінімальна і максимальна швидкість зварювання); максимально допустима величина вильоту електрода; величина кроків, з якими слід вести розрахунок по зварювальному струму і вильоту електрода; необхідна точність розрахунку площі проплавлення; поправочний коефіцієнт, що враховує вплив конструктивних особливостей виробу на можливе спотворення зони проплавлення.

Встановлено, що при зростанні кількості захисного покриття в шві і зниженні теплової потужності дуги припустимі швидкості зварювання знижуються. Результати механічних випробувань показують [3], що при зварюванні на рекомендованих режимах і при номінальній товщині покриття, механічні властивості металу шва задовольняють вимогам, що висуваються до механічних властивостей зварних з'єднань металоконструкцій.

Для складання гігієнічної характеристики технологічного процесу зварювання по захисному покриттю вивчено повітряне середовище в робочій зоні для визначення забруднення її пилом і шкідливими речовинами. Спостерігались також метеорологічні умови. Проби повітря брали в зоні дихання зварювальника. Дослідження показали, що вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони при зварюванні по розробленому захисному покриттю не перевищує гранично припустимих концентрацій.

За наявності на поверхні металу захисного покриття застосування безпосереднього збудження дуги у міжелектродному проміжку, що скорочується, є ефективним і економічно доцільним, оскільки дозволяє скоротити час установалення дугового процесу до 0,02-0,03 с і підвищити якість початкової ділянки зварного шва.

Використовували спосіб початкового збудження дуги, що заснований на пробі дугового проміжку високовольтним високочастотним іскровим розрядом за допомогою осцилятора або електродного блоку збудження дуги. Використовували блок підпалу дуги УПД-1.

Дослідження довели [3] відсутність кратерів, структур закалювання, мікротріщин, які є осередками руйнування. Збудження дуги можливе починаючи з певних мінімальних напруг при мінімальній товщині захисного шару (рис. 1) та наявності в якості інгредієнтів покриття електропровідних та іонізуючих компонентів, що створюють умови гарантованого переростання іскрового розряду в дуговий.

Оскільки статистичний час запізнювання розряду становить приблизно  $10^{-6} - 10^{-7}$  с, то при робочих швидкостях подачі електрода забезпечується збудження дуги без короткого замикання. Виробничі випробування показали доцільність застосування в цьому випадку апаратів із програмованою швидкістю подачі електродного дроту.

На основі одержаних теоретичних та експериментальних даних стосовно оптимізації параметрів автоматичного та механізованого зварювання з використанням захисних покриттів розроблено програмно-методичний комплекс математичних моделей та алгоритмів прийняття рішень при багатокритеріальній оптимізації технологічних параметрів процесу зварювання по захисному покриттю [4], що забезпечує мінімізацію ймовірності виникнення дефектів на основі комбінації комп'ютерного імітування процесу зі стохастичними методами оцінювання ймовірності одержання з'єднань із заданими показниками якості.

Алгоритм реалізований у вигляді програмних засобів з використанням багатокритеріального регресійного аналізу.

Застосування даного програмного продукту дозволяє мінімізувати інтенсивність налипання бризок при збереженні стабільних зварювально-технологічних показників процесу. Його доцільно використовувати машинобудівним підприємствам, оскільки він є простим і надійним інструментом для вирішення питань зменшення собівартості та підвищення якості зварних металоконструкцій. Оцінка за результатами тестування в промислових і лабораторних умовах показала його високу ступінь достовірності. Програмно-методичний комплекс дозволяє одержувати алгоритми для автоматичного керування зварюванням, оскільки визначає зміну параметрів дуги (струму, напруги, швидкості зварювання), обумовлену змінами технологічних чинників (товщиною захисного покриття).

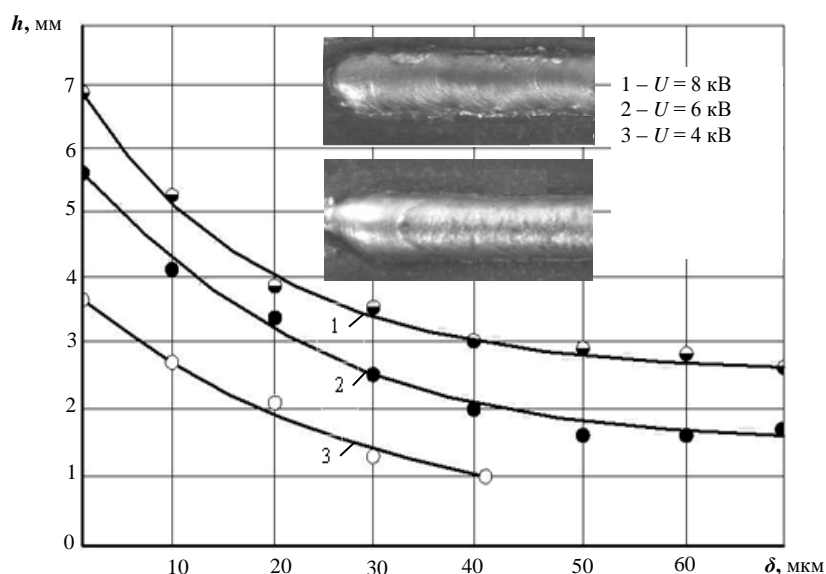


Рис. 1. Залежність відстані між електродами  $h$  від товщини захисного шару покриття  $\delta$  за різних амплітуд імпульсу  $U$

## ВИСНОВКИ

На основі теоретичних та експериментальних даних, одержаних у результаті фізико-математичного моделювання процесу дугового зварювання по захисним покриттям, розроблено алгоритм прийняття рішень та програмні засоби з вирішення питання оптимізації параметрів режиму процесу дугового зварювання при використанні захисних покриттів. Застосування розробленого програмного продукту дозволяє мінімізувати інтенсивність налипання бризок при збереженні стабільних зварювально-технологічних показників процесу. Запропоновані програмні засоби доцільно використовувати машинобудівним підприємствам, оскільки вони є простим і надійним інструментом для вирішення питань зменшення собівартості та підвищення якості зварних металоконструкцій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Valerij Kassov Detecting patterns of structure formation at various types of metal machining / Valerij Kassov, Eduard Gribkov, Olena Berezshnaya, Svetlana Malyhina, Andrej Sumets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol 6, No 12 (102) (2019). – pp. 22-30. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.186989>.
2. Мартиновська, О.В. Підвищення енергоефективності відновлення профілю прокатних валів / О.В. Мартиновська, В.Д. Кассов, В.С. Гузенко, О.П. Мокляк // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – 2016. – №39. – С. 203-208. – ISSN 2222-9000.
3. Кассов В. Д. Технологические особенности изготовления и наплавки с использованием порошковой проволоки сложной конструкции / В.Д. Кассов, А.В. Кабацкий, Е.В. Бережная, С.В. Малыгина // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії збірник наукових праць, № 2 (44), 2018, С. 47-52.
4. Малигіна, С.В. Математическое моделирование температурного поля защитного покрытия / С.В. Малыгина, В.Н. Черномаз, Е.В. Бережная, В.К. Лысак, Н.С. Кукуенберг // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорск, 2011.– № 1 (22).– С. 12-17.

## REFERENCES

1. Valerij Kassov, Eduard Gribkov, Olena Berezshnaya, Svetlana Malyhina, Andrej Sumets Detecting patterns of structure formation at various types of metal machining Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 6, No 12 (102). PP. 22-30. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.186989>.
2. Martinovska O.V., Kassov V.D., Guzenko V.S., Moklyak O.P. Improving energy efficiency of rolling shaft profile restoration. *Tool reliability and optimization of technological systems*. 2016. №39. PP. 203-208. ISSN 2222-9000. (In Russian)
3. Kassov V.D., Kabatsky A.V., Berezshnaya E.V., Malyhina S.V. Technological features of manufacturing and surfacing using powder wire of complex design. *Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy: a collection of scientific papers*. 2018. № 2 (44). PP. 47-52. (In Russian)
4. Malyhina S.V., Chernomaz V.N., Berezshnaya E.V., Lisak V.K., Kukenberg N.S. Mathematical modeling of the temperature field of a protective coating. *Bulletin of the Donbass State Engineering Academy*. 2011. № 1 (22). PP. 12-17. (In Russian)

## АВТОРИ / АВТОРЫ / AUTORS

Малигіна С. В. – канд. техн. наук, доц. кафедри КІТ ДДМА;  
 Малыгина С. В. – канд. техн. наук, доц. кафедри КИТ ДГМА;  
 Malyhina S. V. – candidate of technical science, associate professor DSEA.  
 E-mail: [svmal5.sm@gmail.com](mailto:svmal5.sm@gmail.com)

Бережна О. В. – д-р техн. наук, доц. кафедри ПТМ ДДМА;  
 Бережная Е. В. – д-р техн. наук, доц. кафедри ПТМ ДГМА;  
 Berezshnaya E. V. – doctor of technical sciences, associate professor DSEA.  
 E-mail: [elena.kassova07@gmail.com](mailto:elena.kassova07@gmail.com)

Малигін М. О. – аспірант кафедри КМСіТ ДДМА;  
 Малыгин Н. О. – аспірант кафедри КМСиТ ДГМА;  
 Malyhin M. O. – graduate student DSEA.

Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), м. Краматорськ.  
 Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА), г. Краматорск.  
 Donbass State Engineering Academy (DSEA), Kramatorsk.

## АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ANNOTATION

**Малигіна С. В., Бережна О. В., Малигін М. О. Розробка програмного комплексу оптимізації параметрів режиму автоматичного і механізованого дугового зварювання по захисному покриттю. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2020. № 1 (48).**

Технологія захисту металоконструкцій від їх ураження при зварюванні бризками розплавленого електричного металу передбачає операцію попереднього нанесення на основний метал спеціальних захисних покриттів. При цьому повинна забезпечуватися задовільна якість зварених з'єднань. Ефективність застосування захисних покриттів і можливість зварювання по ним залежать від загальної стабільності процесу, яка визначається постійністю формування шва, характером перенесення і витратами електродного металу. З метою підвищення стабіль-

ності протікання процесу зварювання проведено розробку фізико-математичної моделі процесу автоматичного і механізованого дугового зварювання з використанням захисних покриттів і розробку алгоритму вирішення задачі оптимізації параметрів режиму автоматичного і механізованого зварювання в функції товщини шару захисного покриття. Проведено оптимізацію технологічних параметрів режимів дугового зварювання при використанні захисних покриттів. На основі розробленої фізико-математичної моделі процесу дугового зварювання по захисним покриттям та одержаних експериментальних залежностей створено алгоритм вирішення задачі оптимізації параметрів режиму автоматичного і механізованого дугового зварювання залежно від товщини шару захисного покриття. Розроблено програмно-методичний комплекс оптимізації технологічних параметрів режиму дугового зварювання по захисному покриттю, що забезпечує мінімізацію ймовірності виникнення дефектів від наварювання бризок у процесі виготовлення зварних металоконструкцій при збереженні стабільних зварювально-технологічних показників процесу і тим самим значно знижує трудомісткість виготовлення металоконструкцій.

**Ключові слова:** дугове зварювання, захисне покриття, товщина шару захисного покриття, параметри режиму зварювання, оптимізація, програмно-методичний комплекс.

**Малыгина С. В., Бережная Е. В., Малыгин Н. О. Оптимизация и моделирование параметров сварки по защитным покрытиям. Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. 2020. № 1 (48).**

Технология защиты металлоконструкций от поражения при сварке брызгами расплавленного электродного металла предусматривает операцию предварительного нанесения на основной металл специальных защитных покрытий. При этом должно обеспечиваться удовлетворительное качество сварных соединений. Эффективность применения защитных покрытий и возможность сварки по ним зависят от общей стабильности процесса, которая определяется постоянством формирования шва, характером переноса и потерями электродного металла. С целью повышения стабильности протекания процесса сварки проведена разработка физико-математической модели процесса автоматической и механизированной дуговой сварки с использованием защитных покрытий и разработка алгоритма решения задачи оптимизации параметров режима автоматической и механизированной сварки в функции толщины слоя защитного покрытия. Проведена оптимизация технологических параметров режимов дуговой сварки с использованием защитных покрытий. На основе разработанной физико-математической модели процесса дуговой сварки по защитным покрытиям и полученных экспериментальных зависимостей получен алгоритм решения задачи оптимизации параметров режима автоматической и механизированной дуговой сварки в зависимости от толщины слоя защитного покрытия. Разработан программно-методический комплекс оптимизации технологических параметров режима дуговой сварки по защитным покрытиям, что обеспечивает минимизацию вероятности образования дефектов от наваривания брызг в процессе изготовления сварных металлоконструкций при сохранении стабильных сварочно-технологических показателей процесса и тем самым значительно снижает трудоемкость изготовления металлоконструкций.

**Ключевые слова:** дуговая сварка, защитное покрытие, толщина слоя защитного покрытия, параметры режима сварки, оптимизация, программно-методический комплекс.

**Malyhina S. V., Berezhnaya E. V., Malyhin M. O. Optimization and modeling of welding parameters for protective coatings. Herald of the DSEA. 2020. № 1 (48).**

The technology for protecting metal structures from damage during welding by splashing molten electrode metal involves the operation of preliminary applying special protective coatings to the base metal. At the same time, satisfactory quality of welded joints should be ensured. The effectiveness of the use of protective coatings and the possibility of welding on them depend on the overall stability of the process, which is determined by the constancy of the formation of the seam, the nature of the transfer and the loss of electrode metal. In order to increase the stability of the welding process, a physical and mathematical model was developed for the process of automatic and mechanized arc welding using protective coatings and an algorithm for solving the problem of optimizing the parameters of automatic and mechanized welding as a function of the thickness of the protective coating layer was developed. The optimization of the technological parameters of the modes of arc welding using protective coatings is provided. Based on the developed physical and mathematical model of the arc welding process with protective coatings and the obtained experimental dependences, an algorithm is obtained for solving the problem of optimizing the parameters of the automatic and mechanized arc welding modes depending on the thickness of the protective coating layer. A program-methodological complex has been developed for optimizing the technological parameters of the arc welding mode with protective coatings, which minimizes the likelihood of formation of defects from welding on the spray during the manufacturing of welded metal structures while maintaining stable welding and technological parameters of the process and thereby significantly reduces the complexity of manufacturing metal structures.

**Keywords:** arc welding, protective coating, protective coating layer thickness, welding mode parameters, optimization, software and methodological complex.

*Стаття надійшла до редакції 11.09.2019 р.*