

ВПЛИВ ТЕРМОХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ У МЕТАЛО-МІНЕРАЛЬНОМУ ОСЕРДІ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ НА ПОКАЗНИКИ ПЛАВЛЕННЯ ДРОТУ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

В.В. Головка, О.С. Котельчук

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: alexa_kot@ukr.net

Наведено результати дослідження порошкових матеріалів та їхніх сумішей методами комплексного термічного аналізу фізико-хімічних властивостей, що моделюють осердя порошкових дротів флюоритно-карбонатного типу, а також проаналізовано результати мас-спектроскопії газової фази при динамічному нагріванні таких модельних осердь до температури плавлення сталі. Результати цих досліджень пов'язані з показниками плавлення порошкових дротів. Визначено теплові ефекти термохімічних реакцій (ендотермічні процеси деструкції, дисоціації та плавлення, а також екзотермічні процеси, пов'язані з окисненням й утворенням комплексних сполук), які набувають розвитку під час нагрівання порошкового дроту на вильоті. Надано приклад можливості реалізації керування цими реакціями за рахунок зміни складу суміші, що дозволяє регулювати швидкість плавлення осердя, досягати формування сприятливих характеристик плавлення порошкового дроту та підвищувати ефективність переносу електродного металу в зварювальну ванну. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: зварювання, низьколегована сталь, порошковий дріт, метало-мінеральна шихта, термохімічні реакції

Вступ. Використання порошкових дротів при електродуговому методі зварювання набуло широкого використання. Особливе місце в цьому технологічному процесі займають самозахисні порошкові дроти. Для підвищення ефективності газового захисту при зварюванні самозахисними порошковими дротами важливим є не тільки створення умов для генерації достатньо великого обсягу захисних газів, але й керування процесами газовиділення, щоб забезпечити сталу генерацію захисної атмосфери на всіх етапах нагрівання та плавлення порошкового дроту, переносу електродного металу та існування зварювальної ванни.

Утворення розплавів на вильоті електродного дроту ще на стадії нагрівання порошкового осердя, до плавлення оболонки дроту та виділення газоподібних продуктів (CO, CO₂, SiF₄ та ін.), визначає захисні функції порошкового дроту та суттєво впливає на перебіг реакцій взаємодії металу з газами на стадіях краплі та ванни. Температурні інтервали термохімічних реакцій (наприклад, ендотермічні процеси видалення газів, деструкції мінеральних складових, плавлення компонентів та екзотермічне окиснення та утворення комплексних сполук), які супроводжують процес нагрівання, перекриваються, а їхні теплові ефекти накладаються один на одного, стимулюючи розвиток одних процесів і гальмуючи інші.

Таким чином, керування цими термохімічними реакціями за рахунок корегування складу осердя

дозволяє регулювати швидкість його плавлення, досягаючи сприятливих характеристик плавлення порошкового дроту в цілому, а також перенесення електродного металу в зварювальну ванну. Специфічні дані стосовно величини сумарного теплового потоку при нагріванні порошкових композитів дозволяють оцінювати витрати тепла на їхнє нагрівання та плавлення, з урахуванням взаємного впливу екзо- та ендотермічних реакцій, що набувають розвитку в осерді порошкового дроту.

Метою даної роботи був пошук шляхів покращення зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів на основі вивчення теплофізичних властивостей модельних композицій їхнього наповнювача (осердя) методами комплексного термічного аналізу з використанням елементів моделювання процесів утворення газового та шлакового захисту розплавленого металу при нагріванні й плавленні порошкових дротів.

Методика та матеріали дослідження. Для моделювання та аналізу ступеня розвитку термохімічних реакцій в осерді порошкового дроту проведено розрахунки температурних умов нагрівання та плавлення складових осердя порошкового дроту, враховуючи умови нагрівання оболонки та осердя порошкового дроту трубчастого перерізу діаметром 1,2; 1,6 та 2,0 мм [1]. При розрахунках бралось до уваги, що оболонка порошкового дроту при зварюванні нагрівається переважно за рахунок тепла, що виділяється при проходженні зварювального струму, й тепла від активної плями зварювальної дуги. При цьому на вильоті дроту встановлюється близьке до квазістаціонарного

© В.В. Головка, О.С. Котельчук

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

температурне поле. Це дозволяє моделювати осердя порошкового дроту у вигляді циліндра нескінченної довжини, що нагрівається із зовнішньої поверхні та торця, і проводити розрахункові оцінки. У розрахунках моделювалось нагрівання оболонки порошкового дроту на вильоті дроту до температури плавлення сталі (~1500 °C). Оскільки теплопровідність порошкового композита в десятки разів менша за теплопровідність металу, то при високих швидкостях плавлення тепло, передане торцю електродного дроту від дуги, поширюється на значно меншу довжину. Розрахункові оцінки для модельних осердь порошкових дротів карбонатно-флюоритного та рутилового типів показали, що порошковий композит осердя дроту при зварювальному струмі 350... 400 А (для діаметра дроту 2 мм) нагрівається в основному за рахунок теплопередачі від дуги й – меншою мірою – від оболонки.

З метою визначення можливості використання в якості шлакоутворюючих компонентів в осерді самозахисних дротів проведено дослідження впливу таких шлакоутворюючих сполук, які мають температуру плавлення нижче від температури металевого розплаву зварювальної ванни низьколегованих сталей. В якості таких матеріалів у склад осердя порошкових дротів вводять флюорит ($T_{пл} = 1418$ °C), рутил ($T_{пл} = 1843$ °C), перовскіт ($T_{пл} = 1975$ °C), воластоніт ($T_{пл} = 1540$ °C). З цією ж метою використовують карбонат літію, для якого найвища швидкість термічної декомпозиції досягається вже за температури ~730 °C за реакцією: $Li_2CO_3 \rightarrow Li_2O + CO_2$.

Виходячи з викладеного вище, для подальших досліджень було обрано варіант із введенням в осердя порошкового дроту карбонату літію. Для такого складу осердя порошкового дроту оцінено ступінь розвитку термохімічних реакцій у порошковому композиті, використовуючи одержані термоаналітичними методами дані досліджень відповідних модельних композицій осердь порошкових дротів.

Результати досліджень. Дослідження теплофізичних властивостей моделей порошкових осердь були проведені при динамічному нагріванні до температур плавлення сталі (~1500 °C), використовуючи методи комплексного термічного аналізу, що містять термогравіметричний, диференціальний термогравіметричний аналізи та диференціальну сканувальну калориметрію, а також мас-спектроскопію газової атмосфери, що формується в процесі нагрівання, з використанням суміщеного термоаналізатора TGA/DSC Q600 STD (фірми «TA Instruments», США) і мас-спектроме-

тра VG ProLab (фірми «Thermo Scientific Fisher», Велика Британія). Кінетичні параметри термохімічних реакцій (зокрема енергії активації процесів) у модельних композиціях осердя порошкового дроту визначалися на основі даних серій термічного аналізу, що проводився з різними швидкостями нагрівання із застосуванням ізоконверсійного методу Фліна-Уола-Озаві [2–4].

Для поглибленого вивчення процесів газо-шлакоутворення, що набувають розвитку при нагріванні та плавленні порошкоподібних/дисперсних матеріалів, у якості об'єктів досліджень використали порошкові композити, які за вмістом відповідають складу осердя самозахисних порошкових дротів. Властивості таких композитів вивчалися на зразках масою $20,0 \pm 0,2$ мг у керамічних тиглях (виготовлені з оксиду алюмінію Al_2O_3) при динамічному нагріванні зі швидкістю ~20 °C/хв до температури ~1500 °C у потоці повітря з витратами, які відповідали розмірам нагрівальної камери та умовами калібрування приладу – ~100 см³/хв.

Для визначення витрат тепла на нагрівання, плавлення та термічну деструкцію модельного осердя порошкового дроту використовували дані диференціальної сканувальної калориметрії з використанням шихти порошкового дроту карбонатно-флюоритного типу, що містять карбонат літію. Оцінку зварювально-технологічних властивостей самозахисних порошкових дротів із різним вмістом карбонату літію в порошковому осерді проводили при зварюванні дослідними порошковими дротами трубчастої конструкції Ø1,6 мм на постійному струмі прямої полярності, використовуючи систему реєстрації, статистичної обробки та аналізу електричних сигналів електродугового зварювання, подібну до Hannover AH XII [5, 6].

Визначення даних для оцінювання теплового балансу при нагріванні та плавленні порошкового дроту, осердя якого містить карбонат літію, виконували при зварюванні порошковим дротом Ø1,6 мм, що містить 1 мас. % Li_2CO_3 , на режимі $U_d \sim 24$ В і $I_{зв} \sim 250$ А ($v_{зв} \sim 3,5$ м/хв). Як видно з даних, наведених на рис. 1, при нагріванні шихти порошкового дроту тепло витрачається на плавлення та термічну дисоціацію Li_2CO_3 , що призводить до утворення Li_2O у шлаковій фазі та виділення в газову фазу CO_2 . Сумарний витратний тепловий ефект досягає 20,5 кДж/г осердя дроту, при цьому близько 2,4 % підведеної енергії витрачається на нагрівання, плавлення та термічну дисоціацію компонентів осердя дроту, що призводить до помітного погіршення зварювально-технологічних властивостей – зниження

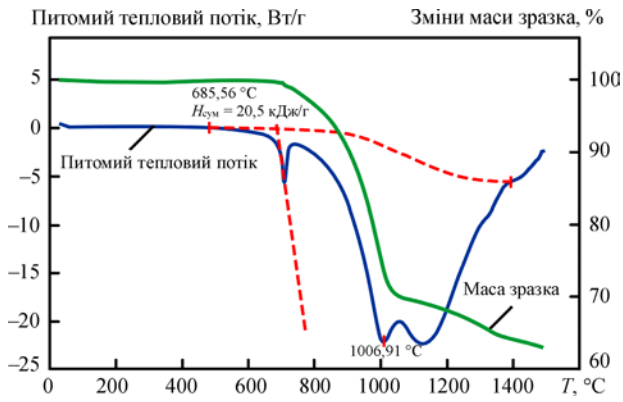


Рис. 1. Термічний аналіз одночасно методами диференційної сканувальної калориметрії та термогравіметрії модельного порошкового осердя, що містить Li_2CO_3

стабільності горіння дуги, підвищеного розбрикування електродного металу.

Результати статистичної обробки значень зварювального струму та напруги дуги, що були одержані за допомогою системи, яка використовує швидкісні аналого-цифрові перетворювачі, для моніторингу й обробки електричних сигналів дугового зварювання з частотою 50 кГц [7–9], наведено в табл. 1 і на рис. 2. Ці дані свідчать, що вміст карбонату літію в порошковому осерді дроту істотного не впливає на технологічні характеристики процесу при його вмісті до 2 % маси дроту. Перевищення цього значення веде до підвищення розбрикування електродного металу (табл. 1).

У загальному випадку введення карбонатів полегшує відділення шлакової кірки по краях металу шва. Це полегшення пояснюється впливом оксидів, що утворюються при розкладанні карбонатів, на гомогенізацію шлаків. Збільшення вмісту карбонатів в

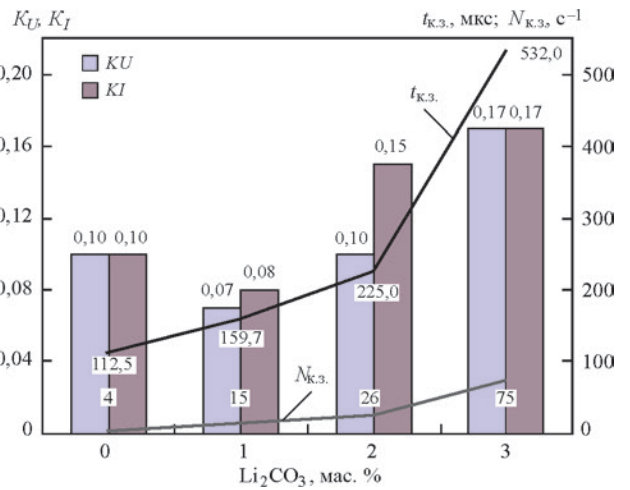


Рис. 2. Коефіцієнти варіації напруги дуги та зварювального струму, середня тривалість і частота коротких замикань при зварюванні дослідними самозахисними порошковими дротами в залежності від вмісту карбонату літію в порошковому осерді дроту

осерді дроту понад 2 мас. % підвищує ефективність створюваного газового захисту несуттєвим чином.

Таким чином, можна зробити висновок, що вміст карбонатів у таких порошкових дротах доцільно обмежити на рівні 1... 2 % за масою. Це дозволяє зберегти на прийнятному рівні показники, що характеризують стабільність процесу зварювання, і при цьому забезпечити достатньо ефективний газовий захист металу та хорошу віддільність шлакової кірки (табл. 2, рис. 2).

Аналіз та обговорення отриманих даних. Дослідження фізико-хімічних властивостей порошкових матеріалів та їхніх сумішей методами комплексного термічного аналізу, що моделюють осердя порошкових дротів, а також мас-спек-

Таблиця 1. Статистичні характеристики процесу зварювання дослідними самозахисними порошковими дротами

Частка карбонату літію в осерді дроту, мас. %	Напруга на дузі			Зварювальний струм			Середнє значення тривалості коротких замикань, мкс	Частота коротких замикань, c^{-1}
	Середнє значення, В	Стандартне відхилення, В	Коефіцієнт варіації	Середнє значення, А	Стандартне відхилення, А	Коефіцієнт варіації		
0	23,1	2,3	0,10	289,1	28,0	0,10	112,5	4
1	21,8	1,6	0,07	296,4	24,9	0,08	159,7	15
2	22,9	2,4	0,10	283,0	36,0	0,15	225,0	26
3	22,0	3,8	0,17	294,5	49,4	0,17	532,0	75

Таблиця 2. Показники технологічних властивостей порошкових дротів, що містять різну кількість карбонатів в осерді

Частка карбонату літію в осерді дроту, мас. %	Напруга на дузі, В	Зварювальний струм, А	Втрати металу на розбрикування, %	Віддільність шлакової кірки, бали	Наявність дефектів
0	19...22	220...270	5,1	3	відсутні
	23...26	250...300	4,8	3	пори
1	19...22	220...250	5,2	5	відсутні
	23...26	250...300	4,9	5	відсутні
2	19...22	250...300	7,2	5	відсутні
	23...27	310...350	6,9	5	відсутні
3	18...22	240...290	11,3	4	відсутні
	22...24	300...350	9,3	4	відсутні

троскопія газової фази при динамічному нагріванні до температури плавлення сталі, показали, що процес нагрівання сумішей порошкових матеріалів, які містять газо- та шлакоутворювальні компоненти разом із металевими порошками, супроводжується протіканням реакцій дисоціації з газовиділенням, окисненням та плавленням сумішей з утворенням первинного розплаву металеві та шлакової фаз.

Відомо, що утворення шлакового розплаву ще на стадії нагрівання порошкового осердя до плавлення оболонки дроту та виділення газів у результаті термічної деструкції матеріалів осердя порошкового дроту (наприклад, CO_2 , SiF_4) сприяє покращенню захисних функцій порошкових дротів при зварюванні без додаткового захисту. Теплові ефекти термічних реакцій (ендотермічні процеси деструкції, плавлення та екзотермічні процеси окиснення та утворення комплексних сполук), які супроводжують процес нагрівання, протікають одночасно. Отримані в результаті проведених досліджень дані мають слугувати базою для реалізації процесів керування цими реакціями за рахунок зміни складу суміші, що дозволяє регулювати швидкість плавлення осердя, сприяє формуванню сприятливих характеристик плавлення порошкового дроту та переносу електродного металу у зварювальну ванну.

Ефективність теплового потоку визначалась через продуктивність плавлення зразків порошкового дроту при використанні захисної атмосфери вуглекислого газу та його суміші з аргонем (коргаз, M21 та ін.). Вища ефективність досягнута при використанні газової суміші марки «Коргон» (CORGON), що містить до 18 об. % CO_2 . Продуктивність плавлення оцінювалась за формулою:

$$MR = a \cdot I + b \cdot L \cdot I^2,$$

де сталі коефіцієнти a та b залежать лише від полярності струму I ; L – виліт дроту.

На ефективність плавлення дротів найсуттєвіше впливає складова, яка пов'язана з густиною струму, що протікає по суцільній частині перерізу порошкового дроту ($b \cdot L \cdot I^2$). Як видно з даних, наведених на рис. 3, використання порошкового дроту в порівнянні з дротом суцільного перерізу такого ж діаметра при однакових параметрах зварювання дозволяє досягти більшої ефективності та швидкості плавлення.

Наявність порошкового осердя, що містить металеві порошки, знижує витрати енергії на радіаційне тепло, яке практично не впливає на продуктивність плавлення електродного металу. Експериментально підтверджено, що використання порошкового дроту дозволяє підвищити продуктивність плавлення електродного металу в порівнянні з дротом суцільного перерізу на 20...30 % при аналогічних параметрах зварювання [9]. Це дозволяє виконувати зварні шви заданого розміру з більшою швидкістю та знижувати втрати тепла на випромінювання, а також перегрів основного металу, що є важливим при зварюванні з'єднань низьколегованих сталей високої міцності.

Використовуючи дані диференціальної сканувальної калориметрії, провели оцінку витрат тепла на нагрівання та плавлення порошкового осердя карбонатно-флюоритного типу з додаванням карбонату літію, що впливають на зварювально-технологічні властивості порошкового дроту. Отримані експериментальні дані свідчать, що при нагріванні шихти порошкового дроту тепло витрачається на плавлення та термічну дисоціацію Li_2CO_3 . Це спричиняє утворення Li_2O у шлаковій фазі та виділення в газову фазу CO_2 . При цьо-

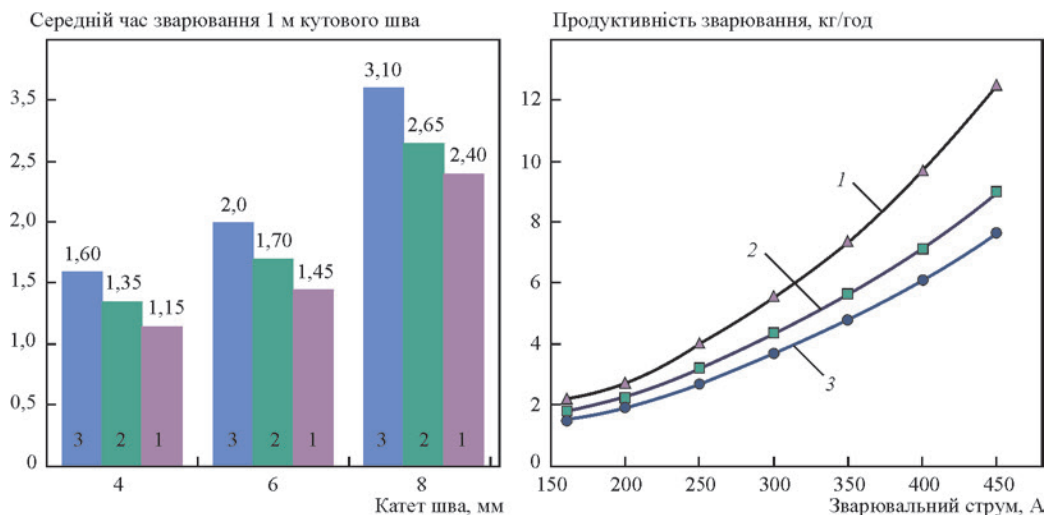


Рис. 3. Типова продуктивність наплавлення електродними дротами $\text{Ø}1,2$ мм різного типу в атмосфері захисного газу M21 (об. %: 82 Ar + 18 CO_2): порошковими дротами з метало-порошковим (1) і рутиловим типом осердя (2), дротом суцільного перерізу (3)

му сумарний витратний тепловий ефект досягає 20,5 кДж/г осердя дроту. Такі дані дозволили оцінити тепловий баланс при нагріванні та плавленні осердя порошкового дроту. Зокрема при зварюванні порошковим дротом Ø1,6 мм, що містить в осерді 1 мас. % Li_2CO_3 , близько 2,4 % підведеної енергії витрачається на нагрівання, плавлення та термічну дисоціацію компонентів осердя дроту, що призводить до помітного погіршення зварювально-технологічних властивостей, а саме: зниження стабільності горіння дуги, підвищеного розбрикування електродного металу.

Висновки

Дослідження методами комплексного термічного аналізу фізико-хімічних властивостей порошкових матеріалів та їхніх сумішей, що моделюють осердя порошкових дротів, а також мас-спектроскопія газової фази при динамічному нагріванні до температури плавлення сталі показали, що:

- процес нагрівання сумішей порошкових матеріалів, які містять газо- та шлакоутворювальні компоненти разом з металевими порошками, супроводжується протіканням реакцій дисоціації з газовиділенням, окисненням та плавленням сумішей з утворенням первинного розплаву металеві та шлакової фаз;

- утворення шлакового розплаву ще на стадії нагрівання порошкового осердя, до плавлення оболонки дроту та виділення газів (CO_2 , SiF_4), сприяє покращенню захисних функцій порошкових дротів при зварюванні без додаткового захисту;

- теплові ефекти термохімічних реакцій (ендо-термічні процеси деструкції, плавлення та екзо-термічного окиснення та утворення комплексних сполук), які супроводжують процес нагрівання, протікають одночасно;

- реалізація керування цими реакціями за рахунок зміни складу суміші дозволяє регулювати

швидкість плавлення осердя, сприяє формуванню сприятливих характеристик плавлення порошкового дроту та переносу електродного металу в зварювальну ванну;

- у якості компонентів порошкового дроту, які знижують температуру початку оплавлення осердя, доцільно використовувати металеві порошки на основі алюмінію та його сплавів, неметалеві шлако- та газоутворювальні компоненти типу карбонатів, оксидів і фторидів лужних металів.

Список літератури/References

1. Походня І.К., Явдошин І.Р., Швачко В.І., Пальцевич А.П., Котельчук А.С. (2004) *Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие газов с металлами*. Под ред. И.К. Походни. Киев, Наукова думка. 415–438.
Pokhodnya, I.K., Yavdoshchin, I.R., Shvachko, V.I., Paltsevich, A.P., Kotelchuk, A.S. (2004) *Metallurgy of Arc Welding. Interaction of Gases with Metals*. Ed. by I.K. Pokhodnya. Kyiv, Naukova Dumka. 415–438 [in Russian].
2. Wendlandt, W.Wm. (1986) *Thermal methods of analysis*. 3rd Ed. A Wiley – Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
3. (2023) ASTM E1641-23. *Standard test method for decomposition kinetics by thermogravimetry using the Ozawa/Flynn/Wall method*. West Conshohocken, PA.
4. Golovko, V.V., Kotelchuk, O.S., Naumeiko, S.M., Golyakovich, A.A. (2022) Development of self-shielded flux-cored wires for arc welding of low-alloy steels. In: *Defect and Diffusion Forum*. Vol. 416. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 103–114.
5. Ponomarev, V., Al-Erhayem, O., Apps, R.L. et al. (1997) *Arc welding process statistical analysis. Methodical approaches, analysis conceptions, experiences: Manual-guide*. JOM-Institute, DTU- Helsingor.
6. Rehfeldt, D., Schmitz, Th., Behrens S.M. (1995) *Report on the use of quality monitoring systems*. IIW Doc. XII-1420-95.
7. Keehan, E., Karlsson, L., Andron, H.-O., Svensson L.-E. (2006) New developments with C–Mn–Ni high strength steel weld metals properties. *Welding J. Welding Research Supplement*, **85**, 211s–218s.
8. Keehan, E., Karlsson, L., Thuvander, M., Bergquist, E.L. (2007) Microstructural characterization of as deposited and reheated weld metal – high strength steel weld metals. *Welding in the World*, **51**, 44–49. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03266559>
9. Shlepakov, V.N., Kotelchuk, A.S. (2019) Improvement of technological and sanitary-hygienic characteristics of gas-shielded arc welding process. *The Paton Welding J.*, **6**, 29–33. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.06.05>

INFLUENCE OF THERMOCHEMICAL REACTIONS IN THE METAL-MINERAL CORE OF FLUX-CORED WIRE ON WIRE MELTING CHARACTERISTICS AT ARC WELDING

V.V. Holovko, O.S. Kotelchuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: alexa_kot@ukr.net

Results of study of physical and chemical properties of powdered materials and their mixtures that simulates cores of flux-cored wires of carbonate-fluoride type using methods of complex thermal analysis as well as mass-spectral study of composition of gas phase at their dynamic heating up to steel melting point are given in connection with the melting properties of flux-cored wires. Heat effects of thermochemical reactions (endothermic processes of destruction, dissociation and melting as well as exothermic processes of oxidation and formation of complex compounds) that take place simultaneously during flux-cored wire heating and melting at the wire extension are evaluated. An example of a possibility to regulate flux-cored wire melting rate, to achieve the favorable flux-cored wire melting characteristics and to increase the efficiency of electrode metal transfer to welding pool is presented. 9 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Keywords: welding, low-alloy steel, flux-cored wire, metal-mineral charge, thermochemical reactions

ORCID

В.В. Головка – <https://orcid.org/0000-0002-2117-0864>, О.С. Котельчук – <https://orcid.org/0000-0002-5432-0232>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

О.С. Котельчук

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: alexa_kot@ukr.net

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

В.В. Головка, О.С. Котельчук (2026) Вплив термохімічних реакцій у метало-мінеральному осерді порошкового дроту на показники плавлення дроту при дуговому зварюванні. *Автоматичне зварювання*, 02, 33–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.02.04>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 02.10.2025

Отримано у переглянутому вигляді 24.11.2025

Підписано до друку 10.04.2026

Оприлюднено 11.04.2026

XXIV МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ-2026

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ



МЕТАЛООБРОБКА



УКРЗВАРЮВАННЯ



УКРВТОРЕХ



ГІДРАВЛІКА
ПНЕВМАТИКА



ПІДШИПНИКИ



УКРЛИТВО



АВТОМАТИЗАЦІЯ
І РОБОТОТЕХНІКА



БЕЗПЕКА
ВИРОБНИЦТВА



ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ
ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ



ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНЕ
СКЛАДСЬКЕ ОБЛАДНАННЯ



ІНДУСТРІАЛЬНІ
ПАРКИ



Генеральний
інформаційний партнер:

**ОБЛАДНАННЯ
ІНСТРУМЕНТИ**

**26–28
ТРАВНЯ**