

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

УДК 621.791: 614.8

**Oleg Levchenko**, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of the Labour Protection, Industrial and Civil Safety

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9737-7212> *e-mail*: levchenko.opcb@ukr.net

**Yury Polukarov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6261-3991> *e-mail*: polukarov@ukr.net

**Olena Zemlyanska**, Senior lecturer of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9608-3677> *e-mail*: o\_zemlyanska@i.ua

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

### HYGIENIC CHARACTERISTICS OF WELDING METHODS AND WELDING MATERIALS

**Abstract.** *The purpose of this work is to assess the hygienic characteristics of various arc welding methods and welding materials and to identify the main factors that affect the degree of risk of hazardous effects of welding aerosol on the body of welders. The assessment methodology was based on the study of the levels of welding aerosol release and its chemical composition depending on the content of components in welding materials that intensify the process of aerosol formation, welding modes and specific properties of the welding methods themselves. The study made it possible to identify welding materials, the use of which is accompanied by the highest levels of welding aerosol release during manual arc welding with covered electrodes, submerged arc welding and mechanized welding. The results obtained make it possible to choose safer welding materials in terms of hygiene for the above-mentioned welding methods. Also, based on the obtained research results, it becomes possible to form substantiated recommendations on the choice of measures and means of protecting welders and auxiliary personnel from harmful factors accompanying welding processes. The novelty of the research lies in the first comprehensive analysis of the hygienic characteristics of arc welding methods and welding materials. Prospects for further research include the development of innovative means of collective and individual protection, as well as the study of the long-term impact of harmful factors on the body of workers. The main limitation is the local nature of the experiments, which requires expanding the scale of the study to confirm the correlation of the results obtained for other welding materials of both domestic and foreign production.*

**Key words:** *arc welding, hygienic assessment, aerosol, emission level, chemical composition, submerged arc welding, mechanized welding.*

О.Г. Левченко, Ю.О. Полукаров, О.В. Землянська

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

## ГІГІЄНИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБІВ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

***Анотація.** Мета даної роботи – оцінити гігієнічні характеристики різних способів дугового зварювання та зварювальних матеріалів і виявити основні чинники, які впливають на ступінь ризику небезпечного впливу зварювального аерозолю на організм зварників. В основу методики оцінки було покладено дослідження рівнів виділення зварювального аерозолю та його хімічного складу в залежності від вмісту у зварювальних матеріалах компонентів, які інтенсифікують процес утворення аерозолів, режимів зварювання та специфічних властивостей самих способів зварювання. Проведене дослідження надало можливість визначити зварювальні матеріали, використання яких супроводжується найвищими рівнями виділення зварювальних аерозолів під час ручного дугового зварювання покритими електродами, при зварюванні під флюсом та механізованому зварюванні. Отримані результати дають можливість обирати більш безпечні в гігієнічному відношенні зварювальні матеріали для вищезазначених способів зварювання. Також на підставі отриманих результатів дослідження з'являється можливість формувати обґрунтовані рекомендації щодо вибору заходів та засобів захисту зварників і допоміжного персоналу від шкідливих факторів, що супроводжують зварювальні процеси. Новизна дослідження полягає у вперше здійсненому комплексному аналізі гігієнічних характеристик способів дугового зварювання та зварювальних матеріалів. Перспективи подальших досліджень передбачають розробку інноваційних засобів колективного та індивідуального захисту, а також вивчення довгострокового впливу шкідливих факторів на організм працівників. Основним обмеженням є локальний характер проведених експериментів, що потребує розширення масштабів дослідження для підтвердження кореляції отриманих результатів для інших зварювальних матеріалів як вітчизняного, так й зарубіжного виробництва.*

***Ключові слова:** дугове зварювання, гігієнічна оцінка, аерозоль, рівень виділення, хімічний склад, зварювання під флюсом, механізоване зварювання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.82-94>

### Вступ

Особливістю умов праці зварників є наявність низки характерних шкідливих і небезпечних виробничих факторів, як невід'ємного наслідку зварювального процесу. Серед них найбільшу загрозу для здоров'я зварників становить зварювальний аерозоль (ЗА), від якого й досі зварник захищений недостатньо.

Ступінь ризику небезпечного впливу ЗА на організм зварника, насамперед, визначається способом зварювання, видом та складом (маркою) зварювального матеріалу. Характер розвитку і тяжкість перебігу захворювань зварників, викликаних шкідливими речовинами ЗА, залежать від їх концентрації в зоні дихання. Нижче наведено дані про санітарно-гігієнічні характеристики різних способів дугового зварювання.

**Постановка завдання.** У сучасному зварювальному виробництві значна частина працівників піддається впливу шкідливих факторів, які виникають під час виконання технологічних операцій. Основними джерелами небезпеки є високі рівні виділення зварювальних аерозолів, які забруднюють повітря в робочій зоні. Традиційні способи зварювання часто не відповідають сучасним вимогам безпеки, що зумовлює підвищений ризик професійних захворювань серед зварників.

Зважаючи на це, основними завданнями дослідження є:

1. Проведення гігієнічної оцінки найбільш поширених способів дугового зварювання.

2. Аналіз складу та характеристик зварювальних матеріалів, їхньої ролі у формуванні шкідливих виділень.

3. Порівняння ефективності традиційних методів контролю забруднення з інноваційними підходами, зокрема сучасними вентиляційними системами та засобами індивідуального захисту.

4. Формування рекомендацій щодо вибору оптимальних технологій зварювання та використання безпечних матеріалів.

Результати цього дослідження мають на меті розробку науково обґрунтованих рішень для зменшення шкідливого впливу зварювальних процесів, покращення гігієнічних умов праці та підвищення ефективності захисту органів дихання зварників.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У вітчизняній та зарубіжній літературі значна увага приділяється питанням удосконалення технологій зварювання, зокрема впровадженню новітніх методів і матеріалів. Дослідження у сфері зварювальних процесів переважно фокусуються на підвищенні ефективності процесів зварювання, покращенні міцності з'єднань та якості зварювальних швів. Зокрема, у роботах [1, 2] розглядається застосування інноваційних зварювальних матеріалів для підвищення якості зварного шва. Проте, дослідження гігієнічних показників процесів зварювання та впливу зварювальних аерозолів на працівників залишаються недостатньо висвітленими.

Особливу увагу привертає вплив способу зварювання на якість повітря робочої зони. Як зазначено в [3], ручне електродугове зварювання покритими електродами, зварювання під флюсами та механізоване зварювання в захисних газах супроводжується значним виділенням шкідливих аерозолів та газів. У роботі [4] було підтверджено, що різні способи зварювання створюють різні рівні впливу на повітряне середовище робочої зони, що зумовлено типом зварювальних матеріалів та обладнання. Наприклад, процеси ручного дугового зварювання характеризуються підвищеним виділенням зварювальних аерозолів, які включають важкі метали та токсичні сполуки.

Дослідження [5] демонструє, що використання сучасних зварювальних апаратів дозволяє зменшити вплив на стан повітря, проте остаточного вирішення проблеми не досягнуто. Крім того, в роботі [6] розглядаються питання автоматизації процесів зварювання, що дає змогу мінімізувати безпосередній контакт працівників із шкідливими факторами. Водночас, автори зазначають, що навіть за умови застосування автоматизованого обладнання доводиться говорити про небезпечний рівень шкідливих речовин у повітрі робочої зони, особливо у разі використання порошкових електродів.

Аналіз літературних даних свідчить, що необхідність комплексного підходу до визначення гігієнічних характеристик способів зварювання та зварювальних матеріалів є актуальною. Досі залишаються невирішеними питання розробки ефективних заходів щодо зменшення шкідливого впливу на працівників, а також створення методичних підходів для оцінювання цих впливів у реальних виробничих умовах.

*Метою дослідження* є гігієнічна оцінка впливу різних способів дугового зварювання та зварювальних матеріалів на стан повітряного середовища робочої зони, виявлення основних факторів ризику для здоров'я зварників та розробка рекомендацій щодо мінімізації цих впливів.

## **Результати дослідження**

### *Ручне дугове зварювання покритими електродами*

Рівні виділень і хімічний склад ЗА, які утворюються при зварюванні покритими електродами, визначаються низкою факторів [7]:

- вмістом у шлаковому розплаві, що утворюється в результаті плавлення покриття на торці електрода, хімічних елементів чи сполук з високою пружністю пари, які вносять великий вклад в утворення аерозолів;
- характеристикою основності (кислотності) шлаку, від якої залежить інтенсивність випаровування окремих його складових;
- окиснювальним потенціалом атмосфери дуги;
- діаметром електрода і режимом зварювання (сила зварювального струму та напруга дуги).

У вітчизняній і зарубіжній практиці ручного дугового зварювання використовуються електроди з покриттями, які розподіляються на такі основні види: кислі, рутилові, целюлозні, основні (фтористо-кальцієві); а також змішані види покриття: рутилово-кислі (ільменітові), рутил-целюлозні, рутил-основні тощо. У залежності від виду (складу) цих покриттів здійснюється необхідний вплив на характеристики зварного шва. Разом з тим склад електродного покриття визначає токсичність ЗА, що утворюються під час застосування електродів певних марок для електродугового зварювання.

Результати досліджень рівнів виділень ЗА, виконані в різних країнах, показують, що найбільші виділення аерозолу характерні для електродів з целюлозним покриттям. За ними йдуть електроди з покриттям основного виду. Електроди з кислим, рутиловим та ільменітовим покриттям за рівнем виділення ЗА розрізняються між собою незначно, а порівняно з електродами з целюлозним та основним покриттям характеризуються значно меншим виділенням аерозолу (рис. 1).

Найбільший рівень виділень ЗА у разі зварювання електродами з целюлозним покриттям пояснюється виділенням у великих кількостях газів: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, які утворюються в результаті згоряння органічних складових целюлозного покриття, надходженням в розплавлену краплю на торці електрода вуглецю, що утворюється в результаті розкладання целюлози в покритті, і підвищенням інтенсивності виділення ЗА через підсилення інтенсивності вибуху рідких крапель внаслідок окиснення вуглецю та утворення CO.

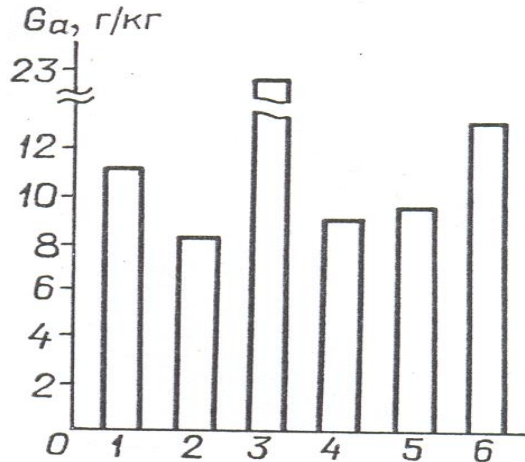


Рис. 1. Питомі виділення ЗА під час зварювання електродами з різними покриттями: 1 – ільменітове; 2 – рутило-карбонатне; 3 – целюлозне; 4 – рутилове; 5 – кисле; 6 – основне (діаметр електрода – 5 мм, зварювальний струм – 230 А) [7]

Високий рівень виділення ЗА при зварюванні електродами з основним покриттям обумовлено наявністю в покритті летучих сполук фтору ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ) і високою основністю шлакової фази, яка сприяє більш інтенсивному надходженню в ЗА сполук лужних металів. Великий вміст карбонатів (мармуру, крейди, вапняку, магнезиту, доломіту) в покритті сприяє стисненню дуги вуглекислим газом, який утворюється при їх розкладанні, що також призводить до підвищення інтенсивності виділення ЗА.

Аналіз багатьох даних щодо визначення хімічного складу ЗА показує, що при зварюванні електродами з рутиловим, кислим і ільменітовим покриттям утворюються ЗА близькі за хімічним складом. Основою ЗА є оксиди заліза. Із шлакової фази в ЗА переходять, переважно,  $\text{SiO}_2$  (20...30%),  $\text{K}_2\text{O}$  (5...10%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (6...10%). Вміст у ЗА сполук кальцію, магнію, алюмінію та титану незначний: 0,1...0,8%  $\text{CaO}$ ; 0,1...3%  $\text{MgO}$ ; 0,1...0,3%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 0,1...2%  $\text{TiO}_2$ . Вміст найбільш токсичної складової ЗА – сполук марганцю – при зварюванні електродами загального призначення складає 5...10%. Це є результатом випаровування його, переважно, з металевого розплаву, в якому концентрація марганцю при зварюванні електродами різних марок також змінюється в порівняно вузькому інтервалі.

Склад ЗА, який утворюється у випадку зварювання целюлозними електродами, відрізняється від складу, що утворюється у разі зварювання зазначеними вище електродами, лише більш високим вмістом оксидів заліза внаслідок деякого зниження кількості інших складових.

Склад ЗА під час зварювання електродами з покриттям основного виду істотно відрізняється: наявністю великої кількості розчинних і нерозчинних фторидів (10...20% в перерахунку на фтор); більш високою порівняно зі зварюванням кислими, рутиловими та целюлозними електродами кількістю сполук лужних і лужно-земельних металів (6...25%  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 5...30%  $\text{K}_2\text{O}$ ; 7...15%  $\text{CaO}$ ; 0...8%  $\text{MgO}$ , причому сума  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  складає 20...40%, а їх

співвідношення визначається, головним чином, складом рідкого скла-зв'язуючого); більш низьким вмістом оксидів кремнію (4...12%) та заліза (10...20%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Ці відмінності обумовлені, в першу чергу, наявністю фторидів у складі основного покриття і високою основністю шлаків, що утворюються в процесі плавлення покриття електродів. Крім того, під час зварювання електродами з покриттям основного виду поряд з фторидами у складі ЗА в повітрі присутні також токсичні газоподібні фториди (фтористий водень, тетрафторид кремнію тощо). Вміст оксидів марганцю в ЗА, що утворюється при зварюванні електродами з основним покриттям, нижчий, ніж за умови зварювання електродами інших видів, і складає звичайно 3...5%. Це пояснюється більш низьким вмістом феромарганцю в покритті основного виду [7].

Найбільш шкідливими речовинами, які входять до складу ЗА, що утворюються в процесі зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей з покриттями рутилового, кислого, ільменітового та целюлозного видів, є марганець, а під час використання електродів з покриттям основного виду – сполуки фтору (особливо газоподібні).

За умов зварювання оцинкованих сталей у складі ЗА присутні токсичні сполуки цинку.

У процесі зварювання легованих, у тому числі нержавіючих сталей, у складі ЗА, крім токсичних сполук марганцю та фтору, з'являються ще більш токсичні сполуки шестивалентного хрому і нікелю з канцерогенними властивостями. Хром у складі ЗА присутній у вигляді двох різних за токсичністю сполук: в шестивалентному стані у вигляді хроматів та біхроматів натрію і калію ( $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), які утворюються в результаті взаємодії хрому зі сполуками калію та натрію із рідкого скла, і в тривалентному стані у вигляді  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Згідно з гігієнічним регламентом [8], шестивалентний хром відноситься до першого, а тривалентний – до третього класу небезпеки. Таким чином, в процесі зварювання електродами хромонікелевих легованих сталей сполуки шестивалентного хрому є компонентами, які визначають токсичність ЗА.

Основними токсичними компонентами ЗА, що утворюються під час зварювання кольорових металів (алюмінію, міді та ін.), є їхні оксиди.

Одночасно із ЗА в повітря робочої зони можуть надходити й такі шкідливі гази, як фтористий водень, тетрафтористий кремній, оксиди азоту, оксид вуглецю, озон [9–11]. Ці гази можуть забруднювати повітря до рівня, що перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК). Окрім цього, слід враховувати, що величини ГДК одних і тих же шкідливих речовин у нормативних документах різних країн істотно відрізняються. Тому електроди однієї й тієї ж марки у різних країнах можуть належати до різних гігієнічних класів. Разом з цим, ще певним недоліком гігієнічної класифікації зварювальних матеріалів є те, що прийнята в ній форма для запису даних про аерозолі [12] не враховує наявність у повітрі робочої зони зазначених газоподібних компонентів, особливо фтористого водню, тетрафтористого кремнію та озону, що належать до шкідливих речовин першого класу небезпеки [13] і залежно від їх концентрації в повітрі можуть бути визначальними токсичними компонентами.

### **Зварювання під флюсом**

Зварювання під флюсом – прогресивний процес не тільки за технічними, а й за гігієнічними характеристиками. Під час його виконання зварювальна дуга закрита шаром флюсу, внаслідок чого усувається шкідливий вплив випромінювання дуги, відсутні іскри та бризки розплавленого металу, рівень шуму дуги незначний і сама головна перевага – рівень виділень ЗА на 1...2 порядки нижчий, ніж при зварюванні покритими електродами і в захисних газах [13].

Джерелами утворення ЗА є, переважно, сам флюс, а також електродний дріт. Разом з тим шар флюсу виконує роль фільтра, в процесі проходження через який, основний потік ЗА осаджується і лише незначна частина розсіюється в навколишню атмосферу.

Рівень виділень ЗА визначається потужністю зварювальної дуги, тобто залежить від діаметра зварювального дроту, що використовується, і, відповідно, режиму зварювання.

Хімічний склад ЗА визначається складом флюсу та електродного дроту. Обов'язковими компонентами ЗА, що утворюється при зварюванні під флюсом, є сполуки марганцю (9...12%), кремнію (3...9%), заліза (30...70%), а також розчинні і нерозчинні фториди. Крім того, при зварюванні під флюсом в повітря надходять фтористий водень та тетрафтористий кремній, а також незначна кількість оксидів азоту і монооксиду вуглецю [13].

Гігієнічну характеристику ЗА, який утворюється з використанням типових марок флюсів, наведено в таблиці 1, необхідний об'єм повітря (повітрообмін) загальнообмінної вентиляції – в таблиці 2, з якої видно, що для забезпечення норм ГДК при зварюванні під флюсом продуктивність вентиляції можна знизити в десятки або сотні разів порівняно зі зварюванням покритими електродами.

Таблиця 1. Рівні виділень ЗА при автоматичному зварюванні під флюсами дротом Св-08ХМ діаметром 3 мм,  $I_{зв} - 550...600$  А,  $U_{д} - 45...47$  В (за даними Київського інституту медицини праці)

Марка флюсу	Інтенсивність утворення ЗА, мг/хв										
	ЗА	Si	Fe	Mn	Al	Mg	Ca	HF	SiF <sub>4</sub>	NO <sub>x</sub>	CO
АН-47	6,3	0,43	1,42	0,34	0,19	0,10	0,21	0,33	0,62	0,24	8,1
АН-22	7,1	0,55	0,7	0,28	0,33	0,26	0,65	0,13	0,52	–	12
АН-348 А	7,2	–	1,16	2,75	–	–	–	4,3	–	0,96	–

Зварювання під плавленими флюсами супроводжується наявністю ЗА і пилу флюсу в зоні дихання зварника, концентрація яких може досягати 3...50 мг/м<sup>3</sup>, а за умов використання керамічних флюсів – 50...170 мг/м<sup>3</sup>. При застосуванні керамічних флюсів концентрація розчинних фторидів в повітрі така ж сама, як і в процесі зварювання під плавленими флюсами, а вміст монооксиду вуглецю досягає (для флюсів К-2п, К-5) 400...500 мг/м<sup>3</sup>. Причиною цього є наявність в керамічних флюсах карбонатів кальцію та магнію, які, розкладаючись, призводять до утворення великих кількостей діоксиду і монооксиду вуглецю. Крім того, технологія виготовлення керамічних флюсів дозволяє вводити в них легуючі сплави (феромарганець, ферохром тощо), що призводить до підвищеного вмісту в ЗА токсичних сполук марганцю, хрому та інших речовин.

Таблиця 2. Питомі виділення ЗА та необхідний повітрообмін вентиляції при зварюванні під флюсами

Марки флюсів	Питомі виділення компонентів ЗА, які визначають токсичність, г/кг		Повітрообмін вентиляції, м <sup>3</sup> /кг дроту
	Mn	HF	
АН-30, АН-60, АН-65, АН-67, АН-348А, 48-ОФ-11	0,012...0,07	0,002...0,004	40...570
ФЦ-2А, ФЦ-6, ФЦ-7, ФЦ-12, АН-26, АН-64, 48-ОФ-6М, ОСЦ-45	–	0,017...0,20	40...400
АКН-18	–	0,042...0,15	80...300

За умов зварювання легованих сталей під флюсами у складі ЗА може бути присутній нікель, шестивалентний та тривалентний хром. Причому в процесі використання керамічних флюсів концентрація шестивалентного хрому вища, ніж при зварюванні під плавленими флюсами. Це пояснюється наявністю в керамічних флюсах рідкого скла як зв'язуючого, що вміщує оксиди натрію і калію, які зв'язують нестійкий хромовий ангідрид (CrO<sub>3</sub>) в хромати калію та натрію [13].

Найбільш шкідливими компонентами ЗА, що утворюються в процесі зварювання під флюсами вуглецевих і низьколегованих сталей, є фтористий водень, тетрафтористий кремній, розчинні фториди натрію та калію, сполуки марганцю; якщо ж це зварювання легованих сталей – такими речовинами є сполуки шестивалентного хрому й нікелю.

### ***Механізоване зварювання***

Хімічний склад і рівні виділень ЗА в процесі механізованого зварювання в захисних газах залежать від складу зварювального дроту, захисного газу та режимів зварювання. При зварюванні дротом типової марки Св-08Г2С у вуглекислому газі інтенсивність виділення ЗА залежно від параметрів режиму зварювання і діаметра дроту коливається від 0,2 до 1,6 г/хв, питомі виділення – від 4,6 до 20,3 г/кг дроту. І хоча у складі зварювального дроту вміст марганцю незначний (1,8...2,1%), його вміст в ЗА, що утворюється, досягає 11,1...13,7%. Концентрація діоксиду кремнію складає 7,6...10%, а заліза – 54...85%. З підвищенням вмісту легуючих елементів (Mn, Si) в зварювальному дроті їх концентрація в ЗА та рівні виділень підвищуються [13].

Застосовуючи дроти, мікролеговані рідкоземельними металами (РЗМ), які вміщують незначну кількість церію (0,01...0,03%) і дещо знижену кількість марганцю (1,5...1,8%), рівні виділення ЗА і вміст у ньому токсичного марганцю знижується. Цьому сприяє не лише знижений вміст марганцю в дроті, але й можливість проводити зварювання струмом прямої полярності, за якої температура дуги нижча, ніж у дузі зворотної полярності [13, 14]. Такі переваги в гігієнічному відношенні забезпечують наявність в дроті РЗМ.



Крім ЗА, в процесі зварювання в захисних газах у зоні зварювальної дуги утворюються і шкідливі газоподібні речовини, склад яких визначається складом захисного газу. У випадку зварювання у вуглекислому газі в повітря робочої зони виділяється оксид вуглецю (чадний газ) з інтенсивністю 0,1...0,2 г/хв та оксиди азоту – 0,003...0,015 г/хв [14].

Основною причиною утворення оксиду вуглецю є дисоціація вуглекислого газу за високої температури зварювальної дуги. Оксиди азоту утворюються в результаті окиснення азоту повітря в процесі дії на нього теплоти і випромінювання зварювальної дуги [15]. Оскільки дуга горить в атмосфері захисного вуглекислого газу, то інтенсивність утворення оксидів азоту дуже невелика порівняно з утворенням оксиду вуглецю [16, 17].

У випадку використання в ролі захисного газу аргону або його суміші в повітрі робочої зони з'являється озон, який утворюється із кисню повітря та захисного газу під дією ультрафіолетового випромінювання дуги. Концентрація озону в початковий період зварювання висока, але потім він реагує з оксидом азоту із утворенням діоксиду азоту та кисню [18, 19]. Причому озон утворюється не тільки в зоні дуги, а і на деякій відстані від неї. Концентрація озону в повітрі знижується пропорційно відстані віддалення від дуги [9, 20].

У процесі механізованого зварювання порошковими дротами у вуглекислому газі рутилового (ПП-АН8, ПП-АН10), рутил-флюоритного (ПП-АН9, ПП-АН18), а також самозахисними дротами карбонатно-флюоритного типу (ПП-АН7, ПП-АН11) утворюються ЗА і гази, що вміщують, крім марганцю, кремнію, заліза, оксидів азоту та вуглецю, також фтористий водень, тетрафтористий кремній, розчинні і нерозчинні фториди. Інтенсивність виділення ЗА у разі зварювання цих дротів вища, ніж за умов застосування дротів суцільного перерізу, виділення фтористого водню складає 16,6...56,7 мг/хв, тетрафтористого кремнію – 29,3...78,7 мг/хв [14, 21].

Таким чином, зварювання порошковими дротами, в залежності від їх складу, насамперед супроводжується виділенням у повітря робочої зони фтористих газів, розчинних фторидів та сполук марганцю.

У випадку використання хромонікелевих зварювальних і наплавних порошкових дротів, а також наплавних порошкових стрічок, у складі ЗА, крім фторидів, можуть бути присутні сполуки нікелю, шестивалентного та тривалентного хрому, які в залежності від їх вмісту в ЗА можуть визначати його токсичність.

У процесі зварювання активованим дротом інтенсивність утворення ЗА на оптимальних режимах нижча, ніж за умов використання порошкових дротів, і вища, ніж при зварюванні дротом суцільного перерізу типу Св-08Г2С. Вміст марганцю в ЗА, який утворюється у випадку зварювання активованим дротом, нижчий, ніж у випадку застосування дроту Св-08Г2С. Проте у складі таких ЗА з'являються легколетучі розчинні та нерозчинні сполуки фтору [13]. Збільшення діаметра дроту супроводжується зростанням інтенсивності утворення ЗА [15-17].

Найбільш токсичними компонентами ЗА у разі зварювання активованими дротами є сполуки марганцю та фтору.

## Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведене дослідження дозволило встановити взаємозв'язок між вибором способу зварювання, характеристиками зварювальних матеріалів та впливом цих факторів на гігієнічні умови праці зварників. Було встановлено, що вибір способу зварювання та зварювальних матеріалів має суттєвий вплив на формування гігієнічних умов у робочій зоні зварника. Крім того, виявлено суттєвий вплив хімічного складу аерозолів, що утворюються під час зварювання, на якість повітря у робочій зоні.

Аналіз літературних джерел показав, що існуючі методики оцінки впливу зварювальних процесів на гігієнічні умови праці мають певні недоліки. Це вимагає створення нових підходів до оцінки впливу шкідливих факторів.

Проведені дослідження дозволили визначити та дослідити специфіку впливу зварювальних процесів на гігієнічні умови праці для різних способів зварювання. Запропоновано комплексний підхід до гігієнічної оцінки умов праці зварників з урахуванням особливостей хімічного складу аерозолів. Це створює базу для подальших досліджень, що передбачають:

1. Дослідження взаємозв'язку між параметрами зварювального процесу та рівнями шкідливих факторів для оптимізації технологій зварювання.

2. Вибір нових матеріалів та технологічних рішень, які мінімізують виділення шкідливих речовин у робочій зоні.

3. Удосконалення методів моніторингу та контролю за гігієнічними умовами на робочих місцях зварників, зокрема впровадження автоматизованих систем оцінки та прогнозування.

Отримані результати та запропоновані напрями подальших досліджень сприятимуть подальшому вдосконаленню технологій зварювання, розробленню нових сучасних засобів захисту працівників та модернізації зварювального обладнання. Це дозволить підвищити безпеку та гігієну праці у зварювальному виробництві, сприятиме зниженню професійної захворюваності серед зварників та мінімізації витрат, пов'язаних з виплатами за роботу в шкідливих умовах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Martín, Ó., & De Tiedra, P. (2022). Advances in the control and improvement of quality in the resistance spot welding process. *Metals*, 12(11), 1810. <https://doi.org/10.3390/met12111810>.
2. Periyasamy, P. S., Sivalingam, P., Vellingiri, V. P., Maruthachalam, S., & Balakrishnapillai, V. (2024). A review of traditional and modern welding techniques for copper. *Welding International*, 38(10), 673-68. <https://doi.org/10.1080/09507116.2024.2413386>.
3. Knott, P., Csorba, G., Bennett, D., & Kift, R. (2023). Welding Fume: A Comparison Study of Industry Used Control Methods. *Safety*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/safety9030042>.
4. Quecke, E., Quemerais, B., & Hashisho, Z. (2023). Review of welding fume emission factor development. *Annals of Work Exposures and Health*, 67(6), 675-693. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxad024>.
5. Mahadevan, R., Jagan, A., Pavithran, L., Shrivastava, A., & Selvaraj, S. K. (2021). Intelligent welding by using machine learning techniques. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7402-7410. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1149>.

6. Klimecka-Tatar, D., Ulewicz, R., & Ingaldi, M. (2023). Minimizing occupational risk by automation of the special processes-based on occupational risk assessment. *Procedia Computer Science*, 217, 1145-1152. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.313>.
7. Походня, И. К., Горпенюк, В. Н., Миличенко С. С. и др. (1990). *Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов*. Киев: Наук. думка, 224.
8. Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони (Наказ МОЗ України). № 1596 (2020). Вилучено з: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0741-20#Text>.
9. Press, H. (1981). Formation des oxydes d'azote lors du soudage aux gaz. Mesures pour la prevention d'atteintes a la sante. *Soudage et Techniques Connexes*. (№ 516, pp. 207-212).
10. Sipek, L. Emission of gases pollutants during GTA Welding of Yorcibro Brass. (1988). *Intern. Inst. of. Welding; Doc. VIII-1443-88*. (pp.16).
11. Sipek, L. & Smars, E. (1989). Ozone and nitrogen oxides in gas shielded arc welding. *Institute International de la Soudure (IIS/IIW)*, doc VIII-1486-89.
12. ДСТУ EN ISO 15011-4:2022. (2022). Здоров'я та безпека під час зварювання та суміжних процесів. Лабораторний метод відбирання проб диму та газів. Частина 4. Таблиці даних щодо диму. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
13. Левченко, О. Г. (2015). *Сварочные аэрозоли и газы: процессы образования, методы нейтрализации и средства защиты*. Киев: Наукова думка, 248.
14. Левченко, О. Г. & Метлицкий, В. А. (2003). Глава 6: Охрана труда при сварке. *Сварные строительные конструкции: Справ. изд. в 3-х томах*. К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 293-319.
15. Weman, K. (2012). Manual metal arc (MMA) welding with coated electrodes. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, *Welding Processes Handbook (Second Edition)*, Woodhead Publishing, 99-103. <https://doi.org/10.1533/9780857095183.99>.
16. Murugan, S. S., & Sathiya, P. (2024). Analysis of welding hazards from an occupational safety perspective. *Vietnam journal of science, technology and engineering*, 66(3), 63-74. <http://dx.doi.org/10.31276/VJSTE.2023.0007>.
17. Saxena, V. (2023). Occupational Hazards and Safety Challenges in Welding Activity. *Indian Welding Journal*, 56(1). <https://doi.org/10.22486/iwj.v56i1.218496>.
18. Li, Y., Liu, W., Chen, Z., Jiang, L., & Ye, P. (2022). A novel approach for occupational health risk assessment and its application to the welding project. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134590>.
19. Van der Mee, V. (2021). Welding exposure scenarios. *Welding in the World*, 65(12), 2397-2401. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01182-4>.
20. Dhas, J. E. R., Lewise, K. A. S., & Laxmi, G. (2022). Submerged arc welding process parameter prediction using predictive modeling techniques. *Materials Today: Proceedings*, 64, 402-409. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.757>.
21. Kah, P., & Martikainen, J. (2013). Influence of shielding gases in the welding of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 1411-1421. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2024 і прийнята до друку після рецензування 23.12.2024

## REFERENCES

1. Martín, Ó., & De Tiedra, P. (2022). Advances in the control and improvement of quality in the resistance spot welding process. *Metals*, 12(11), 1810. <https://doi.org/10.3390/met12111810>
2. Periyasamy, P.S., Sivalingam, P., Vellingiri, V.P., Maruthachalam, S., & Balakrishnapillai, V. (2024). A review of traditional and modern welding techniques for copper. *Welding International*, 38(10), 673-68. <https://doi.org/10.1080/09507116.2024.2413386>

3. Knott, P., Csorba, G., Bennett, D., & Kift, R. (2023). Welding Fume: A Comparison Study of Industry Used Control Methods. *Safety*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/safety9030042>
4. Quecke, E., Quemerais, B., & Hashisho, Z. (2023). Review of welding fume emission factor development. *Annals of Work Exposures and Health*, 67(6), 675-693. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxad024>
5. Mahadevan, R., Jagan, A., Pavithran, L., Shrivastava, A., & Selvaraj, S. K. (2021). Intelligent welding by using machine learning techniques. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7402-7410. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1149>
6. Klimecka-Tatar, D., Ulewicz, R., & Ingaldi, M. (2023). Minimizing occupational risk by automation of the special processes-based on occupational risk assessment. *Procedia Computer Science*, 217, 1145-1152. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.313>
7. Pokhodnya, I. K., Gorpenyuk, V. N., Milichenko S. S. et al. (1990). Metallurgiya dugovoi svarki: Protsessy v duge i plavlenie elektrodov. Kiev: Nauk. dumka [in Russian].
8. Pro zatverdzhennia hihienichnykh rehlamentiv dopustymoho vmistu khimichnykh i biolohichnykh rehovyn u povitri robochoi zony (Nakaz MOZ Ukrainy). № 1596 (2020). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0741-20#Text> [in Ukrainian].
9. Press, H. (1981). Formation des oxydes d'azote lors du soudage aux gaz. Mesures pour la prevention d'atteintes a la sante. *Soudage et Techniques Connexes*, 516, 207-212.
10. Sipek, L. Emission of gases pollutants during GTA Welding of Yorcalbro Brass. (1988). *Intern. Inst. of Welding; Doc. VIII-1443-88*, (pp. 16).
11. Sipek, L. & Smars, E. (1989). Ozone and nitrogen oxides in gas shielded arc welding. *Institute International de la Soudure (IIS/IIW)*, doc VIII-1486-89.
12. DSTU EN ISO 15011-4:2022. (2022). Zdrovia ta bezpeka pid chas zvariuvannia ta sumizhnykh protsesiv. Laboratornyi metod vidbyrannia prob dymu ta haziv. Chastyna 4. Tablytsi danykh schodo dymu. Kyiv: DP "UkrNDNTS" [in Ukrainian].
13. Levchenko, O.G. (2015). Svarochnye aerzoli i gazy: protsessy obrazovaniya, metody neutralizatsii i sredstva zashchity. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
14. Levchenko, O.G. & Metlitskii, V.A. (2003). Glava 6: Okhrana truda pri svarke. Svarnye stroitelnye konstruktsii: Sprav. izd. v 3-kh tomakh (pp. 293-319). K.: IES im. Ye.O. Patona [in Russian].
15. Weman, K. (2012). Manual metal arc (MMA) welding with coated electrodes. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, *Welding Processes Handbook (Second Edition)*, Woodhead Publishing, 99-103. <https://doi.org/10.1533/9780857095183.99>
16. Murugan, S.S., & Sathiya, P. (2024). Analysis of welding hazards from an occupational safety perspective. *Vietnam journal of science, technology and engineering*, 66(3), 63-74. <http://dx.doi.org/10.31276/VJSTE.2023.0007>
17. Saxena, V. (2023). Occupational Hazards and Safety Challenges in Welding Activity. *Indian Welding Journal*, 56(1). <https://doi.org/10.22486/iwj.v56i1.218496>
18. Li, Y., Liu, W., Chen, Z., Jiang, L., & Ye, P. (2022). A novel approach for occupational health risk assessment and its application to the welding project. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134590>
19. Van der Mee, V. (2021). Welding exposure scenarios. *Welding in the World*, 65(12), 2397-2401. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01182-4>
20. Dhas, J. E. R., Lewise, K. A. S., & Laxmi, G. (2022). Submerged arc welding process parameter prediction using predictive modeling techniques. *Materials Today: Proceedings*, 64, 402-409. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.757>
21. Kah, P., & Martikainen, J. (2013). Influence of shielding gases in the welding of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 1411-1421. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>

*The article was received 25.09.2024 and was accepted after revision 23.12.2024*

**Левченко Олег Григорович**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Адреса робоча:** 03056, Україна, м. Київ-56, Берестейський проспект, 37

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9737-7212> **e-mail:** levchenko.opcb@ukr.net

**Полукаров Юрій Олексійович**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Адреса робоча:** 03056, Україна, м. Київ-56, Берестейський проспект, 37

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6261-3991> **e-mail:** polukarov@ukr.net

**Землянська Олена Василівна**

старший викладач кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Адреса робоча:** 03056, м. Київ-56, Берестейський проспект, 37

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9608-3677> **e-mail:** o\_zemlyanska@i.ua