

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

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

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

Oksana Ilchuk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6352-5320> **e-mail:** oksana_i@i.ua

Olena Zemlyanska, Senior lecturer of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

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

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE WELDING PROCESS ON AEROSOL RELEASE

***Abstract.** The purpose of this article is to assess the influence of the parameters of the manual and mechanized arc welding process on their hygienic characteristics and to identify the main factors that affect the release of welding aerosols. It is shown that during manual welding with covered electrodes, the level of aerosol release depends on the welding modes: welding current, polarity and arc voltage. Regardless of the type of electrodes used, an increase in the welding current leads to an increase in the level of harmful emissions. In contrast to welding with covered electrodes, the dependence of the level of aerosol release indicators formed during mechanized welding in protective gases with a consumable electrode on the welding mode is more complex – first, the intensity of aerosol formation increases to a maximum, then decreases to a minimum and increases again. It is shown that the process of aerosol formation consists of two stages: evaporation of metal in the arc zone and removal of part of the vapor beyond the arc, where they condense into solid aerosol particles. The removal of vapor from the arc zone is prevented by the immersion of the arc into the weld pool. Increasing the arc power first contributes to increased evaporation, and then to deeper penetration of the base metal, which minimizes aerosol release. Based on studies of weld pool macrosections, it was*

found that the shape of the weld pool also influences the complex nature of such dependencies. For each diameter of the welding wire, there are certain values of the welding current at which the maximum amount of harmful substances is released, and a range of current values that ensures the minimum intensity of their release. When welding at optimal modes, the level of aerosol release decreases when using wires of smaller diameter. The obtained research results show how the correct choice of welding materials, shielding gas and welding modes makes it possible to reduce the levels of harmful substance release.

Keywords: *electric arc welding, manual, mechanized, hygienic characteristics, aerosol, emission intensity, specific emission, recommendations.*

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

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

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ВИДІЛЕННЯ АЕРОЗОЛЮ

Анотація. *Мета даної статті – оцінити вплив параметрів процесу ручного та механізованого дугового зварювання на їх гігієнічні характеристики і виявити основні чинники, які впливають на виділення зварювальних аерозолів. Показано, що під час ручного зварювання покритими електродами рівень виділень аерозолію залежить від режимів зварювання: зварювального струму, полярності та напруги дуги. Незалежно від типу застосовуваних електродів збільшення зварювального струму призводить до зростання рівня шкідливих виділень. На відміну від зварювання покритими електродами, залежності показників рівня виділень аерозолів, що утворюються під час механізованого зварювання в захисних газах плавким електродом, від режиму зварювання мають складніший характер – спочатку інтенсивність утворення аерозолію підвищується до максимуму, потім знижується до мінімуму і знову підвищується. Показано, що процес утворення аерозолів складається з двох етапів: випаровування металу в зоні дуги та винесення частини пари за межі дуги, де вони конденсуються у тверді частинки аерозолів. Виносу пари із зони дуги перешкоджає занурення дуги у зварювальну ванну. Підвищення потужності дуги спочатку сприяє збільшенню випаровування, а потім поглибленню проплавлення основного металу, що знижує до мінімуму виділення аерозолію. На основі досліджень макрошліфів зварювальної ванни було встановлено, що на складний характер таких залежностей здійснює свій вплив і форма зварювальної ванни. Для кожного діаметра зварювального дроту існують певні значення зварювального струму, за яких виділяється максимальна кількість шкідливих речовин, і ділянка значень сили струму, що забезпечує мінімальну інтенсивність їх виділення. При зварюванні на оптимальних режимах рівень виділення аерозолів зменшується під час використання дротів меншого діаметра. Отримані результати досліджень показують, як правильний вибір зварювальних матеріалів, захисного газу та режимів зварювання дає можливість знижувати рівні виділень шкідливих речовин.*

Ключові слова: *електродугове зварювання, ручне, механізоване, гігієнічні характеристики, аерозоль, інтенсивність виділення, питома виділення, рекомендації.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.110-123>

Вступ

Для розроблення гігієнічних рекомендацій щодо зниження рівнів виділення шкідливих речовин зварювальних аерозолів (ЗА) у повітря робочої зони шляхом вибору оптимальних параметрів процесу зварювання необхідні дані про залежності рівнів їх виділень і хімічного складу від способу і режимів зварювання. Як відомо [1, 2], хімічний склад та рівень виділень ЗА визначається не лише складом (маркою) зварювального матеріалу та захисного газу, а й режимом зварювання (видом, полярністю і величиною зварювального струму, напругою електричної дуги). Для встановлення відповідних залежностей необхідно виконати спеціальні дослідження з метою пошуків нових технологічних способів поліпшення гігієнічних характеристик зварювальних матеріалів (покритих електродів і зварювальних дротів).

Постановка завдання

Серед усіх відомих шкідливих і небезпечних факторів зварювального процесу найбільшу загрозу для здоров'я зварників становить зварювальний аерозоль, від якого й досі зварник захищений недостатньо. Про це свідчать результати медичних обстежень, які доводять, що серед професійних захворювань зварників України та інших держав приблизно 80 % становлять бронхолегеневі, спричинені впливом ЗА. Це – пневмоконіоз, що виявився у зварників, які пропрацювали у зварювальних цехах понад 15 років, та хронічний бронхіт, що виникає вже через 5 років праці в професії зварника. Під час виконання зварювальних робіт у недоступних для вентиляції закритих просторах період розвитку пневмоконіозу скорочується до 5 років. Крім того, вплив ЗА на органи дихання може підвищувати ризик розвитку онкологічних захворювань. Отже, традиційні способи зварювання часто не відповідають сучасним вимогам безпеки, що зумовлює підвищений ризик професійних захворювань серед зварників [2-5].

Головними завданнями даного дослідження є:

- встановлення залежностей показників рівнів виділень ЗА від режиму зварювання;
- аналіз залежностей рівнів виділень ЗА під час ручного дугового зварювання покритими електродами та механізованого в захисних газах;
- рекомендації до вибору оптимальних режимів зварювання.

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.

Результати дослідження

Ручне дугове зварювання покритими електродами

Випаровування електродного та основного матеріалів під час зварювання, у результаті чого утворюється ЗА, значною мірою залежить від температурних умов у зоні дугового розряду. Останні залежать від режимів зварювання: зварювального струму, полярності та напруги дуги [2]. Вітчизняними та

зарубіжними дослідниками однозначно встановлено, що незалежно від типу електродів, що застосовуються, збільшення зварювального струму призводить до зростання рівня виділень ЗА. Це зумовлено підвищенням температури крапель металу на торці електрода, що призводить до інтенсифікації випаровування. На рис. 1 наведено типову залежність показників рівня виділень ЗА (інтенсивності V_a та питомого виділення G_a) від величини зварювального струму для електродів діаметром 3,2–8 мм із покриттям ільменітового виду.

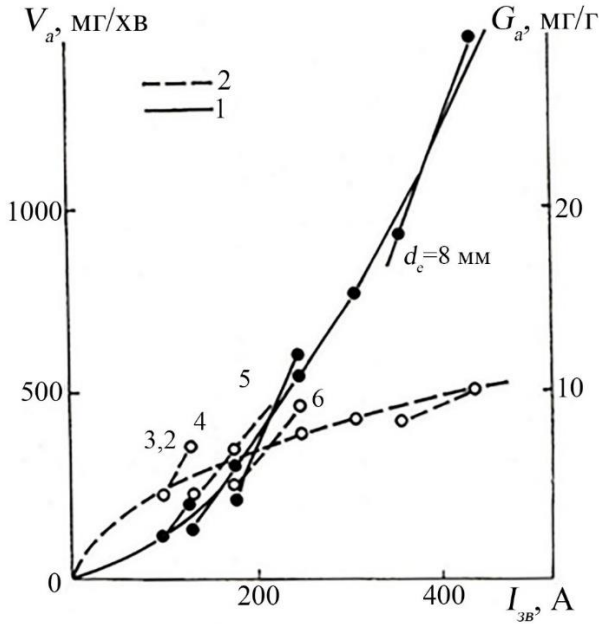


Рис. 1. Залежність показників рівня виділень ЗА: інтенсивності виділення V_a (суцільні криві 1) та питомого виділення G_a (штрихові криві 2) від величини зварювального струму для електродів з ільменітовим покриттям діаметром 3,2–8 мм

Залежність інтенсивності виділення ЗА від сили зварювального струму має параболічний характер і описується рівнянням [6]

$$V_a = A I_{зв}^n,$$

де V_a – інтенсивність виділення ЗА, мг/хв; A і n – емпіричні постійні, величина яких залежить від виду покриття: $A = 0,0361$ для електродів з ільменітовим покриттям, $0,4519$ – для електродів з рутиловим покриттям, $0,0697$ – для електродів з основним покриттям; показник n відповідно дорівнює $1,73$; $1,17$ та $1,65$; $I_{зв}$ – зварювальний струм.

Характерно, що електрод меншого діаметра виділяє більше ЗА, ніж електрод більшого діаметра, якщо зварювання виконується на струмі однакової величини. Очевидно, це зумовлено тим, що за однакового зварювального струму щільність його у електрода меншого діаметра вища, ніж в електроді більшого діаметра. Відповідно й температура нагрівання крапель на торці електрода меншого діаметра вища.

Залежність питомого виділення ЗА від зварювального струму має більш пологий характер у порівнянні із залежністю інтенсивності виділення ЗА. Це пояснюється одночасним збільшенням швидкості плавлення електродів зі зростанням зварювального струму. Тому темп зростання показника виділення ЗА в розрахунку на одиницю маси спаленого електрода менший, ніж показник інтенсивності виділення ЗА.

Збільшення зварювального струму зазвичай супроводжується зростанням номінальної напруги на дузі, тобто потужність зварювальної дуги зростає як через зростання струму, так і в результаті збільшення напруги дуги. Спостерігається пропорційна залежність інтенсивності виділення ЗА від потужності дуги.

Встановлено, що великий вплив на кількість виділень ЗА виявляє напруга дуги [6–8]. Її збільшення внаслідок подовження дуги спричиняє суттєве збільшення інтенсивності утворення ЗА. Це зумовлено, по-перше, погіршенням умов захисту розплавленого металу на торці електрода від кисню навколишнього повітря, тобто збільшенням окисного потенціалу атмосфери дуги, що, як показано вище, інтенсифікує виділення ЗА. По-друге, приріст потужності дуги, викликаний зростанням напруги через її подовження, марно витрачається на випромінювання в навколишній простір, практично не збільшуючи швидкість плавлення електрода. У результаті обидва показники, що характеризують рівень виділення ЗА – інтенсивність та питоме виділення ЗА, – зростають зі збільшенням довжини дуги.

Якщо збільшення напруги дуги обумовлено її стисненням, воно також викликає зростання рівня виділень ЗА, але меншою мірою, ніж подовження дуги, оскільки при стисненні дуги умови захисту зони плавлення електрода від навколишнього повітря не погіршуються.

Відомості про вплив роду струму та полярності на рівень виділення ЗА суперечливі. У більшості робіт зазначається, що за інших рівних умов найбільша інтенсивність виділення ЗА спостерігається при зварюванні постійним струмом зворотної полярності [7, 9]. Цей факт добре узгоджується з експериментальними даними про більш високу температуру крапель на торці електрода у разі зварювання на зворотній полярності. Проте при зварюванні високопродуктивними електродами з рутиловим та кислим покриттями найбільша інтенсивність виділення ЗА має місце при зварюванні на прямій полярності [7]. При зварюванні змінним струмом інтенсивність виділення ЗА, зазвичай, нижча, ніж при зварюванні постійним струмом. Таку залежність можна пояснити періодичним зниженням зварювального струму до нульового значення (на відміну від постійного струму), що тягне за собою відповідні температурні зміни нагріву металу на торці електрода і інтенсивності випаровування електродного матеріалу, що плавиться [10].

З показників, що характеризують режим зварювання, лише швидкість зварювання не створює помітного впливу на рівень виділення ЗА.

Відхилення положення електрода від вертикалі призводить до невеликого збільшення інтенсивності виділення ЗА [6]. Очевидно, зростання виділення ЗА у цьому випадку обумовлено деяким погіршенням захисту зони плавлення електрода від кисню навколишнього повітря.

Механізоване зварювання в захисних газах

На відміну від зварювання покритими електродами, залежності показників рівня виділень ЗА, що утворюються під час механізованого зварювання в захисних газах плавким електродом, від режиму зварювання мають складніший характер [2, 11]. Для встановлення останнього виконано такі дослідження.

Відбирання проб ЗА здійснювали у відповідності з методикою [12] в процесі наплавлення валиків дротом Св-08Г2С діаметром 2 мм на пластини зі сталі ВСтЗсп. Режими наплавлення: $I_{зв}$ – 180...520 А (струм постійний, полярність зворотна), U_d – 21,5...36,5 В, швидкість зварювання – 16 м/год; виліт електрода – 25 мм, витрата газу – 20 л/хв. Використовували такі захисні гази: CO_2 , суміші 75 % Ar + 25 % CO_2 та 70 % Ar + 25 % CO_2 + 5 % O_2 .

Із результатів досліджень (рис. 2) видно, що залежність інтенсивності виділень ЗА від величини зварювального струму має складний характер. Вона досягає максимальних значень при використанні CO_2 , мінімальних – суміші Ar + CO_2 .

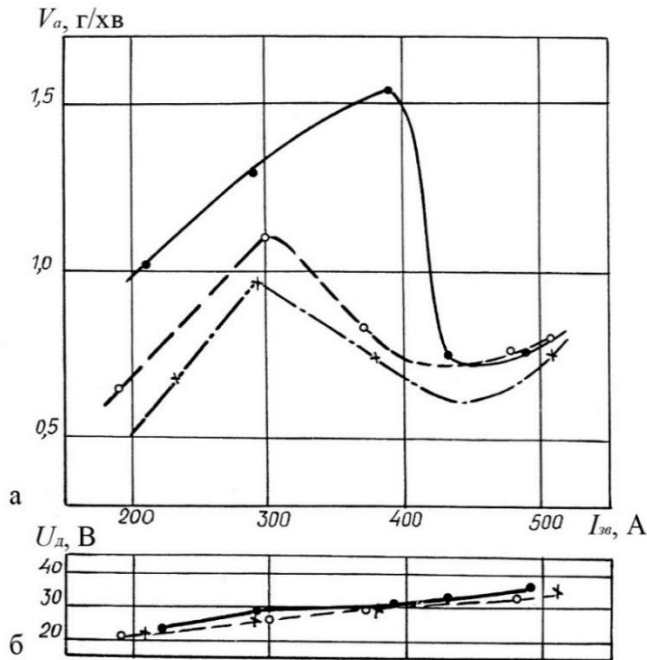


Рис. 2. Залежність інтенсивності утворення ЗА V_a від сили зварювального струму (а) і вольт-амперні характеристики дуги (б): ● – зварювання в CO_2 ; ○ – Ar+ O_2 + CO_2 ; x – Ar+ CO_2 (дріт Св-08Г2С)

На першій ділянці кривої (рис. 2) підвищення інтенсивності утворення ЗА зі збільшенням зварювального струму, звісно, пояснюється зростанням потужності дуги. Як показано в роботі [11], інтенсивність утворення ЗА залежить від характеру перенесення електродного металу. Її підвищення пояснюється збільшенням енергії дуги та посиленням розбризкування електродного металу. Бризки металу, що потрапляють у повітря, інтенсивно окислюються, що сприяє утворенню великої кількості ЗА.

Висока інтенсивність утворення ЗА при зварюванні в CO_2 пояснюється підвищеним розбризкуванням і окисленням електродного металу в порівнянні зі зварюванням в сумішах на основі аргону. При зварюванні в суміші $\text{Ar}+\text{O}_2+\text{CO}_2$ наявність кисню збільшує окисний потенціал газового середовища, тому інтенсивність виділень ЗА вища, ніж при зварюванні в суміші $\text{Ar}+\text{CO}_2$ [2].

На другій ділянці кривої (рис. 2) зниження інтенсивності виділення ЗА обумовлено зміною характеру перенесення електродного металу. При зварюванні в сумішах на основі аргону перенесення металу стає дрібнокрапельним (струменевим), а при зварюванні у вуглекислому газі – великокрапельним (без коротких замикань, з поступовим зануренням дуги у зварювальну ванну). Очевидно, зменшення розбризкування металу і занурення дуги у зварювальну ванну сприяє зменшенню викиду кількості парів металу за межі дуги. У разі застосування сумішей, що містять аргон, зниження інтенсивності виділення ЗА спостерігається за умови меншого зварювального струму порівняно зі зварюванням в CO_2 . Якщо зварювальний струм перевищує 420 А, інтенсивність виділення ЗА знову зростає (рис. 2). Це пов'язано зі збільшенням довжини дуги, площі поверхні зварювальної ванни та зменшенням глибини занурення дуги у ванну, що призводить до підвищення інтенсивності утворення парів та їх видалення із зони дуги.

Мінімальне виділення ЗА забезпечується за зварювального струму близько 420 А і напруги дуги 32...34 В. Застосування зварювання на цьому режимі доцільно і з технологічної точки зору. Для всіх досліджених захисних газів інтенсивність виділення ЗА в процесі зварювання на такому режимі приблизно однакові. Отже, у разі занурення дуги у зварювальну ванну склад захисного газу не має помітного впливу на утворення аерозолі.

Таким чином, можна стверджувати, що процес утворення ЗА складається з двох етапів:

1 – випаровування металу в зоні дуги;

2 – винесення частини пари за межі дуги, де вона конденсується у тверді частинки ЗА.

Виносу пари із зони дуги сприяє розбризкування металу, а перешкоджає занурення дуги у зварювальну ванну.

Підвищення потужності дуги спочатку сприяє збільшенню випаровування, а потім поглибленню проплавлення основного металу, що знижує до мінімуму виділення ЗА. Тому зварювання зануреною дугою є найбільш прийнятним у гігієнічному відношенні.

Визначення питомих виділень ЗА (рис. 3) дозволило оцінити втрати металу на випаровування. Максимальні втрати металу при зварюванні в CO_2 , $\text{Ar}+\text{CO}_2$, $\text{Ar}+\text{O}_2+\text{CO}_2$ становлять близько 2, 1,3 і 1,5 % відповідно. Зі збільшенням зварювального струму (для сумішей на основі аргону – починаючи з 300 А) ці втрати зменшуються, що покращує як гігієнічні, так і економічні характеристики процесу зварювання.

Зварювання в CO_2 характеризується тим, що питоме виділення ЗА на відміну від його інтенсивності утворення завжди знижується (рис. 3). Це пояснюється випереджаючим темпом розплавлення електродного дроту зі збільшенням зварювального струму порівняно з темпом зростання інтенсивності утворення ЗА (див. рис. 2).

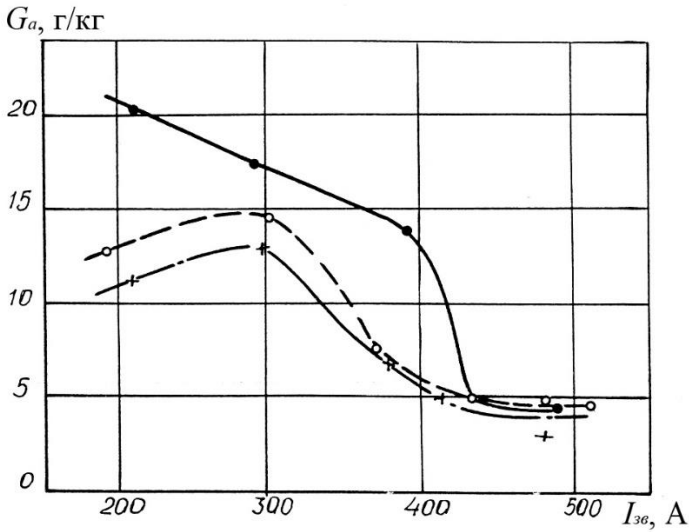


Рис. 3. Залежність питомих виділень ЗА G_a від сили зварювального струму: ● ○ x – див. рис. 2

Отже, для кожного діаметра зварювального дроту існують певні значення зварювального струму, за яких виділяється максимальна кількість ЗА, і ділянка значень сили струму, що забезпечує мінімальну інтенсивність виділення (рис. 4). Проте питомі виділення ЗА у разі зварювання в CO_2 завжди знижуються (рис. 5) з характерними перегинами кривих, що відповідають графікам (рис. 4).

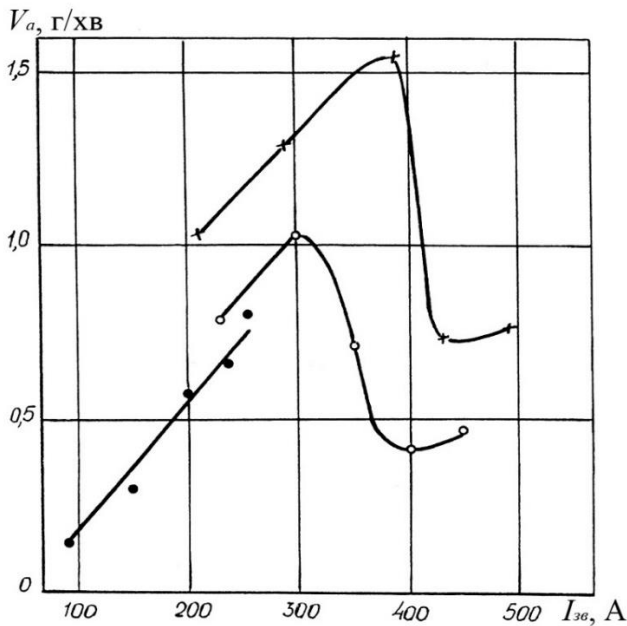


Рис. 4. Залежність інтенсивності утворення ЗА при зварюванні в CO_2 від сили струму: ● – зварювання дротом Св-08Г2С діаметром 1,2 мм; ○ - 1,6 мм; x – 2,0 мм

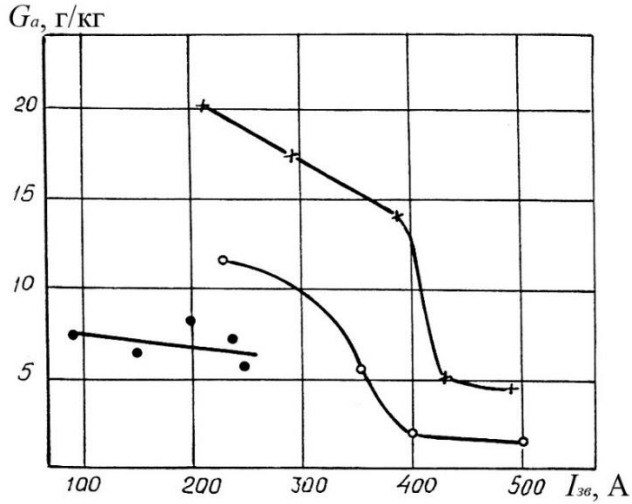


Рис. 5. Залежність питомих виділень ЗА від сили зварювального струму: ● ○ x – див. рис. 3

Складні екстремальні залежності інтенсивності виділення ЗА від режиму зварювання, що мають максимум і мінімум виділень, пояснюються не тільки потужністю зварювальної дуги, а й видом перенесення електродного металу. Разом з тим було встановлено, що на складний характер таких залежностей впливає і форма зварювальної ванни [2]. Для цього досліджували вплив режиму зварювання (сили зварювального струму та напруги дуги) на основні характеристики зварювальної ванни: ширину i і глибину h проплавлення, висоту опуклості c шва, а також їх зв'язок з показниками рівня виділень ЗА. Ці характеристики швів визначали на зразках металу, наплавленого у вуглекислому газі дротом марки Св-08Г2С діаметром 2,0 мм на пластину сталі ВСт3сп товщиною 12 мм. Наплавлення робили в тих же умовах, що і при дослідженні залежностей рівнів виділень ЗА від режиму зварювання. Режими наплавлення: зварювальний струм (постійний зворотної полярності) змінювався в межах від 200 до 500 А, напруга на дузі U_d відповідно – від 23 до 36 В, швидкість процесу наплавлення дорівнювала 16 м/год, виліт електрода становив 25 мм, витрата вуглекислого газу – 20 л/хв. Графіки будували по середніх значеннях із 6 вимірювань на макрошліфах зразків зварного шва, отриманих на кожному режимі.

Вивчення макрошліфів показало, що на всіх зразках (зокрема і наплавлених на режимі, що забезпечує мінімальне виділення ЗА) мають місце сприятливі геометричні параметри шва (таблиця). Це дозволяє шляхом підбору параметрів режиму зварювання забезпечити прийнятне поєднання необхідних геометричних параметрів шва та мінімальне виділення аерозолію.

З підвищенням зварювального струму та напруги на дузі глибина h та ширина проплавлення b , а також опуклість c шва збільшуються. Оскільки глибина проплавлення переважно визначається значенням зварювального струму, а ширина – напругою на дузі, розглянемо відповідні залежності.

Із рис. 6 видно, що залежність інтенсивності утворення ЗА від ширини проплавлення має складний вигляд з максимумом та мінімумом виділень.

Таблиця. Геометричні характеристики зварювальної ванни

№ шва	$I_{зв}, A$	$U_{д}, B$	$e, мм$	$h, мм$	$c, мм$
1	210	23,5	12,9	2,8	2,5
2	290	28,5	16,8	3,9	2,7
3	390	31,5	18,4	6,3	3,6
4	440	33,5	21,5	10,0	4,1
5	500	36,5	23,9	10,7	4,2

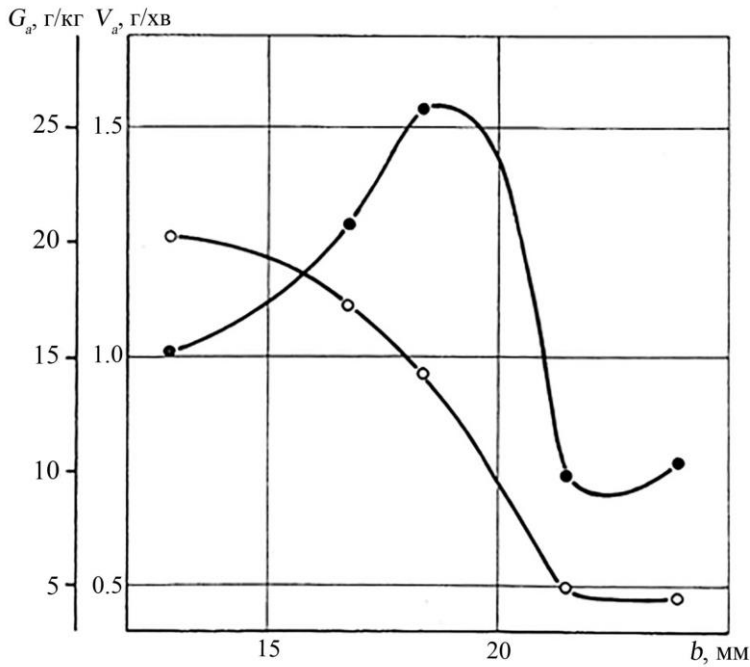


Рис. 6. Залежність інтенсивності V_a і питомого виділення G_a ЗА від ширини шва b при зварюванні в CO_2 дротом Св-08Г2С діаметром 2,0 мм

Залежність інтенсивності виділення ЗА від глибини проплавлення має схожий вигляд (рис. 7), що пояснюється впливом зварювального струму на глибину проплавлення.

Зіставлення залежностей інтенсивності утворення ЗА та глибини проплавлення від зварювального струму (рис. 8) показує, що різке зниження інтенсивності виділення ЗА при підвищенні струму від 400 до 440 відповідає різкому збільшенню глибини проплавлення металу. Це свідчить про те, що зниження інтенсивності утворення ЗА обумовлено зануренням дуги у зварювальну ванну внаслідок проплавлення основного металу.

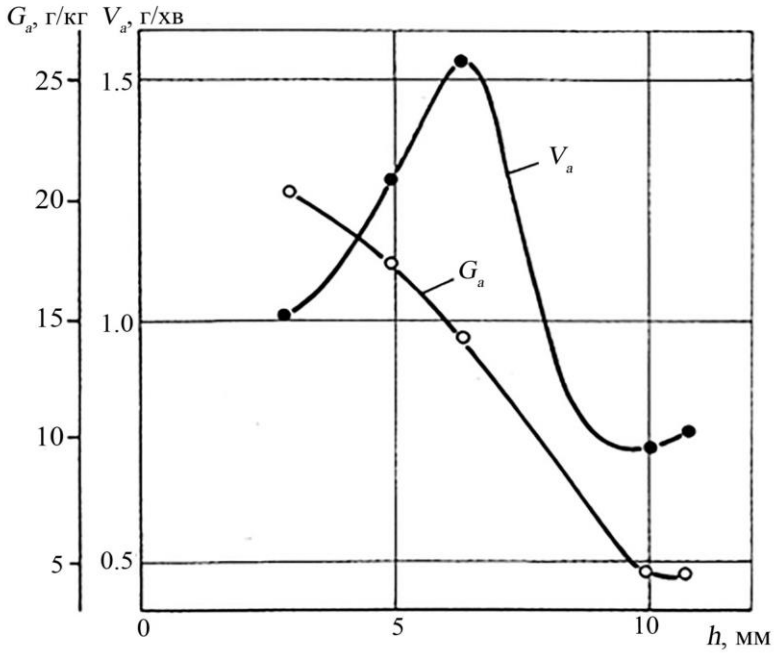


Рис. 7. Залежність інтенсивності V_a і питомого виділення G_a ЗА від глибини проплавлення h при зварюванні в CO_2 (Св-08Г2С, 2,0 мм)

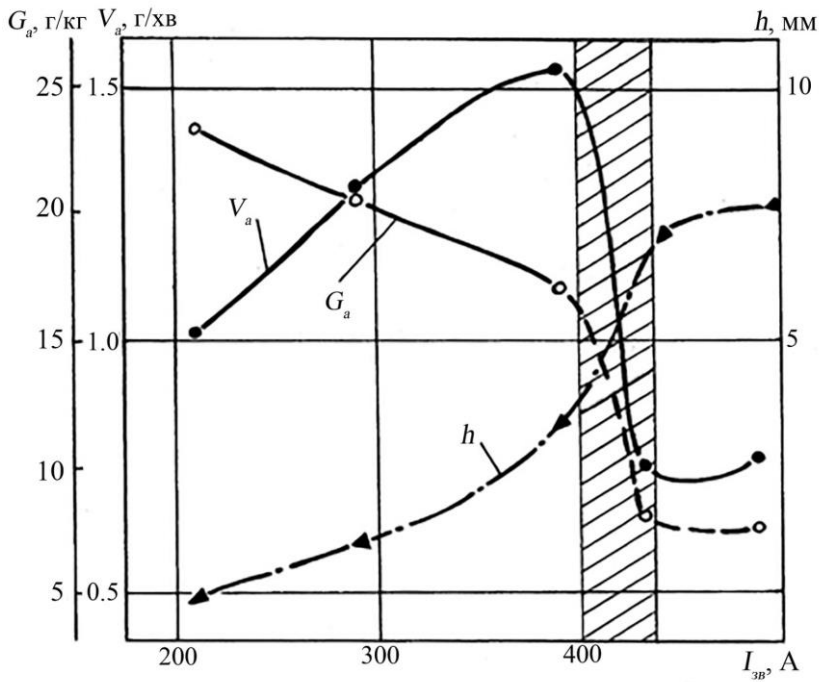


Рис. 8. Зіставлення інтенсивності V_a та питомого виділення G_a ЗА з глибиною проплавлення h залежно від зварювального струму при зварюванні в CO_2 (Св-08Г2С, 2,0 мм)

Отже, незважаючи на те, що рівень випаровування металу залежить і від площі поверхні зварювальної ванни, кількість викидів пари металу за межі дуги, головним чином, визначається глибиною її занурення у зварювальну ванну, яка залежить від глибини проплавлення основного металу. Глибина проплавлення, своєю чергою, залежить від тиску на поверхню зварювальної ванни плазмових потоків і потоку пари металу, які витісняють рідкий метал з-під основи стовпа дуги. Зі зростанням зварювального струму підвищується тиск дуги та збільшується глибина проплавлення. При цьому зварювальна дуга заглиблюється у ванну; пари металу переносяться з електрода на основний метал через дуговий проміжок, заповнений парами металу, і переважно конденсуються на основному металі. Незначна частина пари виноситься з ванни через проміжок між електродом і ванною в навколишню атмосферу [2].

Встановлено, що інтенсивне проплавлення основного металу починається за потужності дуги приблизно 12,3 кВт і закінчується при 14,4 кВт. Подальше підвищення потужності зануреної дуги сприяє вже збільшенню обсягу проплавлення внаслідок гарного контакту дуги з основним металом і високої тепловіддачі цьому металу, а отже, – і виходу пари із об'єму плавильного простору, що збільшується, за його межі (у повітря). При цьому інтенсивність утворення ЗА знову починає дещо збільшуватися (див. рис. 2, 8). Для дротів діаметром 1,6...2,0 мм мінімальні виділення відзначаються за потужності дуги 14,0...16,0 кВт.

Вивчення залежностей питомого виділення ЗА від режиму зварювання (див. рис. 3, 8) свідчить про те, що цей гігієнічний показник, жорстко пов'язаний з інтенсивністю утворення ЗА, – знижується при підвищенні зварювального струму, збільшенні ширини шва і глибини проплавлення. Причому максимальний темп зменшення питомого виділення ЗА відповідає ділянці різкого збільшення глибини проплавлення основного металу у разі підвищення зварювального струму (див. рис. 7, 8).

Таким чином, істотний вплив на інтенсивність утворення ЗА має форма зварювальної ванни (глибина проплавлення основного металу), що визначає рівень випаровування металу. Це необхідно враховувати для оптимізації технологічних параметрів режиму зварювання з метою зниження рівня виділень ЗА.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Інтенсивність утворення ЗА під час зварювання в захисних газах плавким електродом залежить від потужності зварювальної дуги, характеру перенесення електродного металу, ступеня його розбризкування і глибини занурення дуги в метал, що зварюється. Збільшення інтенсивності утворення ЗА з підвищенням зварювального струму та напруги дуги спостерігається у разі перенесення металу з короткими замиканнями. З переходом до краплинного перенесення без замикань дугового проміжку інтенсивність утворення ЗА починає знижуватися і досягає мінімуму при зануренні дуги у зварювальну ванну. Для кожного діаметра зварювальних дротів існують певні значення зварювальних струмів, за яких виділяється максимальна кількість ЗА, та діапазон струмів, що забезпечує мінімальну інтенсивність утворення ЗА. При зварюванні на оптимальних режимах рівень виділення ЗА зменшується під час використання дротів меншого діаметра.

Отримані результати досліджень показують, як правильний вибір зварювальних матеріалів, захисного газу та параметрів режиму зварювання дає можливість знижувати рівні виділень шкідливих речовин. Ці результати сприятимуть подальшому вдосконаленню технологій зварювання та модернізації зварювальних технологій, що дозволить поліпшити умови праці у зварювальному виробництві та знизити професійну захворюваність зварників.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Senthil Murugan, S. & Sathiya, P. (2024). Analysis of welding hazards from an occupational safety perspective. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, 66(3), 63-74. <https://doi.org/10.31276/VJSTE.2023.0007>
2. Левченко, О. Г. (2025). Зварювальні аерозолі і гази: процеси утворення, методи нейтралізації та засоби захисту. 2-ге вид., доповн. *Видавництво «Каравела»*, 226.
3. Fumees de soudage: valeurs limites, evaluation des risques, mesures de prevention. Etudes et recherche. Hygiene et securite. (2006). *Soudage et techniques connexes*, 7/8, 31-33.
4. Tanneberger, J. F.W.G. (2009). Schweißrauch am Arbeitsplatz – Gefahr für die Gesundheit. *Der Praktiker*, 9, 328.
5. Berlinger, B., Benker, N., Weinbruch, S. et al. (2010). Physicochemical characterization of different welding aerosols. *Anal Bioanal Chemistry*, 10, 1773–1789.
6. Kobayashi, M., Maki, S. & Ohe, I. (1976). Factors affecting the amount of fumes generated by manual metal arc welding. *IIW Doc. II E-211–76*, 22.
7. Eichorn, F., Trosken, F. & Oldenburg, T. (1980). Untersuchung der Entstehung gesundheitsgefahrender Schweißrauche beim Lichtbogen-handschweißen und Schutzgasschweißen: Forschungs-berichte. *Humanisierung des Arbeitslebens der Schweisser*, B2, 84.
8. Kimura, Y., Lchihara, I. & Kobayashi, M. (1974). Some quantitative evaluation of fumes generated from coated arc electrodes. *IIW Doc. II-701–74*, 17.
9. Jenkins, N., Met, A., Moreton, J. et al. (1981). *Welding Fume*, vol. 2. Published by the Welding Inst., Abington Hall Abington. *Cambridge CB16AL*, 211-506.
10. Kobayashi, M., Maki, S., Hashimoto, Y. & Suga, T. (1978). Some considerations about the formation mechanisms of welding fume. *Welding World*, 11-12, 238-245.
11. Levchenko, O. G. (1992). Effect of CO₂ welding conditions of structural steels on fume formation. *The Paton Welding Journal*, 4 (9-10), 525-527.
12. ДСТУ EN ISO 15011-1:2021. (2021). Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання проб аерозолів і газів, утворюваних під час дугового зварювання. Частина 1. Визначення швидкості виділення та відбирання проб для аналізування мікрочастинок аерозолів. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 8.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2025, надійшла після рецензування 20.01.2026, прийнята 26.02.26

REFERENCES

1. Senthil Murugan, S. & Sathiya, P. (2024). Analysis of welding hazards from an occupational safety perspective. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, 66(3), 63-74. <https://doi.org/10.31276/VJSTE.2023.0007>
2. Levchenko, O. G. (2025). *Welding aerosols and gases: Formation processes, neutralization methods, and protection means*. (2nd ed). Kyiv: *Caravela* [in Ukrainian].
3. Fumees de soudage: valeurs limites, evaluation des risques, mesures de prevention. Etudes et recherche. Hygiene et securite. (2006). *Soudage et techniques connexes*, 7/8, 31-33.

4. Tanneberger, J. F.W.G. (2009). Schweißrauch am Arbeitsplatz – Gefahr für die Gesundheit. *Der Praktiker*, 9, 328.
5. Berlinger, B., Benker, N., Weinbruch, S. et al. (2010). Physicochemical characterization of different welding aerosols. *Anal Bioanal Chemistry*, 10, 1773–1789.
6. Kobayashi, M., Maki, S. & Ohe, I. (1976). Factors affecting the amount of fumes generated by manual metal arc welding. *IIW Doc. II E-211–76*, 22.
7. Eichorn, F., Trosken, F. & Oldenburg, T. (1980). Untersuchung der Entstehung gesundheitsgefährdender Schweißrauche beim Lichtbogenhandschweißen und Schutzgasschweißen: Forschungsberichte. *Humanisierung des Arbeitslebens der Schweisser*, B2, 84.
8. Kimura, Y., Lchihara, I. & Kobayashi, M. (1974). Some quantitative evaluation of fumes generated from coated arc electrodes. *IIW Doc. II-701–74*, 17.
9. Jenkins, N., Met, A., Moreton, J. et al. (1981). *Welding Fume*, vol. 2. Published by the Welding Inst., Abington Hall Abington. *Cambridge CB16AL*, 211-506.
10. Kobayashi, M., Maki, S., Hashimoto, Y. & Suga, T. (1978). Some considerations about the formation mechanisms of welding fume. *Welding World*, 11-12, 238-245.
11. Levchenko, O. G. (1992). Effect of CO₂ welding conditions of structural steels on fume formation. *The Paton Welding Journal*, 4 (9-10), 525-527.
12. ДСТУ EN ISO 15011-1:2021. (2021). Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling aerosols and gases generated during arc welding [Part 1]. Determination of release rate and sampling for analysis of aerosol microparticles. Kyiv: DP “UkrNDNTS”, 8 [in Ukrainian].

The article was received 25.11.2025, received after revision 20.01.2026, accepted 26.02.26

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

Гльчук Оксана Степанівна

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/0000-0001-6352-5320> **e-mail:** oksana_i@i.ua

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