

ГІГІЄНІЧНА ОЦІНКА АЕРОЗОЛІВ ПРИ КОНТАКТНОМУ СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ОПЛАВЛЕННЯМ

О.Г. Левченко¹, О.В. Демецька², Ю.О. Полукаров¹, О.М. Гончарова³, О.М. Безушко³, Н.А. Праховнік¹,
О.С. Ільчук¹, І.М. Андрусишина⁴

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37.
E-mail: mail@kpi.ua

²Національний університет охорони здоров'я України ім. П.Л. Шупика. 04112. м. Київ, Дорогожицька, 9.
E-mail: dalexandra@ukr.net

³Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

⁴ДУ «Інститут медицини праці ім. Ю.І. Кундієва Національної академії медичних наук України». 01033, м. Київ,
вул. Саксаганського, 75. E-mail: andrusyshyna.in@gmail.com

Метою статті є дослідження гігієнічних характеристик шкідливих речовин, що забруднюють повітря при контактному стиковому зварюванні безперервним та пульсуючим оплавленням, для створення відповідних заходів захисту зварників. Наведено опис методів досліджень хімічного складу зварювальних аерозолів і газів, дисперсного складу аерозолів та оцінки їх впливу на організм зварників. Встановлено, що контактне стикове зварювання оплавленням рейок Р65 супроводжується виділенням у повітря робочої зони шкідливих речовин у формі аерозолів на рівні нанодіапазону, яким притаманна висока біологічна активність. Показано, що токсичність аерозолу при безперервному і пульсуючому оплавленні належить до помірно небезпечного класу. Головними елементами, які визначають токсичність аерозолу, є марганець та залізо. Встановлено, що при контактному стиковому зварюванні оплавленням утворюється аерозоль, у складі якого присутні нанорозмірні компоненти марганцю та заліза у концентраціях, що перевищують розрахункові орієнтовно безпечні рівні впливу на людину. Виконані дослідження показали, що стикове зварювання оплавленням супроводжується утворенням на робочому місці таких токсичних газів як діоксид азоту і монооксид вуглецю у концентраціях, які перевищують гранично допустимі. Отримані результати комплексної гігієнічної оцінки аерозолів при контактному стиковому зварюванні оплавленням надали вичерпну інформацію про рівень шкідливого впливу цих аерозолів на організм зварників. Бібліогр. 20, табл. 5, рис. 11.

Ключові слова: контактне зварювання, аерозолі, гази, розміри, нанорозмірні частинки, рекомендації

Вступ. В останнє десятиліття в усьому світі при будівництві безстикових шляхів швидкісних залізничних магістралей використовуються рейки підвищеної міцності. Для їх з'єднання переважно застосовується контактне стикове зварювання оплавленням (КСЗО), яке має суттєві технічні переваги в порівнянні з іншими способами зварювання: забезпечує підвищену зносостійкість і міцність зварних з'єднань [1]. Разом з тим КСЗО, як і більшість інших способів зварювання, має певні недоліки, пов'язані з наявністю шкідливих і небезпечних виробничих факторів. Серед них найбільш шкідливим для зварників є виділення в повітря робочої зони шкідливих речовин у формі зварювального аерозолу (ЗА). Вплив ЗА на організм людини унікальний, що пояснюється його хімічним і нанорозмірним складом, який і забезпечує підвищену проникну здатність частин аерозолу в організм людини різними шляхами.

Для захисту зварників застосовується комплекс відомих заходів з нормалізації умов праці

на виробництві шляхом застосування сучасних вискоелективних систем вентиляції. Так, існуючі засоби місцевої вентиляції уловлюють ЗА безпосередньо біля джерела його утворення, попереджаючи таким чином його розповсюдження по виробничому приміщенню. Вони видаляють невеликі об'єми повітря, застосовуючи малопотужні вентилятори. Проте у випадку КСЗО інтенсивність виділення ЗА значно більша, ніж, наприклад, при механізованому зварюванні під флюсом. При цьому варто брати до уваги, що ЗА представлені твердими частинками меншими 100 нм у формі агломератів обсягом від кількох до тисяч частинок [2]. Тому, актуальною постає задача визначення кількісного та дисперсного складу ЗА для розроблення ефективного фільтровентиляційного обладнання й інших заходів захисту зварників.

Слід зазначити, що раніше досить докладно і всебічно були вивчені проблеми аерозолів і газів, що утворюються під час дугового зварювання

Левченко О.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-9737-7212>, Демецька О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8174-7813>,
Полукаров Ю.О. – <https://orcid.org/0000-0002-6261-3991>, Гончарова О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-5213-6300>,
Безушко О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-6148-1675>, Праховнік Н.А. – <https://orcid.org/0000-0003-0821-2166>,
Ільчук О.С. – <https://orcid.org/0000-0001-6352-5320>, Андрусишина І.М. – <https://orcid.org/0000-0001-5827-3384>

© О.Г. Левченко, О.В. Демецька, Ю.О. Полукаров, О.М. Гончарова, О.М. Безушко, Н.А. Праховнік, О.С. Ільчук, І.М. Андрусишина, 2023

різними способами. Менш досліджене контактне стикове зварювання оплавленням. Тому для створення належних санітарно-гігієнічних умов праці операторів КСЗО під час зварювання залізничних рейок необхідно визначити гігієнічні характеристики ЗА з метою розроблення заходів захисту працюючих. Для цього необхідно мати дані про хімічний та дисперсний склад ЗА, їх концентрацію в повітрі робочої зони та токсичність.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У сучасній літературі мало даних про ЗА, які б стосувалися конкретно контактного стикового зварювання оплавленням. Є деякі дані про дисперсний склад ЗА [2], що утворюються при дуговому зварюванні, їх фізико-хімічні властивості [3] та проникаючу здатність частинок різних фракцій у різні ділянки органів дихання [4]. У роботі [5] наведено дані про особливості поведінки аерозолів у дихальних шляхах, у роботі [6] – їх класифікацію за розміром та місцем локалізації в органах дихання і дію елементів ЗА на організм.

Розглядаючи властивості аерозолів, слід брати до уваги, з яких позицій проводиться їх гігієнічна оцінка. Для інженерів вентиляційних систем ключовими властивостями частинок аерозолів можуть бути, перш за все ті, які визначають особливості їх поведінки в навколишньому середовищі. Для медиків – ті властивості, які характеризують вплив частинок на стан організму [4, 5]. Так, із рис. 1 видно, що розміри частинок мають вирішальне значення для їх проникання в органи дихання та седиментації на окремих ділянках. Тому дослідженню цього параметра частинок приділяють особливу увагу.

При цьому виникає питання про механізм (схему) утворення ЗА, чим власне і визначається їх дисперсний склад. Так, на рис. 2 наведено схему утворення ЗА при стиковому зварюванні оплавленням залізничних рейок. Вона полягає в наступному. Спочатку відбувається нагрівання металу до утворення на торцях деталей рейок, що зварюються, шару розплавленого металу. У процесі

зближення деталей, що знаходяться під напруженою джерела, у момент їх дотику при порівняно невеликому тиску, на поверхні торців між їх локальними ділянками утворюються електричні контакти. При проходженні струму через контакти відбувається їх швидке плавлення та утворення перемичок з рідкого металу. Перемички руйнуються з високою швидкістю, тривалість їх існування зазвичай не перевищує 0,001...0,005 с. У результаті стиснення перемички збільшується щільність струму, який у ній протікає, отже збільшується і швидкість нагрівання. При досягненні великої щільності струму, метал у центрі перемички інтенсивно випаровується і викликає її вибух. У момент вибуху тиск парів досягає 10...20 МПа, а температура – 6000...8000 °С. Краплі розплавленого металу викидаються із зазору у вигляді іскор (зі швидкістю, яка перевищує 60 м/с). Руйнування перемичок і викид розплавленого металу за межі зони зварного з'єднання призводить до утворення накопиченої теплової енергії. У результаті руйнування перемичок на торцях утворюються кратери, глибина та діаметр яких залежать від розміру перемички [1].

Перемички розплавленого металу є джерелом теплоти, частина якої протягом часу їх існування передається теплопровідністю торцям деталей, за рахунок якої відбувається інтенсивне випаровування металу. Після викидання цих парів із зони високої температури за межі зони зварювання в низькотемпературну зону відбувається їх окиснення і конденсація в тверді частинки, які і являють собою власне зварювальний аерозоль. Ці частинки ЗА утворюються із парів металу і мають дуже малі розміри – від тисячних до 10 мкм. Тому дослідників і цікавить найважливіше питання щодо конкретного розміру частинок ЗА, особливо нанорозмірних фракцій.

Особливістю токсичної дії наночастинок аерозолів, що утворюються при зварювальних роботах, може бути те, що в повітрі робочої зони одночасно знаходяться частинки різних хімічних



Рис. 1. Проникна здатність частинок аерозолів різних фракцій у різні ділянки органів дихання

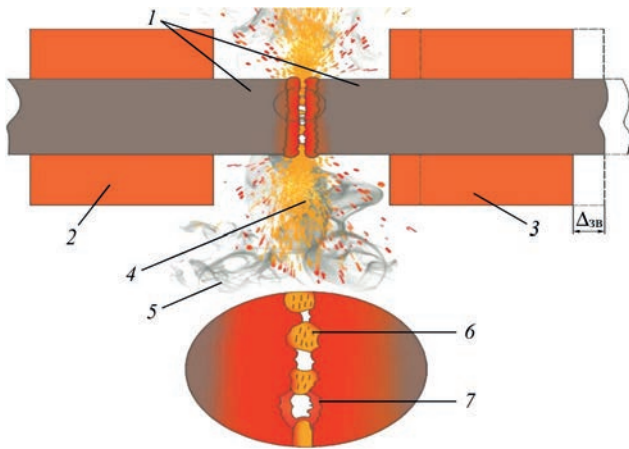


Рис. 2. Схема утворення зварювального аерозолю при стиковому зварюванні оплавленням: 1 – деталі, що зварюються; 2 – нерухомий струмопровідний зажим (затискач-електрод); 3 – рухомий струмопровідний зажим (затискач-електрод); 4 – іскри (бризки) рідкого металу; 5 – зварювальний аерозоль; 6 – перемичка з рідкого металу; 7 – кратер

елементів різного розміру. До складу ЗА переважно входять сполуки металів (заліза, марганцю, хрому, алюмінію, титану, цинку, міді, нікелю та ін.), газоподібні фтористі сполуки, оксиди вуглецю, оксиди азоту, озон тощо [2, 3].

Залежно від розміру частинки аерозолю можуть осідати в трахеї, бронхах та бронхіолах, а потім видалятися з цих органів за допомогою волосків. Якщо осілий пил погано розчиняється в слизовій оболонці та тканинах органів дихання, то він не викликає пневмоконіозу. Якщо ж осілі частинки аерозолю розчинні, то їх загальна токсична дія на організм може виявлятися залежно від хімічного складу цього аерозолю [7].

Частинки різного розміру по-різному впливають на організм зварника. Частинки діаметром менше 20 мкм можуть залишатися зваженими в повітрі [8], частинки розміром більше декількох мікрметрів осідають на стінках повітряних шляхів організму та виводяться назовні разом зі слизом. Близько 30 % частинок розміром 0,1...1,0 мкм, а також розміром менше 0,1 мкм (100 нм) осідають в легенях. Майже 100 % частинок діаметром менше 1 мкм проникають в організм дихальними шляхами [3]. Можливе проникнення нанорозмірних частинок через шкіру [9] та нюховий нерв [10].

Незалежно від шляху надходження в організм наночастинки потрапляють в кровоносну систему і з кров'ю розносяться по всьому організму. Вони можуть накопичуватися в кістковому мозку, центральній і периферичній нервовій системах, органах шлунково-кишкового тракту, легенях, печінці, нирках, лімфатичних вузлах, мати тривалий період напіввиведення [11, 12]. Найбільш токсичними елементами під час зварювальних робіт при інгаляційному шляху надходження у вигляді аерозолю

можуть бути нанодисперсні частинки оксидів марганцю, хрому, нікелю тощо [13].

Таким чином, аналіз літературних даних свідчить, що питання захисту операторів контактного стикового зварювання оплавленням і досі залишаються не вирішеними. Тому суттєвого опрацювання потребують питання дослідження хімічного і дисперсного складу ЗА з метою розроблення відповідних заходів захисту.

Метою дослідження є визначення закономірностей утворення зварювального аерозолю при контактному стиковому зварюванні оплавленням для їх гігієнічної оцінки з метою розроблення заходів захисту операторів-зварників.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- визначити інтенсивність утворення (виділення), хімічний склад ЗА та концентрацію газів при застосуванні КСЗО;

- дослідити дисперсний склад ЗА нанорозмірних фракцій.

Матеріали та методики досліджень. Дослідження зазначених гігієнічних показників ЗА, що утворюються при контактному стиковому зварюванні залізничних рейок, проводили у виробничому приміщенні Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона. Для цього виконували зварювання залізничних рейок Р65 (марка сталі – К76Ф, площа перерізу рейки – 8200 мм²) на машині контактного стикового зварювання К1000. Зварювання здійснювали неперервним та пульсуючим оплавленням на загальноприйнятих режимах.

Дослідження інтенсивності виділень ЗА виконували гравіметричним методом шляхом відбирання проб ЗА в процесі зварювання, визначення хімічного складу ЗА – фотоколориметричними методами. Визначення токсичності ЗА (граничного значення та гігієнічного класу ЗА) здійснювали розрахунковим методом відповідно до ДСТУ ISO 15011-4:2008 [14].

Схема стенду для відбирання проб ЗА при контактному стиковому зварюванні на установці К1000 наведена на рис. 3.

Проби ЗА відбиралися в процесі роботи установки К1000 (контактне стикове зварювання, профіль рейок Р-65, час зварювання 141 с, час відбору проби 30 хв, відібрано 15 дм³ повітря зі швидкістю 0,5 дм³/хв).

Для дослідження масової концентрації зважених частинок і концентрації хімічних речовин повітря з об'ємною витратою 0,5 дм³/хв аспірували за допомогою пробовідбірника «Тайфун Р-20-2» (Україна) через спеціальний поглинач. Відібрану пробу відфільтрували за допомогою шприцу із приєднаним фільтротримачем із мембранним дисковим фільтром «Domnick Hunter» (Англія) діаметром 25 мм і розміром пор 100 нм [15].

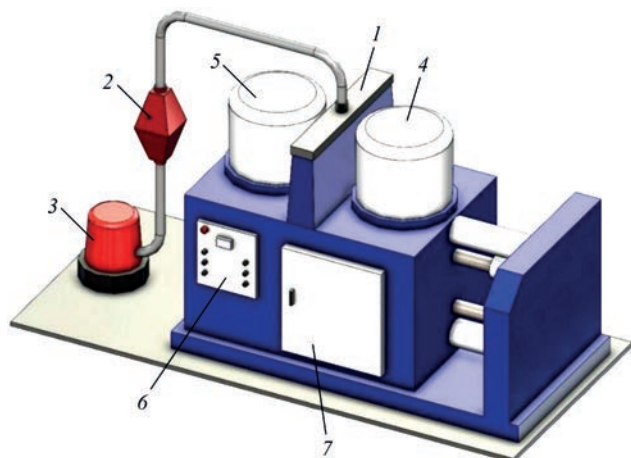


Рис. 3. Схема відбирання проб ЗА при контактному стиковому зварюванні на установці K1000: 1 – забірне сопло (укриття зони зварювання); 2 – камера фільтротримача з фільтром із тканини ФПП; 3 – збуджувач тяги; 4 – нерухома колона; 5 – рухома колона; 6 – блок керування; 7 – дверцята, якими закриваються затискачі-електроди

Хімічний склад проб повітря визначали методом оптико-емісійної спектроскопії з індуктивно зв'язаною плазмою (ОЕС-ІЗП) за допомогою приладу «Optima 2100 DV» («PerkinElmer», США).

Визначення концентрації газів CO та NO₂ в повітрі робочої зони виконували за допомогою газоаналізаторів «Аквілон-1-1» і «Аквілон-1-2», відповідно.

Розмір твердих частинок у пробі ЗА визначали двома методами: методом Паде-Лапласа та кумулянтним (для підвищення достовірності результатів). Користувались методом динамічного розсіювання світла за допомогою приладу «Analysette 12 DynaSizer» («Fritsch», Німеччина) [15].

Розрахунок орієнтовно безпечних рівнів впливу (ОБРВ) для хімічних речовин у нанорозмірному стані здійснювали за допомогою коефіцієнтів, рекомендованих Британським Інститутом Стандартів [16] та відповідно до методичних рекомендацій «Гігієнічне нормування та контроль наноматеріалів у виробничому середовищі» [17].

Експериментальна частина. *Визначення хімічного складу, інтенсивності виділення зварювальних аерозолів та концентрації газів.* Режими зварювання та результати визначення інтенсивності виділення ЗА при контактному стиковому зварюванні безперервним та пульсуючим опрацюванням рейок Р 65 наведено в табл. 1.

Результати визначення інтенсивності виділення ЗА, що утворився при безперервному та пульсуючому оплавленні рейок Р65 наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Режим зварювання та інтенсивність виділення зварювального аерозолю при контактному стиковому зварюванні безперервним та пульсуючим опрацюванням

Режим зварювання	f , Гц	$I_{зв}$, А	$U_{зв}$, В	$t_{зв}$, с	V_a , г/хв	V_{Mn} , г/хв	V_{Al} , г/хв
Безперервний	50	9464	6.8	141	2.61	0,040	0,039
Пульсуючий	50	24752	6.5	101	3.54	0,054	0,053

Примітка. f , Гц – частота струму; $I_{зв}$, А – сила зварювального струму; $U_{зв}$, В – напруга зварювання; $t_{зв}$, с – час зварювання; V_a , г/хв – інтенсивність виділення ЗА за хвилину; V_{Mn} – інтенсивність виділення марганцю; V_{Al} – інтенсивність виділення алюмінію.

Вони свідчать, що інтенсивність виділення ЗА збільшується при пульсуючому оплавленні рейок.

Аналіз хімічного складу ЗА (табл. 2) показав, що він містить такі шкідливі компоненти як марганець та алюміній у незначній кількості. Відповідно решта компонентів ЗА належить залізу, який становить переважну кількість як у складі рейок, так і у складі ЗА. Інтенсивність виділення цих компонентів (табл. 1) змінювалася відповідно до способу оплавлення. Для контактної стикової зварювання безперервним оплавленням ці значення були менші, оскільки в даному випадку застосовували більші струми.

Для розрахунку кінцевих показників гігієнічної оцінки КСЗО користувались методичним стандартом ДСТУ ISO 15011-4:2008 [14]. Результати розрахунків, тобто гігієнічний клас даного способу зварювання наведено в табл. 3.

Згідно класифікації [14] найменші значення інтенсивності виділення ЗА належать до позначки класу «А», а найбільші – «Е». Цифровий клас ЗА може змінюватися від 0 до 5: 0 – найбільш шкідливий; 5 – найменш шкідливий. Номер класу способу зварювання вказує на відповідну токсичність ЗА і на приблизну його концентрацію, якої необхідно дотримуватися. Двозначне позначення класу цифрою та літерою дає можливість отримати загальний показник ступеню впливу ЗА на організм зварника.

Згідно з проведеними розрахунками (табл. 3) рівень виділення ЗА як при безперервному, так і при пульсуючому контактному зварюванні рейок Р65 належить до одного і того ж класу – «4d». Для цього класу характерні коливання інтенсивності виділення ЗА від 15 до 25 мг/с, а граничне значення токсичності ЗА LV_{WF(A)} знаходиться в межах 3,5...4,5 мг/м³.

Важливим фактором, що впливає на умови праці при зварюванні є наявність у повітрі робочої зони таких газів як монооксид вуглецю CO та діоксид азоту NO₂. Концентрація цих газів у зоні зварювання регламентується санітарними нормами [18].

Результати досліджень концентрації CO і NO₂ на робочому місці при КСЗО рейок Р65 залежно від режиму зварювання наведено в табл. 4 з урахуванням похибки вимірювань.

Таблиця 2. Хімічний склад зварювального аерозолю, що утворився при контактному стиковому зварюванні оплавленням

Речовина	Mn	Al	Fe
Мас. %	1,53	1,15	Решта

Таблиця 3. Показники гігієнічної оцінки контактної стикового зварювання безперервним та пульсуючим управлінням рейок Р65

Режим зварювання	$I_{зв}$, А	V_a , мг/с	$LV_{WF(A)}$, мг/м ³	Гігієнічний клас
Безперервний	9464	14,5	3,874	4d
Пульсуючий	24752	19,7	3,874	4d

Результати даних досліджень показали, що концентрація монооксиду вуглецю підвищується зі збільшенням зварювального струму і може перевищувати гранично допустиму концентрацію (ГДК), яка становить 20 мг/м³ згідно з нормативним значенням [18]. Концентрація діоксиду азоту змінюється несуттєво і не перевищує ГДК (2 мг/м³). При цьому монооксид вуглецю виділяється більше при пульсуючому оплавненні, а діоксид азоту – при безперервному оплавненні.

Результати досліджень дисперсного складу зварювальних аерозолів нанорозмірних фракцій. Результати досліджень дисперсного складу ЗА нанорозмірних фракції при контактному зварюванні безперервним оплавненням, виконаних за методами Паде-Лапласа та кумулянтним, наведено на рис. 4–6. Два зазначені методи використано для підвищення достовірності результатів досліджень. При цьому реєстрували інтенсивність випромінюваного сигналу, створеного опроміненням частинок ЗА, об'єм, який частинки займають у пробі, а також кількість частинок у пробі. Таким чином, було встановлено, що середній аеродинамічний діаметр частинок ЗА становить 295,2 нм.

Результати даних досліджень показали, що дані, отримані кумулянтним методом, кореспондують із даними, отриманими методом Паде-Лапласа.

Зокрема, середній аеродинамічний діаметр частинок ЗА у пробі становить 310,13 нм, тоді як середній діаметр відповідно до інтенсивності сигналу, що випромінюється, становить 341,77 нм. За займаним об'ємом середній діаметр ЗА становить 371,86 нм, а за кількістю частинок у пробі – 236,41 нм (рис. 7–9). Разом з тим у пробі ЗА виявлено частинки розміром від 70,81 нм до 1071,8 нм.

Результати визначення середнього аеродинамічного діаметру ЗА, відібраних при контактному стиковому зварюванні пульсуючим оплавненням показали наступне. Відповідно до методу Паде-Лапласа за інтенсивністю випромінюваного сигналу, займаним об'ємом та кількістю частинок у пробі цей діаметр частинок як і при безперервному оплавненні становить 295,2 нм.

Разом з тим, як видно з рис. 10, 11 у пробі спостерігається розподіл частинок на фракції, а

Таблиця 4. Концентрація CO і NO₂ на робочому місці при стиковому зварюванні на різних режимах зварювання

Режим зварювання	$I_{зв}$, кА	Масова концентрація, мг/м ³	
		CO	NO ₂
Безперервний	9,464	18,8 ± 2,0	1,3 ± 0,5
Пульсуючий	24,752	20,4 ± 2,1	1,2 ± 0,5

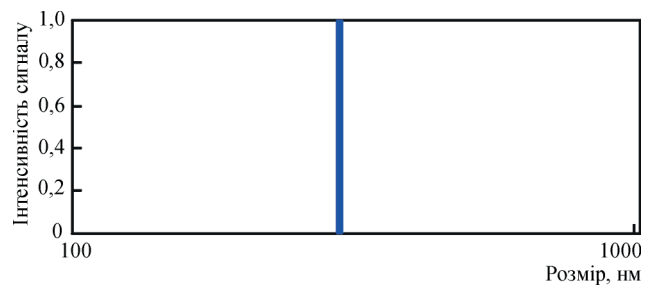


Рис. 4. Середній діаметр частинок ЗА за інтенсивністю сигналу, що випромінюється частинками (метод Паде-Лапласа)

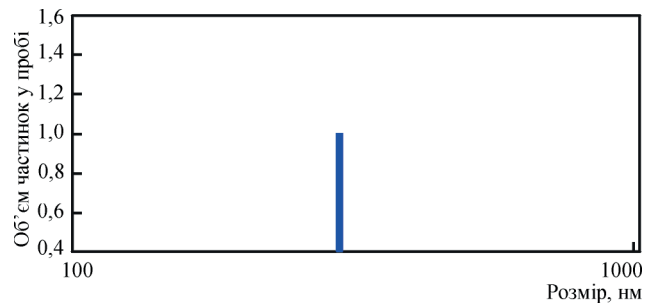


Рис. 5. Середній діаметр частинок ЗА за займаним об'ємом (метод Паде-Лапласа)

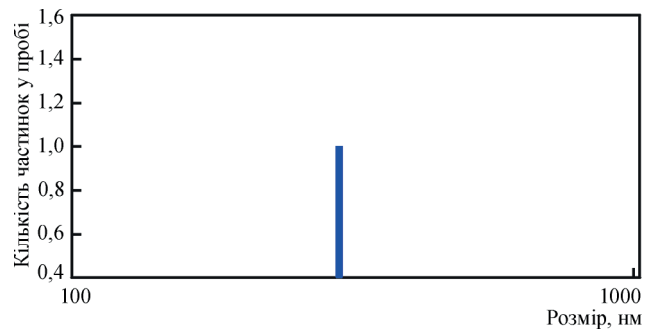


Рис. 6. Середній діаметр частинок ЗА за кількістю частинок у пробі (метод Паде-Лапласа)

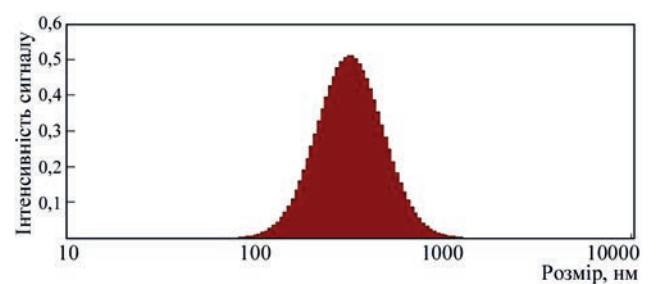


Рис. 7. Розподіл розміру частинок ЗА за інтенсивністю сигналу, що випромінюється частинками (кумулянтний метод)

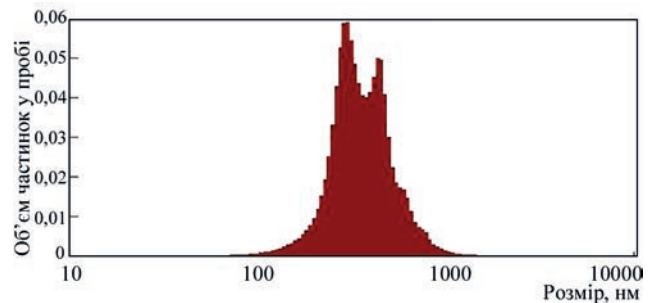


Рис. 8. Розподіл розміру частинок ЗА за займаним об'ємом у пробі (кумулянтний метод)

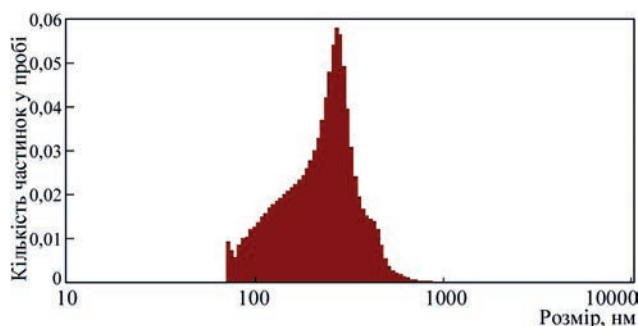


Рис. 9. Розподіл розміру частинок ЗА за кількістю у пробі (кумулянтний метод)

саме 62 % об'єму займають частинки розміром 145,54 нм. Також присутня фракція із середнім розміром 1698,69 нм (38 % об'єму), що може бути пояснено агломерацією частинок у проміжок часу від відбору проби до моменту їх дослідження (24 год).

Своєю чергою, кумулянтним методом встановлено, що середній аеродинамічний діаметр частинок у пробі ЗА становить 292,2 нм, а середній діаметр відповідно до інтенсивності сигналу, що випромінюється, становить 311,01 нм. За займаним об'ємом – 334,53 нм і за кількістю частинок у пробі – 251,97 нм. Окрім того, у пробі виявлено частинки розміром від 102,36 до 851,36 нм.

Аналізуючи проби ЗА, відібрані при контактному стиковому зварюванні безперервним оплавленням, слід зазначити, що вельми близькі дані були отримані за допомогою обох застосованих методів (Паде-Лапласа та кумулянтного). Це свідчить на користь адекватності отриманих результатів щодо розміру частинок, які утворилися як після контактного стикового зварювання безперервним оплавленням, так і пульсуючим.

Подальші дослідження хімічного складу ЗА, відібраних при КСЗО, виконувались за допомогою

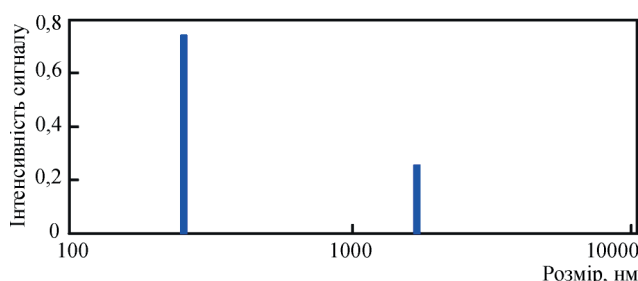


Рис. 10. Середній діаметр частинок ЗА за інтенсивністю сигналу, що випромінюється (метод Паде-Лапласа)

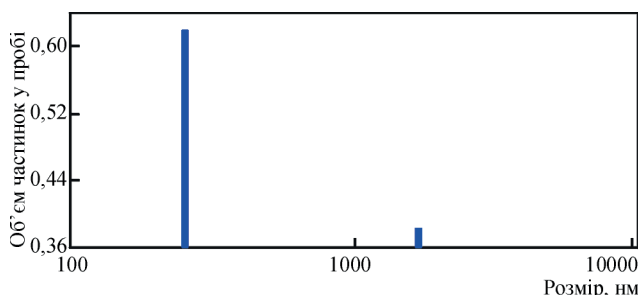


Рис. 11. Середній діаметр частинок ЗА за об'ємом частинок у пробі (метод Паде-Лапласа)

методу атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою (АЕС-ІЗП). Цей метод дав можливість виявити у відібраних пробах повітря наступні хімічні елементи у високодисперсному/нанорозмірному стані (менше 100 нм): марганець, алюміній, залізо (табл. 5). Разом з цим для гігієнічного оцінювання цих речовин у нанорозмірному стані виконано розрахунок орієнтовно безпечних рівнів впливу (ОБРВ) на організм людини [16, 17]. Це розрахункове значення ОБРВ може бути застосовано як додатковий метод контролю для впровадження (у разі необхідності) управлінських рішень щодо мінімізації впливу шкідливих речовин на організм працівників.

Отже, як видно з табл. 5, концентрації нанорозмірних частин марганцю й заліза є такими, що перевищують розрахункові величини ОБРВ. Це певною мірою свідчить про те, що у даному випадку токсичність ЗА переважно визначається марганцем і залізом, що доцільно враховувати при розробці заходів захисту. При цьому концентрація алюмінію у повітрі робочої зони не перевищує ОБРВ.

Обговорення результатів. Аналіз хімічного складу ЗА (табл. 2) показав, що він містить такі шкідливі компоненти як марганець та алюміній в незначній кількості. Їх масова частка в аерозолі незначна, що пов'язано з низьким вмістом цих компонентів у складі рейок Р65, які зварювалися. Відповідно решта компонентів ЗА належить залізу який становить переважну кількість як у складі рейок, так і у складі ЗА.

Як видно з табл. 1, при контактному стиковому зварюванні пульсуючим оплавленням використовувався струм більш ніж у 2,5 рази вищий, ніж при контактному стиковому зварюванні безперервним оплавленням. Тому й інтенсивність виділення ЗА та його окремих компонентів зі збільшенням величини зварювального струму зростає. Проте це зростання (табл. 1) пояснюється не тільки більшою силою струму в даному випадку, а й впливом самих імпульсів струму на виділення ЗА. Оскільки в момент максимального підвищення сили струму кожного імпульсу відбувається різкий викид пари розплавленого металу за межі зони плавлення. Це сприяє додатковому викиду пари і утворенню більшої кількості аерозолу [19]. Причому різкий вибухоподібний викид парів металу за межі стикового проміжку призводить до нерівноважного утворення ЗА, що забезпечує низький вміст токсичного летучого марганцю у складі цього аерозолу (не більше 1,53 %). А, наприклад,

Таблиця 5. Вміст хімічних елементів у високодисперсному стані, відібраних при контактному стиковому зварюванні оплавленням

Елемент	Вміст у рідині, мг/л	Вміст у повітрі, мг/м ³	ОБРВ, мг/м ³
Mn	0,042 ± 0,001	0,027 ± 0,0006	0,01
Fe	1,130 ± 0,1	0,74 ± 0,06	0,6
Al	0,18 ± 0,005	0,12 ± 0,004	0,2

при дуговому зварюванні в захисних газах низьколегованих сталей на різних режимах вміст марганцю в ЗА може змінюватись від 8,5 до 17,7 % [19], що обумовлено переважно рівноважним утворенням аерозолі. Це свідчить про суттєві санітарно-гігієнічні переваги контактного стикового зварювання оплавленням у порівнянні з дуговим.

Разом з тим, що стосується токсичності цих ЗА, то незалежно від інтенсивності їх виділення розрахункові кінцеві показники гігієнічної оцінки КСЗО [14] показують наступне. Як при безперервному, так і при пульсуючому зварюванні рейок Р65 ці аерозолі належать до одного і того ж класу – «4d» (табл. 3). Це свідчить про їх відносно однаковий шкідливий вплив на організм зварників.

Результати визначення концентрації СО на робочому місці (табл. 4) показали, що лише при стиковому зварюванні пульсуючим оплавленням концентрація монооксиду перевищує ГДК [18]. У інших випадках цього не відбувається. Це слід врахувати при створенні заходів захисту зварників.

Підвищений рівень монооксиду вуглецю при пульсуючому оплавленні можна пояснити більш високим струмом і, відповідно, підвищеною температурою у стиковому проміжку на розплавлених торцях рейок. Це призводить до збільшення інтенсивності окиснення металу і, зокрема, вуглецю наявного у складу металу рейок.

Причиною ж утворення діоксиду азоту є переважно фотохімічна дія ультрафіолетового випромінювання [19] у стиковому проміжку, що й призводить до підвищення інтенсивності окиснення азоту повітря до діоксиду. Тому при контактному зварюванні безперервним оплавленням ультрафіолетове випромінювання діє на азот і кисень повітря без пауз, а отже це окиснення не припиняється у порівнянні з пульсуючим оплавленням.

Результати досліджень середнього аеродинамічного діаметру (рис. 4, 5, 10, 11) та розподілу розміру аерозолів нанорозмірного діапазону (рис. 7–9) дають можливість здійснювати вибір відповідних фільтруючих матеріалів для систем очищення повітря. Вони показали, що такі дані можна отримувати за допомогою методів Паде-Лапласа та кумулянтного, що необхідно для аналогічних досліджень інших способів зварювання.

Гігієнічне оцінювання впливу розміру твердих частинок ЗА на організм людини на основі розрахунку ОБРВ [16] показали, що концентрації нанорозмірних частинок даних аерозолів, які виділяються при КСЗО, перевищують їх граничні величини. Ці результати, які показують як розмір частинок ЗА впливає на їх шкідливу дію на зварників, необхідно врахувати при розробці фільтруючих матеріалів для систем вентиляції і індивідуального захисту органів дихання.

Таким чином, отримані результати даної комплексної оцінки гігієнічних характеристик ЗА, що забруднюють повітря робочої зони при КСЗО,

дали вичерпну інформацію про рівень шкідливого впливу цих ЗА на організм зварників. Ці дані мають бути використані для розроблення адекватних заходів і засобів захисту операторів-зварників та й інших працюючих у виробничих приміщеннях, де застосовується КСЗО. Разом з тим, для проведення остаточної гігієнічної оцінки, враховуючи й інші шкідливі і небезпечні фактори, КСЗО слід також користуватись проведеними раніше результатами щодо електромагнітної безпеки зварників КСЗО [20]. Вважаємо, що аналогічні дослідження варто проводити для гігієнічного оцінювання й інших способів зварювання.

Висновки

1. Встановлено, що контактне стикове зварювання оплавленням рейок Р65 супроводжується виділенням у повітря робочої зони шкідливих речовин у формі аерозолів на рівні нанодіапазону, яким притаманна висока біологічна активність.

2. Результати досліджень показали, що при безперервному оплавленні інтенсивність виділення зварювального аерозолі менша, ніж при пульсуючому оплавленні. При цьому токсичність зварювального аерозолі як при безперервному оплавленні, так і при пульсуючому належить до помірно небезпечного класу 4d. Основними елементами, які визначають токсичність аерозолі, є марганець та залізо.

3. Встановлено, що при контактному стиковому зварюванні оплавленням утворюється аерозоль, у складі якого присутні нанорозмірні компоненти марганцю й заліза у концентраціях, які перевищують розрахункові орієнтовно безпечні рівні впливу на людину. Середній аеродинамічний діаметр частинок ЗА становить 295,2 нм. Разом з тим у пробі ЗА виявлено частинки розміром від 70,81 до 1071,8 нм.

4. Проведені дослідження показали, що стикове зварювання оплавленням супроводжується утворенням на робочому місці таких токсичних газів, як діоксид азоту і монооксид вуглецю у концентраціях, які перевищують гранично допустимі.

5. Використовуючи результати досліджень рівнів виділень аерозолів і газів при застосуванні контактного стикового зварювання оплавленням, можна рекомендувати місцеву витяжну вентиляцію, розраховану на основі отриманих гігієнічних показників.

Список літератури/References

1. Кучук-Яценко С.І. (2018) Техноlogии и оборудование контактной сварки рельсов: 60 лет непрерывных инноваций. *Автоматическая сварка*, **11-12**, 29–45. <https://doi.org/10.15407/as2018.12.03>.
2. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2018) Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *The Paton Welding J.*, **11-12**, 25-40. <https://doi.org/10.15407/as2018.12.03>.
3. Губеня І.П., Явдошин І.Р., Степанюк С.Н., Деметська А.В. (2014) К вопросу дисперсности и морфологии частиц в сварочных аэрозолях. *Автоматическая сварка*, **6-7**, 159–162.
4. Gubunya, I.P., Yavdoshchin, I.R., Stepanyuk, S.N., Demetskaya, A.V. (2014) Towards the problem of dispersity and

- morphology of particles in welding aerosols. *The Paton Welding J.*, 6-7, 155-158.
3. Berlinger, B., Benker, N., Weinbruch, S. et al. (2010) Physicochemical characterization of different welding aerosols. *Anal Bioanal Chemistry*, 10, 1773–1789. <https://doi.org/10.1007/s00216-010-4185-7>.
 4. Леоненко Н.С., Демецька О.В., Леоненко О.Б. (2016) Особливості фізико-хімічних властивостей та токсичної дії наноматеріалів – до проблеми оцінки небезпечного впливу їх на живі організми (огляд літератури). *Сучасні проблеми токсикології, харчової та хімічної безпеки*, 1, 64–76. Leonenko, N.S., Demetska, O.V., Leonenko, O.B. (2016) Specifics of physico-chemical peculiarities and toxic impact of nanomaterials – to problem of assessment of their harmful influence on living bodies (Literature review). *Suchasni Problemy Toksykologii, Kharchovoi ta Khimichnoi Bezpeky*, 1, 64–76 [in Russian].
 5. Lewinski, N., Colvin, V., Drezek, R. (2008) Cytotoxicity of Nanoparticles. *Small-journal*, 1, 26 – 49. <https://doi.org/10.1002/smll.200700595>.
 6. Кундієв Ю.І., Корда М.М., Кашуба М.О., Демецька О.В. (2015) *Токсикологія аерозолів*. ТДМУ «Укрмедкнига». Kundiev, Yu.I., Korda, M.M., Kashuba, M.O., Demetska, O.V. (2015) *Toxicology of fumes*. TDMU Ukrmedknyga [in Ukrainian].
 7. Tanneberger, J.F.W.G. (2009) Schweißrauch am Arbeitsplatz – Gefahr für die Gesundheit. *Der Praktiker*, 9, 328.
 8. Jenkins, N.T., Pierce, W.M.G., Eagar, T.W. (2005) Particle size distribution of gas metal and flux cored arc welding fumes. *Welding Journal*, 84, 156–163.
 9. Hoet, P.H.M., Brueske-Hohlfeld, I., Salata, O.V. (2004) Nanoparticles – known and unknown health risks. *Journal of Nanobiotechnology*, 2.
 10. Patel, R.J., Alexander, A., Puri, A., Chatterjee, B. (2021) Current Challenges and Future Needs for Nanotoxicity and Nanosafety Assessment. *Nanotechnology in Medicine: Toxicity and Safety*, 299–314. <https://doi.org/10.1002/9781119769897.ch14>.
 11. Cena, L.G., Chisholm, W.P., Keane, M.J., Chen, B.T. (2015) A Field Study on the Respiratory Deposition of the Nano-Sized Fraction of Mild and Stainless Steel Welding Fume Metals. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 12(10), 721–728. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1043055>.
 12. Elder, A., Gelein, R., Silva, V. et al. (2006) Translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system. *Environmental health perspectives*, 114(8), 1172–1178. <https://doi.org/10.1289/ehp.9030>.
 13. Леоненко О.Б., Леоненко Н.С., Мовчан В.О., Лук'яненко А.О. (2018) Цитотоксичність наночастинок зварювальних аерозолів (огляд літератури). *Сучасні проблеми токсикології, харчової та хімічної безпеки*, 1, 25–38. Leonenko, O.B., Leonenko, N.S., Movchan, V.O., Lukyanenko, A.O. (2018) Cytotoxicity of nanoparticles of welding fumes (Literature review). *Suchasni Problemy Toksykologii, Kharchovoi ta Khimichnoi Bezpeky*, 1, 25–38 [in Ukrainian].
 14. ДСТУ ISO 15011-4:2008 (2011) *Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання аерозолів і газів. Ч. 4. Форма для запису даних про аерозолі*. Київ, Держспоживстандарт України. DSTU ISO 15011-4:2008 (2011) Health and safety in welding and related processes. Laboratory method of sampling fumes and gases. Pt 4. Form for recording data on aerosols. Kyiv, Derzhspozhyvstandard of Ukraine [in Ukrainian].
 15. Мовчан В.О., Сальнікова Н.А., Андрусишина І.М. та ін. (2012) *Спосіб визначення наночастинок в повітрі робочої зони* (Патент України на корисну модель № 72951 від 10.09.2012 р.). Державна служба інтелектуальної власності України. <https://uapatents.com/4-72951-sposib-viznachennya-nanochastinok-v-povitri-robocho-zoni.html>. Movchan, V.O., Salmikova, N.A., Andrusyshina, I.M. et al. (2012) *Method of identification of nanoparticles in air of working area*. Patent of Ukraine on utility model No. 72951 of 10.09.2012 [in Ukrainian]. <https://uapatents.com/4-72951-sposib-viznachennya-nanochastinok-v-povitri-robocho-zoni.html>.
 16. PD 6699-2:2007 (2007) *Nanotechnologies – Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials*. BSI-British Standards.
 17. Кундієв Ю.І., Трахтенберг І.М., Яворський О.П. та ін. (2016) *Гігієнічне нормування та контроль наноматеріалів у виробничому середовищі*. Методичні рекомендації НАМУ. Kundiev, Yu.I., Trakhtenberg, I.M., Yavorskyi, O.P. et al. (2016) *Hygienic regulation and control of nanomaterials in working environment*. Procedural recommendations of NAMU [in Ukrainian].
 18. (2020) *Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони*. № 1596 від 14.07.2020 р. (2020) *Hygienic regulations of chemical substances in air of working environment*. No. 1596 of 14.07.2020 [in Ukrainian].
 19. Левченко О.Г. (2015) *Сварочные аэрозоли и газы: процессы образования, методы нейтрализации и средства защиты*. Киев, Наукова думка. Levchenko, O.G. (2015) *Welding fumes and gases: Formation processes, method of neutralization and means of protection*. Kyiv Naukova Dumka [in Russian].
 20. Levchenko, O., Polukarov, Y., Goncharova, O. et al. (2022) Determining patterns in the generation of magnetic fields when using different contact welding techniques. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10(120)), 46–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268699>.

HYGIENIC ASSESSMENT OF FUMES IN FLASH-BUTT WELDING

O.G. Levchenko¹, O.V. Demetska², YU.O. Polukarpov¹, O.M. Honcharova³, O.M. Bezushko³, N.A. Prakhovnik¹, O.S. Ilchuk¹, I.M. Andrusyshyna⁴

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Prospect Beresteisky. E-mail@kpi.ua

²Shupik National Health Care University of Ukraine. 9 Dorohozhytska Str., Kyiv, 04112, Ukraine. E-mail: dalexandra@ukr.net

³E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

⁴SC «Kundiev Institute of Occupational Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine». 75 Saksaganskogo Str., Kyiv, 01033. E-mail: andrusyshyna.in@gmail.com

The objective of the paper is investigation of hygienic characteristics of harmful substances, which contaminate the air in continuous and pulsed flash-butt welding, to create the appropriate means for welder protection. Description of the methods of studying the chemical composition of welding fumes and gases, dispersed composition of the fumes and assessment of their influence on the welder body is given. It is found that flash-butt welding of R65 rails is accompanied by evolution of harmful substances into the working zone air in the form of fumes at the nanorange level, which are characterized by high biological activity. It is shown that fume toxicity at continuous and pulsed flashing belongs to a moderately dangerous class. The main elements, which determine the fume toxicity, are manganese and iron. It is found that in flash-butt welding the fumes are generated, which contain nanosized components of manganese and iron in concentrations, exceeding the calculated tentatively safe levels of human exposure. Performed studies showed that flash-butt welding is accompanied by generation of such toxic gases as nitrogen dioxide and carbon monoxide in the work place, in concentrations exceeding the limit permissible ones. Obtained results of comprehensive hygienic assessment of the fumes in flash-butt welding provided exhaustive information on the level of harmful influence of these fumes on the welder body. Ref. 20, Tabl. 5, Fig. 11.

Keywords: flash-butt welding, fumes, gases, dimensions, nanosized particles, recommendations

Надійшла до редакції 05.10.2023