

ФІЗИКА АЕРОЗОЛІВ

УДК: 621.791; 533.9

Кіро С.А.¹, Абрамова Н.М.¹, Грідяєв В.В.², Гусельникова Н.О.¹

¹Фізико-хімічний інститут захисту навколишнього середовища і людини
МОН України та НАН України, м. Одеса. E-mail: eksvar@ukr.net

²Національний ТУ “Дніпровська політехніка”, кафедра охорони праці та цивільної безпеки.

Елементний склад частинок, що утворюються при зварюванні штучними електродами

Методом рентгеноспектрального електронно-зондового мікроаналізу досліджено елементний склад респірабельних частинок зварювального аерозолі (ЗА), що утворюється при зварюванні вуглецевих і низьколегованих сталей штучними електродами з рутитовим (АНО-4) і основним (УОНИ 13/45) типом покриття. У діапазоні аеродинамічного діаметра від 0,25 до 16 мкм усі частинки ЗА були розділені на три групи: з низьким ($Fe \leq 20\%$), середнім ($20\% < Fe < 40\%$) та високим ($Fe \geq 40\%$) вмістом заліза. Кожна група містить різну кількість елементів, що походять зі зварювальних матеріалів, та відображає механізм її утворення. Їх відносний вміст у ЗА залежить від аеродинамічного діаметра частинок, типу покриття електродів і потужності дуги. Частинки із середнім вмістом заліза (агломерати нанорозмірних первинних частинок) становлять найчисленнішу групу (понад 70%) респірабельних частинок ЗА. Для кожного типу електродів їх середній елементний склад не залежить від розміру агломератів. Частинки з низьким вмістом заліза містять різні комбінації елементів з покриття електродів, і різноманітність комбінацій збільшується зі зростанням їх аеродинамічного діаметру. Ці частинки ЗА можна ідентифікувати як агрегати агломератів первинних частинок та мікробризок, що утворюються при дезінтеграції покриття електрода. Частинки ЗА з високим вмістом заліза утворюються внаслідок агрегації мікрокрапель розплавленого електродного металу та агломератів первинних нанорозмірних частинок. Вони здебільшого містять залізо (60–70%) та кисень (15–35%). Їх середній елементний склад не залежить від розміру агрегатів, типу електродного покриття і потужності дуги. Отримані результати можуть бути корисними для аналізу та оцінки ризиків для здоров'я зварників.

Ключові слова: зварювальний аерозоль, штучні електроди, рентгеноспектральний електронно-зондовий мікроаналіз, елементний склад частинок, аеродинамічний діаметр.

Вступ. Основним шкідливим фактором зварювального виробництва є зварювальний аерозоль (ЗА) – токсичні аеродисперсні частинки конденсаційного і дезінтеграційного походження діаметром 0,003–20 мкм. За даними [1] понад 80% виявлених випадків професійних захворювань зварників (хронічний бронхіт, пневмоконіоз, інтоксикація металами тощо) викликані дією ЗА. Тому проблема створення безпечних умов праці зварників і робітників суміжних професій привертає увагу науковців вже понад 50 років. Розвинуто теоретичні уявлення про механізм утворення ЗА, випаровування і дезінтеграцію зварювальних

матеріалів при електродуговому процесі, визначено залежності валових показників ЗА (швидкість утворення, хімічний і дисперсний склад) від способів і режимів зварювання, складу зварювальних матеріалів та захисного газу [2-9]. Встановлено, що частинки ЗА у повітрі робочої зони мають трьохмодове розподілення за розмірами, де перші дві моди – агломерати нанорозмірних первинних частинок кластерної і ланцюжково-кластерної морфології, а третя мода – мікрочастинки дезінтеграції зварювальних матеріалів [10, 11]. Створено бази даних, що зв'язують валовий хімічний склад ЗА зі складом зварювальних матеріалів, наприклад, [12]. Одержані дані та закономірності використано для створення малотоксичних штучних електродів шляхом оптимізації складу їх покриття і режимів зварювання. Однак технологічні можливості зменшення токсичності ЗА обмежені вимогами забезпечення якості зварного з'єднання і швидкість утворення ЗА при зварюванні штучними електродами як і раніше досить велика (3-25 мг/с).

На сьогодні пріоритетним напрямком досліджень ЗА є вміст і хімічний склад нанорозмірних частинок та їх агломератів у зоні дихання зварника. Такі частинки мають значно більшу біологічну активність у порівнянні з мікрочастинками дезінтеграції через їх високу питому поверхню і сорбційну здатність та можливість проникати крізь бар'єрний шар епітеліальних клітин і попадати у кровоток [13, 14]. Тому оцінка потенційного ризику для здоров'я зварників тільки за показниками масової концентрації і валового хімічного складу ЗА є недостатньою [13]. Наявної на теперішній час інформації щодо токсичності ЗА різного хімічного складу і дисперсності недостатньо для визначення які саме показники фізико-хімічних властивостей частинок (наприклад: частка, елементний склад і/або питома площа поверхні частинок певного діапазону розмірів) та, відповідно, які методики їх визначення слід використовувати при прогнозуванні дії ЗА на здоров'я зварників. Отже, існує необхідність проведення досліджень, спрямованих на встановлення взаємозв'язку між розміром частинок ЗА та їх хімічним складом.

Метою роботи є дослідження взаємозв'язку елементного і дисперсного складу частинок ЗА, що утворюються при зварюванні вуглецевих і низьколегованих сталей найбільш поширеними типами штучних електродів.

Методика експерименту. Для дослідження елементного складу частинок ЗА було вибрано електроди діаметром 4 мм з однаковим складом електродного металу (дріт Св08) і різними типами покриття: рутіловим - АНО-4 та основним (карбонатно-флюоритовим) - УОНИ 13/45. Наплавлення пластин сталі Ст.3 проводили у зварювальній камері [10, 11] постійним струмом зворотної полярності при двох значеннях потужності дуги $P=5,0$ кВт ($I=180$ А, $U=28$ В) і $P=6.7$ кВт ($I=210$ А, $U=32$ В), швидкість зварювання складала 4 мм/с. ЗА на відстані 40 см від дуги уловлювали щілинним повітрязабірником при об'ємній швидкості видаленого повітря 75 л/с і направляли у вертикально розташовану камеру (висота 1,9 м, діаметр 0,19 м) для ізокінетичного відбору проб. Восьмиступеневий імпактор Бернера LPI 0,06/30 л/хв використано для розподілення проб ЗА на фракції по аеродинамічному діаметру частинок: №1 – 0.0625-0.125 мкм; №2

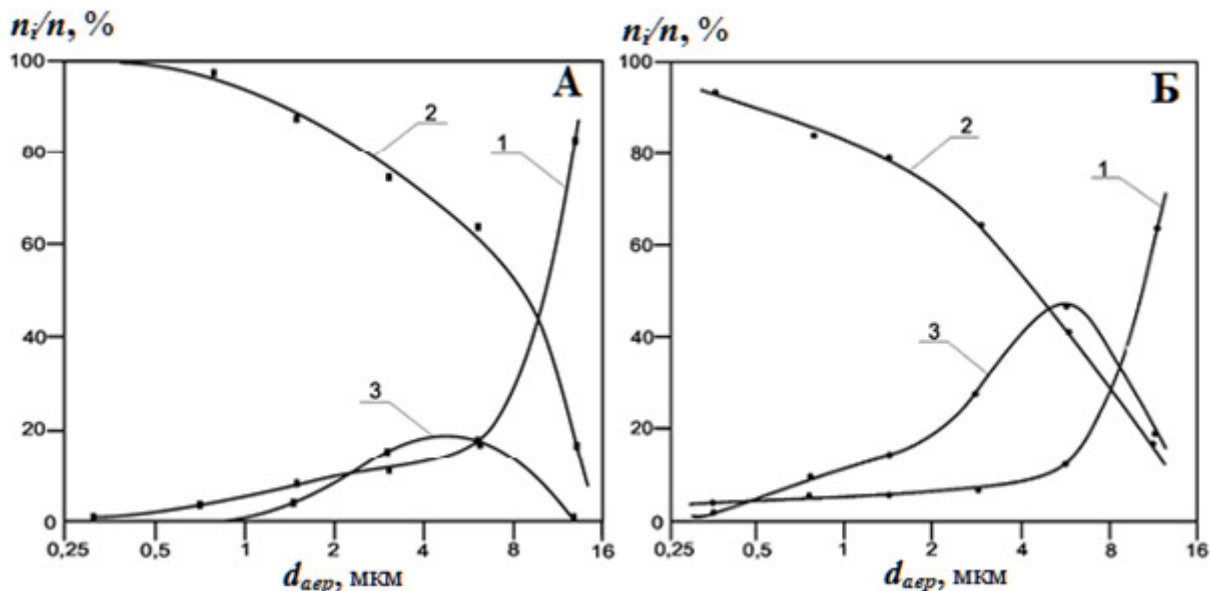


Рис.1 Залежність процентної частки груп частинок ЗА з низьким (Гр.1) – 1, середнім (Гр.2) – 2 і високим (Гр.3) – 3 вмістом Fe від аеродинамічного діаметра частинок при зварюванні електродами АНО-4: А - $P=5,0$ кВт, В - $P=6,7$ кВт.

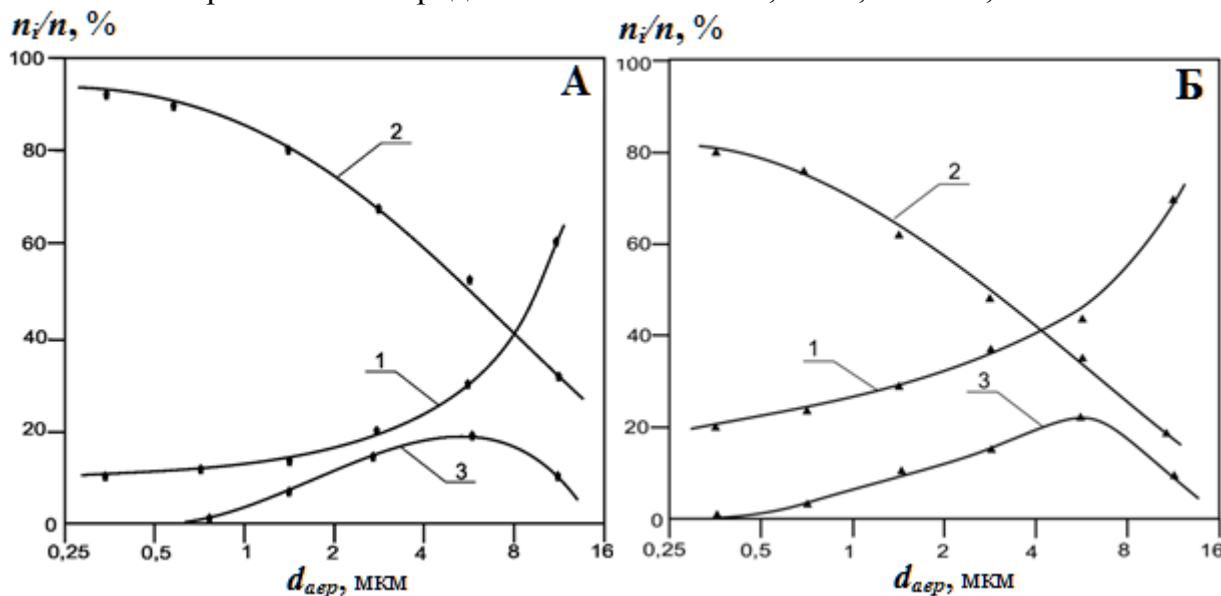


Рис.2 Залежність процентної частки груп частинок ЗА з низьким (Гр.1) – 1, середнім (Гр.2) – 2 і високим (Гр.3) – 3 вмістом Fe від аеродинамічного діаметра частинок при зварюванні електродами УОНИ 13/45: А - $P=5,0$ кВт, В - $P=6,7$ кВт.

– 0.125-0.25 мкм; №3 – 0.25-0.5 мкм; №4 – 0.5-1.0 мкм; №5 – 1.0-2.0 мкм; №6 – 2.0-4.0 мкм; №7 – 4.0-8.0 мкм; №8 – 8.0-16.0 мкм. Для рентгеноспектрального електронно-зондового мікроаналізу елементного складу частинок з $d_{aep} \geq 0.25$ мкм фракції №3-№8 було відібрано на срібні підкладки згідно рекомендацій [15]. Для одержання зразків з одношаровим розміщенням відокремлених частинок час відбору проб складав 3-5 с для фракцій №3 і №4 та 30-70 с для фракцій №5-№8. Для визначення масової частки фракцій №1-№8 у ЗА проби відбирали протягом 70 с на целюлозні фільтри, а зважування фільтрів проводили з точністю 10^{-5} г (мікроваги МХ5) при постійній температурі $21 \pm 0.5^\circ\text{C}$ і вологості $50 \pm 5\%$ повітря.

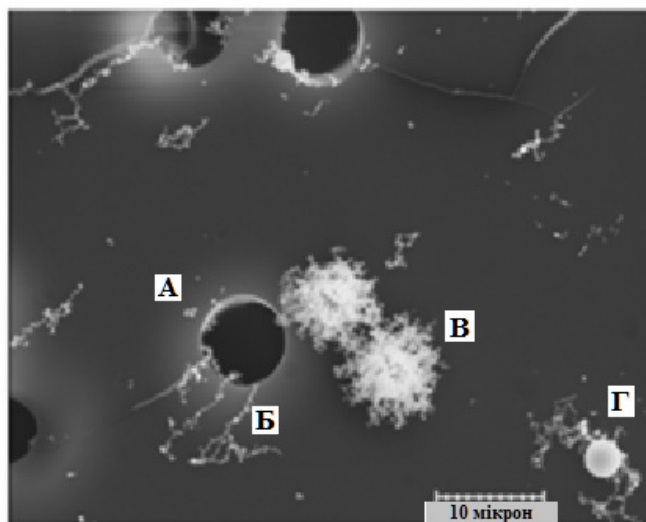


Рис.3 Мікрофотографії частинок ЗА при зварюванні штучними електродами [10]. Агломерати нанорозмірних первинних частинок: А - кластерної морфології, Б - ланцюжково-кластерної морфології; В – агрегати частинок дезінтеграції покриття електродів і агломератів нанорозмірних первинних частинок; Г - агрегати частинок дезінтеграції крапель електродного металу і ланцюжково-кластерних агломератів.

Визначення вмісту елементів (починаючи з вуглецю) у частинках фракцій проводили на стенді JEOL 733 EPMA(Центр мікроаналізу Антверпенського університету), оснащеному енергодисперсійним рентгенівським детектором (OxfordEDXLi) з супертонким атмосферним вікном [16, 17]. Для фракцій №3-№8 досліджували по 200 вибраних випадковим чином частинок. Отримані характеристичні рентгенівські спектри частинок обробляли методом найменшими квадратів, а елементний склад обчислювалася за допомогою апроксимаційно-гометоду Монте-Карло [16, 17].

Результати та їх обговорення. Для визначення тенденцій зміни елементного складу частинок ЗА зі збільшенням їх аеродинамічного діаметра та потужності дуги всі досліджені частинки по вмісту заліза було розподілено на три групи (мас.%): група 1 (далі Гр.1) - $Fe \leq 20\%$, група 2 (Гр.2) – $20\% < Fe < 40\%$ і група 3 (Гр.3) - $Fe \geq 40\%$ (Гр.3) [10]. Процентні частки цих груп частинок у фракціях ЗА електродів АНО-4 і УОНИ 13/45 представлено на рис.1 і рис.2 відповідно.

Як видно, співвідношення між групами у кожній фракції ЗА залежить від діаметра частинок, а також складу покриття електродів і потужності дуги. Частка частинок Гр.2 зі середнім вмістом Fe складає понад 70-80% від загальної кількості частинок ЗА у діапазоні аеродинамічних діаметрів 0,25-16 мкм. Вони являють собою агломерати нанорозмірних первинних частинок кластерної і ланцюжково-кластерної морфології (рис.3).

Максимальні лінійні розміри частинок Гр.2 досягають 20-25 мкм, проте їх аеродинамічний діаметр не перевищує 10 мкм. Середній елементний склад частинок Гр.2 фракцій ЗА електродів АНО-4 та УОНИ 13/45 надано у таблицях 1 та 2 відповідно. Отримані результати показують, що середній (по кожній фракції)

Таблиця 1. Середній елементний склад (мас.%) частинок Гр.2 фракцій ЗА електродів АНО-4 (домішкові елементи F, P, S, Cl, Ca, Cr).

№ фракції (\bar{d}_{aep} мкм)	P= 5.0кВт									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ti	Mn	Fe
№3(0.375)	7.3	29.4	2.5	2.2	1.2	7.9	3.8	0.7	6.6	34.5
№4 (0.75)	10.3	26.9	2.7	2.6	2.1	8.0	3.3	1.5	7.3	31.8
№5 (1.5)	8.1	28.3	2.7	2.3	1.7	7.3	3.7	1.5	7.4	33.4
№6 (3)	7.6	27.9	2.1	1.9	1.3	7.2	3.7	1.6	7.8	34.8
№7 (6)	6.9	28.5	2.2	1.8	0.9	7.6	3.9	1.6	8.1	35.0
№8 (12)	11.1	29.4	2.2	1.7	1.2	7.1	2.9	2.1	6.5	32.0
P=6.7кВт										
№3(0.375)	4.2	27.5	2.5	2.7	1.2	9.8	3.5	2.0	9.2	34.1
№4 (0.75)	3.6	28.3	2.2	2.5	2.0	10.9	3.8	2.1	9.3	33.7
№5 (1.5)	3.5	29.2	2.2	2.7	2.4	10.9	2.7	2.0	8.8	32.9
№6 (3.0)	3.5	26.6	2.1	2.3	1.8	9.3	3.0	2.3	9.4	35.9
№7 (6.0)	2.0	28.4	1.9	1.7	1.7	9.0	3.9	2.5	9.9	35.2
№8 (12.0)	5.1	26.5	2.0	1.9	1.5	9.5	3.5	2.5	9.3	34.4

Таблиця 2. Середній елементний склад (мас.%) частинок Гр.2 фракцій ЗА електродів УОНИ 13/45 (домішкові елементи P, S, Cl, Ti, Cr).

№ фракції (\bar{d}_{aep} мкм)	P=5.0кВт										
	C	O	F	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe
№3(0.375)	8.5	27.2	8.6	5.1	0.9	1.4	4.5	0.6	5.7	6.0	30.5
№4 (0.75)	10.0	21.1	8.3	5.5	1.9	2.7	5.0	1.2	4.8	6.9	29.9
№5 (1.5)	8.9	27.3	7.8	3.6	1.4	1.7	5.6	0.7	5.2	6.2	30.4
№6 (3.0)	8.0	25.4	8.7	4.5	1.2	1.6	5.2	0.9	4.9	6.6	31.2
№7 (6.0)	7.1	24	7.5	3.8	1.3	1.4	5.9	0.8	6.1	7.5	32.8
№8 (12.0)	5.2	25.1	7.6	3.4	1.2	1.2	6.5	1.4	4.8	8.9	33.3
P=6.7кВт											
№3(0.375)	17.2	20.4	16.1	4.4	0.9	2.9	4.2	0.4	3.2	4.9	24.1
№4 (0.75)	13.1	21.4	17.8	4.4	0.7	1.9	4.2	0.3	4.4	3.8	25.8
№5 (1.5)	14.0	24.3	15.5	2.8	1.1	1.4	5.2	0.1	3.2	5.2	25.7
№6 (3.0)	9.6	24.6	17.5	4.0	0.7	1.0	5.1	0.1	4.9	5.0	26.1
№7 (6.0)	10.3	24.3	15.9	2.8	1.1	1.1	5.5	0.7	2.6	4.9	28.1
№8 (12.0)	9.8	27.1	16.6	2.5	1.0	0.8	5.6	0.5	3.6	4.2	26.8

елементний склад частинок Гр.2 практично не залежить від їх аеродинамічного діаметра.

У той же час для частинок Гр.2 ЗА електродів АНО-4 та УОНИ 13/45 спостерігаються протилежні тенденції зміни вмісту основних елементів зі збільшенням потужності дуги. Так, у ЗА електродів з рутиловим покриттям (АНО-4) вміст Al, Si, Ti та Mn у частинках Гр.2 збільшується на ~30-50%, вуглецю зменшується у ~2,3 рази, а O, Na, Mg, K і Fe практично не змінюється зі збільшен-

Таблиця 3. Типові елементні склади (мас. %) частинок Гр.1 фракцій №3-№8 ЗА електродів АНО-4 та УОНІ 13/45.

ЗА	C	O	F	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe
АНО	25.9	37.3	-	19.7	2.3	2.5	2.4	-	-	1.1	1.2	4.7
	6.9	35.0	0.2	0.7	1.0	2.3	42.7	2.0	0.9	0.5	1.4	7.3
	1.9	26.2	0.4	0.8	1.4	64.8	0.6	-	-	0.2	0.8	2.0
	16.9	23.1	-	3.4	5.7	10.3	17.6	-	0.9	3.4	3.5	11.4
	4.4	31.1	0.3	1.5	3.6	4.4	5.9	1.4	1.1	26.0	5.3	13.6
	1.6	28.6	0.7	2.8	2.4	2.8	9.0	13.2	0.2	11.4	8.1	16.9
УОНІ	18.9	23.7	5.5	4.2	1.9	4.0	7.0	0.6	12.6	1.4	4.3	14.2
	7.0	18.1	14.6	13.2	12.3	23.5	-	1.0	8.1	-	-	-
	13.5	19.1	11.1	7.8	1.1	1.3	5.8	8.4	8.1	0.8	4.5	15.5
	27.4	25.9	7.7	2.6	2.1	4.7	8.5	0.4	4.6	1.7	3.0	9.1
	21.7	30.4	2.3	3.7	2.0	7.6	16.3	0.7	6.4	-	0.4	6.8
№3*	9.6	26.8	15.1	9.9	1.2	2.5	0.5	7.5	9.8	-	4.1	11.8
	3.7	29.8	5.2	3.9	1.4	1.6	5.2	1.9	30.9	-	2.3	12.7

* - тільки для фракції №3

ням потужності дуги. У ЗА електродів з основним типом покриття (УОНІ 13/45) вміст Na, Mg, Ca, Al, Mn і Fe в частинках Гр.2 зменшується на ~20-40%, C і F зростає в 1.5-2 рази, а O, Al і Si практично не змінюється. Що стосується вмісту токсичного Mn - відношення Mn/Fe у частинках Гр.2 ЗА електродів АНО-4 збільшується від 0.22 до 0.27, а електродів УОНІ 13/45 зменшується від 0.22 до 0.18 при зростанні потужності дуги.

В усіх фракціях частинки Гр.1 (з низьким вмістом заліза) містять переважно різні комбінації елементів покриття електродів (Na, Mg, Al, Si, K, Ti для електродів АНО-4 та додатково Ca та F для УОНІ 13/45), а також вуглець і кисень, причому різноманітність комбінацій елементів у частинках збільшується зі зростанням d_{aep} . Типові елементні склади частинок Гр.1 показано у таблиці 3.

За морфологією частинки Гр.1 можна ідентифікувати як агрегати частинок дезінтеграції матеріалів покриття електродів і агломератів нанорозмірних первинних частинок (рис.3). Причинами дезінтеграції покриття електродів є інтенсивне газоутворення при його плавленні внаслідок термолізу карбонатів, піролізу целюлози, пірогідролізу CaF_2 тощо, а також розбризкування розплавленого шлаку при його стіканні безпосередньо в зварювальну ванну[19]. Слід зазначити, що ~25% частинок Гр.1 мають високий вміст (від 16 до 35%) вуглецю. Утворення карбонатів викликано взаємодією CO_2 атмосфери дуги з оксидами шлакового розплаву CaO , K_2O , Na_2O , MgO , Al_2O_3 і SiO_2 .

Частинки Гр.3 з високим вмістом заліза утворюються в результаті дезінтеграції крапель електродного металу і за морфологією являють собою агрегати мікрокрапель електродного металу і ланцюжково-кластерних агломератів (рис.3). Причинами дезінтеграції крапель розплавленого електродного металу є: вибухове руйнування перемички між краплею, що відривається, і електродом в результаті різкого збільшення щільності струму; локальне вибухоподібне виділення газів в об'ємі металу, що викликано металургійними реакціями, та приз-

Таблиця 4. Типові елементні склади (мас. %) частинок Гр.3 фракцій №5-№8 ЗА електродів АНО-4 та УОНИ 13/45.

ЗА	Fe	Mn	Ca	K	Si	O	C
Фракції №5-№8	59.8	2.8	-	-	1.8	31.2	2.2
	63.4	4.2	2.8	3	2.2	21.3	2.6
	69.3	3.9	1.1	2.5	3	16.8	2.8
	62.1	3.1	-	-	1	31.9	1.4

водить до викиду мікробризок електродного металу з крапель або, що буває рідше, із зварювальної ванни [19]. А поза зоною атмосфери дуги відбувається високотемпературне окислення або горіння мікрокрапель.

Оскільки основну частку маси частинки Гр.3 складає мікрокрапля електродного металу, то вона і визначає загальний елементний склад частинок. Для них характерно несуттєві відмінності у елементному складі - містять, переважно 60–70% Fe і 15–35% кисню (таблиця 4), а також незалежність від складу покриття штучних електродів.

Як видно з рис.1 та рис.2, основними параметрами, що визначають інтенсивність дезінтеграції крапель електродів металу, є потужність зварювальної дуги та склад покриття електродів. Збільшення P для електродів з рутіловим покриттям (АНО-4) призводить до помітного зростання частки частинок Гр.3 у ЗА та збільшення діапазону їх розмірів. У той же час частка частинок Гр.1 з низьким вмістом заліза незначно зменшується. Аеродинамічний діаметр частинок Гр.3 перевищує $d_{aep} > 0.7$ мкм і у міру його зростання, їх частка у ЗА спочатку збільшується до 18-47% (фракція №7), а потім зменшується до 3-16% (фракція №8). Існування максимуму можна пояснити тим, що мікробризки електродного металу діаметром понад 20 мкм не встигають значно випаровуватися в атмосфері зварювальної дуги, і не потрапляють у діапазон аеродинамічних діаметрів респірабельних частинок ЗА. Для електродів з основним типом покриттям УОНИ 13/45 спостерігаються протилежні тенденції - зі збільшенням потужності дуги частка частинок Гр.1 з низьким вмістом заліза у ЗА збільшується в ~2 рази, а частка частинок Гр.3 практично не змінюється. Максимальне значення частки (60-80%) частинок Гр.1 у ЗА спостерігається у фракції №8, а середній вміст Fe становить ~9%.

Висновки. Встановлені відмінності у елементному складі респірабельних частинок ЗА відображають різні умови їх утворення в процесі зварювання. Масова частка частинок фракцій №5-№8 (1-16 мкм) складає у ЗА штучних електродів ~40%. Тому, як валовий елементний склад ЗА електродів АНО-4 і УОНИ 13/45 [20], так і склад частинок фракції PM_{2,5} ($d_{aep} < 2.5$ мкм)[10], що осаджуються переважно в трахео-бронхіальній та альвеолярній областях дихальної системи, не відображають елементний склад частинок конденсаційного походження (Гр.2) - агломератів нанорозмірних первинних частинок, які завдяки високій питомій поверхні ($S_{num} \sim 50-70$ м²/г) становлять найбільшу небезпеку при інгаляції. Враховуючи вищевикладене, визначення хімічного складу інгаляційної екс-

позиції частинок ЗА слід проводити лише для фракції $d_{aep} < 0.5$ мкм. Елементний склад та питома поверхня цієї фракції характеризують середній хімічний склад та дисперсність первинних нанорозмірних частинок, визначення яких необхідно для аналізу і оцінки ризиків для здоров'я зварників.

Література:

1. *Antonini J.M.* Health effect of welding // *Critical Reviews of Toxicology*. – 2003. – Vol. 33, № 1. – P. 61-103.
2. *Voitkevich V.G.* Welding fumes formation, properties and biological effects. – Abington Publishing, 1995. – 111 p.
3. *Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов. Походня И.К. (ред.), Горпенюк В.Н., Муличенко С.С., Пономарев В.Е., Стародубцев Л.В., Швачко В.И., Явдошин И.Р.* – К.: Наук. думка, 1990. – 224 с.
4. *Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Chursina O.D., Ennan A.A.* Numerical and experimental study of the fume chemical composition in gas metal arc welding // *Aerosol Sci. Eng.* – 2018. – Vol. 2, № 3. – P. 109–117.
5. *Sowards J.W., Lippold J.C., Dickinson D.W., Ramirez J.C.* Characterization of Welding Fume from SMAW Electrodes - Part I // *Welding Journal*. – 2008. – Vol. 87, № 4. – P. 106-112.
6. *Pohlmann G., Holzinger C., Spiegel-Ciobanu V. E.* Comparative investigations in order to characterise ultrafine particles in fumes in the case of welding and allied processes // *Welding and Cutting*. – 2013. – Vol. 12, № 2. – P. 2-10.
7. *Berlinger B., Benker N., Weinbruch S., L'Vov B., Ebert M., Koch W., Ellingsen D.G., Thomassen Y.* Physicochemical characterization of different welding aerosols // *Anal. Bioanal.Chem.* – 2011. – Vol. 399. – P. 1773–1780.
8. *Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Chursina O.D., Ennan A.A-A.* Formation of particles in welding fume plasmas: Numerical modeling and experiment // *Ukr. J. Phys.* – 2019. – Vol. 64, № 5. – P. 380-393.
9. *Левченко О.Г., Безушко О.Н.* Математическое моделирование химического состава сварочного аэрозоля при ручной дуговой сварке // *Автом. сварка*. – 2017. - №1. – с.35-38.
10. *Oprya M., Kiro S., Worobiec A., Horemans B., Darchuk L., Novakovic V., Ennan A., Van Grieken R.* Size distribution and chemical properties of welding fumes of inhalable particles // *J. Aerosol Sci.* - 2012. - Vol. 45. - P. 50-57.
11. *Ennan A.A., Kiro S.A., Oprya M.V., Vishnyakov V.I.* Particle size distribution of welding fume and its dependency on conditions of shielded metal arc welding // *J. Aerosol Sci.* – 2013. – Vol. 64. –P.103-110.
12. *Fasiska, E.J., Wagenblast, H.W., Nasta, M.* *Characterization of Arc Welding Fume*. – Miami, FL, American Welding Society, 1983. – 56 p.
13. *Oberdörster G., Maynard A., Donaldson K., Castranova V., Fitzpatrick J.* Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy // *Particle and Fibre Toxicology*. – 2005. – Vol. 2, № 8. – P. 1-35.
14. *Nemmar A., Hoet P.H.M., Vanquickenbome B., Dinsdale D., Thomeer M., Hoylaerts M.F., Vanbilloen H., Mortelmans L., Nemery B.* Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans // *Circulation*. – 2002. – Vol. 105. – P. 411-414.

15. Szaloki I., Osan J., Worobiec A., de Hoog J., Van Grieken R. Optimization of experimental conditions of thin-window EPMA for light-element analysis of individual environmental particles // X-Ray Spectrometry. – 2001. - Vol. 30. – P. 143-155.
16. Osan J., Szaloki I., Ro C.U., Van Grieken R. Light element analysis of individual microparticles using thin-window EPMA // Mikrochimica Acta. – 2000. – Vol. 132. – P. 349–355.
17. Szaloki I., Osan J., Ro C.U., Van Grieken R. Quantitative characterization of individual aerosol particles by thin-window electron probe microanalysis combined with iterative simulation // Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy. – 2000. – Vol. 55. – P. 1017–1030.
18. Worobiec A., Stefaniak E., Kiro S., Oprya M., Bekshaev A., Spolnik Z., Potgieter-Vermaak S.S., Ennan A., Van-Grieken R. Comprehensive microanalytical study of welding aerosols with x-ray and Raman based methods // X-rayspectrometry. – 2007. – Vol. 36, N 5. – P. 328-335.
19. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. – М.: Машиностроение, 1973. -448с.
20. Voitkevich V.G., Bezruk L.I., Esaulenko G.B. Investigation of welding fume by electron microscopy method // The Paton Welding Journal. - 1984. – N 6. – P. 33–35.

S.A. Kiro, N.N. Abramova, V.V. Gridyaev, N.O. Huselnykova

Elemental composition of particles formed during welding with stick electrodes

SUMMARY

The elemental composition of welding fume (WF) respirable particles formed in carbon and low-alloy steels welding with stick electrodes with rutile (ANO-4) and the basic (UONI 13/45) type of coating was studied by X-ray-spectral electron-probe microanalysis. In the range from 0.25 to 16 μm aerodynamic diameter, all WF particles were divided into three groups according to their iron content: low ($\text{Fe} \leq 20\%$), medium ($20\% < \text{Fe} < 40\%$) and high ($\text{Fe} \geq 40\%$). Each group contains various amounts of elements originating from the welding materials, which reflects their formation mechanism. Their relative abundance in WF depends on the particles aerodynamic diameter, type of electrode coating and the arc power. Particles with the medium iron content (agglomerates of nanosized primary particles) formed the largest group (over 70%) of respirable WF particles. For each electrode type, their average elemental composition does not depend on the size of the agglomerates. The low iron particles contain various combinations of electrode coating elements, and the variety of combinations increases with their aerodynamic diameter grows. These WF particles can be identified as aggregates of primary particles agglomerates and microspatters formed by disintegration of the electrode coating. WF particles with a high iron content are formed by aggregation of molten electrode metal microdroplets and nanosized primary particles agglomerates. They mainly contain iron (60–70%) and oxygen (15–35%). Their average elemental composition does not depend on the size of the aggregates, type of electrode coating and the arc power. The obtained results can be useful for the analysis and assessment of health risks for welders.

Key words: welding aerosol, stick electrodes, X-ray spectral electron-probe microanalysis, particles elemental composition, aerodynamic diameter.