

УДК 6.67.672

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.10.694

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ УТВОРЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО АЕРОЗОЛЮ ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОДІВ З ОСНОВНИМ, РУТИЛОВИМ ТА РУТИЛОВО-ЦЕЛЮЛОЗНИМ ПОКРИТТЯМ

БЕРЕЗУЦЬКИЙ В. В.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.,  
ХОНДАК І. І.<sup>2\*</sup>, ст. виклад.

<sup>1</sup> Кафедра безпеки праці та навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, e-mail: [viaberezuc@gmail.com](mailto:viaberezuc@gmail.com), тел. +38 (097) 943-61-60, ORCID ID: 0000-0002-7318-1039

<sup>2\*</sup> Кафедра охорони праці, Державний вищий навчальний заклад «Харківський національний університет радіоелектроніки», пр. Науки, 14, 61166, Харків, Україна, тел. +38 (099) 778-44-35, e-mail: [Inna.hondak@nure.ua](mailto:Inna.hondak@nure.ua), ORCID ID: 0000-0001-6644-9968

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Електродугове зварювання характеризується значною кількістю шкідливих та небезпечних виробничих факторів, що спричинюють розвиток професійних захворювань зварювальника, тому створення безпечних умов праці – найважливіше завдання будь-якого виробництва. Безпека зварювальних робіт цілком залежить від рівня професійної майстерності, знань і умінь виконання їх зварником. *Мета статті* – дослідити режими роботи електрозварювального апарата і визначити найменш небезпечні з них з точки зору виділення зварювального аерозолю залежно від струму і часу процесу зварювання для трьох основних груп електродів, які застосовуються в технологіях зварювання. *Висновки.* Наведено аналіз результатів дослідження на ділянці зварювання з використанням електродів із різним типом покриття. Проаналізовано шкідливі чинники, які виникають під час застосування різного виду зварювальних технологій. Досліджено зміни концентрацій зварювального аерозолю, які утворюються під час ручного електродугового зварювання та використання електродів з основним типом покриття, рутиловим та рутилово-целюлозним. Визначено математичні залежності процесів утворення зварювального аерозолю (ЗА) за допомогою повного факторного експерименту типу ПФЕ-2<sup>2</sup>. Дослідження проводилися в лабораторії зварювання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», на робочому місці зварювальника, де встановлено вентиляцію у вигляді зонта, в якому є вісім отворів у формі рівностороннього трикутника, розміром сторін 5 × 20 × 20. Установлено характер розповсюдження зварювального аерозолю, який може бути причиною захворювань зварювальників. Проаналізовано режими роботи електрозварювального апарата і визначено найменш небезпечні з них залежно від струму і часу процесу зварювання щодо трьох основних груп електродів, які застосовуються в технологіях зварювання. Досліджено залежність концентрації зварювального аерозолю від часу у разі використання електродів з основним типом покриття із застосуванням витяжної вентиляції, без вентиляції та одночасно з вентиляцією і пиловососом. Розглянуто необхідність вибору електродів із меншою кількістю викидів зварювального аерозолю у повітря робочої зони. Оцінено ефективність витяжної вентиляції на ділянці зварювання та одночасно використання витяжної вентиляції з пиловсмоктувачем і зроблено висновки, що використання тільки витяжної вентиляції не може забезпечити припустимий рівень забруднень у робочій зоні зварювання та у приміщенні.

**Ключові слова:** електродугове зварювання; електроди; зварювальний аерозоль; забруднення; вентиляція; робоча зона; концентрація; шкідливі чинники

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СВАРОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ С ОСНОВНЫМ, РУТИЛОВЫМ И РУТИЛОВО-ЦЕЛЛЮЛОЗНЫМ ПОКРЫТИЕМ

БЕРЕЗУЦЬКИЙ В. В.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.  
ХОНДАК И. И.<sup>2\*</sup>, ст. препод.

<sup>1</sup> Кафедра безопасности труда и окружающей среды, Государственное высшее учебное заведение «Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»», ул. Кирпичева, 2, 61002, Харьков, Украина, e-mail: [viaberezuc@gmail.com](mailto:viaberezuc@gmail.com), тел.+38 (097) 943-61-60, ORCID ID: 0000-0002-7318-1039

<sup>2\*</sup> Кафедра охраны труда, Государственное высшее учебное заведение «Харьковский национальный университет радиоэлектроники», пр. Науки, 14, 61166, Харьков, Украина, тел. +38 (099) 778-44-35, e-mail: [Inna.hondak@nure.ua](mailto:Inna.hondak@nure.ua), ORCID ID: 0000-0001-6644-9968

**Аннотация. Постановка проблемы.** Электродуговая сварка характеризуется значительным количеством вредных и опасных производственных факторов, приводящих к развитию профессиональных заболеваний сварщика, поэтому создание безопасных условий труда – важнейшая задача любого производства. Безопасность сварочных работ полностью зависит от уровня профессионального мастерства, знаний и умений выполнения их сварщиком. **Цель статьи** – исследовать режимы работы электросварочного аппарата и определить наименее опасные из них с точки зрения выделения сварочного аэрозоля в зависимости от тока и времени процесса сварки для трех основных групп электродов, применяемых в технологиях сварки. **Выводы.** Приведен анализ результатов исследования на участке сварки при использовании электродов с различным типом покрытия. Проанализированы вредные факторы, возникающие при применении различного вида сварочных технологий. Исследованы изменения концентраций сварочного аэрозоля, которые образуются при ручной электродуговой сварке и использовании электродов с основным типом покрытия, рутиловым и рутилово-целлюлозным. Определены математические зависимости процессов образования сварочного аэрозоля (СА) с помощью полного факторного эксперимента типа ПФЭ-2<sup>2</sup>. Исследования проводились в лаборатории сварки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», на рабочем месте сварщика, где установлена вентиляция в виде зонта, в котором есть восемь отверстий в форме равностороннего треугольника, размером сторон 5 × 20 × 20. Установлен характер распространения сварочного аэрозоля, который может быть причиной заболеваний сварщиков. Проанализированы режимы работы электросварочного аппарата и определены наименее опасные из них в зависимости от тока и времени процесса сварки для трех основных групп электродов, применяемых в технологиях сварки. Исследована зависимость концентрации сварочного аэрозоля от времени при использовании электродов с основным типом покрытия при использовании вытяжной вентиляции, без вентиляции и одновременно с вентиляцией и пылевсасывателем. Рассмотрена необходимость выбора электродов с меньшим количеством выбросов сварочного аэрозоля в воздух рабочей зоны. Проведена оценка эффективности вытяжной вентиляции на участке сварки и одновременно использования вытяжной вентиляции с пылевсасывателем и сделаны выводы, что использование только вытяжной вентиляции не может обеспечить допустимый уровень загрязнений в рабочей зоне сварки и в помещении.

**Ключевые слова:** электродуговая сварка; электроды; сварочный аэрозоль; загрязнения; вентиляция; рабочая зона; концентрация; вредные факторы

## STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE FORMATION OF WELDING AEROSOL IN ELECTRIC ARC WELDING USING ELECTRODES WITH BASIC, RUTHYL AND RUTHYL-CELLULOSE COATING

BEREZUTSKYI V.V.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
HONDAK I.I.<sup>2\*</sup>, *Assist. Prof.*

<sup>1</sup> Department “Labor and Environment Safety”, State Higher Education Institution “National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2, Кирпичова Str., 61002, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (097) 943-61-60, e-mail: [viaberezuc@gmail.com](mailto:viaberezuc@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6644-9968

<sup>2</sup> Department of Occupational Safety, State Higher Education Institution “Kharkiv National University of Radio Electronics”, 14, Nauky Ave., 61166, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (099) 778-44-35, e-mail: [Inna.hondak@nure.ua](mailto:Inna.hondak@nure.ua), ORCID ID: 0000-0002-7318-1039

**Abstract. Problem statement.** Electric arc welding is characterized by a significant number of harmful and hazardous production factors that lead to the development of occupational diseases of the welder, therefore the most important task of any production is the creation of safe working conditions. The safety of welding works entirely depends on the level of professional skill, knowledge and skills of their performance by the welder. **The purpose of the article** is to study the operating modes of an electric welding machine and determine the least dangerous of them from the point of view of the emission of welding aerosol, depending on the current and time of the welding process for three main groups of electrodes used in welding technologies. **Conclusions.** The analysis of the research results at the welding site when using electrodes with various types of coating provides in article. The harmful factors arising from the use of various types of welding technologies are analyzed. Changes in the concentration of welding aerosol, which are formed during manual electric arc welding and the use of electrodes with the main type of coating, rutile and rutile-cellulose, have been investigated. The mathematical dependences of the processes of formation of welding aerosol (SA) were determined using a full factorial experiment of the FFE-2<sup>2</sup> type. The studies were carried out in the welding laboratory of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" at the welder's workplace where

ventilation is installed in the form of an umbrella in which there are 8 holes in the form of an equilateral triangle, with a side size of  $5 \times 20 \times 20$ . The nature of the propagation of welding aerosol, which can cause diseases of welders, has been established. The modes of operation of the electric welding machine are analyzed and the least dangerous of them are determined depending on the current and time of the welding process for three main groups of electrodes that used in welding technologies. The dependence of the concentration of the welding aerosol on time was studied when using electrodes with the main type of coating when using ventilation, without ventilation and simultaneously with ventilation and the vacuum cleaner. The necessity of choosing electrodes with a smaller amount of welding aerosol emissions into the air of the working area is considered. Evaluation of the efficiency of exhaust ventilation at the welding site and at the same time the use of exhaust ventilation with a dust collector was carried out, and it was concluded that the use of only exhaust ventilation cannot provide an acceptable level of contamination in the air of workplaces and indoors.

**Keywords:** *electric arc welding; electrodes; welding aerosol; pollution; ventilation; working area; concentration; harmful factors*

**Постановка проблеми.** Один з основних технологічних процесів у машинобудівній промисловості – це електродугове зварювання та інші споріднені технології, що характеризуються значною кількістю шкідливих та небезпечних виробничих факторів, що викликають розвиток професійних захворювань робітників зварювальних професій [1]. Тому створення безпечних умов праці – найважливіше завдання будь-якого виробництва. Безпека зварювальних робіт цілком залежить від рівня професійної майстерності, знань і умінь виконання їх зварником [2].

**Аналіз досліджень та публікацій.** У процесі електродугового зварювання забруднюється повітря виробничого середовища. Це відбувається за впливу на метал та матеріал електрода тепла дуги, плавлення та часткового випаровування. Під час застосування різного виду зварювальних технологій можуть виникати шкідливі чинники: підвищуватись рівень електромагнітних полів, з'являтися лазерне, ультрафіолетове, інфрачервоне, іонізуюче випромінювання, підвищуватись напруженість електростатичного поля, рівень шуму, ультразвук, запиленість і загазованість повітря робочої зони; можливі значні статичні навантаження на руки і плечовий пояс [3].

Основні шкідливі фактори процесу електродугового зварювання такі: зварювальний аерозоль (ЗА), що містить пил, пари і газу, наприклад, фтористі сполуки, оксид вуглецю, оксиди азоту, озон, ультрафіолетове випромінювання; бризки розплавленого металу. Склад пилу і газів, що утворюються під час зварювання,

залежить головним чином від складу електродних покриттів.

Хімічні речовини в повітряному середовищі на робочих місцях зварювальника можуть перевищувати ГДК навіть коли працює вентиляція [4; 5]. У зоні дихання зварювальника, який виконує ручні операції, вміст шкідливих компонентів зварювального аерозолю значно (в 7...10 раз) перевищує як фон, так і ГДК [6].

Використання витяжної вентиляції разом із припливно-витяжною дозволить знизити забруднення ЗА робочої зони зварювальника, а також виробничого середовища, але не повністю. Особливу увагу слід звернути на використання електродів із різним типом покриття, для цього необхідно проводити підготовку до процесу зварювання та вибирати електроди із меншою кількістю забруднювальних викидів ЗА у повітря робочої зони.

Результати досліджень рівнів виділень ЗА, виконаних у різних країнах, показують, що найбільші виділення аерозолю характерні для електродів із целюлозним покриттям. За ними йдуть електроди з покриттям основного типу [5; 7]. Електроди з рутиловим покриттям за рівнем виділення ЗА порівняно з електродами з целюлозним та основним покриттям характеризуються значно меншим виділенням аерозолю [7].

Для проведення більш детальних досліджень впливу електродів із різним типом покриття на стан робочої зони зварювальника та виробничого середовища виконано планування експерименту типу ПФЕ<sup>2</sup>. Дослідження проводилися в лабораторії зварювання НТУ «ХП».

**Характеристика робочої зони.** У приміщенні лабораторії встановлено витяжну вентиляцію. На робочому місці зварника – зонт, у якому вісім отворів у формі рівностороннього трикутника, розміром  $5 \times 20 \times 20$ . Швидкість руху повітря біля входу 1,6 (1,5; 1,3) м/с. На робочому місці на відстані 20 см від отворів швидкість руху повітря складає 0,2 м/с. На інших робочих місцях 12 отворів у формі рівностороннього трикутника, розміром  $3,5 \times 20 \times 20$ . Швидкість руху повітря біля входу 1,7 (1,6; 1,9) м/с. На робочому місці на відстані 50 см від отворів швидкість руху повітря складає 0,2...0,3 м/с. Є зонт розміром  $40 \times 82$  у формі прямокутника.

**Мета досліджень** – визначити вплив залежності між струмом і часом зварювання на утворення зварювального аерозолі в робочій зоні.

**Завдання досліджень** – дослідити режими роботи електрозварювального апарата і визначити найменш небезпечні з них залежно від струму і часу процесу зварювання для трьох основних груп електродів, які застосовуються в технологіях зварювання.

Електроди, використані в експерименті:

- з рутилово-целюлозним покриттям. E46 - MAX weld РЦ, E432(3) – РЦ 11;
- з рутиловим покриттям E 6013 Э46 – E60/13-d –УДЕ 431(3) –Р21 ТЕКНМАНН
- з основним покриттям УОНИ-13/45 ПИОНЕР.

**Методика дослідження.** Основний рівень та інтервали варіювання (табл. 1) вибиралися на основі виконаного аналізу застосовуваних у даний час зварювальних процесів. Результати повного факторного експерименту типу  $2^2$ , реалізованого відповідно до матриці планування експерименту, наведені в таблицях 2–6.

Натуральні величини факторів під час проведення експерименту відповідно замінені кодованими їх значеннями. Відтворюваність дослідів перевірена шляхом постановки паралельних дослідів на основному рівні (табл. 2–6).

Таблиця 1

Основний рівень та інтервали варіювання

Рівні факторів	Фактори	
	Струм(I), А, (X <sub>1</sub> )	Час (t), с, (X <sub>2</sub> )
Основний рівень	150	180
Інтервали варіювання	50	120
Верхній рівень (+1)	200	300
Нижній рівень (-1)	100	60

#### Обладнання та прилади

Апарат електродугового зварювання, місцева витяжна вентиляція, пиловсмоктувач, ваги аналітичні ТВЕ-0,21-0,001, фільтри аналітичні АФА ВП 20.

Отримані результати дослідів занесені в таблиці 2–6.

Досліджено вміст зварювального аерозолі з рутилово-целюлозними електродами з використанням вентиляції (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця планування експерименту і результати досліджень вмісту зварювального аерозолі з рутилово-целюлозними електродами з використанням вентиляції

№ досліду (№ зразка)	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Натуральні значення		Y <sub>1</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Y <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Y <sub>3</sub> , мг/м <sup>3</sup>	$\bar{Y}$ , мг/м <sup>3</sup>	Y <sup>2</sup> , мг/м <sup>3</sup>
			I, А	t, с					
1 (№ 29)	+1	+1	150	300	2,03	1,99	2,06	2,03	4,1209
2 (№ 27)	-1	+1	100	300	1,05	1,07	1,09	1,07	1,1449
3 (№ 28)	+1	-1	150	60	1,04	1,05	0,99	1,03	1,0609
4 (№ 26)	-1	-1	100	60	1,02	0,95	1,07	1,01	1,0201
Σ								5,14	26,4196
0 (№ 30)	0	0	200	180	1,03	1,04	1,02	1,03	1,0609

На рисунку 1 показано зразки, отримані в ході експерименту з використанням електродів із рутилово-целюлозним

покриттям у процесі електродугового зварювання при вентиляції, яка працювала.

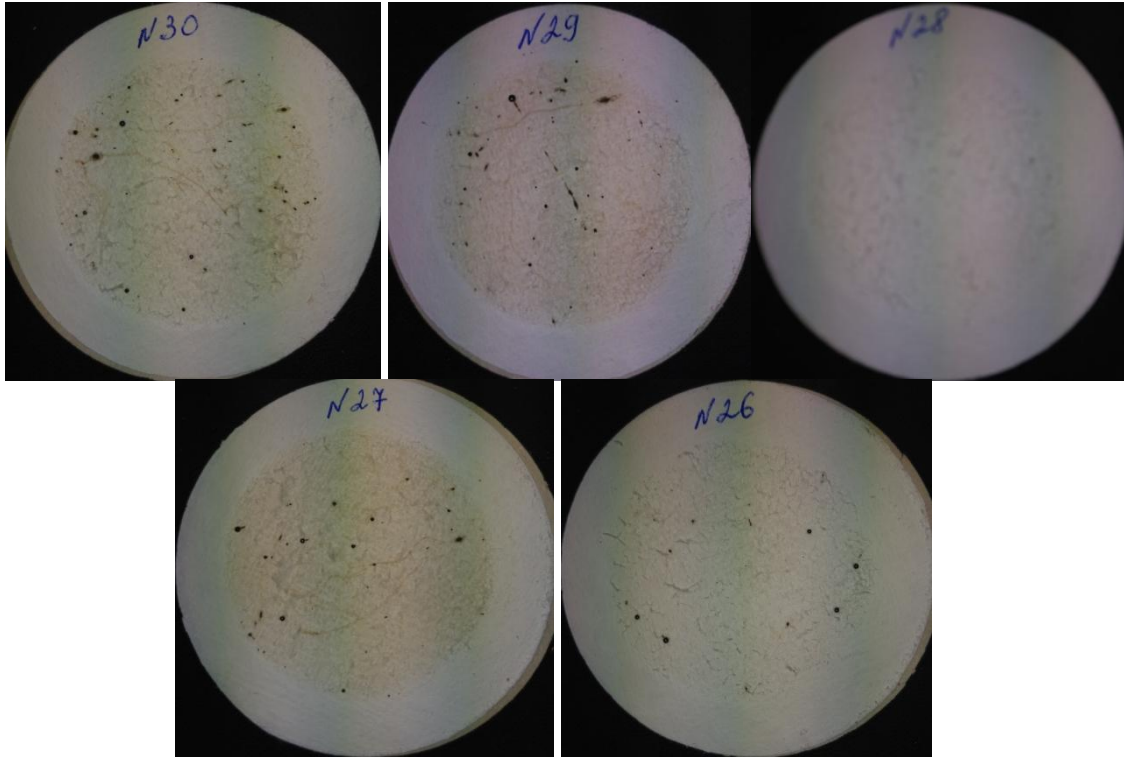
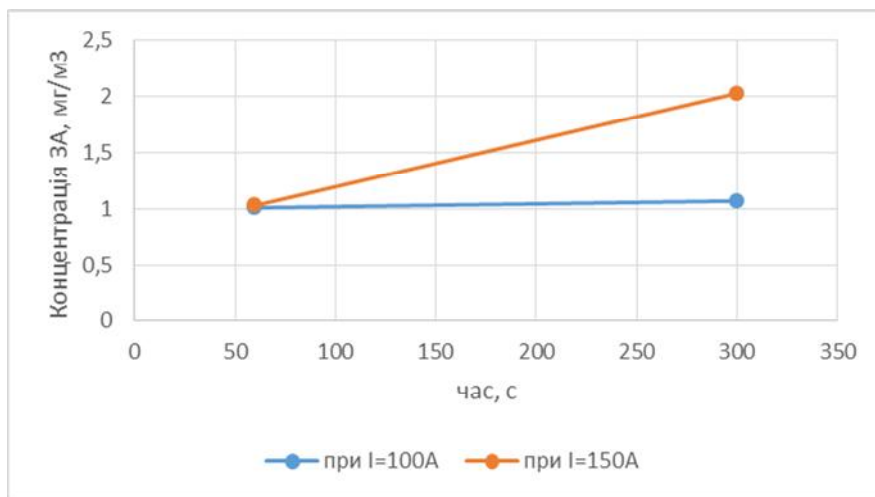
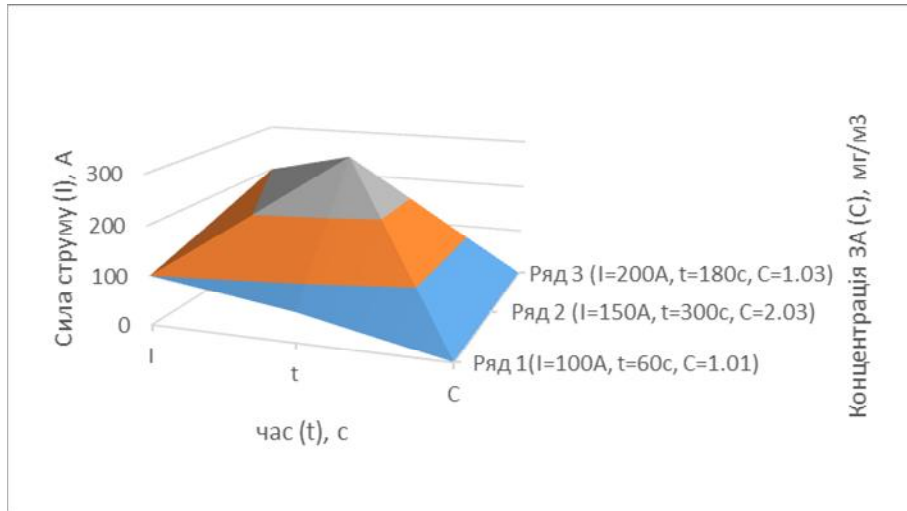


Рис. 1. Зразки фільтрів для використання електродів з рутилово-целюлозним покриттям в умовах працюючої вентиляції

За результатами досліджень, аерозолі від часу за використання наведеними в таблиці 2, побудовано графіки рутилово-целюлозних електродів з залежності концентрації зварювального вентиляцією, яка працює.



a



б

Рис. 2. Залежність концентрації зварювального аерозолі від часу за використання рутилово-целюлозних електродів і вентиляції (табл. 2): а) за  $I = 100 \text{ A}$  і  $I = 150 \text{ A}$ ; б) за  $I = 100 \text{ A}, 150 \text{ A}, 200 \text{ A}$

Відтворюваність дослідів визначена за критерієм Кохрена [8], розрахункове значення якого дорівнює:

$$G_p = \frac{\max Y_i^2}{\sum_{i=1}^{n_0} Y_i^2} = \frac{4,1209}{26,4196} = 0,156 \quad (1)$$

Відповідно табличне значення критерію Кохрена при числі степенів вільності  $f = k-1 = 1$  і рівня значущості  $\alpha = 0,05$  дорівнює  $G = 0,9985$  [8].

Оскільки розрахунковий критерій Кохрена не перевищує значення табличного, однорідність дисперсій підтверджується. Отже, досліді вважаються відтворюваними.

Математичну модель процесу запишемо у вигляді рівняння регресії:

$$\bar{Y} = \epsilon_0 X_0 + \epsilon_1 X_1 + \epsilon_2 X_2 + \epsilon_{12} X_1 X_2, \quad (2)$$

де  $\epsilon_i$  – коефіцієнти рівняння регресії.

Коефіцієнти  $\epsilon_i$  рівняння регресії розраховуються за формулами [8]:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \bar{Y}_u ;$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u , \quad (3)$$

де  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ .

$$\bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Y_{uk} , \quad (4)$$

де  $m$  – число паралельних дослідів.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{iu} X_{ju} Y_u , \quad (5)$$

де  $i = 1, 2 \dots n, \quad i \neq j$ .

Розрахункові значення коефіцієнтів такі:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4} \sum_1^4 Y = 1/4(2,03 + 1,07 + 1,03 + 1,01) = 1,28; \quad (6)$$

$$\epsilon_1 = \frac{1}{4} \sum_1^4 Y_1 = 1/4(2,03 - 1,07 + 1,03 - 1,01) = 0,245; \quad (7)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{4} \sum_1^4 Y_2 = 1/4(2,03 + 1,07 - 1,03 - 1,01) = 0,265; \quad (8)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{4} \sum_1^4 Y_{12} = 1/4(2,03-1,07-1,03+1,01) = 0,235. \quad (9)$$

Математична модель процесу набуває такого вигляду:

$$\bar{Y} = 1,285 + 0,245 X_1 + 0,265 X_2 + 0,235 X_1 X_2. \quad (10)$$

Обчислимо значення  $\hat{Y}$  :

$$\hat{Y}_1 = 1,285 + 0,245(+1) + 0,265(+1) + 0,235(+1) = 2,03 \quad (11)$$

$$\hat{Y}_2 = 1,285 + 0,245(-1) + 0,265(+1) + 0,235(-1) = 1,07 \quad (12)$$

$$\hat{Y}_3 = 1,285 + 0,245(+1) + 0,265(-1) + 0,235(-1) = 1,03 \quad (13)$$

$$\hat{Y}_4 = 1,285 + 0,245(-1) + 0,265(-1) + 0,235(+1) = 1,01 \quad (14)$$

Вважається, що коефіцієнт регресії значимий, якщо виконується умова [8]:

$$t_{ip} > t_T. \quad (15)$$

Розрахункове значення  $t$ -критерію Стьюдента визначається за таким виразом:

$$t_{ip} = \frac{|e_i|}{S_{B_i}}, \quad (16)$$

де  $e_i$  –  $i$ -й коефіцієнт регресії.

$$S_{y_i}^2 = \frac{S_0^2}{N \cdot m}; \quad (17)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^m (Y_i - \bar{Y}_0) = \frac{0,0025}{3} = 0,00083; \quad (18)$$

$$t_{ip} = \frac{1,285}{\sqrt{0,00083}} = 44,31.$$

Усі коефіцієнти рівняння регресії, які визначаються, задовольняють умовам значимості  $t_{ip} > t_T$  ( $f_y = N(m-1) = 4$ ,  $\alpha = 0,05$ ) тому критичне значення критерію Стьюдента:

$$t_{0,05}(4) = 2,78 < t_{ip}. \quad (19)$$

Отже, всі коефіцієнти рівняння (10) – значимі.

Адекватність моделі оцінювали за допомогою  $F$ -критерію (критерію Фішера).

Отже, рівняння вважається адекватним і отриманий поліном цілком достовірно описує математичну залежність факторів, які входять до нього.

Відносна похибка вимірів не перевищує 3 %, що можна вважати допустимим у даних дослідженнях.

У таблиці 3 наведено матрицю планування експерименту і результати досліджень утворення зварювального аерозолі у разі зварювання рутіловими електродами з використанням вентиляції.

Таблиця 3

**Матриця планування експерименту і результати досліджень вмісту зварювального аерозолі з рутіловими електродами з використанням вентиляції**

№ досліду (№ зразка)	X1	X2	Натуральні значення		Y1, мг/м <sup>3</sup>	Y2 мг/м <sup>3</sup>	Y3 мг/м <sup>3</sup>	$\bar{Y}$ , мг/м <sup>3</sup>	Y2, мг/м <sup>3</sup>
			I, A	t, c					
1 (№ 24)	+1	+1	150	300	3,93	3,63	4,02	3,87	14,9769
2 (№ 20)	-1	+1	100	300	3,08	2,85	3,15	3,03	9,1809
3 (№ 21)	+1	-1	150	60	0,95	1,05	1,07	1,02	1,0404
4 (№ 19)	-1	-1	100	60	1,95	2,05	2,03	2,01	4,0401
$\Sigma$								9,93	98,6049
0 (№ 23)	0	0	200	180	2,02	1,95	2,16	2,04	4,1616

На рисунку 3 показано зразки, отримані в ході експерименту за використанням електродів з рутіловим покриттям у процесі

електродугового зварювання з вентиляцією, яка працює.

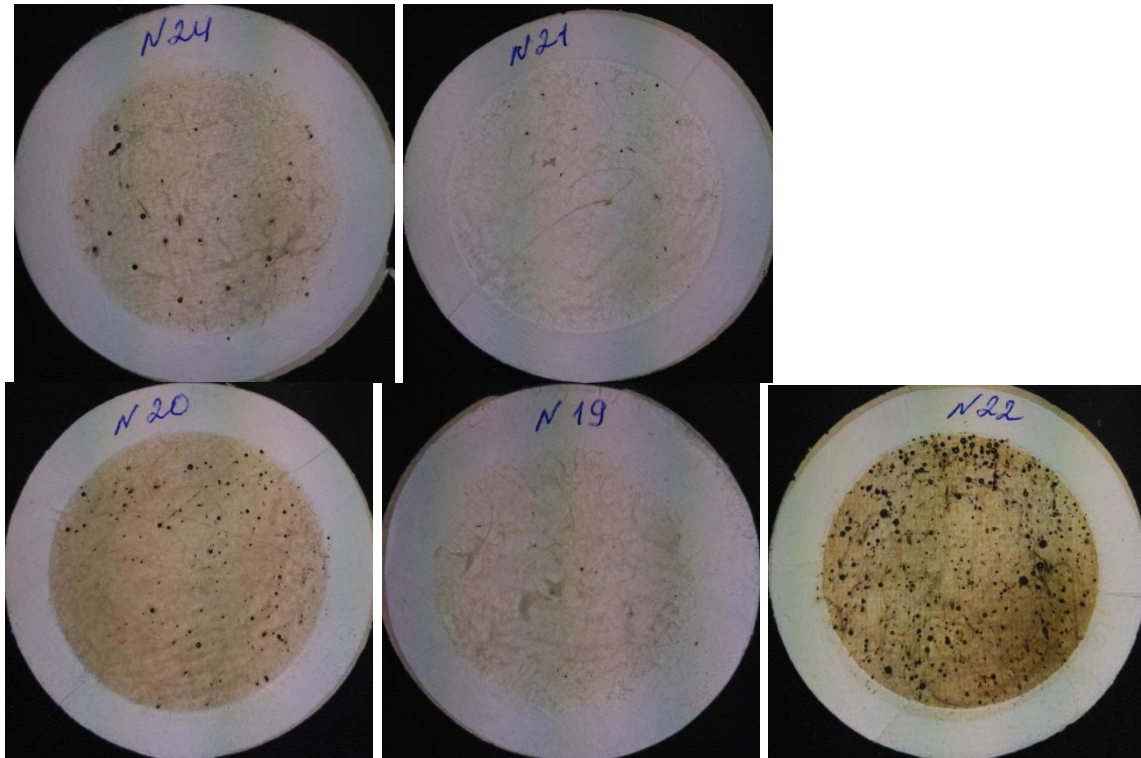


Рис. 3. Зразки фільтрів за використання електродів із рутиловим покриттям в умовах працюючої вентиляції (зразок № 22 отриманий ближче до місця зварювання на 10 см, ніж інші зразки за зварювання рутиловими електродами з вентиляцією, струм 150 А, час 300 с)

За результатами досліджень, наведеними в таблиці 3, побудовано графіки залежності концентрації зварювального аерозолі від часу за використання електродів із рутиловим покриттям в умовах працюючої вентиляції.

Математичну модель процесу зварювання рутиловими електродами з використанням вентиляції записуємо у вигляді рівняння регресії відповідно до рівнянь (2) – (5).

Розрахункові значення коефіцієнтів такі:  $b_0 = 2,4825$ ;  $b_1 = -0,0375$ ;  $b_2 = 0,9675$ ;  $b_{12} = 0,4575$ .

Математична модель процесу зварювання з рутиловими електродами набуває вигляду:

$$\bar{y} = 2,4825 - 0,0375X_1 + 0,9675X_2 + 0,4575X_1X_2 \quad (20)$$

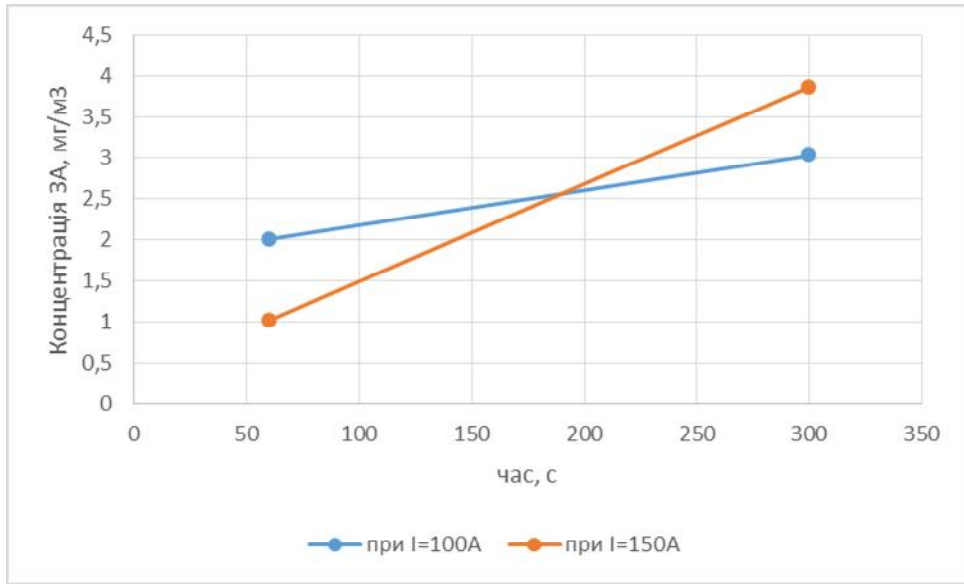
Усі коефіцієнти рівняння регресії, які визначаються, задовольняють умовам значимості  $t_{ip} > t_T$  ( $f_y = N(m - 1) = 4$ ,  $\alpha = 0,05$ ), тому критичне значення критерію Стьюдента:

$$t_{0,05}(4) = 2,78 < t_{ip}. \quad (21)$$

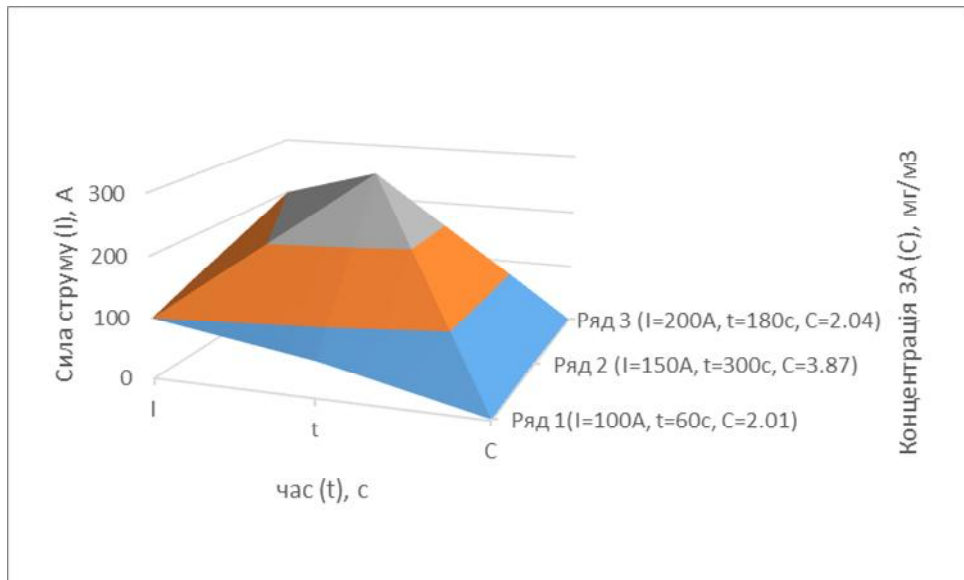
Отже, усі коефіцієнти рівняння (20) значимі.

Відтворюваність дослідів утворення ЗА, отримана під час зварювання рутиловими електродами, визначена за критерієм Кохрена [8] показала, що розрахункове значення якого за формулою (1) дорівнює  $G_p = 0,152$ . Відповідно табличне значення критерію Кохрена при числі степенів свободи  $f = k - 1 = 1$  і рівня значущості  $\alpha = 0,05$  дорівнює  $G = 0,9985$  [8].





а



б

Рис. 4. Залежність концентрації зварювального аерозолу від часу за використання рутильових електродів із вентиляцією, що працює (табл. 3): а) за  $I = 100 \text{ A}$  і  $I = 150 \text{ A}$ , б) за  $I = 100 \text{ A}$ ,  $150 \text{ A}$ ,  $200 \text{ A}$

Таблиця 4

**Матриця планування експерименту і результати досліджень вмісту зварювального аерозолу з основними електродами з використанням вентиляції**

№ досліду (№ зразка)	$X_1$	$X_2$	Натуральні значення		$Y_1$ , мг/м <sup>3</sup>	$Y_2$ мг/м <sup>3</sup>	$Y_3$ мг/м <sup>3</sup>	$\bar{Y}$ , мг/м <sup>3</sup>	$Y^2$ , мг/м <sup>3</sup>
			I, A	t, c					
1 (№ 10)	+1	+1	150	300	4,10	3,50	4,45	4,02	16,1604
2 (№ 8)	-1	+1	100	300	3,35	3,41	3,52	3,43	11,7649
3 (№ 9)	+1	-1	150	60	2,37	2,51	1,28	2,05	4,2025
4 (№ 7)	-1	-1	100	60	1,05	1,03	0,98	1,02	1,0404
$\Sigma$								10,52	110,6704
0 (№ 11)	0	0	200	180	2,27	2,25	2,43	2,32	5,3824

Оскільки розрахунковий критерій Кохрена не перевищує значення табличного, однорідність дисперсій підтверджується. Отже, досліди вважаються відтворюваними.

У таблиці 4 наведено матрицю планування експерименту і результати досліджень утворення зварювального

аерозолі у разі зварювання основними електродами з вентиляцією.

На рисунку 5 показано зразки, отримані в ході експерименту з використанням електродів з основним покриттям у процесі електродугового зварювання за використання вентиляції.

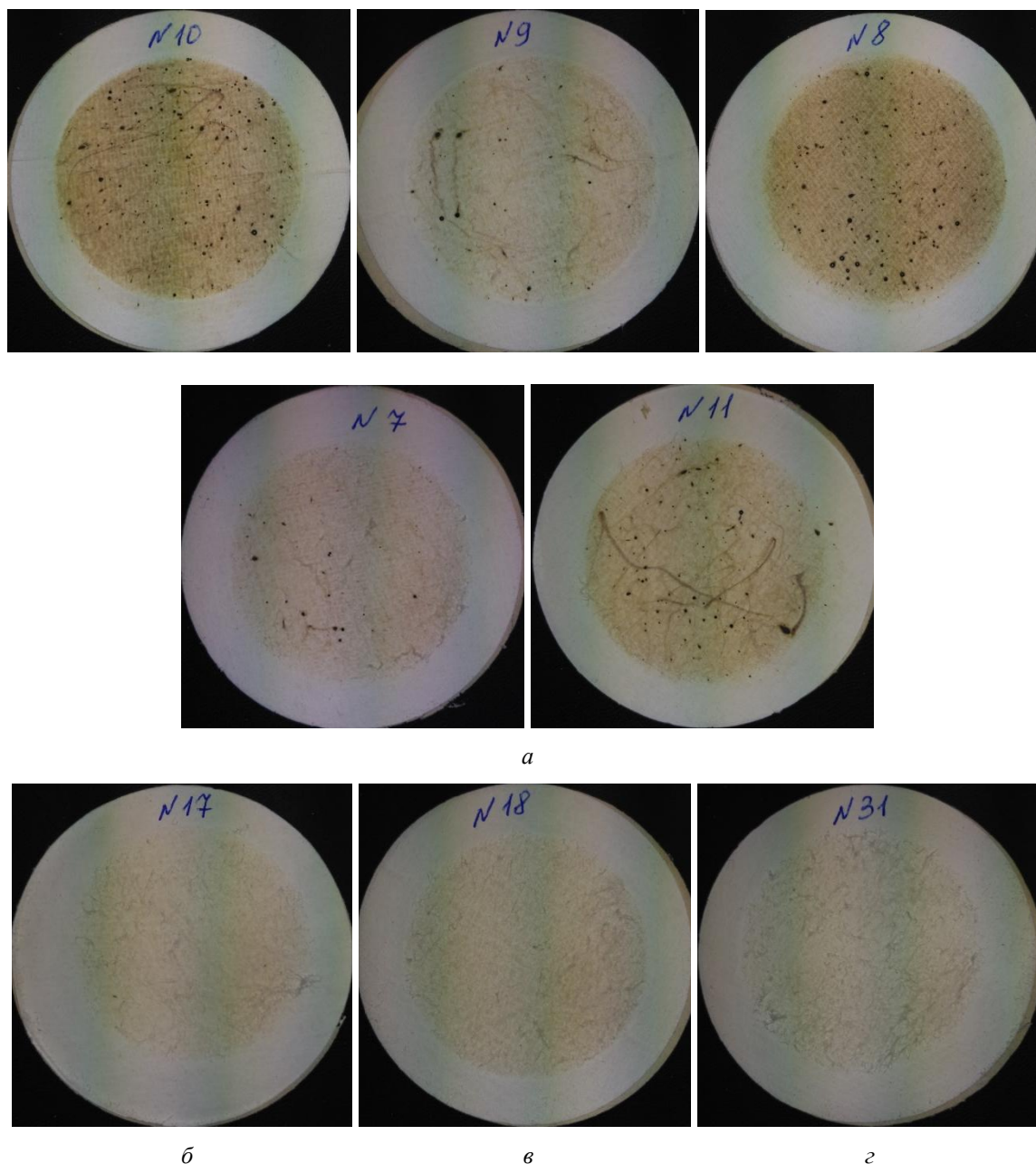


Рис. 5. Зразки фільтрів для електродів з основним типом покриття:  
а) з вентиляцією, яка працює (табл. 4):

- б) зразок № 17 отриманий під час зварювання основними електродами з використанням вентиляції і силою струму 200 А, час 180 с, на відстані 0,5 м від місця зварювання;
- в) зразок № 18 отриманий під час зварювання основними електродами з використанням вентиляції і струмом 200 А, час 180 с, на відстані 1,0 м від місця зварювання;
- г) зразок № 31 отриманий біля органів дихання зварювальника з використанням вентиляції (струм 200 А, час 180 с)

За результатами досліджень, наведеними в таблиці 4, побудовано графіки залежності концентрації зварювального аерозолі від часу з використанням електродів з основним покриттям за вентиляції, яка працює.

Математичну модель процесу зварювання основними електродами з використанням вентиляції записуємо у вигляді рівняння регресії відповідно до рівнянь (2) – (5).

Розрахункові значення коефіцієнтів такі:  $b_0 = 2,63$ ;  $b_1 = 0,405$ ;  $b_2 = 1,095$ ;  $b_{12} = -0,11$ .

Математична модель процесу зварювання з основними електродами з використанням вентиляції набуває вигляду:

$$\bar{Y} = 2,63 + 0,405X_1 + 1,095X_2 - 0,11X_1X_2 \quad (21)$$

Усі коефіцієнти рівняння регресії, які визначаються, задовольняють умовам значимості:

$$t_{ip} > t_T (f_y = N(m - 1) = 4, \alpha = 0,05),$$

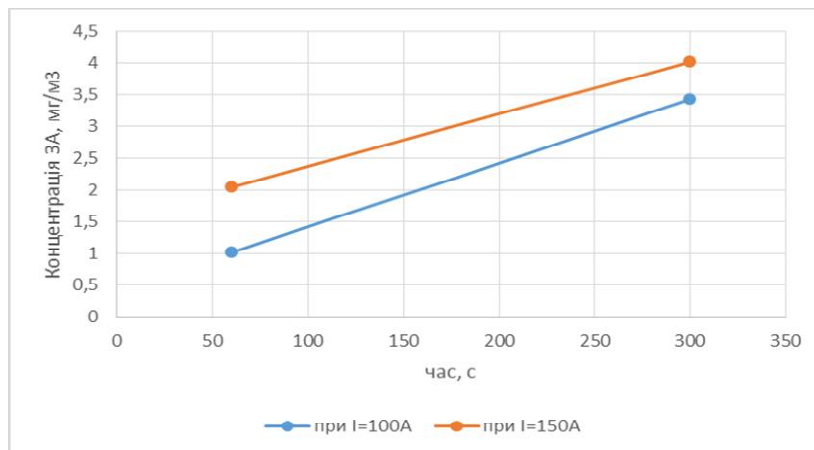
тому критичне значення критерію Стьюдента:

$$t_{0,05}(4) = 2,78 < t_{ip} \quad (22)$$

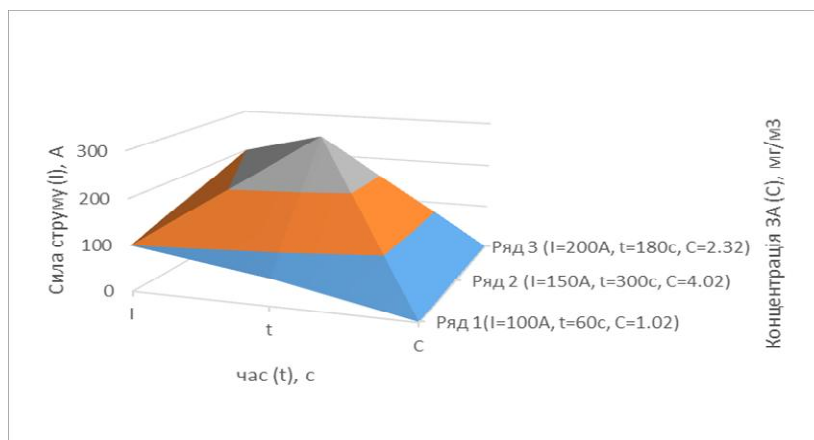
Отже, усі коефіцієнти рівняння (21) значимі.

Відтворюваність дослідів утворення ЗА, отримана у разі зварювання рутіловими електродами, визначена за критерієм Кохрена [8], показала, що його розрахункове значення за формулою (1) дорівнює  $G_p = 0,146$ . Відповідно табличне значення критерію Кохрена при числі степенів вільності  $f = k - 1 = 1$  і рівня значущості  $\alpha = 0,05$  дорівнює  $G = 0,9985$  [8].

Оскільки розрахунковий критерій Кохрена не перевищує значення табличного, однорідність дисперсій підтверджується. Отже, досліди вважаються відтворюваними.



а



б

Рис. 6. Залежність концентрації зварювального аерозолі від часу за використання основних електродів з вентиляцією, що працює (табл. 4): а) за I = 100 А і I = 150 А; б) за I = 100 А, 150 А, 200 А

У таблиці 5 наведено матрицю планування експерименту і результати досліджень утворення зварювального аерозолі за зварювання основними електродами з вентиляцією і пиловсмоктувачем. На рисунку 7 показано

зразки, отримані в ході експерименту з використанням електродів з основним покриттям у процесі електродугового зварювання з вентиляцією, яка працює, і пиловсмоктувачем.

Таблиця 5

**Матриця планування експерименту і результати досліджень вмісту зварювального аерозолі з основними електродами з використанням вентиляції і пиловсмоктувача**

№ дослідів (№ зразка)	$X_1$	$X_2$	Натуральні значення		$y_1$ , мг/м <sup>3</sup>	$y_2$ мг/м <sup>3</sup>	$y_3$ мг/м <sup>3</sup>	$\bar{y}$ , мг/м <sup>3</sup>	$y^2$ , мг/м <sup>3</sup>
			I, A	t, c					
1 (№ 15)	+1	+1	150	300	3,75	3,82	3,73	3,76	14,1376
2 (№ 13)	-1	+1	100	300	2,72	3,01	2,91	2,88	8,2944
3 (№ 14)	+1	-1	150	60	1,83	1,50	1,45	1,59	2,5281
4 (№ 12)	-1	-1	100	60	1,22	1,28	1,13	1,21	1,4641
$\Sigma$								9,44	89,1136
0 (№ 16)	0	0	200	180	2,15	2,22	2,27	2,21	4,8841

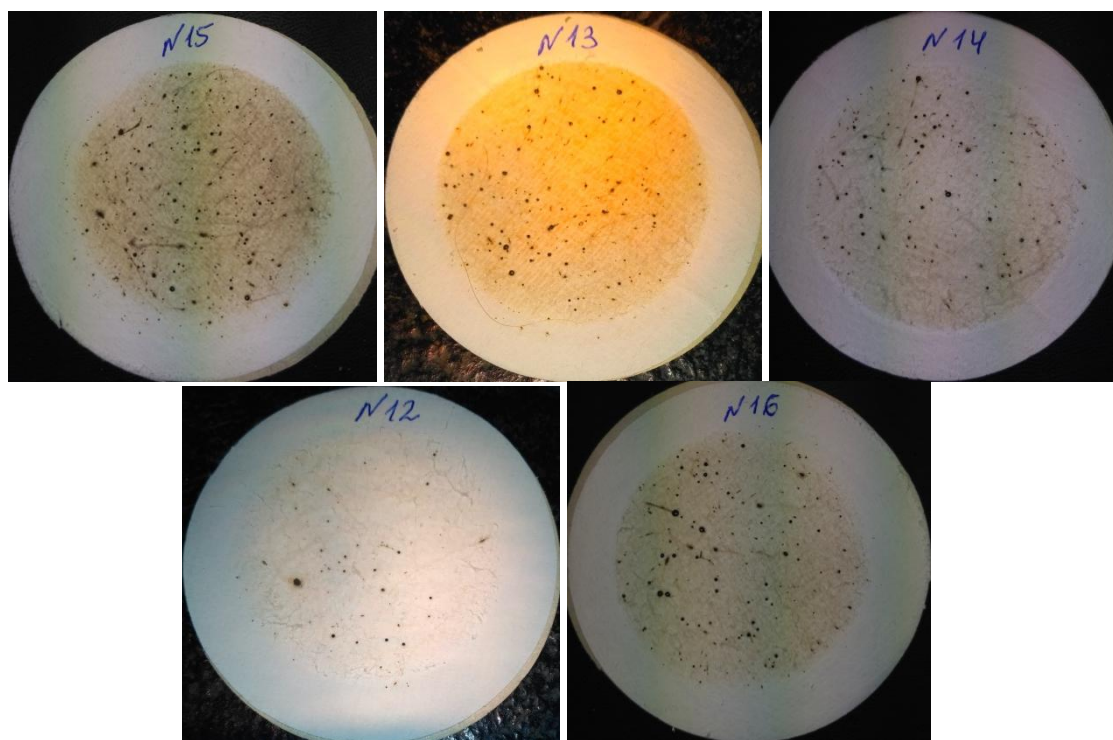
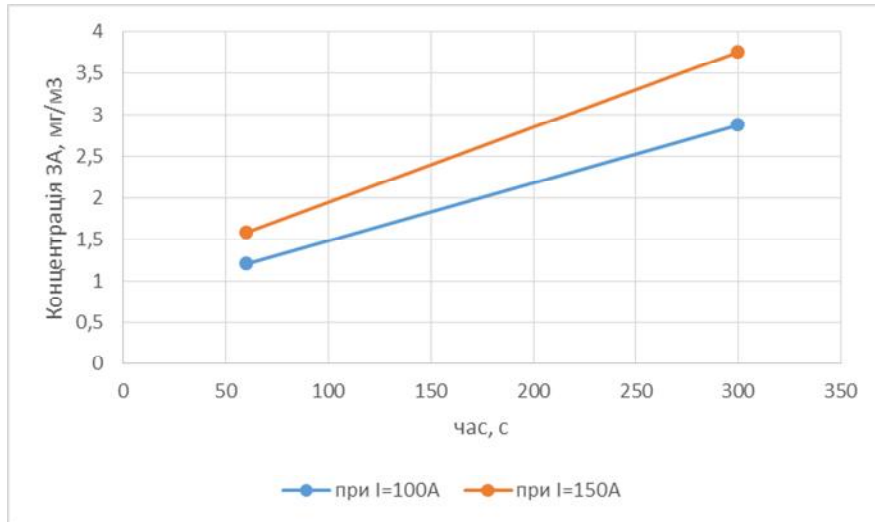


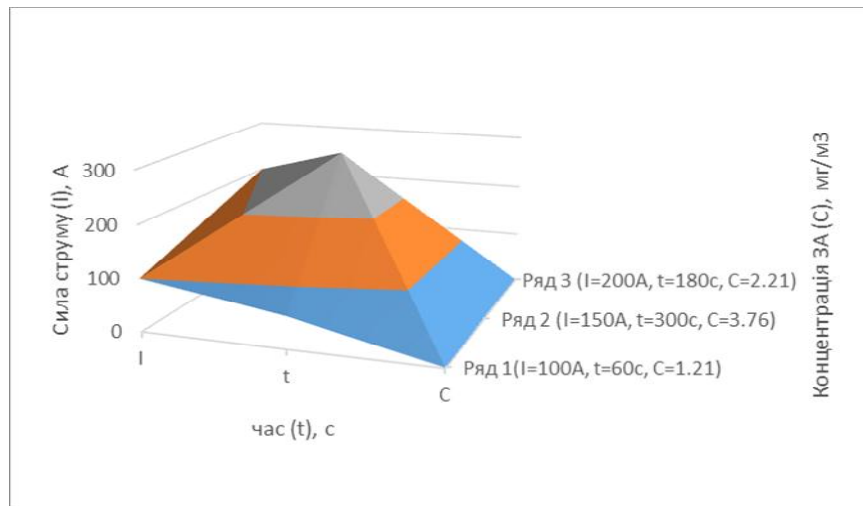
Рис. 7. Зразки фільтрів за використання електродів з основним покриттям із вентиляцією, яка працює, і пиловсмоктувачем

За результатами досліджень, наведеними в таблиці 5, побудовано графіки залежності концентрації зварювального

аерозолі від часу за використання електродів з основним покриттям, вентиляції та пиловсмоктувача.



а



б

Рис. 8. Залежність концентрації зварювального аерозолу від часу за використання основних електродів, вентиляції та пиловсмоктувача (табл. 5):  
а) за  $I = 100 \text{ A}$  і  $I = 150 \text{ A}$ ; б) за  $I = 100 \text{ A}$ ,  $150 \text{ A}$ ,  $200 \text{ A}$

Математичну модель процесу зварювання основними електродами з використанням вентиляції та пиловсмоктувача записуємо у вигляді рівняння регресії відповідно до рівнянь (2) – (5).

Розрахункові значення коефіцієнтів такі:

$$v_0 = 2,36; v_1 = 0,315; v_2 = 0,96; v_{12} = 0,125.$$

Математична модель процесу зварювання з основними електродами за використання вентиляції та пиловсмоктувача набуває вигляду:

$$\bar{Y} = 2,36 + 0,315X_1 + 0,96X_2 + 0,125X_1X_2. \quad (23)$$

Усі коефіцієнти рівняння регресії, які визначаються, задовольняють умовам значимості  $t_{ip} > t_T$  ( $f_y = N(m - 1) = 4$ ,  $\alpha = 0,05$ ), тому критичне значення критерію Стьюдента:

$$t_{0,05}(4) = 2,78 < t_{ip}. \quad (24)$$

Отже, усі коефіцієнти рівняння (23) значимі.

Відтворюваність дослідів утворення ЗА, отримана за зварювання основними електродами з використанням вентиляції та пиловсмоктувача електродами, визначена за критерієм Кохрена [8], показала, що його розрахункове значення за формулою (1) дорівнює  $G_p = 0,159$ . Відповідно табличне значення критерію Кохрена при числі

степенів вільності  $f = k - 1 = 1$  і рівня значущості  $\alpha = 0,05$  дорівнює  $G = 0,9985$  [8].

Оскільки розрахунковий критерій Кохрена не перевищує значення табличного, однорідність дисперсій підтверджується. Отже, досліди вважаються відтворюваними.

У таблиці 6 наведено матрицю планування експерименту і результати

досліджень утворення зварювального аерозолю у разі зварювання основними електродами без вентиляції.

На рисунку 9 показано зразки, отримані в ході експерименту за використання електродів з основним покриттям у процесі електродугового зварювання без вентиляції.

Таблиця 6

**Матриця планування експерименту і результати досліджень щодо вмісту зварювального аерозолю з основними електродами без вентиляції**

№ досліду (№ зразка)	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Натуральні значення		Y <sub>1</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Y <sub>2</sub> мг/м <sup>3</sup>	Y <sub>3</sub> мг/м <sup>3</sup>	$\bar{Y}$ , <sup>3</sup> мг/м <sup>3</sup>	Y <sup>2</sup> , мг/м <sup>3</sup>
			I, A	t, c					
1 (№ 5)	+1	+1	150	300	4,43	4,66	4,45	4,53	20,5209
2 (№ 3)	-1	+1	100	300	3,95	4,05	3,91	3,95	15,6025
3 (№ 4)	+1	-1	150	60	2,49	2,51	2,32	2,44	5,9536
4 (№ 2)	-1	-1	100	60	1,89	1,67	2,38	1,98	3,9204
$\Sigma$								12,9	166,41
0 (№ 6)	0	0	200	180	3,08	2,9	3,12	3,03	9,1809

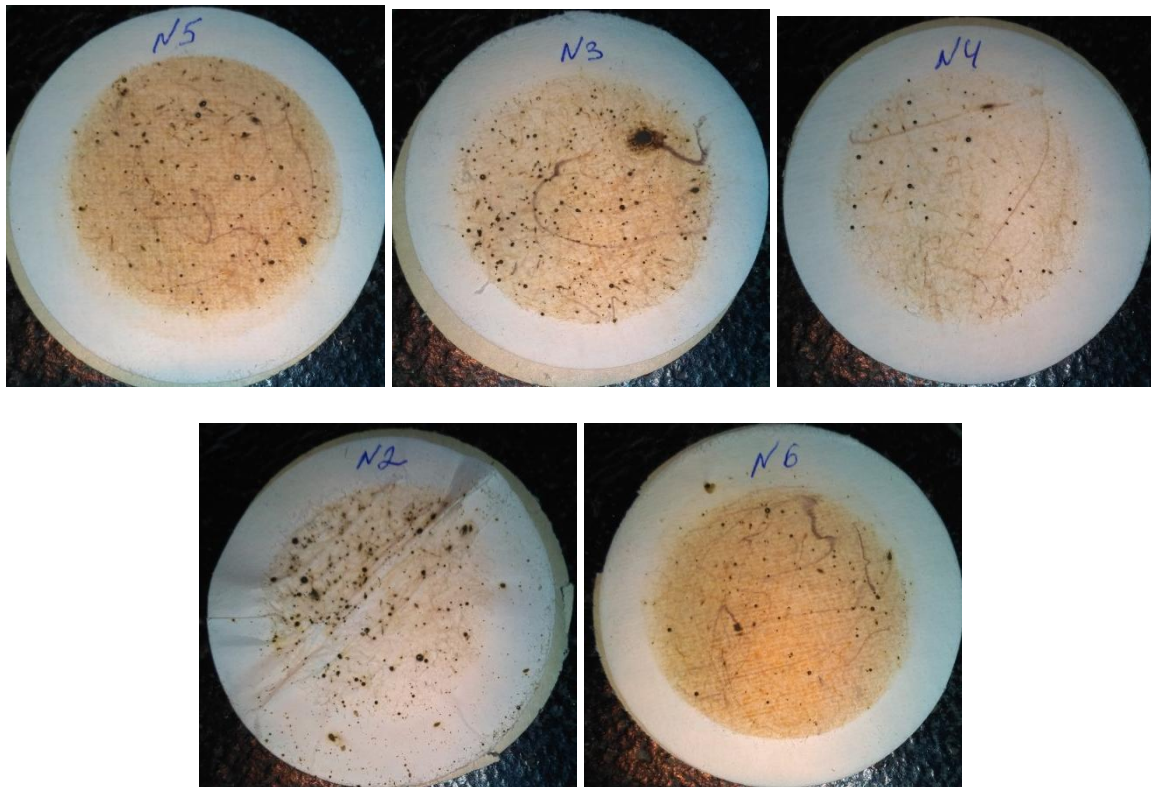
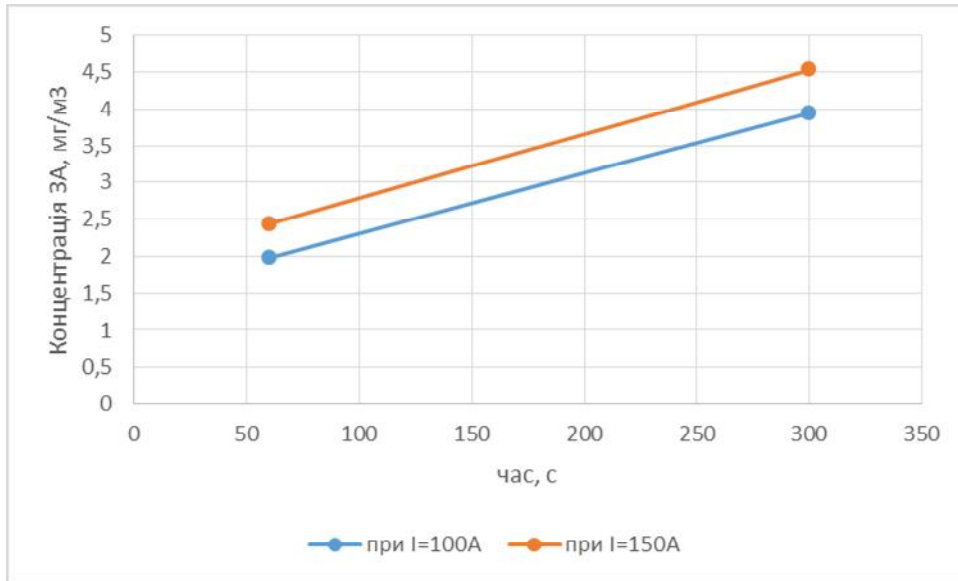
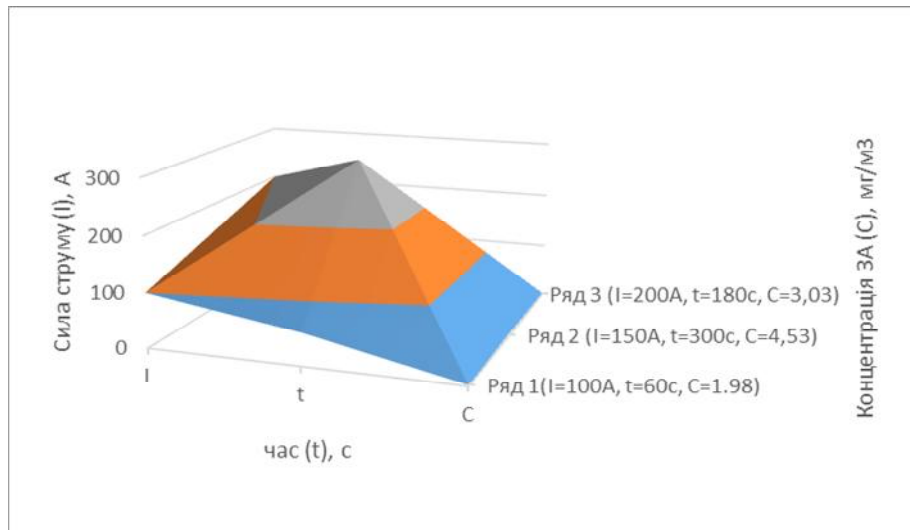


Рис. 9. Зразки фільтрів за використання електродів з основним покриттям без вентиляції



а



б

Рис. 10. Залежність концентрації зварювального аерозолі від часу при використанні основних електродів без вентиляції (табл. 6): а) за  $I = 100 \text{ A}$  і  $I = 150 \text{ A}$ ; б) за  $I = 100 \text{ A}$ ,  $150 \text{ A}$ ,  $200 \text{ A}$

За результатами досліджень, наведеними в таблиці 6, побудовано графіки залежності концентрації зварювального аерозолі від часу за використання електродів з основним покриттям без вентиляції. Математичну модель процесу зварювання основними електродами без вентиляції записуємо у вигляді рівняння регресії відповідно до рівнянь (2) – (5).

Розрахункові значення коефіцієнтів такі:  
 $\epsilon_0 = 3,225$ ;  $\epsilon_1 = 0,26$ ;  $\epsilon_2 = 1,015$ ;  $\epsilon_{12} = 0,03$ .

Математична модель процесу зварювання з основними електродами без використання вентиляції набуває вигляду:

$$\bar{Y} = 3,225 + 0,26X_1 + 1,015X_2 + 0,03X_1X_2. \quad (25)$$

Усі коефіцієнти рівняння регресії, які визначаються, задовольняють умовам значимості  $t_{ip} > t_T$  ( $f_y = N(m - 1) = 4$ ,  $\alpha = 0,05$ ), тому критичне значення критерію Стьюдента:

$$t_{0,05}(4) = 2,78 < t_{ip}. \quad (26)$$

Отже, усі коефіцієнти рівняння (25) значимі.

Відтворюваність дослідів утворення ЗА, отримана при зварюванні основними електродами без вентиляції, визначена за критерієм Кохрена [8], показала, що його розрахункове значення за формулою (1) дорівнює  $G_p = 0,123$ . Відповідно табличне значення критерію Кохрена при числі

степенів вільності  $f = k - 1 = 1$  і рівня значущості  $\alpha = 0,05$  дорівнює  $G = 0,9985$  [8].

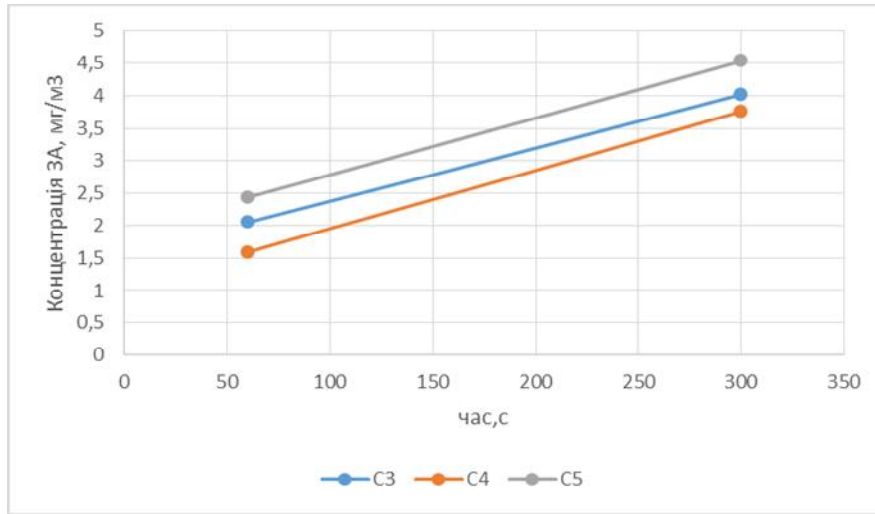


Рис. 11. Залежність концентрації зварювального аерозолу від часу за використання електродів з основним типом покриття (C3 – з вентиляцією, C4 – з вентиляцією та пиловсмоктувачем, C5 – без вентиляції) за  $I = 150$  А

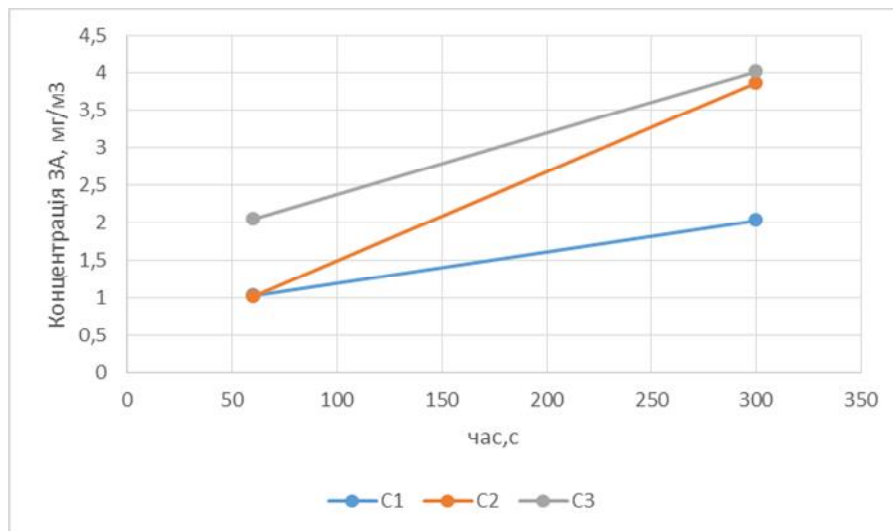


Рис. 12. Залежність концентрації зварювального аерозолу від часу за використання вентиляції та електродів з різним типом покриття (1 – рутилово-целюлозне, 2 – рутилове, 3 – основне) за  $I = 150$  А

Оскільки розрахунковий критерій Кохрена не перевищує значення табличного, однорідність дисперсій підтверджується. Отже, досліди вважаються відтворюваними.

На рисунку 11 розглянуто залежність концентрації зварювального аерозолу від часу за використання електродів з основним типом покриття у трьох ситуаціях:

- 1) коли працює вентиляція;
- 2) одночасно працюють вентиляція і пиловсмоктувач;
- 3) без вентиляції.

За  $I = 150$  А.

Дослідження довели, що одночасне використання вентиляції та пиловсмоктувача суттєво ефективніше, ніж просто витяжної вентиляції.

У середовищі Mathcad [9; 10] побудовано графіки залежності концентрації зварювального аерозолу від часу і від сили струму за розрахованими математичними моделями за формулами 10, 20, 21, 23, 25: (рис. 13–17).



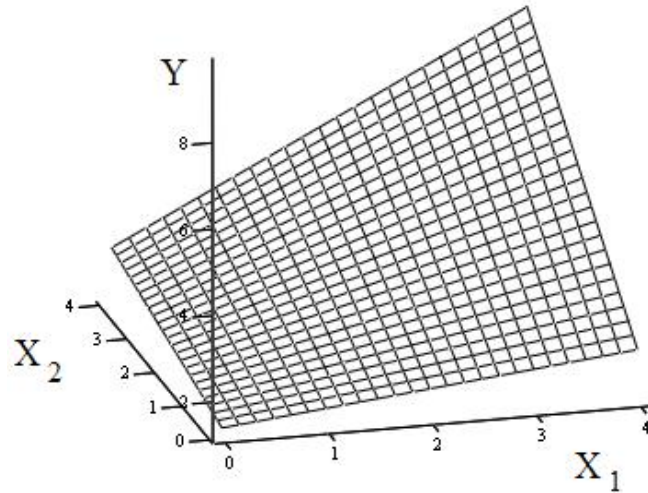


Рис. 13. Залежність концентрації зварювального аерозолу від часу за використання рутилово-целюлозних електродів і вентиляції (табл. 2)

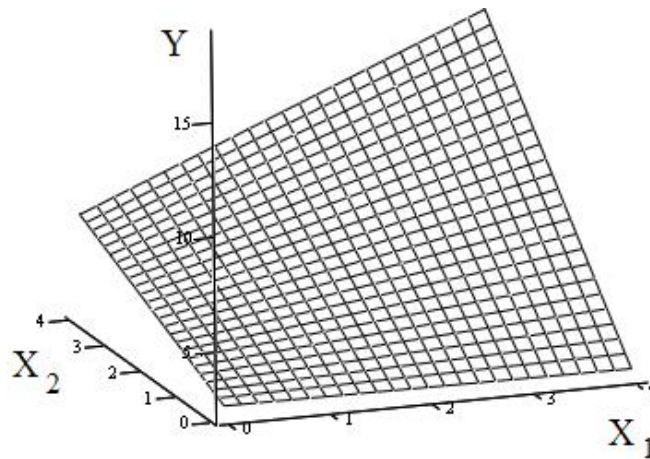


Рис. 14. Залежність концентрації зварювального аерозолу від часу за використання рутилових електродів із вентиляцією (табл. 3)

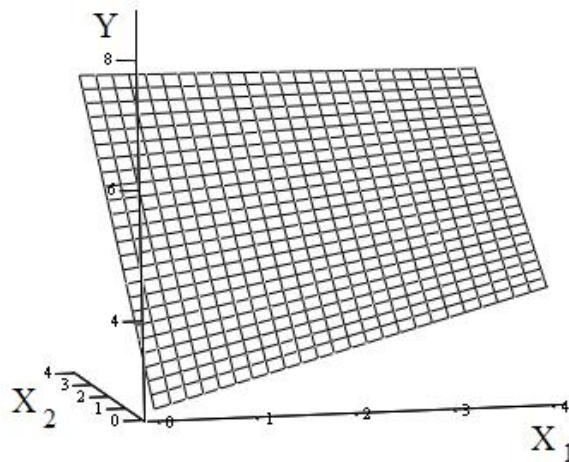


Рис. 15. Залежність концентрації зварювального аерозолу від часу за використання основних електродів із вентиляцією (табл. 4)

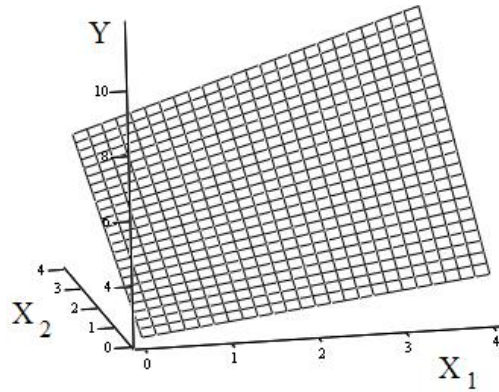


Рис. 16. Залежність концентрації зварювального аерозолі від часу за використання основних електродів із вентиляцією та пиловсмоктувачем (табл. 5)

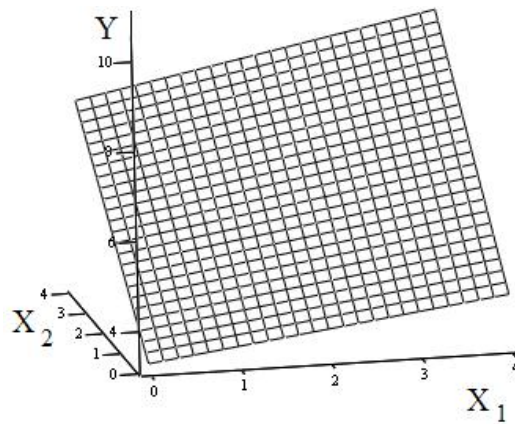


Рис. 17. Залежність концентрації зварювального аерозолі від часу за використання основних електродів без вентиляції (табл. 6)

### Висновки

1. Виконані дослідження та отримані результати забрудненості повітря робочої зони зварювальним аерозолем на ділянці зварювання довели залежність утворення ЗА у повітрі робочої зони від типу електродів та необхідність вибору для роботи під час ручного електродугового зварювання електродів із меншою кількістю викидів ЗА у повітря робочої зони, що дозволяє регулювати та зменшувати обсяги ЗА, які виділяються в навколишнє середовище.

2. Досліджено зміни концентрацій зварювального аерозолі, які утворюються під час ручного електродугового зварювання та використання електродів з основним типом покриття, рутіловим та рутілово-целюлозним.

3. Визначено математичні залежності процесів утворення ЗА за допомогою повного факторного експерименту типу ПФЕ- $2^2$  та встановлено характер розповсюдження зварювального аерозолі,

який може бути причиною професійних захворювань зварювальників.

4. Досліджено залежність концентрації зварювального аерозолі від часу і сили струму за використання електродів з основним типом покриття з вентиляцією, без вентиляції та одночасно з вентиляцією і пиловсмоктувачем. Використання тільки витяжної вентиляції без припливно-витяжної не може забезпечити допустимий рівень забруднень у робочій зоні зварювання та у приміщенні;

5. Результати досліджень доводять, що найбільша концентрація ЗА – від електродів з основним покриттям, менша – з рутіловим. Установлено, що із трьох досліджених типів електродів менше ЗА утворюється під час роботи з рутілово-целюлозним покриттям. Результати дослідження вказують, що використання електродів із рутіловим типом покриття через 310...320 секунд ці електроди стають більш небезпечними ніж основні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Денисова Н. М. Шляхи зниження забрудненості повітря робочої зони зварювальних дільниць. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. № 3 (59). С. 208–213.
2. Березуцький В. В., Хондак І. І. Зварювання металевих виробів та безпека. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. № 41 (1317). 2018. С. 91–102.
3. Левченко О. Г. Гігієна праці та виробнича санітарія у зварювальному виробництві : навч. посіб. Київ : Основа, 2004. С. 96–98.
4. Лубянова И. П. Характер и структура производственно обусловленных заболеваний у сварщиков. *Довкілля та здоров'я*. 1999. № 3. С. 51–57.
5. Гримитлин М. И., Кгондрашов С. Ю., Алексеева И. С. и др. Улучшение состояния воздушной среды в сборочно-сварочных цехах. Охрана труда в условиях интенсификации производства. Ленинград, 1987. С. 40–67.
6. Гримитлин М. И. Вентиляция сварочного производства. 2007. URL: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/845/>.
7. Лук'яненко А. О. Нормалізація концентрації шкідливих речовин на робочих місцях ручного дугового зварювання : автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук : спец. 05.26.01. Київ, 2012. 20 с.
8. Основы научных исследований в химической промышленности : монография. Под ред. И. М. Глущенко. Київ : Вища школа, 1983. 158 с.
9. Кирьянов Д. В. Mathcad 15 / MathcadPrime 1.0. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. 432 с.
10. Макаров Е. Г. Инженерные расчеты в Mathcad 15 : учеб. курс. Санкт-Петербург : БГТУ-Военмех, 2011. 345 с.

## REFERENCES

1. Denysova N.M. *Shlyakhy znyzhennya zabrudnenosti povitrya robochoyi zony zvaryval'nykh dil'nyts'* [Ways to reduce air pollution of the working area of welding sites]. *Visnyk Chernihivs'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu , seriya «Tekhnichni nauky»* [Bulletin of Chernihiv State Technological University, series "Technical Sciences"]. 2012, no. 3 (59), pp. 208–213. (in Ukrainian).
2. Berezuts'kyi V.V. and Khondak I.I. *Zvaryuvannya metalevykh vyrobiv ta bezpeka* [Welding of metal products and safety]. *Visnyk NTU «KHPi»*. Seriya: *Innovatsiyni tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment for materials processing in mechanical engineering and metallurgy]. 2018, no. 41 (1317), pp. 91–102. (in Ukrainian).
3. Levchenko O.H. *Hihiyena pratsi ta vyrobnycha sanitariya u zvaryval'nomu vyrobnytstvi : navchal'nyy posibnyk* [Occupational hygiene and industrial sanitation in welding : a textbook]. Kyiv : Osнова Publ., 2004, pp. 96–98. (in Ukrainian).
4. Lubjanova I. P. *Harakter i struktura proizvodstvenno obuslovenykh zbolevanij u svarshnikov* [The nature and structure of occupational diseases in welders]. *Dovkillja ta zdorov'ja* [Environment and health]. 1999, no. 3, pp. 51–57. (in Russian).
5. Gritmitlin M.I., Kgondrashov S.Ju., Alekseeva I.S and oth. *Uluchshenie sostojaniya vozdushnoj sredy v sborochno-svarochnyh cehah* [Improving the state of the air in the assembly and welding shops]. *Ohrana truda v uslovijah intensifikacii proizvodstva* [Labor protection in conditions of intensification of production]. Leningrad, 1987, pp. 40–67. (in Russian).
6. Gritmitlin M.I. *Ventiljacija svarochnogo proizvodstva* [Welding production ventilation]. 2007. URL: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/845/> (in Russian).
7. Luk'yanenko A.O. *Normalizaciya koncentraciyi shkidly'vy'x rechovy'n na robochy'x miscyax ruchnogo dugovogo zvaryuvannya: avtoref. dy's. na zdobuttja naukovogo stupenya kand. texn. Nauk : specz. 05.26.01* [Normalization of concentration of harmful substances at workplaces of manual arc welding : author's ref. dis. for the degree of Cand.Tech. Science : special. 05.26.01]. 2012, Kyiv, 20 p. (in Ukrainian).
8. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v khimicheskoy promyshlennosti* [Fundamentals of scientific research in the chemical industry]. By ed. I.M. Glushchenko. Kyiv : Vishcha shkola Publ., 1983, 158 p. (in Russian).
9. Kir'janov D.V. *Mathcad 15/MathcadPrime 1.0*. Saint Petersburg : BHV-Peterburg Publ., 2012, 432 p. (in Russian).
10. Makarov E.G. *Inzhenernye raschety v Mathcad 15 : uchebnyj kurs* [Engineering calculations in Mathcad 15. Training course]. Saint Petersburg : BGTU-Voenmeh Publ., 2011, 345 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 02.10.2020.