

**Гайдамак О. Л.**

к.т.н., доцент

**Матвійчук В. А.**

д.т.н., професор

*Вінницький національний  
аграрний університет***Gaidamak O.  
Matviyчук V.***Vinnitsia National Agrarian  
University***УДК 621.735.34; 621.793.79****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-12****СТВОРЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ  
ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ  
ПОКРИТТІВ ГАЗОДИНАМІЧНИМ  
НАПИЛЕННЯМ**

В статті показано результати дослідження процесів напилення композиційних електропровідних покриттів з використанням мідного С01-11 та алюмінієвого А20-11 порошоків з метою з'ясування впливу компонентів один на одного при утворенні покриття холодним газодинамічним напиленням (ХГДН), а також розробка рекомендацій, що до введення додаткового компонента для отримання композиційного покриття із заданим співвідношенням різних компонентів. Наприклад, коли при температурі робочого повітря 300° С коефіцієнт напилення міді майже дорівнює нулю, це пошук експериментальної залежності зміни коефіцієнта напилення в залежності від процентного вмісту компонентів порошоків міді та алюмінію в суміші, що напилюється, та визначення їх залишкового вмісту в покритті і обчислення на основі отриманих даних коефіцієнтів напилення міді і алюмінію.

Методом ХГДН отримано заготовки з композитними покриттями із сумішею порошоків алюмінію А20-11 і міді С01-11 при різній вихідній концентрації алюмінію по масі (від 0 до 100% з кроком 10%) при інших рівних умовах (тиск повітря 0,5 МПа, температура нагріву повітря 300 °С).

Знайдено коефіцієнт напилення суміші міді та алюмінію і залишковий вміст компонентів в напилених композитних покриттях. Дані за залишковим змістом окремих компонентів в напиленому покритті дозволяють визначити склад вихідного порошку, необхідний для напилення заданого вмісту кожного з компонентів в покритті.

Знайдено залежності коефіцієнтів напилення міді С01-11 і алюмінію А20-11 від масового вмісту алюмінію в суміші, що напилюється. При вихідній концентрації алюмінію менше 66 %, коефіцієнт напилення міді виявляється більше коефіцієнта напилення алюмінію. Обидва вони збільшуються зі зростанням концентрації алюмінію, поки вона не досягне величини 61 %. При високих концентраціях алюмінію (більше 66%) коефіцієнти напилення міді, алюмінію і їх суміші збігаються. Отримані результати за залишковим змістом компонентів в покритті дозволяють вибрати склад вихідного порошку, необхідний для отримання необхідного вмісту компонентів в покритті. Наприклад, максимальний залишковий вміст міді (~ 95 %) може бути отриманий при додаванні в вихідний порошок 30-40 % алюмінію.

Отримані результати доводять наявність впливу компонентів один на одного і обґрунтовують кількість введення додаткового компонента для напилення композиційного покриття, що містить компонент, який важко напилюється.

**Ключові слова:** холодне газодинамічне нанесення покриття, напилення, композиційне покриття, мідь, алюміній.



**Вступ.** Холодне газодинамічне напилення (ХГДН) - процес порошкового нанесення покриттів [1], що швидко розвивається. При ХГДН частинки з характерним розміром 10-150 мкм прискорюються в потоці газу до швидкостей 250-1200 м/с і при ударі об підкладку закріплюються на ній без фазових переходів. Відсутність високих температур дозволяє істотно розширити можливості методів нанесення покриттів порошковими матеріалами та забезпечує методу ХГДН, у порівнянні з відомими газотермічними методами, такі переваги:

- дозволяє використовувати для напилення порошки із розміром менше 30-50 мкм, в тому числі ультрадисперсні, що призводить до поліпшення якості покриття - збільшується його щільність, зменшується об'єм мікропорожнин, структура стає більш однорідною, виникає можливість зменшувати товщину покриття;

- відсутнє істотне нагрівання часток і пов'язаних з ним процесів високотемпературного окислення та фазових переходів, що дозволяє отримувати покриття з властивостями, близькими до матеріалу початкових часток, а також композиційні покриття з механічної суміші порошків, які значно різняться за фізико-термічними властивостями;

- відсутній істотний термічний вплив на виріб, що дозволяє наносити покриття на підкладки з нетермостійких матеріалів;

- простота технічної реалізації та покращення безпеки робіт у зв'язку із відсутністю високотемпературних струменів, а також вогне- та вибухонебезпечних газів.

На основі методу ХГДН створюються технології для вирішення завдань енерго та ресурсозбереження у різних галузях промисловості які вводяться в практику нетрадиційних та ефективних способів виробництва, ремонту, відновлення, антикорозійного захисту, отримання електропровідних, теплопровідних, антифрикційних, ізоляційних та інших покриттів функціональних вузлів і елементів самої різної техніки та обладнання.

#### **Аналіз останніх досліджень.**

Можливість утворення надійних покриттів із часток в твердому (нерозплавленому) стані виявилася несподіваною для фахівців, оскільки існували уявлення про необхідність плавлення (загального або локального) для адгезії між часткою і поверхнею підкладки та утворення покриття і про те, що при ударі нерозплавленої частки пружна енергія викличе відскік напилюваної частки від перепони.

Починаючи приблизно з 2000 р повсюди стали з'являтися центри та лабораторії з вивчення можливостей методу ХГДН. Інтенсивність досліджень наочно демонструється великим числом публікацій, розгорнутий огляд яких представлений в монографії [6] (перша в світі монографія, присвячена основам ХГДН, та роботах [1-5]. В результаті проведених досліджень були запропоновані різні технічні рішення шляхом оптимального вибору робочого газу [7-9], розміру і форми часток порошку [10], режимів напилення (число проходів, швидкість сканування) [11], кута напилення [12], температури підігріву порошку [13], створення підшарів [14].

Слід зазначити також роботи з напилювання у вакуумі субмікронних порошків [15], застосування мікросопел (до 50 мкм в діаметрі) для напилення нанопорошків (включаючи неметали) [16], з металізації методом ХГДН скла і кремнію [17], різних пластиків [18-21], а також напилення порошків пластиків [22, 23]. Всі ці досягнення показують, наскільки широка область застосування ХГДН. Велика розноманітність одержуваних з його допомогою матеріалів і покриттів докладно представлено в опублікованих наукових роботах [24, 25].

Однак потенціал ХГДН ще до кінця не розкритий. Деякі аспекти процесу вимагають подальшого дослідження з метою створення нових технологій, їх оптимізації, а також більш глибокого розуміння фізики високошвидкісної ударної взаємодії гетерогенних потоків з перешкодами.

Одним з таких завдань є вивчення формування композиційних покриттів з багатокомпонентних сумішей, зокрема з двокомпонентних, що представляють собою суміші двох різних металевих порошків. Особливо важливо виявити взаємний вплив компонентів, наприклад, коли коефіцієнт напилення одного з компонентів у присутності іншого компонента відрізняється від коефіцієнта напилення при відсутності іншого компонента. Для вивчення цього явища нами була обрана суміш порошків алюмінію і міді. Ранні експерименти показали, що при температурі 300 °С коефіцієнт напилення мідного порошку практично дорівнює нулю. У той же час коефіцієнт напилення алюмінієвого порошку при цій температурі помітно відрізняється від нуля (нижче в роботі наведені конкретні значення). Новизна даного дослідження полягає в тому, щоб показати, що при цій же температурі робочого повітря (300 °С) можна збільшити коефіцієнт напилення міді шляхом створення суміші з додаванням



алюмінію. Це дозволяє обґрунтувати підхід, що в тих випадках, коли не вдається з певного порошку отримати покриття, в силу обмежених можливостей конкретної установки ХГДН, додавання відповідного компонента забезпечує отримання композиційного покриття, до складу якого в певній пропорції буде входити і «важконапилюваний» компонент.

**Мета досліджень.** Метою роботи є встановлення взаємовпливу компонентів порошку один на одного і обґрунтування методики введення додаткового компонента для отримання якісного композиційного покриття методом ХГДН.

**Завданням дослідження** є встановлення залежності зміни коефіцієнта напилення від

процентного вмісту порошків міді та алюмінію в суміші (в умовах, коли коефіцієнт напилення міді майже дорівнює нулю, зокрема при температурі робочого повітря 300 °С), визначення їх залишкового вмісту в покритті і обчислення на основі цих даних коефіцієнтів напилення міді і алюмінію.

**Виклад основного матеріалу.** Для отримання композиційних покриттів використовувалася механічна суміш порошку алюмінію А20-11 і міді С01-11. На рис. 1 показано вигляд цих порошків, а на рис. 2 - мікрофотографії їх часток.



Рис. 1. Вигляд порошків, що формують суміш для напилення: а - порошок алюмінію А 20-11, б - порошок міді С01-11

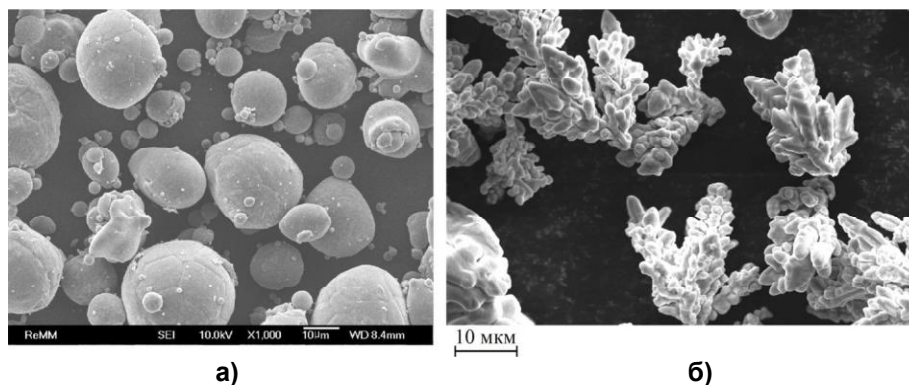


Рис. 2. Мікрофотографії часток порошків для напилення: а - порошок алюмінію А 20-11, б - порошок міді С01-11

Розподіл часток порошку за розміром є одним з найважливіших параметрів, які визначають можливість його застосування в ХГДН і якість одержуваних покриттів [1].

Середні значення розмірів частинок  $d_{cp}$ .

і стандартне відхилення  $S_d$ , що обчислені за мікрофотографіями рис. 2, представлені в табл. 1. Максимальну частку за об'ємом (масою) займають частки розміром 20-52 мкм для алюмінію і 42 - 78 мкм для міді.

Табл. 1

Порошок	$d_{cp}$ , мкм	$S_d$ , мкм
А 20-11	30,3	15,8
С 01-11	46,4	26,6



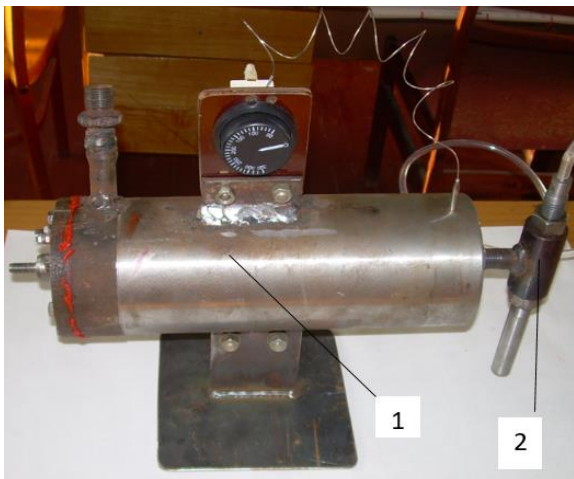
Для створення композиційних покриттів готували механічні суміші двох порошків у

пропорціях, приведених у табл. 2. Загальна маса кожної порції складала 0,5 грам.

Табл. 2

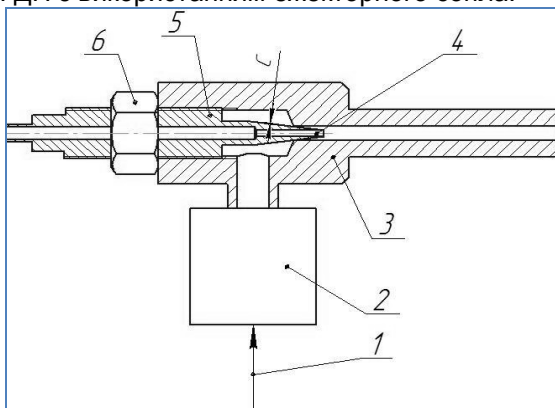
Порошок	Номер суміші										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
С 01-11	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	–
А 20-11	–	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Нанесення покриття відбувалось за допомогою газодинамічного напилувального пристрою, розробленого та виготовленого на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету [2], загальний вигляд якого показаний на рис. 3.



**Рис. 3. Газодинамічний напилувальний пристрій: 1 – електронагрівач стиснутого повітря. 2 – сопло-прискорювач стиснутого повітря та напилуваного порошку**

На рис. 4 приведена схема реалізації ХГДН з використанням ежекторного сопла.



**Рис. 4. Схема реалізації ХГДН за допомогою ежекторного сопла: 1 – подача стиснутого повітря, 2 – електронагрівач, 3 – сопло, 4 – конус з центральним осьовим отвором для подачі напилуваного порошку, 5 – гвинтова частина конусу, 6 – контргайка, С – кільцевий критичний перетин (зазор) між конусом і отвором сопла**

Пристрій для ХГДН працює наступним чином. Стиснуте повітря 1 від компресора подається в електронагрівач 2, де нагрівається до необхідної температури і нагріте потрапляє в сопло через кільцевий зазор С. При обтіканні конуса 4 швидкість потоку повітря значно збільшується, а тиск всередині сопла падає до значень, менших від атмосферного. В результаті цього на виході центрального осьового отвору виникає ефект ежекції. Регулюванням величини кільцевого зазору С, завдяки наявності різьбової частини 5 і контргайки 6, регулюється тиск ежекції і відповідна величина та швидкість подачі напилуваного порошку.

Для проведення дослідження нами були вибрані наступні режими роботи пристрою ХГДН Тиск повітря  $P_0 = 0,6$  МПа, тиск ежекції  $P_e = 0,095$  МПа, температура нагріву стиснутого повітря на вході в сопло  $T_0 = 300 \pm 10$  °С. Дистанція напилування 20 мм. Коефіцієнт напилування суміші визначався як відношення маси отриманого покриття до маси витраченого порошку (в експериментах вона становила 0,5 г). За різницею мас підкладки до і після напилування визначалася маса отриманого покриття. Коефіцієнти напилування окремо міді і алюмінію в напиленій суміші обчислювалися за виміряним коефіцієнтом напилування суміші та результатами елементного аналізу зразків на електронному мікроскопі.

На рис. 5 приведені результати нанесення композиційних покриттів на металеву підкладку.

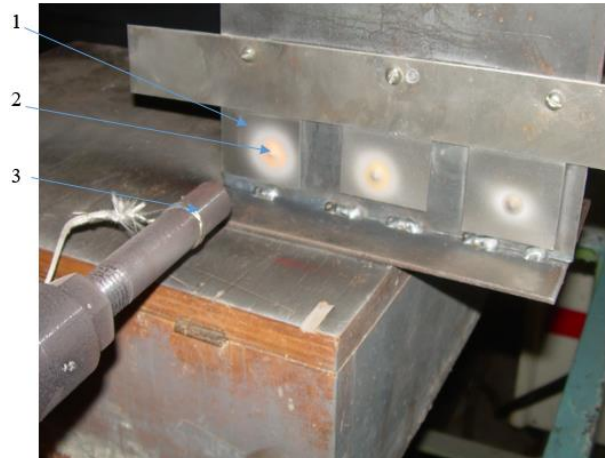
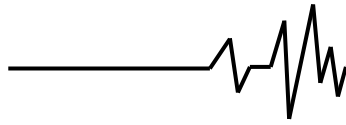


Рис. 5. Нанесення композиційних покриттів на металеву підкладку: 1 – металева підкладка, 2 – фігура наплення, 3 – сопло пристрою ХГДН

Для визначення складу отриманих композиційних покриттів зразки з покриттям

розрізали та готували для дослідження під мікроскопом у відповідності до рис. 6.

На рис. 7 приведена мікрофотографія шліфа підкладки з композиційним покриттям мідь – алюміній.

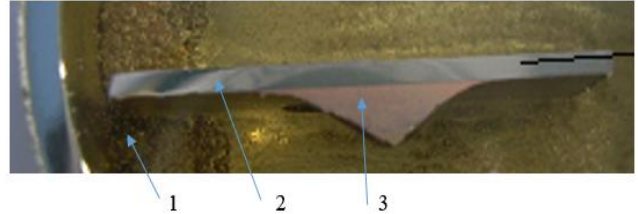


Рис. 6. Підготовлений шліф перерізу фігури наплення для дослідження складу отриманого покриття: 1 – епоксидна смола, 2 – металева підкладка, 3 – композиційне покриття

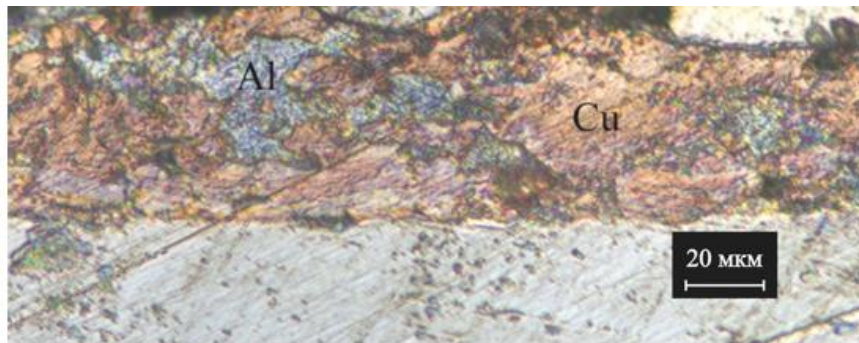


Рис. 7. Мікрофотографія шліфа підкладки з композиційним покриттям мідь – алюміній

Мікрофотографії оброблялись за допомогою програми PhotoM 1,21 та визначали площу вмісту кожного з компонентів, тобто міді та алюмінію. Фотографія обробленого мікрошліфа показана на рис. 8.

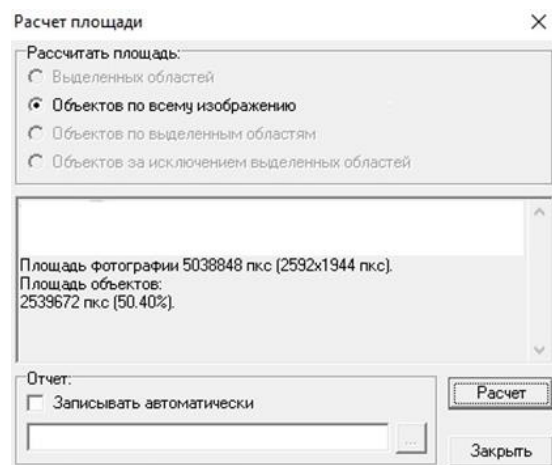
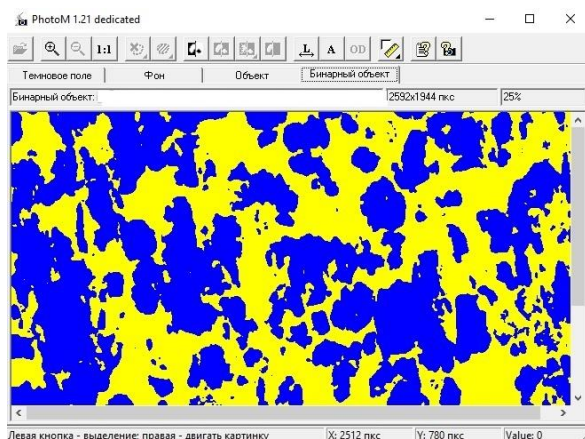


Рис. 8. Результати обробки фотографії мікрошліфа з композиційним покриттям за допомогою програми PhotoM 1,21 для визначення вмісту міді та алюмінію



На рис. 9 представлені дані по масовому вмісту алюмінію в покритті (далі позначено як  $C_{cAl}$ ) у залежності від масового його вмісту у вихідному порошку (далі позначено як  $C_{pAl}$ ). Отримано графік залежності, який може бути апроксимований поліномом (1). На графіку рис. 9 ця апроксимація показана пунктирною лінією.

$$y = 79,003x^6 - 214,09x^5 + 199,99x^4 - 71,815x^3 + 7,338x^2 + 0,5835x - 0,001 \quad (1)$$

де  $x$  це  $C_{pAl}$ , а  $y$  це  $C_{cAl}$ .

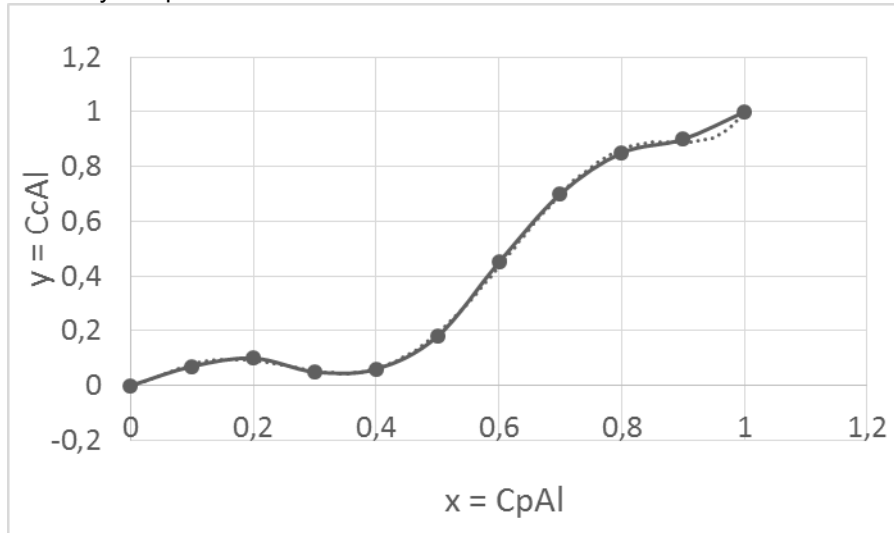


Рис. 9. Абсолютне значення вмісту алюмінію у покритті  $C_{cAl}$  в залежності від його вмісту у вихідному порошку  $C_{pAl}$

На рис. 10, представлені дані по масовому вмісту міді в покритті (далі позначено як  $C_{cCu}$ ) у залежності від масового його вмісту в вихідному порошку (далі позначено як  $C_{pCu}$ ).

Отримано графік залежності, який може бути апроксимований поліномом (2). На графіку рис. 10 апроксимація показана пунктирною лінією.

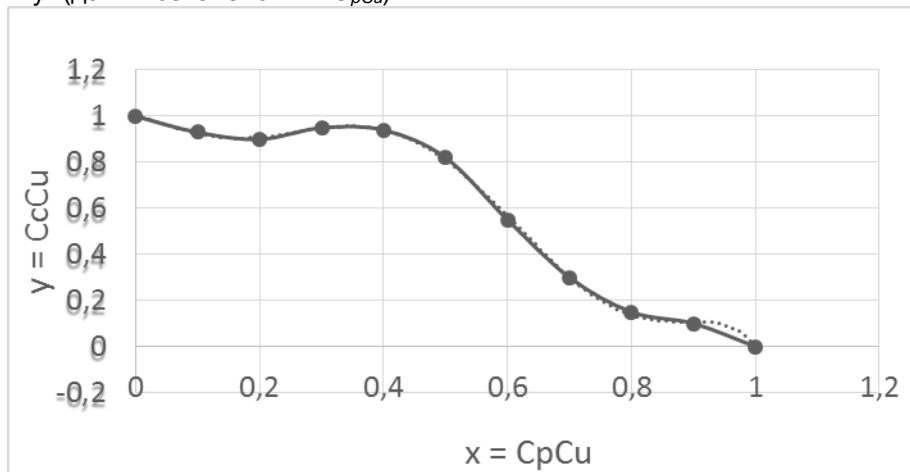


Рис. 10. Абсолютне значення вмісту міді у покритті  $C_{cCu}$  в залежності від його вмісту у вихідному порошку  $C_{pCu}$

$$y = -79,003x^6 + 214,09x^5 - 199,99x^4 + 71,815x^3 - 7,338x^2 - 0,5835x + 1,0014 \quad (2)$$

На рис. 11 показані залежності коефіцієнтів наплення суміші алюмінію і міді 1, лише алюмінію 2 і лише міді 3 від масового вмісту алюмінію у вихідній суміші. Коефіцієнти

наплення визначені за змістом алюмінію в покритті за формулами (3):

$$k_{dAl} = \frac{C_{cAl}}{C_{pAl}} k_{dmix}, \quad k_{dCu} = \frac{C_{cCu}}{C_{pCu}} k_{dmix}, \quad (3)$$



де  $k_{dmix}$  – коефіцієнти напilenня суміші порошків алюмінію і міді;

$k_{dAl}$  – коефіцієнти напilenня порошків алюмінію;

$k_{dCu}$  – коефіцієнти напilenня порошків міді.

Дані для коефіцієнта напilenня суміші добре апроксимуються параболою 4 (див. рис. 11). Штриховою кривою 5 показана апроксимація коефіцієнта напilenня міді, та 6 - коефіцієнта напilenня алюмінію. Із графіка

залежності коефіцієнтів видно, що при початковій концентрації алюмінію менше 66 % коефіцієнт напilenня міді виявляється вище коефіцієнта напilenня алюмінію. Обидва монотонно збільшуються зі зростанням концентрації алюмінію, поки вона не досягне величини 61 %. При високих концентраціях алюмінію (більше 66 %) коефіцієнти напilenня міді і алюмінію збігаються один з одним та з коефіцієнтом напilenня суміші.

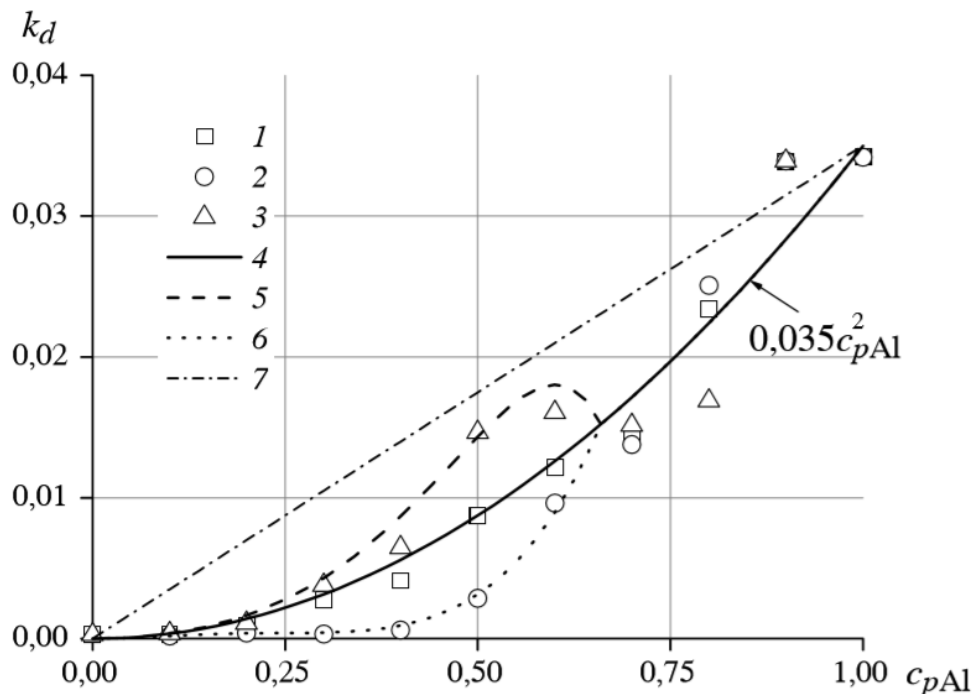


Рис. 11. Залежності коефіцієнтів напilenня суміші 1, алюмінію 2, міді 3 від концентрації алюмінію у вихідній суміші; 4 - параболічна апроксимація коефіцієнта напilenня суміші; 5 - апроксимація коефіцієнта напilenня міді; 6 - апроксимація коефіцієнта напilenня алюмінію; 7 - коефіцієнт напilenня суміші по лінійній теорії (коли компоненти не впливають один на одного).

Відповідно до лінійної теорії, якщо порошки окремих матеріалів суміші не впливають один на одного, то їх коефіцієнти напilenня залишаються однаковими незалежно від того, в якій пропорції вони змішані. Це дозволяє обчислити коефіцієнт напilenня суміші на підставі лише двох вимірювань: коефіцієнта напilenня лише першого компонента (міді при відсутності алюмінію)  $k_{dCu0}$ , і лише другого компонента (алюмінію при відсутності міді). Тоді за формулою (4) можна знайти коефіцієнт напilenня суміші при заданому вихідному вмісті алюмінію ( $C$ ).

$$k_{dmix} = Ck_{dAl0} + (1 - C)k_{dCu0} \quad (4)$$

Обчислені за цією формулою величини показані на рис. 11 штрих-пунктирною лінією 7. Очевидно, що в даному випадку припущення, що компоненти не впливають один на одного, є необґрунтованим, оскільки спостерігаються істотні відмінності між розрахунком за лінійною теорією і експериментальними результатами.

Отримані дані за залишковим вмістом компонентів в покритті дозволяють вибрати склад вихідного порошку, необхідний для отримання заданого вмісту. Наприклад, максимальний залишковий вміст міді (~ 95 %) може бути отриманий при додаванні у вихідний порошок 30-40 % алюмінію. При такій вихідній концентрації алюмінію коефіцієнт напilenня міді складе 0,5%, що помітно вище, ніж коефіцієнт напilenня



чистої міді (0,01%). Якщо, наприклад, необхідно отримати залишковий вміст міді 50 %, то слід додати у вихідний порошок 61 % Алюмінію. У цьому випадку коефіцієнт напilenня міді помітно зростає і буде сягати 15% і т.д.

З даного дослідження можна зробити висновок, що в процесі напilenня компоненти суміші впливають один на одного. Імовірно механізм взаємодії компонентів полягає у тому, що компоненти з різною ймовірністю закріплюються на поверхні, що складається з різних матеріалів (тобто ймовірність закріплення мідних частинок на поверхні з алюмінієвих частинок вище, ніж вірогідність закріплення мідних частинок на поверхні зі сталі або самих мідних частинок).

**Висновки.** Методом ХГДН отримано зразки з композитними покриттями із сумішей порошоків алюмінію і міді при різній вихідній масовій концентрації алюмінію (від 0 до 100%, з кроком 10%) при інших рівних умовах (тиск повітря 0,6 МПа, температура нагріву повітря 300 °С).

Виміряно коефіцієнт напilenня суміші і залишковий вміст компонентів в отриманих композитних покриттях. Дані за залишковим вмістом компонентів в покритті дозволяють вибрати склад вихідного порошку, необхідний для отримання заданого вмісту компонентів в покритті.

Знайдено залежності коефіцієнтів напilenня міді і алюмінію від масового вмісту алюмінію в суміші, що напilenняється. При вихідній концентрації алюмінію менше 66 %, коефіцієнт напilenня міді виявляється вище коефіцієнта напilenня алюмінію. Обидва монотонно збільшуються зі зростанням концентрації алюмінію, поки вона не досягне величини 61 %. При високих концентраціях алюмінію (більше 66%) коефіцієнти напilenня міді, алюмінію і їх суміші збігаються.

Отримані результати підтверджують наявність взаємовпливу компонентів один на одного і обґрунтовують метод введення додаткового компонента для отримання композиційного покриття, що містить компонент, який важко напilenняється.

#### Список використаних джерел

1. Пристрій для газодинамічного нанесення покриттів з радіальною подачею порошкового матеріалу: Пат. 110552 Україна, МПК6 С23С24/00 № а 201405543; заявл. 23.05.14; опубл. 12.01.16, Бюл. №1. 12 с.

2. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість / Калетнік Г. М., Чаусов М. Г., Швайко В. М. Київ: «Хайт-Тек Прес», 2013. 528 с.

3. Анализ деформируемости металлов при поверхностном упрочнении деталей / Матвийчук В. А., Егоров В. П., Михалевич В. М, Покрас В. Д. // Кузнечно-штамповочное производство. 1993. №10. 10-13. С.

4. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев [и др.]. – М.: Физматлит, 2010. – 533 с.

5. Гайдамак О. Л., Савуляк В. І. Експериментальне дослідження процесу холодного газодинамічного нанесення покриття та методика розрахунку його режимів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2018. № 4(14). 88-94. С.

6. Cold spray technology / A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov [et al.]. – Elsevier Science, 2007. – 336 p.

7. The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications. – Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2007. – 362 p.

8. Maev R., Leshchynsky V. Introduction to low pressure gas dynamic spray: Physics & Technology. – Weinheim: Wiley-VCH, 2008. – 234 p.

9. Influence of helium and nitrogen gases on the properties of cold gas dynamic sprayed pure titanium coatings / W. Wong, E. Irissou, A.N. Ryabinin [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2011. – Vol. 20. – P. 213–226.

10. Effect of particle morphology and size distribution on coldsprayed pure titanium coatings / W. Wong, P. Vo, E. Irissou, A.N. Ryabinin [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2013. – Vol. 22. – P. 1140–1153.

11. Cold spray deposition of 316L stainless steel coatings on aluminium surface with following laser post-treatment / A. Sova, S. Grigoriev, A. Okunkova [et al.] // Surf. and Coat. Technol. – 2013. – Vol. 235. – P. 283–289.

12. Influence of impact angle and gas temperature on mechanical properties of titanium cold spray deposits / K. Binder, J. Gottschalk, M. Kollenda [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2011. – Vol. 20. – P. 234–242.

13. Manufacturing and macroscopic properties of cold sprayed Cu-In coating material for sputtering target / Y.-M. Jin, J.-H. Cho, D.-Y. Park [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2011. – Vol. 20. – P. 497–507.

14. Influence of TGO composition on the thermal shock lifetime of thermal barrier coatings with cold-sprayed MCrAlY bond coat / Y. Li, Ch.-J. Li, Q. Zhang [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2010. – Vol. 19. – P. 168–177.

15. Cold spray deposition of copper electrodes on silicon and glass substrates / D.-Y.





Kim, J.-J. Park, J.-G. Lee [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2013. – Vol. 22. – P. 1092–1102.

16. Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process / F. Robitaille, M. Yandouzi, S. Hind [et al.] // Surf. and Coat. Technol. – 2009. – Vol. 203. – P. 2954–2960.

17. Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray / X.I. Zhou, A.F. Chen, J.C. Liu [et al.] // Surf. and Coat. Technol. – 2011. – Vol. 206. – P. 132–136.

18. Lupoi R., O'Neill W. Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray // Surf. and Coat. Technol. – 2010. – Vol. 205. – P. 2167–2173.

19. Lupoi R., O'Neill W. Powder stream characteristics in cold spray nozzles // Surf. and Coat. Technol. – 2011. – Vol. 206. – P. 1069–1076.

20. Cold gas spray titanium coatings onto biocompatible polymer / M. Gardon, A. Latorre, M. Torrell [et al.] // Material Letters. – 2013. – Vol. 106. – P. 97–99.

21. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives / A. Moridi, S.M. Hassani-Gangaraj, M. Guagliano [et al.] // Surf. Eng. – 2014. – Vol. 36, № 6. – P. 369–395.

22. Champagne V.K., Helfritch D.J. Mainstreaming cold spray – push for applications // Surf. Eng. – 2014. – Vol. 30, № 6. – P. 396–403.

23. Hassani-Gangaraj S.M., Moridi A., Guagliano M. Critical review of corrosion protection by cold spray coatings // Surf. Eng. – 2015. – Vol. 31, № 11. – P. 803–815.

24. Application of high-pressure cold spray for an internal bore repair of a navy valve actuator / C.A. Widener, M.J. Carter, O.C. Ozdemir [et al.] // J. Therm. Spray Technol. – 2016. – Vol. 25(1–2). – P. 193–201.

25. Клинков С.В., Косарев В.Ф., Сова А.А. Исследование эжекторной схемы формирования гетерогенных сверхзвуковых потоков в условиях холодного газодинамического напыления // Теплофизика и аэромеханика. – 2006. – Т. 13, № 3. – С. 386–397.

## References

1. *Device for gas-dynamic coating with radial flow of powder material*. Pat. 110552 Ukraine, IPC6 C23C24 / 00 № а 201405543; claimed 05/23/14; publ. 01/12/16, Bul. №1. 12 sec. [in Ukrainian]

2. Kaletnik G. M., Chauso M. G., Shvaiko V. M. (2013) *Osnovi inzhenernih rozrahunkiv na mitsnist i zshornkist* [Fundamentals of engineering methods for technical and practical studies] - Kyiv: "High-Tech Pres", [in Ukrainian]

3. Matviychuk V. A., Egorov V. P., Mikhalevich V. M., Pokras V. D (1993) *Analiz deformiruemosti metalov pri poverhnostnom uprochnenii detaley*. [Analysis of deformability of metals during surface hardening of parts. Forging and stamping].10, 10-13. [in Russia].

4. A.P. Alkhimov, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev [and others]. (2010) *Holodnoe gazodinamicheskoe napilenie. Teoriya i praktika*. [Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice] Moscow: Fizmatlit. [in Russia].

5. Gaidamak OL, Savulyak VI (2018) *Eksperementalne doslidzshenna prozesu holodnogo gazodinamichnogo nanesenja pokrittia ta metodika rozrahynku yogo rezshimiv*/ [Experimental study of the process of cold gas-dynamic coating and methods for calculating its modes]. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute. № 4 (14). 88-94. [in Ukrainian].

6. Cold spray technology / A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov [et al.]. – Elsevier Science, 2007. – 336 p.

7. The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications. – Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2007. – 362 p.

8. Maev R., Leshchynsky V. Introduction to low pressure gas dynamic spray: Physics & Technology. – Weinheim: Wiley-VCH, 2008. – 234 p.

9. Influence of helium and nitrogen gases on the properties of cold gas dynamic sprayed pure titanium coatings / W. Wong, E. Irissou, A.N. Ryabinin [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2011. – Vol. 20. – P. 213–226.

10. Effect of particle morphology and size distribution on coldsprayed pure titanium coatings / W. Wong, P. Vo, E. Irissou, A.N. Ryabinin [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2013. – Vol. 22. – P. 1140–1153.

11. Cold spray deposition of 316L stainless steel coatings on aluminium surface with following laser post-treatment / A. Sova, S. Grigoriev, A. Okunkova [et al.] // Surf. and Coat. Technol. – 2013. – Vol. 235. – P. 283–289.

12. Influence of impact angle and gas temperature on mechanical properties of titanium cold spray deposits / K. Binder, J. Gottschalk, M. Kollenda [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2011. – Vol. 20. – P. 234–242.

13. Manufacturing and macroscopic properties of cold sprayed Cu-In coating material for sputtering target / Y.-M. Jin, J.-H. Cho, D.-Y. Park [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2011. – Vol. 20. – P. 497–507.

14. Influence of TGO composition on the thermal shock lifetime of thermal barrier coatings with cold-sprayed MCrAlY bond coat / Y. Li, Ch.-J. Li, Q. Zhang [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2010. – Vol. 19. – P. 168–177.



15. Cold spray deposition of copper electrodes on silicon and glass substrates / D.-Y. Kim, J.-J. Park, J.-G. Lee [et al.] // *J. of Therm. Spray Technol.* – 2013. – Vol. 22. – P. 1092–1102.

16. Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process / F. Robitaille, M. Yandouzi, S. Hind [et al.] // *Surf. and Coat. Technol.* – 2009. – Vol. 203. – P. 2954–2960.

17. Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray / X.I. Zhou, A.F. Chen, J.C. Liu [et al.] // *Surf. and Coat. Technol.* – 2011. – Vol. 206. – P. 132–136.

18. Lupoi R., O'Neill W. Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray // *Surf. and Coat. Technol.* – 2010. – Vol. 205. – P. 2167–2173.

19. Lupoi R., O'Neill W. Powder stream characteristics in cold spray nozzles // *Surf. and Coat. Technol.* – 2011. – Vol. 206. – P. 1069–1076.

20. Cold gas spray titanium coatings onto biocompatible polymer / M. Gardon, A. Latorre, M. Torrell [et al.] // *Material Letters.* – 2013. – Vol. 106. – P. 97–99.

21. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives / A. Moridi, S.M. Hassani-Gangaraj, M. Guagliano [et al.] // *Surf. Eng.* – 2014. – Vol. 36, № 6. – P. 369–395.

22. Champagne V.K., Helfritch D.J. Mainstreaming cold spray – push for applications // *Surf. Eng.* – 2014. – Vol. 30, № 6. – P. 396–403.

23. Hassani-Gangaraj S.M., Moridi A., Guagliano M. Critical review of corrosion protection by cold spray coatings // *Surf. Eng.* – 2015. – Vol. 31, № 11. – P. 803–815.

24. Application of high-pressure cold spray for an internal bore repair of a navy valve actuator / C.A. Widener, M.J. Carter, O.C. Ozdemir [et al.] // *J. Therm. Spray Technol.* – 2016. – Vol. 25(1–2). – P. 193–201.

25. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Sova A.A. (2006). Issledovanie inzhenernoy shemi formirovaniya geterogennih sverkhzvukovih potokov v usloviyah holodnogo gzodinamicheskogo napileniya [Investigation of the ejector scheme for the formation of heterogeneous supersonic flows under conditions of cold gas-dynamic spraying] – *Thermophysics and aeromechanics*. Vol. 13, 3. 386–397. [in Russia].

### СОЗДАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ.

В статье показаны результаты исследования процессов напыления композиционных электропроводящих покрытий с использованием медного С01-11 и алюминиевого А20-11 порошков с целью выяснения влияния компонентов друг на друга при образовании

покрытия холодным газодинамическим напылением (ХГДН), а также разработка рекомендаций по введению дополнительного компонента для получения композиционного покрытия с заданным соотношением различных компонентов. Например, когда при температуре рабочего воздуха 300 °С коэффициент напыления меди почти равен нулю, это поиск экспериментальной зависимости изменения коэффициента напыления в зависимости от процентного содержания компонентов порошков меди и алюминия в смеси, которая напыляется, и определения их остаточного содержания в покрытии а также вычисления на основе полученных данных коэффициентов напыления меди и алюминия.

Методом ХГДН получено заготовки с композитными покрытиями из смесей порошков алюминия А20-11 и меди С01-11 при различной исходной концентрации алюминия по массе (от 0 до 100% с шагом 10%) при прочих равных условиях (давление воздуха 1,5 МПа, температура нагрева воздуха 300 °С).

Найдено коэффициент напыления смеси меди и алюминия и остаточное содержание компонентов в напыленных композитных покрытиях. Данные по остаточному содержанию отдельных компонентов в напыленных покрытиях позволяют определить состав исходного порошка, необходимый для напыления заданного содержания каждого из компонентов в покрытии.

Найдены зависимости коэффициентов напыления меди С01-11 и алюминия А20-11 от массового содержания алюминия в смеси которая напыляется. При исходной концентрации алюминия менее 66%, коэффициент напыления меди оказывается больше коэффициента напыления алюминия. Оба они увеличиваются с ростом концентрации алюминия, пока она не достигнет величины 61%. При высоких концентрациях алюминия (более 66%) коэффициенты напыления меди, алюминия и их смеси совпадают. Полученные результаты по остаточному содержанию компонентов в покрытии позволяют выбрать состав исходного порошка, необходимый для получения необходимого содержания компонентов в покрытии. Например, максимальный остаточное содержание меди (~ 95%) может быть получен при добавлении в исходный порошок 30-40% алюминия.

Полученные результаты доказывают наличие влияния компонентов друг на друга и обосновывают количество введение дополнительного компонента для напыления композиционного покрытия, содержащего компонент, который трудно напыляется.

**Ключевые слова:** холодное газодинамическое нанесение покрытия,



напыление, композиционное покрытие, медь, алюминий.

### CREATION OF COMPOSITE ELECTRICALLY CONDUCTIVE COATINGS BY GAS DYNAMIC SPRAYING.

The article presents the results of research of spraying processes of composite electrically conductive coatings using copper C01-11 and aluminum A20-11 powders in order to determine the effect of components on each other in the formation of cold gas-dynamic spraying (CGDS) and the development of recommendations for the introduction of additional component to obtain a composite coating with a given ratio of different components. For example, when at a working air temperature of 300 ° C the copper sputtering coefficient is almost zero, it is a search for the experimental dependence of the sputtering coefficient change depending on the percentage of components of copper and aluminum powders in the sprayed mixture and determination of their residual content in the coating. based on the obtained data of the sputtering coefficients of copper and aluminum.

The CGDS method obtained blanks with composite coatings from mixtures of powders of aluminum A20-11 and copper C01-11 at different initial concentrations of aluminum by weight (from 0 to 100% with a step of 10%) under otherwise equal conditions (air pressure 0,6 MPa, temperature air heating 300 ° C).

The sputtering coefficient of a mixture of copper and aluminum and the residual content of components in the sprayed composite coatings were found. Data on the residual content of the individual components in the sprayed coating allows to determine the composition of the source powder required for spraying a given content of each of the components in the coating.

The dependences of the spraying coefficients of copper C01-11 and aluminum A20-11 on the mass content of aluminum in the sprayed mixture were found. When the initial concentration of aluminum is less than 66%, the coefficient of copper deposition is greater than the coefficient of deposition of aluminum. Both increase with increasing concentration of aluminum until it reaches 61%. At high concentrations of aluminum (more than 66%) the spray coefficients of copper, aluminum and their mixtures coincide. The results obtained on the residual content of the components in the coating allow you to select the composition of the source powder required to obtain the desired content of components in the coating. For example, the maximum residual copper content (~ 95%) can be obtained by adding 30-40% aluminum to the starting powder.

The obtained results prove the influence of the components on each other and justify the amount of introduction of an additional component for spraying a composite coating containing a component that is difficult to spray.

**Keywords:** cold gas-dynamic spraying, coating, composite coating, copper, aluminum.

### Відомості про авторів

**Гайдамак Олег Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електротехніки, електроенергетики та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [haidamak@vsau.vin.ua](mailto:haidamak@vsau.vin.ua)).

**Матвійчук Віктор Андрійович** – доктор технічних наук, професор, декан інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail:).

**Гайдамак Олег Леонидович** - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроэнергетики, электротехники и электромеханики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: [haidamak@vsau.vin.ua](mailto:haidamak@vsau.vin.ua))

**Матвийчук Виктор Андреевич** - доктор технических наук, профессор, декан инженерно-технологического факультета Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: [vamatv50@gmail.com](mailto:vamatv50@gmail.com)).

**Gaidamak Oleg Leonidovich** - Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University .

**Matviychuk Viktor Andreevich** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Technology of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, Ukraine, 21008, e-mail: [vamatv50@gmail.com](mailto:vamatv50@gmail.com)).