

УДК 621.311.1.018.3

**О. Л. Гайдамак, к. т. н., доц.; В. І. Савуляк, д. т. н., проф.****ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ  
ГАЗОДИНАМІЧНИМ НАПИЛЕННЯМ, ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ  
ЗАСТОСУВАННЯ У КОМП'ЮТЕРНІЙ ТЕХНІЦІ**

*У статті досліджено властивості покриттів на основі алюмінію, отриманих газодинамічним напиленням. Показано, що отримані покриття можуть бути застосовані для створення пористих тепловідвідних елементів для охолодження мікропроцесорної техніки, що може значно зменшити їх габарити та спростити їх системи охолодження.*

**Ключові слова:** мікропроцесорна та інша комп'ютерна техніка, системи охолодження, газодинамічне напилення.

**Вступ**

Створення функціональних покриттів на поверхнях деталей дозволяє суттєво впливати на експлуатаційні характеристики та надавати цим поверхням нових, не притаманних матеріалу деталі, якостей. Наприклад, створення покриттів на основі алюмінію на сталевих деталях може захистити ці деталі від корозії та значно змінити фрикційні, електропровідні та теплопровідні властивості покритих поверхонь.

На кафедрі технології підвищення зносостійкості Вінницького національного технічного університету розроблено й виготовлено дослідну установку для газодинамічного нанесення функціональних покриттів. Порошкові частинки, розігнані до високих швидкостей, близьких до швидкості звуку або вищих за неї, при зіткненні з підкладкою адгезійно взаємодіють з нею на атомному рівні і здатні утворювати міцне з'єднання з останньою та між частинками порошку [1, 2]. При цьому температура напиленої частинки є нижчою за температуру її плавлення.

**Установка газодинамічного напилення**

На рис. 1 показано фото установки газодинамічного нанесення функціональних покриттів. Основними елементами установки є нагрівач повітря 1 і напилювач порошку 2.

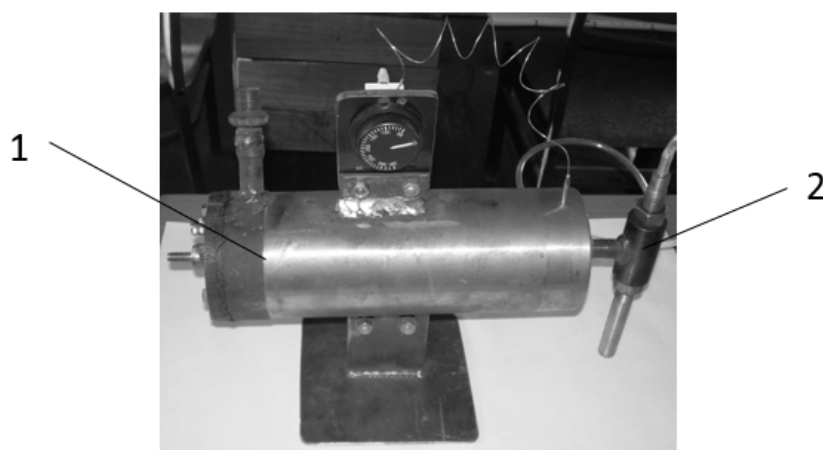


Рис. 1. Установка для газодинамічного нанесення функціональних покриттів: 1 – нагрівач повітря, 2 – напилювач порошку

Нагрівач повітря 1 виготовлений з навитого спіраллю ніхромового дроту, через який продувають стиснуте повітря, яке далі потрапляє в напилювач 2, де потік прискорюється до

швидкості звуку. У цей повітряний потік за рахунок ежекції подається напилювальний матеріал – порошок алюмінію. Розганяючись у нагрітому повітряному потоці, порошок досягає поверхні підкладки й утворює суцільне покриття.

Напилювач (рис. 2) [3] складається з корпусу 1, у якому розміщено голку 2 для регулювання параметрів повітряного потоку. До корпусу 1 приєднано штуцер із каналом 3 для подачі порошку, який всмоктується в сопло 4 за рахунок ефекту ежекції. Стиснуте повітря подають у напилювач через канал 5.

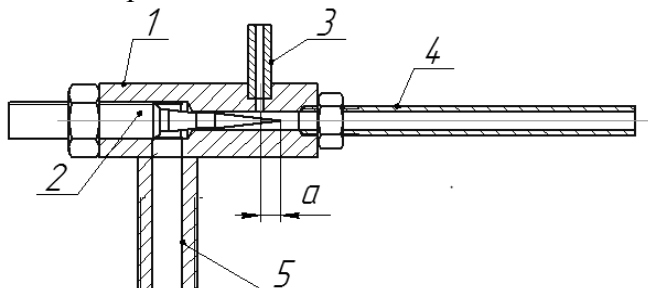


Рис. 2. Напилювач: 1 – корпус, 2 – голка, 3 – канал подачі порошку, 4 – сопло, 5 – канал подачі стиснутого повітря

### Мета та методика дослідження

Метою дослідження є: визначення коефіцієнта використання алюмінієвого порошку залежно від режимів напилювання; визначення міцності зчеплення плями покриття з підкладкою; визначення пористості отриманих покриттів та оцінювання перспектив їх застосування в різних галузях і, зокрема, у мікропроцесорній техніці.

Для проведення досліджень використовували алюмінієвий порошок із розміром частинок 60 – 100 мкм. Порція порошку складала 0,47 г. Дистанція напилення – 15 мм. Для підкладки використовували пластини зі сталі Ст. 3 товщиною 1 мм. Поверхню пластин під напилення попередньо не обробляли.

Положення голки 2 визначають розміром  $a$ , який приймав три різних значення. Фіксували температуру початку і кінця напилювання. Тиск повітря становив 0,57 МПа. Зважували підкладку до та після напилювання. Усі дані заносили до таблиці 1, де  $a$  – відстань, яка визначає положення голки 2 відносно каналу введення порошку 3,  $T_1$  та  $T_2$  – температура початку та кінця напилювання,  $M_1$  та  $M_2$  – маса підкладки до та після напилювання,  $M_n$  – маса фігури напилення,  $K$  – коефіцієнт використання порошку, який визначають як відношення маси фігури напилення до початкової маси порції порошку та помноженої на 100%. Результати напилення показані на рис. 3.

Використовуючи функцію «масоцентрувальні характеристики» програми Компас, визначили масу фігури напилення як суцільного матеріалу для алюмінію А0 ГОСТ 11069-2001, який має густину  $\rho_1 = 0,002700$  г/мм<sup>3</sup>.

Густину покриття  $\rho_2$  визначали як відношення маси зваженої фігури напилення до її розрахованого об'єму.

Пористість  $J$  фігури напилення визначали за формулою (1)

$$J = \frac{A_1 - \rho_2}{\rho_1} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Тобто визначали, який процент повітря міститься в об'ємі фігури напилення.

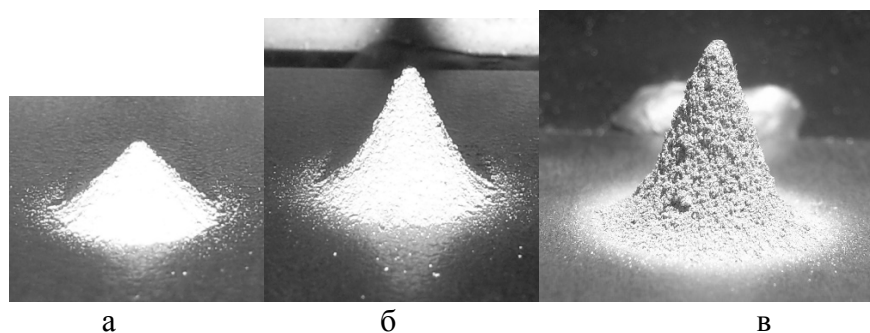


Рис. 3. Фігури напилення. а – зразок № 1, б – зразок № 2, в – зразок № 3

Таблиця 1

**Уплив режимів напилення на коефіцієнт використання порошку алюмінію**

№ зразка	$a$ , мм	$T_1$ , °C	$T_2$ , °C	$M_1$ , г	$M_2$ , г	$M_n$ , Г	$K$ , %
1	2,25	320	330	10,41	10,45	0,04	8
2	1,85	320	360	10,55	10,67	0,12	25,5
3	1,5	320	460	10,79	10,99	0,2	42,5

Для визначення густини  $\rho_2$  отриманого покриття розробили 3D-моделі за розмірами фігур напилення.

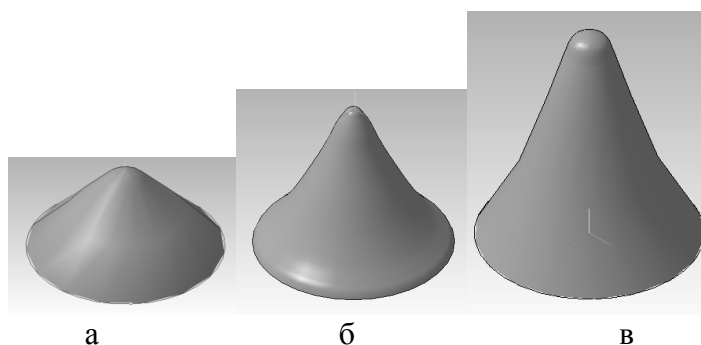


Рис. 4. 3D-моделі фігур напилення: а – зразок №1, б – зразок №2, в – зразок №3

Таблиця 2

**Визначення пористості фігури напилення**

№ Зразка	Маса фігури напилення, розрахункова для алюмінію $A_0$ , г	Об'єм розрахунковий, мм <sup>3</sup>	Маса фігури напилення зважена, г	Густина фігури напилення $\rho_2$ , г/мм <sup>3</sup>	Пористість фігури напилення $J$ , %
1	0,097759	36,206894	0,04	0,0011	41
2	0,227543	84,275364	0,12	0,0014	52
3	0,439850	162,907247	0,2	0,00158	58

Для визначення міцності зчеплення плями покриття з підкладкою розробили пристосування для випробовування на зсув (рис. 5).

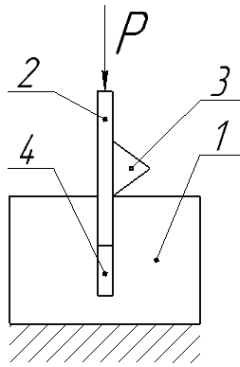


Рис. 5. Схема навантаження фігури напилення: 1 – упор, 2 – підкладка, 3 – фігура напилення, 4 – щілина

Підкладку 2 з фігурою напилення 3 встановлювали у щілину 4 упора 1 і гідравлічним пресом натискали на підкладку із зусиллям  $P$ .

Знаючи зусилля  $P$  зсуву плями напилення і площу  $S$  контакту фігури напилення з підкладкою, знаходили межу міцності зсуву плями напилення  $\sigma_3$  за формулою (2).

$$\sigma_3 = P/S. \quad (2)$$

Ураховуючи те, що поверхня зсуву має досить неправильну форму, для визначення площі  $S$  зсуву застосували програму Компас. Для цього сфотографували фігури напилення зверху, як показано на рис. 6. Вставили це фото в документ програми Компас – 2D в масштабі 1:1. Обвели контур плями напилення замкнутою кривою Без'є, як показано на рис. 6, і за допомогою функції вимірювання площі програми Компас визначили площі контакту фігур напилення 1, 2 та 3 з підкладкою.

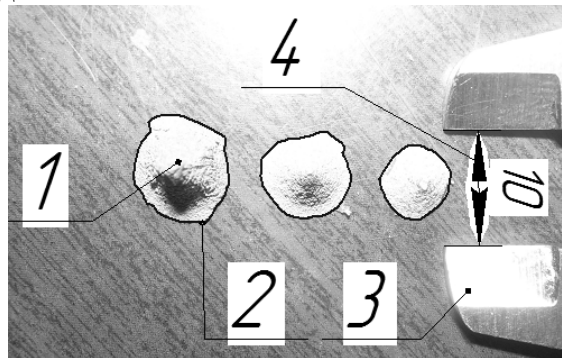


Рис. 6. Визначення площі контакту фігур напилення з підкладкою:

1 – фото фігур напилення зверху (зліва направо показані фігури № 3, 2, 1), 2 – крива Без'є, 3 – губки штангенциркуля, 4 – розмір між губками штангенциркуля для визначення коефіцієнту масштабування фото

Результати вимірювань площ, сили зсуву фігури напилення й межі міцності на зсув наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

**Результати вимірювань площ і межі міцності на зсув фігури напилення з підкладкою**

№ зразка	Площа контакту фігури напилення з підкладкою, мм <sup>2</sup>	Сила $P$ в момент зсуву фігури напилення, Н	Межа міцності на зсув, МПа
1	29,47	173,6	5,79
2	44,69	188,2	4,12
3	58,55	151,5	2,55

Провели металографічне дослідження покриття з порошку алюмінію. На рис. 8, 9 показані відповідні мікрошліфи.

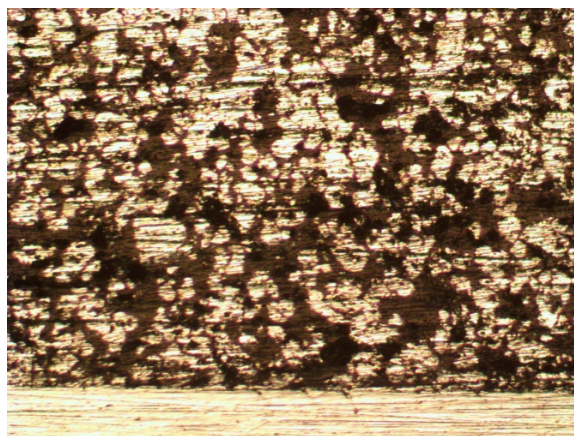


Рис. 8. Мікрошліф покриття, напиленого алюмінієвим порошком, за 80-кратного збільшення

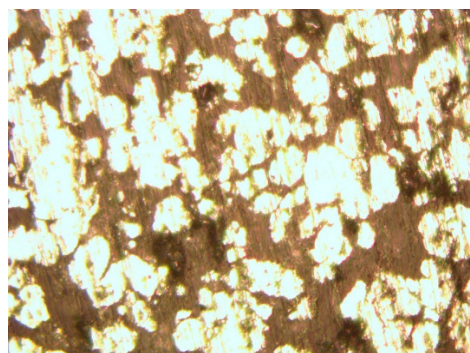


Рис. 9. Мікрошліф покриття, напиленого алюмінієвим порошком, за 200-кратного збільшення

Світлий колір на мікрошліфах – це зерна алюмінію, темний колір – це повітряні порожнини. Як видно на мікрошліфах, повітряні порожнини сполучаються між собою і є відкритими. Це дозволяє повітрю вільно рухатись порожнинами, об'єднаними в канали, і забезпечувати ефективний теплообмін із зернами алюмінію.

Відомо, що ефективність та швидкість охолодження будь-якого нагрітого об'єкта покращується зі збільшенням площі поверхонь цих об'єктів. Наприклад, системи охолодження процесорів мають спеціальні ребристі радіатори (рис. 10) для того, щоб збільшити площу поверхні системи охолодження й запобігти перегріву процесора.

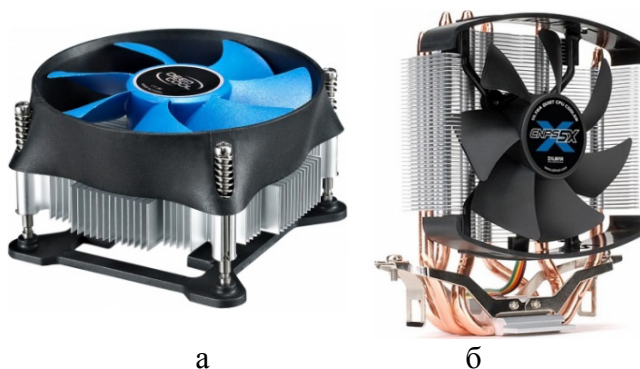


Рис. 10. Системи охолодження для процесорів, пристосовані для невеликих за розмірами корпусів:  
а – DeepCoolTheta 15 PWM, б – Zalman CNPS5X Performa

процесорів значно збільшує площу охолодження за рахунок відкритих порожнин (пор) усередині покриття. Для того, щоб оцінити збільшення ефективної площі охолодження порахували довжину границь зерен, які контактують із порами і відповідно здійснюють теплообмін з повітрям у цих порах. Методика підрахунку довжин границь зерен полягала в обведенні границь зерен мікрошліфа кривою Без'є в програмі Компас та вимірювання довжин цих кривих. Схема підрахунку довжин границь зерен мікрошліфа покриття з алюмінієвого порошку показана на рис. 11.

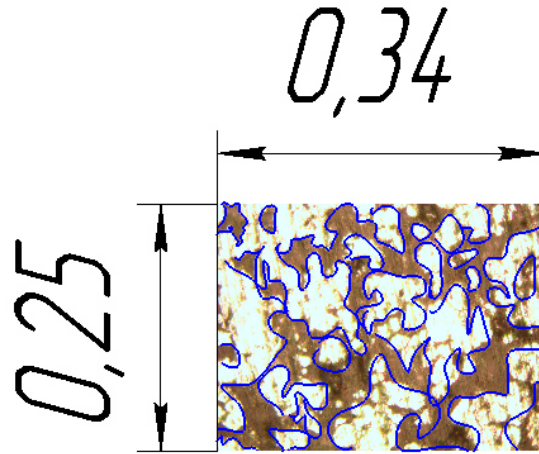


Рис. 11. Схема підрахунку довжини границь зерен мікрошліфа покриття з алюмінієвого порошку.  
Розмір знімка мікрошліфа 0,34 x 0,25 мм

Сума довжин ліній границь зерен (синього кольору) дорівнює 4,8 мм (рис. 11).

Якщо прийняти площу поверхонь усередині пористого покриття прямо пропорційною довжині границь зерен мікрошліфа, то можна вважати, що на прямолінійній ділянці деталі, покритій пористим покриттям довжиною 0,34 мм при товщині покриття 0,25 мм, додатково утворилась активна поверхня площею пропорційною довжині границь зерен, сума яких становить 4,8 мм. Тобто, активна площа, здатна покращити теплообмін, збільшилась у  $4,8/0,34 = 14$  раз. Крім того, пористе покриття створюється з алюмінію і може наноситись на сталеві поверхні, а також на поверхні з кольорових металів, що може сприяти значному зменшенню витрат на виготовлення систем охолодження мікропроцесорної та іншої техніки.

### Висновки

У результаті проведеного дослідження встановили, що зі збільшенням температури наплення з 320 до 460 °С коефіцієнт використання порошку збільшився з 8 до 42,5 %, водночас межа міцності на зсув плями покриття з підкладкою зменшилась з 5,79 до 2,55 МПа, при цьому пористість отриманого покриття збільшилась з 41 до 58%. Тобто половина об'єму покриття займають об'єднані в канали повітряні порожнини, якими може вільно рухатись повітря й відповідно відбирати тепло в нагрітого об'єкта.

Отримані покриття можуть бути застосовані для інтенсифікації процесу охолодження об'єктів, які в процесі експлуатації піддаються значному нагріванню, наприклад, процесори комп'ютерної техніки та інші елементи.

З'являється перспектива зниження ваги систем охолодження за рахунок зменшення або ліквідації ребрення радіаторів.

Значне зростання площі охолодження за рахунок додаткових поверхонь пористого покриття призведе до зменшення та спрощення конструкції систем охолодження процесорів на іншій комп'ютерної техніки.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 2237746 Российская Федерация, МПК С 23 С 24/04. Способ газодинамического нанесения покрытий и устройство для его осуществления / Каширин А. И., Ключев О. Ф., Шкодкин А. В. ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Обнинский центр порошкового напыления». – № 2003100745/02 ; заявл. 14.01.03 ; опубл. 10.10.04, Бюл. №28.

2. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / [Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М.]. ; под ред. В. М. Фомина. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 536 с. ISBN 978-5-9221-1210-9.

3. Пат. 110552 Україна, МПК С 23 С 24/00. Пристрій для газодинамічного нанесення покриттів з радіальною подачею порошкового матеріалу / Гайдамак О. Л. ; заявник та патентовласник Гайдамак О. Л. – № а 201405543 ; заявл. 23.05.14 ; опубл. 12.01.16, Бюл. №1.

***Гайдамак Олег Леонідович*** – к. т. н., доцент кафедри технології підвищення зносостійкості.

***Савуляк Валерій Іванович*** – д. т. н., професор кафедри технології підвищення зносостійкості.  
Вінницький національний технічний університет.