

УДК 621.793

**А.М. Степанчук, проф.**  
Національний технічний університет України "КПІ"  
**М.П. Данильчук, с.н.с.**  
Житомирський державний технологічний університет  
**О.В. Полегешко, інж.**  
**М.С. Вдовіченко, с.н.с.**  
Національний технічний університет України "КПІ"

## ОПТИМІЗАЦІЯ УМОВ ОТРИМАННЯ ГНУЧКИХ ПОРОШКОВИХ ШНУРІВ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ

*У роботі розглянутий процес мундштукового пресування гнучкого порошкового шнура з пластифікованих сумішей, а також проведені дослідження режимів пресування для визначення оптимальних параметрів цього процесу. Розроблено математичну модель процесу мундштукового пресування гнучких порошкових шнурів, що дає можливість кількісно оцінити щільність гнучкого порошкового шнура залежно від декількох важливих факторів.*

Сьогодні однією з важливих проблем є підвищення якості деталей механізмів, їх надійності й потужності за одночасного збільшення жорстості режимів роботи. Вирішення цих проблем повинно здійснюватися поряд з економією матеріальних та енергетичних ресурсів. Одним із високоефективних шляхів вирішення цих проблем є використання захисних покриттів.

Серед існуючих способів нанесення захисних покриттів особливу увагу спеціалістів привертають газотермічні методи нанесення покриттів, суть яких полягає у формуванні покриття із частинок порошкового матеріалу, які розплавляються або оплавлюються у високотемпературному газовому струмені [1–4]. В зв'язку з цим перед інженерами, що працюють в галузі технології напилення покриттів, постають нові завдання із введення композиційного матеріалу в зону напилення. Так, до останнього часу в практиці газотермічного напилення покриттів, застосовується широка гама матеріалів. Матеріали багато в чому визначають властивості покриттів, а те, в якому вигляді вони використовуються, визначає конструктивні особливості устаткування для газотермічного напилення. В даний час для подачі матеріалу в зону напилення широко застосовуються в основному чотири види матеріалів: порошок, дріт, стержні, гнучкі шнури [3].

Відомо, що не всі матеріали можна отримати у вигляді дроту або стержнів. Окрім цього порошковий дріт володіє й істотним недоліком – нерівномірністю хімічного складу і фізико-механічних властивостей по товщині покриття через різницю температур плавлення металеві оболонки й порошкової суміші. Стержні, в свою чергу, самі по собі дуже недосконалі. Вони дуже крихкі, що ускладнює процес їхнього транспортування; вони мають відхилення в геометричних розмірах; різниця в діаметрах і різні стріли прогину призводять до нерівномірності подачі їх у зону напилення. На початку і при закінченні розпилення стрижня дискретної довжини йде викидання великих частинок, що призводить до місцевого погіршення якості покриття. Застосування стрижнів не дозволяє автоматизувати процес напилення і застосовувати їх у масовому потоковому виробництві. Технологія виготовлення стрижнів досить складна, що призводить до їх високої вартості. Нарешті, коло матеріалів, з яких можуть бути виготовлені стрижні, обмежений.

Саме тому в останні роки зріс інтерес до використання гнучких порошкових шнурів (далі ППШ) у практиці газотермічного напилення [5]. Недоліки, властиві подачі матеріалів у вигляді порошку, дроту та стрижнів, майже цілком усуваються при використанні гнучких порошкових шнурів. Застосування дозволяє використовувати для напилення суміші речовин різної природи, наприклад метал і кераміку, сплави металів і окисли та ін; цілком автоматизувати процес напилення; спростити систему транспортування матеріалу в зону напилення; підвищити коефіцієнт використання матеріалу; легко зупиняти і відновлювати процес напилення; усунути дефекти в покритті, що виникають при розпиленні стрижнів під час зміни одного стрижня іншим; розширити коло застосовуваних матеріалів і способів їхнього одержання.

Поряд з цим до гнучкого порошкового шнура висувають ряд вимог, а саме: при мінімальному вмісті пластифікатора щільність ГПШ повинна бути максимальною, зміна діаметра по довжині повинна бути мінімальною, достатня механічна щільність та еластичність. При цьому однією з найбільш важливих характеристик ГПШ є щільність, яка, в свою чергу, залежить від кількості пластифікатора, його концентрації, діаметра частинок порошку, його питомої поверхні, ступеня обтиснення та інших технологічних параметрів процесу мундштучного пресування, яке найбільш доцільно використовувати для виготовлення ГПШ. Оптимізація цього процесу передбачає підбір таких параметрів, при яких щільність ГПШ буде максимальною. Для досягнення цієї мети необхідно побудувати математичну модель цього процесу, а потім – оптимізувати її.

У роботі було досліджено умови отримання ГПШ при різних значеннях параметрів, що суттєво впливають на щільність ГПШ. Вивчено залежність пружної післядії спресованого ГПШ і відносної його щільності від вмісту і концентрації пластифікатора, форми і розміру частинок порошку, ступеня обтиснення і зміни швидкості витікання. Для виготовлення ГПШ як модельні порошки використовувались порошки заліза, що мають різні фізичні властивості (розмір та форму частинок, питому поверхню). Як пластифікатор використовували розчин сополіаміду в етиловому спирті різної концентрації [11].

Одержані результати свідчать про підвищення діаметра ГПШ у порівнянні з діаметром каналу мундштука. При цьому величина діаметра ГПШ визначається складом суміші, ступенем обтиснення і швидкістю витікання. З підвищенням останньої спочатку спостерігається зростання діаметра ГПШ, причому він більш значний для мундштуків з меншим діаметром каналу. Потім спостерігається його зменшення, що починається приблизно при швидкостях витікання 8,0–10,0 мм/с. Причиною підвищення діаметра ГПШ із підвищенням швидкості витікання суміші є пружні напруження, що виникають у суміші при її деформації, та ступінь їх релаксації, яка зменшується в області каналу мундштука. У зв'язку з тим, що пружні напруження зростають зі збільшенням ступеня обтиснення, а здатність сумішей до їхньої релаксації зменшується з підвищенням концентрації пластифікатора і зменшенням його вмісту в суміші, відносно збільшення діаметра ГПШ має максимальне значення у випадку використання порошку з розміром частинок менших за 50 мкм (близько 9 %).

Збільшення діаметра ГПШ також відбувається при збільшенні вмісту і концентрації пластифікатора. Це можна пояснити так. Ущільнення пластифікованих сумішей відбувається, в основному, за рахунок їхнього перегрупування в процесі витікання через мундштук. При цьому майже не спостерігається пружна деформація частинок твердої фази, зазвичай деформується матеріал пластифікатора. У даному випадку як пластифікатор застосовується розчин поліаміду в етиловому спирті, що володіє високими пружними властивостями. У зв'язку з цим збільшення вмісту і концентрації пластифікатора повинне призводити до збільшення діаметра ГПШ. Щільність же ГПШ для вищевказаного випадку у всіх досліджуваних матеріалах зменшується. Це обумовлено зменшенням відносної частки частинок порошку в масі пластифікованої суміші.

Дослідження впливу розміру частинок порошку на пружну післядію ГПШ показали, що при їхньому збільшенні пружна післядія зменшується. Такий характер залежності на перший погляд суперечить відомостям про величину товщини прошарку пластифікатора зі зменшенням питомої поверхні, обумовленої збільшенням розміру частинок. Однак збільшення розміру частинок призводить до утворення великих пор. Але відомо, що радіус пори пропорційний радіусу частки, тому пластифікатор розташовується всередині пори за рахунок видавлювання його між частками і тим самим основна маса пластифікатора не зазнає пружного стиснення, що призводить до зниження пружної післядії. Мало того, можливе утворення безпосереднього контакту між частками твердої фази, що також сприяє зменшенню пружної післядії за рахунок збільшення фактора міцності. Останнє також підтверджується залежністю пружної післядії від питомої поверхні вихідних порошків.

При дослідженні впливу ступеня обтиснення на пружну післядію і щільність ГПШ було встановлено, що при збільшенні ступеня обтиснення ці характеристики зростають. Це необхідно пов'язувати зі збільшенням тиску витікання і, так само, ступенем структурної деформації частинок, що є відповідальною за пружну післядію. Однак при подальшому підвищенні ступеня обтиснення значну роль відіграє взаємодія на межі «суміш–порожнина мундштука», що зростає зі збільшенням тиску витікання. Очевидно, що це призводить до уповільнення пружної післядії ГПШ при визначених швидкостях і навіть до наступного

зменшення діаметра ГШ, хоча у всіх випадках він залишається більше діаметра каналу мундштука.

З наведених вище рисунків видно, що найбільшої зміни зазнає щільність, так, наприклад, при зміні вмісту пластифікатора в ГПШ від 20 до 40 мас. %, щільність змінюється майже на  $0,8 \text{ г/см}^3$ . В той час, як зміна пружної післядії в цьому інтервалі складає тільки 2 %. У зв'язку з цим як параметр відгуку доцільно вибрано щільність ГПШ.

При виборі факторів також будемо керуватися даними експерименту. Як фактори моделі виберемо ті, що вносять найбільш дієвий вплив на параметр відгуку. До таких факторів можна віднести: вміст пластифікатора, діаметр частинок, питому поверхню, коефіцієнт обтиснення. Аналізуючи одержані в роботі результати, було встановлено, що найбільше впливають на щільність шнура вміст пластифікатора ( $V$ ) та розмір частинок порошку ( $d$ ). Враховуємо це у рівняння регресії і вводимо ці фактори. Оскільки отримані залежності не носять екстремального характеру (в даному інтервалі дослідження), то найбільш прийнятним рівнянням регресії є поліном 3-го степеня. Рівняння регресії буде таким:

$$f(x, y) = a_0 + a_1x^3 + a_2y^3 + a_3x \cdot y^2 + a_4x^2 \cdot y + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7x \cdot y + a_8x + a_9y.$$

Для його розв'язання потрібно провести експеримент типу  $3^5$ . Оскільки ми маємо повний факторний експеримент типу  $2^5$ , то, використовуючи ортогональне композиційне планування, для доповнення плану до  $3^5$  проводимо досліди в центрі плану та на деякій відстані від нього. Це дасть нам можливість отримати необхідну кількість дослідів та розширити область дослідження [6].

Враховуючи вищенаведені дані, було проведено експеримент, результати якого наведені в табл. 1-2.

Таблиця 1

## Результати експерименту

Середній розмір частинок	Вміст зв'язки, об.%	Відносна щільність, %	Кут загину, град.	Межа міцності, МПа
менше 50	30	64,44	60	32
50-100	30	51,98	69	31,5
100-160	30	47,31	72	27
більше 160	30	45,91	71	25
50-100	14,5	48,1	9	8,2
50-100	15	53,4	11	12,6
50-100	22,5	54,36	21	22
50-100	35	50,2	74	31,5
50-100	40	40,6	86	16

Таблиця 2

## Результати експерименту при середньому розмірі частинок 120 мкм

Вміст зв'язки, об.%	Відносна щільність, %	Кут загину, град.	Межа міцності, МПа
12	41,4	14	12,4
14	44,8	14	19,2
15,6	50,4	31	22,1
17,5	52,1	48	28,4
19,4	51,8	72	27,9
20,5	51,9	82	28,1
24,6	50,6	91	27,8
28	49,4	102	21,8
30	49	124	20,1

За результатами проведеного експерименту, аналізу літературних джерел та раніше проведених дослідів було проведено їх математичну обробку.

Для знаходження рівняння регресії використовуємо метод найменших квадратів. Мінімум функції, якщо він існує, досягається при одночасній рівності нулю часткових похідних за всіма невідомими:

$$\frac{\partial g}{\partial x_0} = 0, \frac{\partial g}{\partial x_1} = 0, \dots, \frac{\partial g}{\partial x_5} = 0.$$

Точність завдання факторів повинна бути вища точності вимірів функції відгуку. А фактори, що задаються, не повинні бути зв'язані між собою, тобто коефіцієнт кореляції  $R_{(xy)} \leq 0,81$ :

$$R_{(xy)} = \frac{\text{cov}(xy)}{\sqrt{D(x) \cdot D(y)}},$$

де  $\text{cov}(xy)$  – коваріація між  $x$  і  $y$  і визначається за формулою:

$$\text{cov}(xy) = M \{ [x - M(x)] \cdot [y - M(y)] \};$$

$D(x), D(y)$  – дисперсії, що характеризують розкид випадкової величини щодо її математичного очікування;

$M(x)$  – математичне очікування є середнє зважене, що для дискретної величини визначали за формулою:

$$M(x) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot f(x).$$

Інтервал між двома сусідніми точками значень факторів повинен бути більшим за похибку, з якою він вимірюється [7–8].

Значення параметра оптимізації в точках факторного простору повинне визначатися незалежно один від одного.

Всі подані розрахунки у відповідності до вибраної моделі проводилися з використанням математичного пакету MathCAD 7.0. Для обчислення деяких статистичних критеріїв використовували пакет статистичного аналізу в Microsoft Excel [9–10].

В результаті проведених обчислень отримали таке рівняння регресії:

$$\gamma = -4,833 + 4,139 \cdot V + 0,504 \cdot d - 0,048 \cdot V \cdot d - 0,04 \cdot V^2 + 0,001 \cdot d + 6,345 \cdot 10^{-4} \cdot V^2 \cdot d + 4,857 \cdot 10^{-5} \cdot V \cdot d^2 - 5,703 \cdot 10^{-4} \cdot V^3 - 7,284 \cdot 10^{-6} \cdot d^3.$$

Для перевірки гіпотези про адекватність моделі розраховували критерій Фішера, який для даної моделі становить  $F_p = 16,5143$ .

Теоретичне значення критерію Фішера, взятого при тих самих ступенях вільності, та вибраному рівні значущості 95 % дорівнює:  $F_m = 19,4$ . Оскільки розраховане значення не перевищує табличного, то можна стверджувати, що при рівні значущості 95 % модель адекватна.

Також розраховали коефіцієнт регресії  $R$ , який показує ступінь залежностей змінних в рівнянні регресії:  $R = 0,925$ .

Отже можна говорити, що на 92,5 % незалежні змінні визначають значення залежної змінної.

Для перевірки коефіцієнтів рівняння регресії на статистичну значущість розраховували критерій Стьюдента. Результати обчислень зводимо до табл. 3.

Таблиця 3

Теоретичні та розрахункові значення критерію Стьюдента

Коефіцієнт	$t_p$	$t_T$
$a_0$	-0,211457724	2,48
$a_1$	1,673366863	2,48
$a_2$	2,104539924	2,48
$a_3$	-4,91136939	2,48
$a_4$	-0,452413068	2,48
$a_5$	0,397728823	2,48
$a_6$	4,07358068	2,48
$a_7$	1,798207297	2,48
$a_8$	-0,551029106	2,48
$a_9$	-0,647712287	2,48

Оскільки теоретичне значення t-критерію Стьюдента більше за розрахункове, то можна говорити про статистичну значимість коефіцієнтів у рівнянні регресії.

В результаті проведеного експерименту та після його математичної обробки ми можемо сказати, що прийнята математична модель адекватна і може бути використана для розрахунку оптимальних параметрів процесу мундштучного пресування.

Для співставлення математичної моделі та експериментальних даних були побудовані залежності щільності від вмісту пластифікатора та при різних значеннях розміру частинок на базі експериментальних даних та отриманого рівняння регресії (рис. 1-2).

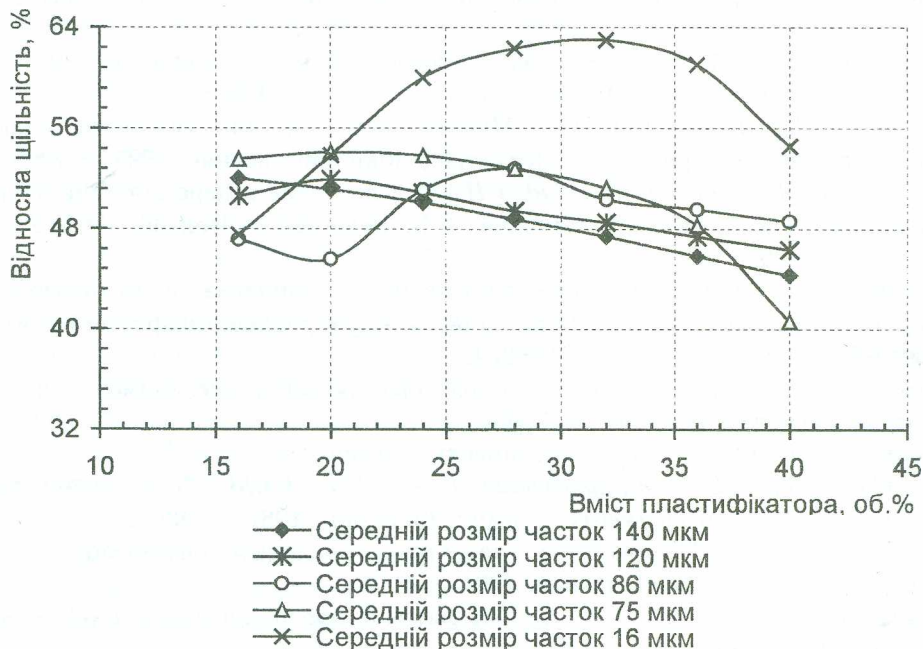


Рис. 1. Експериментальні залежності щільності від вмісту пластифікатора

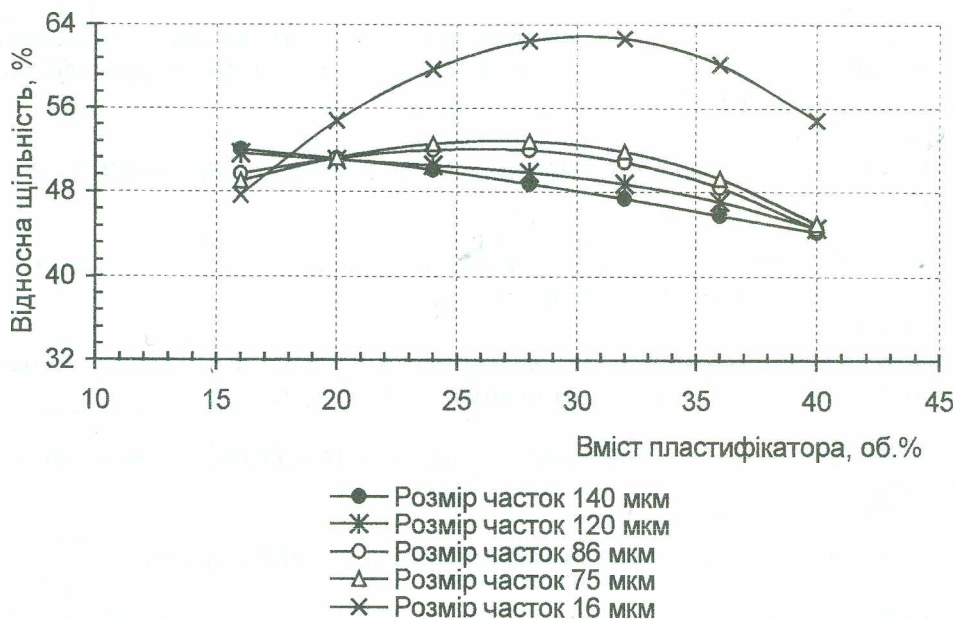


Рис. 2. Залежності щільності від вмісту пластифікатора, побудовані за даними рівняння регресії

Як видно з наведених вище залежностей, експериментальні значення знаходяться в межах довірчого інтервалу, а в деяких точках повністю співпадають з теоретичними. Тому,

використовуючи отриману математичну модель, можна без проведення експерименту кількісно оцінити щільність ГППШ при заданих значеннях факторів з достатньою точністю, що, на думку авторів, повинно позитивно позначитися при оптимізації технологічних процесів напилення покриттів.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.
2. Клеман Р. Гибкий шнур – новый способ подачи материалов при газопламенном напылении покрытий. – Москва: Атомиздат, 1973. – 120 с.
3. Кулик А.Я., Борисов Ю.С., Мнукин А.С., и др. Газотермическое напыление композиционных порошков. – Ленинград: Машиностроение, 1985. – 199 с.
4. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия (пер. с англ. Э.М. Лазарева, С.В. Симонов, А.Б. Цепелева / Под ред. Р.А. Андриевского. – М.: Мир, 2000. – 898 с.
5. Затока А.Е. Газотермическое напыление и наплавка с использованием гибких шнуровых материалов // В сб. 5-ой международной конференции «П и П'98». – Санкт-Петербург, 1998. – С. 218–224.
6. Говорин Е.В. Статистические методы планирования эксперимента в металлургии. – Москва: Металлургия, 1992. – 350 с.
7. Пальоха К.К. Організація експерименту. – Київ: 1996. – 135 с.
8. Володарський Е.Т., Малиновський Б.М., Туз Ю.М. Планування та організація вимірювального експерименту. – Київ: Вища шк., 1987. – 280 с.
9. Толбатов Ю.А. Математична статистика та задачі оптимізації в алгоритмах і програмах. – Київ: Вища школа, 1994. – 400 с.
10. Мазаракі А.А., Толбатов Ю.А. Математичне програмування в Excel. – Київ: Четверта хвиля, 1998. – 208 с.
11. Степанчук А.Н., Данильчук Н.П., Вдовиченко Н.С. Структура и свойства композиционных газотермических покрытий, полученных с помощью гибкого порошкового шнура // Вісник ЖІТІ. – 1999. – № 9. – С. 35–38.

**СТЕПАНЧУК** Анатолій Миколайович – професор, завідувач кафедри високотемпературних матеріалів та композиційних покриттів Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– нові процеси та матеріали в порошковій металургії, їх використання і властивості при напиленні.

**ДАНИЛЬЧУК** Микола Петрович – науковий керівник, старший науковий співробітник Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– захисно-зміцнюючі покриття, які одержуть газотермічними та іншими методами;  
– триботехнічні та інші властивості газотермічних покриттів.

**ПОЛЕГЕШКО** Олександр Вікторович – інженер Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– нові порошкові матеріали для газотермічного нанесення покриттів.

**ВДОВІЧЕНКО** Микола Семенович – старший науковий співробітник Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– зносостійкі плазмові покриття з використанням економнолегованих порошкових матеріалів.

Подано 17.03.2004