

УДК 621.793.620.172

DOI: 10.18372/0370-2197.1(98).17363

О. В. ЛОПАТА

*Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Україна***ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ НА ЇХ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ І МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ**

У статті на основі експериментальних досліджень представлена комплексна оцінка впливу технологічних параметрів процесу газотермічного напилення (дистанції напилення), конструкторських параметрів (товщини покриття) та експлуатаційних параметрів (умов експлуатації – навантаження і швидкості ковзання) на міцність зчеплення та інтенсивність зношування газотермічних покриттів. Було встановлено вплив кожного з них на властивості отриманих покриттів. Зроблено висновок, що для підвищення міцності зчеплення газотермічних покриттів та зменшення інтенсивності їх зношування доцільно комплексно використовувати вплив дистанції напилення, товщини покриттів та умов його експлуатації.

Ключові слова: газотермічні покриття, міцність зчеплення, інтенсивність зношування, дистанція напилення, товщина покриттів, навантаження, швидкість ковзання

Вступ та постановка задач дослідження. Неадитивний вплив на елементи конструкцій (ЕК) експлуатаційних факторів є складним процесом, який залежить від величини цих факторів. У зв'язку з цим доцільно дослідити елементи конструкцій із покриттями в умовах експлуатації. З розвитком технологій нанесення покриттів методами газотермічного напилення (ГТН) та через складність фізико-хімічних процесів, що відбуваються при ГТН, в даний час експеримент є одним з основних засобів, який дає можливість описати та вивчити цей процес, а експериментально-статистичні методи - один з основних інструментів не тільки у його науковому пізнанні, а й у технологічних і конструкторських розробках. При відпрацюванні технології ГТН покриттів експериментальні дослідження проводили на зразках, оскільки безпосереднє нанесення покриттів на деталі та випробування на реальних об'єктах – трудомісткий і дорогий процес. Розробка технологічного процесу (ТП) ГТН покриттів пов'язана з розв'язанням оптимізаційних завдань [1-2]. Це пояснюється тим, що значна кількість технологічних параметрів процесу ГТН у поєднанні з великою номенклатурою матеріалів, з яких формують покриття, надають широкий ряд альтернативних варіантів. У такій ситуації ефективність прийнятих рішень залежить від вибору параметрів процесу ГТН для керування його ТП, і властивостей покриттів за заданих умов експлуатації, що дозволяє збільшити термін служби деталей машин. Ресурс (інтенсивність зносу, термін служби) поверхонь ЕК з газотермічними покриттями залежить від їх якісних характеристик, що впливають на інтенсивність спрацьовування: твердість покриття, міцність зчеплення, зносостійкість. Дослідження [3] працездатності ЕК з покриттями показали, що основною причиною їх руйнування є недостатній зв'язок між матеріалом покриття та поверхнею, що зміцнюється. Іншими словами, однією з найважливіших експлуатаційних характеристик ЕК з газотермічними покриттями є міцність зчеплення - критерій, який визначає їхню працездатність [3, 4]. При оптимізації режимів процесу ГТН в якості його основних параметрів, що визначають якість ЕК з покриттями були вибрані дистанція напилення

(технологічний параметр), товщина покриття (конструкторський параметр), навантаження та швидкість ковзання (експлуатаційні параметри).

Мета роботи - забезпечити максимальний термін служби елементів конструкцій з напиленими покриттями шляхом оцінки впливу параметрів процесу газотермічного напилення на властивості покриттів та визначення його оптимальні режими, які дозволяють при мінімальних витратах на дослідження отримати достатній обсяг інформації про процес, що вивчається.

Методологія досліджень. Методологія досліджень призначена для скорочення обсягу експериментальних робіт, отримання максимальної інформації та передбачає використання комплексу експериментально-статистичних методів досліджень. Ці методи дають можливість визначити оптимальні режими ГТН, за допомогою яких можна отримати покриття із заданими властивостями та забезпечити оптимальне співвідношення характеристик міцності в композиції «основа-покриття», а саме максимальну міцність і довговічність. Іншими словами, технологію нанесення покриттів ГТН слід розглядати як спосіб керування властивостями поверхневого шару, що зміцнюється. При цьому конструювання композиції "основа покриття" базується не тільки на співвідношенні властивостей покриття з умовами експлуатації, а також на співвідношенні властивостей покриття з властивостями зміцнюваної поверхні. У роботі запропоновано методологію, яка базується на застосуванні системного підходу до вирішення проблеми дослідження процесу ГТН з метою вивчення його особливостей, встановлення закономірностей впливу параметрів ГТН на властивості та структуру одержуваних покриттів, вибору оптимальних режимів ГТН та розробки ТП ГТН. Основним принципом та передумовою розробки методології науково-експериментальних досліджень багатофункціональних газотермічних покриттів є системність та комплексний характер дослідження їх властивостей, принципи моделювання (змістовний аналіз, формалізований опис, дослідження та вибір оптимального варіанту). Виходячи із системного підходу, організація дослідження є ієрархічною структурою таких методологічних рівнів: 1) проблемного аналізу з'ясування актуальності проблеми, визначення мети дослідження та постановку завдань; 2) концептуального рівня дослідження, що включає аналіз системного оточення, виділення з нього ТП та обґрунтування засобів його вибору; 3) операційного рівня дослідження, що передбачає проведення функціонально-морфологічного аналізу, вибір режимів ТП та розробку його математичних моделей; 4) детального рівня дослідження, що включає обґрунтування та оцінку пропозицій щодо вдосконалення ТП; вибір його оптимального варіанта; 5) завершального етапу прийняття рішення щодо вибору оптимальних параметрів ТП, які дозволять вирішити поставлену проблему.

Завдяки можливості керування параметрами процесу нанесення газотермічних покриттів для дослідження ТП було вибрано метод багатофакторного планування експерименту та математичної обробки статистичних даних, який дозволяє подати ТП у вигляді функціональної залежності вхідних та вихідних параметрів.

Обговорення основних результатів. Для ефективного аналізу механізму ГТН покриттів та управління його ТП встановлювали взаємозв'язок факторів, що визначають перебіг процесу напилення. Планування експерименту є необхідним

елементом експериментального дослідження та відноситься до статистичного методу ідентифікації складних систем [5]. Від плану експерименту залежить обсяг інформації, її якість та надійність. Був вибраний план експерименту, який для структури рівняння регресії забезпечує отримання стійкої, інформативної та адекватної математичної моделі [5]. Конструювання плану експерименту проводили за допомогою пакету прикладних програм "Планування, регресія та аналіз моделей (ППП ПРІАМ)" [6]. Проведення розрахункового експерименту необхідне для використання моделі у процесі вивчення ГТН покриття. При цьому фізичний об'єкт замінюється побудованою моделлю. Побудова математичних моделей за результатами експерименту відбувалась у два етапи: вибір структури рівняння регресії, оцінка коефіцієнтів регресії та його статистичних характеристик. Під побудовою моделі розуміється побудова за результатами експериментальних даних регресивної моделі, яка повинна відображати структуру зв'язків між незалежними змінними. Таким чином, на основі експериментальних даних будуються багатофакторні математичні моделі критеріїв якості, потім за цими моделями та результатами проводиться оптимізація. При вирішенні реальних завдань оптимізації постає проблема вибору критеріїв оптимізації.

Ефективне використання процесу ГТН покриттів засноване на можливості його керування з метою забезпечення максимальної міцності та ресурсу елементів конструкцій за їх мінімальної вартості. Фазовий склад, структура, механічні та експлуатаційні властивості поверхонь із покриттями є функціями параметрів ГТН. За результатами досліджень констатують факт того, що поверхня з покриттями має необхідні властивості при заданих параметрах ГТН. Однією з найважливіших характеристик ТП ГТН є відтворення необхідних властивостей поверхонь із покриттями та їх стабільність. Процес ГТН характеризується великою кількістю факторів, що впливають на властивості поверхонь деталей з покриттями, керуючи якими можна підвищити їх термін служби. Процес нанесення покриттів ГТН характеризується складністю та взаємною обумовленістю технологічних параметрів. На умови формування ГТН-покриттів не адитивно впливають конструктивні особливості устаткування, технологічні параметри процесу, характеристики матеріалу покриття. Природно прагнення при вдосконаленні технології ГТН мінімізувати кількість факторів (табл. 1), що впливають на властивості покриттів. Висока чутливість механічних характеристик матеріалів покриттів та поверхонь до режимів ГТН вимагає дослідження впливу процесу ГТН на властивості поверхонь з покриттями, їхнє управління та оптимізацію. Для визначення оптимальних режимів ГТН при проведенні експериментальних досліджень процесу нанесення покриттів були вибрані такі фактори (табл. 1): технологічні (дистанція напилення, L), конструкційні (товщина покриття, h); експлуатаційні (навантаження, P та швидкість ковзання, $V_{\text{ков.}}$). Результати проведених експериментальних досліджень представлені в табл. 2 - 5.

За результатами експерименту проведено статистичний аналіз та побудовано регресійні моделі (1 і 2) залежностей критеріїв оптимізації, які характеризують міцність зчеплення ($\sigma_{\text{зч.}}$) та зносостійкість (інтенсивність зношування, J_h) покриттів від конструктивних (товщина покриття, h), технологічних (дистанція напилення, L) та експлуатаційних факторів (навантаження, P та швидкість ковзання, $V_{\text{ков.}}$). Фактори та їх рівні наведені у таблиці 6, матриця планування у

табл. 7. Як вихідні дані використовувалися матриця планування (табл. 7) і результати експериментальних досліджень (табл. 1-4). Використовуючи фактори та значення рівнів їх варіювання, згенеровано план експерименту в кодованих значеннях (табл. 8).

Таблиця 1

Значення факторів процесу ГТН

Найменування параметра	Позначення	Одиниця вимірювання	Величина
Дистанція напилення	L	мм	100...200
Товщина покриття	h	мм	0,5...3,0
Навантаження	P	МПа	2,0...10,0
Швидкість ковзання	$V_{\text{ков.}}$	м/с	2,0...2,75

Таблиця 2

Залежність міцності зчеплення і зносостійкості від дистанції напилення

№ експерименту	Дистанція напилення L , мм	Міцність зчеплення $\sigma_{\text{зч.}}$, МПа	Інтенсивність зношування J_h , мкм/км (10^{-9})
1	140	90	0,013
2	100	110	0,012
3	180	71	0,014
4	200	60	0,015
5	120	88	0,012
6	160	80	0,014
7	80	119	0,015
8	160	72	0,013

Таблиця 3

Залежність міцності зчеплення і зносостійкості від товщини покриття

№ експерименту	Товщина покриття h , мм	Міцність зчеплення $\sigma_{\text{зч.}}$, МПа	Інтенсивність зношування J_h , мкм/км (10^{-9})
1	1,5	109	0,011
2	2,5	108	0,012
3	1	110	0,014
4	2	120	0,013
5	0,5	86	0,012
6	1,5	115	0,011
7	3	89	0,015
8	3	95	0,013

Таблиця 4

Залежність зносостійкості і міцності зчеплення від навантаження

№ експерименту	Навантаження, P , МПа	Міцність зчеплення $\sigma_{\text{зч.}}$, МПа	Інтенсивність зношування J_h , мкм/км (10^{-9})
1	6	85	0,012
2	4	110	0,012
3	8	90-	0,014
4	8	90-	0,013
5	2	120	0,012
6	10	80	0,014
7	4	110	0,011
8	2	120	0,011

Таблиця 5

Залежність зносостійкості і міцності зчеплення від швидкості ковзання

№ експерименту	Швидкість ковзання $V_{ков.}$, м/с	Міцність зчеплення $\sigma_{зч.}$, МПа	Інтенсивність зношування J_h , мкм/км (10^{-9})
1	2,3	100	0,012
2	2,6	110	0,013
3	2,15	85	0,014
4	2	80	0,014
5	2,45	90	0,012
6	2,75	120	0,015
7	2,3	100	0,011
8	2	80	0,015

Таблиця 6

Значення факторів, що варіюються та їх рівні

Рівні	Фактори				Кодовані значення факторів
	h , мм	L , мм	P , МПа	$V_{ков.}$, м/с	
	X_1	X_2	X_3	X_4	
Нижній	0,5	80	2	2	-1
Верхній	3	200	10	2,75	+1
Нульовий	1	150	-	-	-0
Інтервал, що варіюються	0,5	20	2	0,15	

Таблиця 7

Робоча матриця

Експеримент	Товщина покриття	Дистанція напilenня	Навантаження	Швидкість ковзання
№ експерименту	h , мм	L , мм	P , МПа	$V_{ск.}$, м/с
1	1,5	140	6	2,3
2	2,5	100	4	2,6
3	1	180	8	2,15
4	2	200	8	2
5	0,5	120	2	2,45
6	1,5	160	10	2,75
7	3	80	4	2,3
8	3	160	2	2

Таблиця 8

План експерименту у натуральних значеннях

№ експерименту	X_1	X_2	X_3	X_4
1	1,5	140	6	2,3
2	2,5	100	4	2,6
3	1	180	8	2,15
4	2	200	8	2
5	0,5	120	2	2,45
6	1,5	160	10	2,75
7	3	80	4	2,3
8	3	160	2	2

За результатами експериментальних досліджень (табл. 2-5) побудовано математичну модель (1) залежності критерію оптимізації, що характеризує міцність зчеплення покриттів, від факторів ГТН (табл. 1). Для певних факторів проведено графічне дослідження їх впливу на критерій оптимізації, що характеризує міцність зчеплення покриття. Воно виконувалося шляхом побудови сімейства графіків приватних рівнянь регресії (рис. 1). Математична модель (1) адекватно описує процес ГТН покриттів та її можна використовувати для аналізу та вибору його оптимальних параметрів.

$$Y_{\text{сзч.}} = 94,5537 - 16,1578x_1 + 8,66664x_2 - 4,37462x_3 - 17,2747x_4 - 3,92423x_1x_2 - 16,0642x_1x_3 - 17,0532x_2x_3 - 22,4759x_1x_4 - 9,99573x_2x_4 + 1,41499x_3x_4, \quad (1)$$

де $Y_{\text{сзч.}}$ – математична модель в кодованих значеннях для міцності зчеплення покриття.

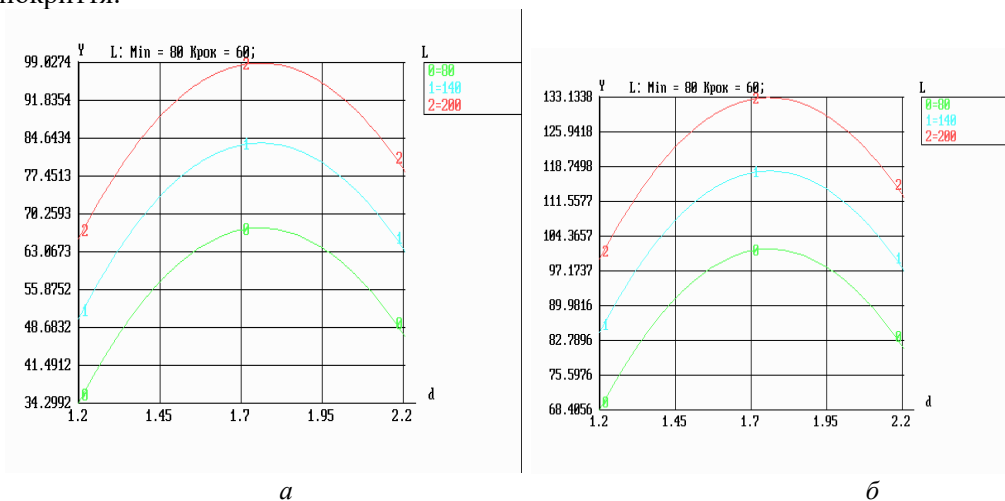


Рис. 1. Графіки приватних рівнянь регресії $Y_{\text{сзч.}} = f(X_1, X_2)$. Чинники зафіксовані на рівнях: $a - h = 1,5$ мм; $L = 180$ мм; $P = 2$ МПа; $V_{\text{ков.}} = 2$ м/с та $b - h = 0,5$ мм; $L = 200$ мм; $P = 2$ МПа; $V_{\text{ков.}} = 2$ м/с

За результатами експерименту (табл. 2-5) проведено статистичний аналіз та побудовано математичну модель (2) залежності критерію оптимізації, що характеризує зносостійкість покриттів від факторів ГТН (табл. 1).

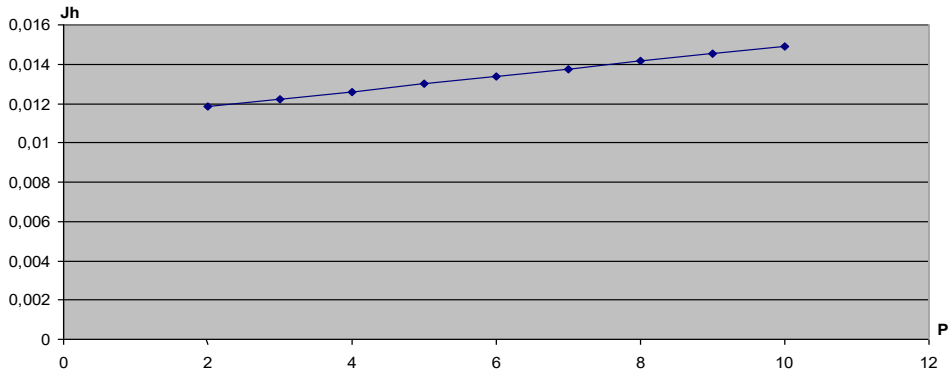
$$Y_{Jh} = 0.013375 + 0.00153333x_3 \quad (2)$$

де Y_{Jh} – математична модель у кодованих значеннях для зносостійкості покриття.

Розрахунок моделі здійснювався за допомогою ППП ПРИАМ [6]. Як вихідні дані використовувалися матриця планування (табл. 7) і результати досліджень (табл. 2-5). Результати статистичного аналізу дозволили зробити висновок, що математична модель (2) адекватно описує процес ГТН покриттів та її можна використовувати для аналізу та вибору його оптимальних параметрів.

Рівняння регресії (2), що описують залежність зносостійкості Jh від параметрів ГТН, представлено графічно на рис. 2.

Аналізуючи рівняння (1 і 2) слід зазначити, що міцність зчеплення покриттів, отриманих ГТН залежить від його товщини та дистанції напилання. На зносостійкість покриттів впливають умови його експлуатації (навантаження та швидкість ковзання).

Рис. 2. Графік приватних рівнянь регресії $Y_{Jh} = f(X_3, X_4)$

Дослідження проводили на прикладі газополуменевого напилення (ГПН) композиційного порошку КХН-30 (70% карбід хрому Cr_3C_2 та 30% ніхром (Ni-Cr 80/20)). Узагальнюючи результати досліджень впливу факторів процесу ГПН композиційного порошку КХН-30 встановлені технологічні параметри процесу напилення: дистанція напилення 100...200 мм; тиск кисню $P_{O_2} = 0,15-0,5$ МПа; тиск пального газу $P_G = 0,03-0,05$ МПа; тиск повітря $P_{пов.} = 0,1 \dots 0,2$ МПа; витрата кисню $G_{O_2} = 0,5 \dots 2,5$ м³/год.; витрата пального газу $G_G = 0,3 \dots 0,6$ м³/год.; витрата повітря $G_{пов.} = 3,0 \dots 5,0$ м³/год. (повітря використовували як транспортуючий газ). Співвідношення кисню до пального газу для ацетиленокисневої суміші $\beta = V_{O_2}/V_{C_2H_2} = 1,1 \dots 1,4$ та пропан-кисневої суміші $\beta = V_{O_2}/V_{C_3H_8} = 3,5 \dots 4,0$. Метод підготовки поверхні перед напиленням – дробоструменева обробка. Характеристика властивостей напилених покриттів із композиційного порошку КХН-30 (70% карбід хрому Cr_3C_2 та 30% ніхром (Ni-Cr 80/20)) наведено у табл. 9.

Таблиця 9

Характеристики напилених покриттів

Характеристика покриття	Величина
Міцність зчеплення $\sigma_{зч.}$, МПа	80–120 МПа
Інтенсивність зношування J_h , мкм/км (10^{-9})	0,011–0,015
Мікротвердість, МПа	40...43 HRC
Контактні навантаження, МПа	До 100 МПа за наявності ударів
Товщина покриття	0.5–10.0 мм

Висновки. Дослідження ГТН покриттів із варіюванням основних його параметрів дозволили оцінити вплив кожного з них на властивості поверхонь із напиленими покриттями. На основі отриманих експериментальних результатів розроблені моделі, що зв'язує міцність зчеплення та інтенсивність зношування покриттів з їх товщиною та дистанцією напилення. Вирішення задач математичного моделювання та оптимізації процесу нанесення покриттів ГТН дає можливість отримати комплексну оцінку впливу вхідних змінних (параметрів процесу ГТН) на вихідні показники – властивості напилених покриттів. Аналізуючи отримані моделі (1 і 2) слід зазначити, що міцність зчеплення покриттів залежить від їхньої товщини та дистанції напилення. На зносостійкість покриттів впливають умови його експлуатації (навантаження та швидкість

ковзання). Встановлені технологічні режими процесу нанесення покриттів методом ГТН дозволяють наносити на функціональні поверхні деталей покриття з композиційного порошку КХН-30 (70% карбід хрому Cr_3C_2 та 30% ніхром (Ni-Cr 80/20)) з міцністю зчеплення 80 - 100 МПа, яка в 2 рази перевищує аналоги (40 - 45 МПа) та підвищеною в 2-2.5 рази зносостійкістю.

Список літератури

1. Радченко С.Г., Лапач С.Н. Методология создания новой техники и технологий. Технологические системы. 2003. №1. С. 41-44.
2. Вислоух С.П. Многокритериальная оптимизация в технологических расчетах. Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ «ХП». Харьков: 2001 С. 94-98.
3. Покрyтия и их использование в технике: под ред. В.Т. Трощенко. К.: Академперіодика, 2006. С. 981-1074.
4. Медведєва Наталья Анатольевна. Повышение прочности сцепления и снижение пористости напыленных покрытий из порошковых материалов электроконтактным припеканием: Дис. канд. техн. наук: 05.03.06/Кировоградский национальный технический ун-т. Кировоград: 2006.
5. Радченко С.Г. Математическое моделирование и оптимизация технологических систем: Учебное пособие. К.: ИВЦ «Политехника», 2001. 88 с.
6. Каталог. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ. НТУ КПИ. Под ред. С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, П.Н. Бабич. К.: СП «Текпор», 1993. С. 24-27.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2023.

Лопата Олександр Віталійович – аспірант кафедри зварювального виробництва Інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», вул. Дашавська, 6/2, навчальний корпус 23, м. Київ, Україна, 03056, тел.: +38 044 204 82 40, E-mail: lopata-sasha@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5266-6486>.

A. V. LOPATA

INFLUENCE OF GAS THERMAL PROCESS PARAMETERS SPRAYING OF COATINGS FOR THEIR WEAR RESISTANCE AND ADHESION STRENGTH

The article presents a comprehensive impact assessment based on experimental research technological parameters of the gas-thermal spraying process (spraying distance), design parameters (coating thickness) and operational parameters (conditions operation - load and sliding speed) on grip strength and intensity wear and tear of gas-thermal coatings. The effect of each of them on the properties was established received coatings. The study of HTN coatings with variation of its main parameters made it possible to assess the influence of each of them on the properties of surfaces with sprayed coatings. On the basis of the obtained experimental results, models have been developed that relate the adhesion strength and wear intensity of the coatings to their thickness and spraying distance. Solving the problems of mathematical modeling and optimization of the HTN coating process makes it possible to obtain a comprehensive assessment of the influence of input variables (HTN process parameters) on the output indicators - the properties of sprayed coatings. Analyzing the obtained models, it should be noted that the adhesion strength of the coatings depends on their thickness and spraying distance. The wear resistance of the coatings is influenced by its operating conditions (load and sliding speed). It was concluded that to increase the adhesion strength of gas thermal coatings and reducing the intensity of their wear is expedient to use comprehensively influence of spraying distance, coating thickness and conditions of its operation.

Key words: gas-thermal coatings, adhesion strength, intensity of wear, spraying distance, coating thickness, load, sliding speed

Referenses

1. Radchenko S.G., Lapach S.N. The methodology of creating new techniques and technologies. The technological systems. 2003. Number one. I'm not. 41-44.
2. Visloux S.P. Multi-criterion optimization in technological calculations. High tech in engineering. The collection of scientific works of NTU XPI. I'm not sure. 94-98.
3. V.T. Troshchenko Coatings and their use in technology. K.: Academic periodical, 2006. 981-1074.
4. Medvedeva Natalia Anatolievna Increase the strength of adhesion and decrease the porosity of powdered coatings by electrical contact baking: D. Cand. of technical sciences: 05.03.06 / Kirovograd national technical university.
5. Radchenko S.G. Mathematical modeling and optimization of technological systems: A textbook. K.: I.V.C. The Polytechnic, 2001.
6. S.N. Lapach, Radchenko S.G., P.N. Babich The catalog. The software products of Ukraine. Planning, regression and analysis of the PRIAM / NTU KPI model. K.: SP «Tekpor». 1993. 24-27.

Oleksandr Vitaliyovych Lopata – graduate student of the Department of Welding Production at the E.O. Institute of Materials Science and Welding. Paton, National Technical University of Ukraine "KPI named after Ihor Sikorskyi", str. Dashavska, 6/2, educational building 23, Kyiv, Ukraine, 03056, phone: +38 044 204 82 40, E-mail: lopata-sasha@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5266-6486>.