

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Рибак Ольга Володимирівна



УДК 004.942:004.021

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ
В САПР ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ
ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ**

05.13.12– системи автоматизації проектувальних робіт

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інформаційних технологій проектування в машинобудуванні Одеського національного політехнічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Тонконогий Володимир Михайлович,
Одеський національний політехнічний
університет, директор Інституту промислових
технологій, дизайну та менеджменту

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Гоменюк Сергій Іванович,
Запорізький національний університет,
декан математичного факультету

кандидат технічних наук
Лазарєва Діна Василівна,
Одеська державна академія
будівництва та архітектури,
завідувач кафедри інформаційних
технологій та прикладної математики

Захист відбудеться « 05 » липня 2019 р. о 13.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 41.052.08 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, ауд. 400-А.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1.

Автореферат розісланий « 04 » червня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 41.052.08



Р.О. Шапорін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При шліфуванні деталей з плазмовими покриттями постає питання вибору оптимальних параметрів технологічного процесу, що забезпечать досягнення заданої шорсткості та точності поверхні, відсутність браку та одночасно високу продуктивність процесу обробки. Окрім ризику утворення поверхневих та структурних дефектів, властивих для шліфування деталей із суцільною структурою, таких як магістральні тріщини, сколювання, припалення та ін., в процесі обробки деталей з плазмовими покриттями різні властивості основи та нанесеного шару зумовлюють можливість його відшаровування та відриву від основного матеріалу. Зазначені дефекти спричиняють непридатність отриманих виробів для подальшого використання, що, в свою чергу, призводить до економічних збитків. Попри те, що зниження швидкості обробки поверхні дозволяє зменшити кількість бракованих виробів, даний підхід негативно впливає на продуктивність процесу шліфування. Отже, при виборі параметрів процесу шліфування плазмових покриттів слід враховувати велику кількість факторів.

На даний час одним з найбільш перспективних напрямків підвищення ефективності технологічних процесів фінішної обробки деталей є розробка систем автоматизованого проектування шліфувальних операцій. Існуючі САПР процесу шліфування створювались на основі математичних моделей обробки деталей, що мають суцільну структуру, відтак, їхнє використання при шліфуванні деталей з плазмовим покриттям може призводити до великої кількості бракованих виробів. З іншого боку, класичні методи розв'язку оптимізаційних задач виявилися малоприматними для визначення оптимального режиму обробки через нелінійність цільових функцій та велику кількість обмежувальних умов, пов'язаних з процесом шліфування.

Таким чином, для визначення оптимальних параметрів шліфування плазмових покриттів необхідно побудувати математичну модель температурного поля та напружено-деформованого стану деталі з покриттям в процесі обробки, враховуючи особливості структури нанесеного матеріалу, його пористість та включення інших фаз. Крім того, слід сформулювати критерії оптимізації з огляду на високу вартість та дефіцитність матеріалів плазмових покриттів, а також необхідність забезпечення високої продуктивності процесу шліфування. Для розв'язку задачі оптимізації технологічного процесу останнім часом розвиваються та набувають все більшої популярності різноманітні метаевристичні алгоритми. Враховуючи особливості процесу шліфування плазмових покриттів, модифікація еволюційних алгоритмів шляхом задання нових способів селекції, принципів схрещування та стратегії мутації дозволить підвищити швидкість та надійність розв'язку поставлених задач.

Виходячи із зазначених обставин, можна стверджувати, що розробка моделей температурного поля та напружено-деформованого стану деталей з плазмовим покриттям, а також методів визначення оптимальних параметрів їхнього шліфування, спрямована на забезпечення якості та продуктивності обробки поверхні, є актуальною при проектуванні технологічних процесів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до фундаментальних напрямків науково-дослідних

робіт Одеського національного політехнічного університету «Підвищення ефективності функціонування технічних систем» (№ державної реєстрації 0114U005502), «Розробка компонентів інтелектуальних інформаційних систем для моделювання та проектування складних об'єктів та систем» (№ державної реєстрації 0115U000835).

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка та дослідження математичного моделювання і оптимізація процесу шліфування плазмових покриттів в САПР ТП для зниження кількості бракованих виробів та підвищення продуктивності процесу обробки деталей з плазмовими покриттями.

Для досягнення цієї мети в роботі були поставлені та вирішені наступні **задачі:**

- проаналізовано існуючі САПР, класичні методи розв'язку багатокритеріальних оптимізаційних задач, а також метаевристичні стратегії та алгоритми, що можуть бути застосовані для пошуку найкращого рішення при виборі параметрів технологічних систем;

- побудована математична модель термомеханічного стану деталей при шліфуванні плазмових покриттів, визначені умови забезпечення якості обробки поверхні, критерії міцності та руйнування нанесеного шару та фактори, що впливають на ціноутворення готової продукції;

- вдосконалено метод генетичного алгоритму для оптимізації процесу шліфування плазмових покриттів та побудови САПР процесу обробки, який дозволяє не допустити збіжності до локального екстремуму;

- створено імітаційну модель температурного поля деталі з покриттям для оцінки розподілу енергії в системі оброблювана деталь – шліфувальний круг та перевірено якість моделювання за даними експериментальних досліджень;

- розроблено САПР технологічного процесу шліфування плазмових покриттів, що ґрунтується на створених математичних моделях та модифікованому методі генетичного алгоритму та забезпечує вибір оптимальних параметрів бездефектного шліфування;

- виконано практичне випробування розробленої системи САПР «PLASMOSHILIF» в якості лабораторного комп'ютерного дослідження та в умовах виробництва з позитивним технічним ефектом.

Об'єктом дослідження є процес проектування технологічної обробки плазмових покриттів з точки зору забезпечення їхньої якості та оптимізація технологічних параметрів шліфування.

Предметом дослідження є моделі та методи, які використовуються для побудови САПР ТП шліфування плазмових покриттів.

Методи дослідження. Теоретичні методи дослідження термомеханічного стану плазмових покриттів при їхньому шліфуванні ґрунтуються на фундаментальних положеннях теплофізики та фізики твердого тіла, класичної теорії пружності, теорії руйнування та математичному аналізу. Для розв'язку теплової задачі та аналізу напружено-деформованого стану поверхневого шару деталей з покриттям використані інтегральні перетворення Фур'є та Лапласа, метод розривних розв'язків, методи сингулярних інтегральних рівнянь. З метою

практичного підтвердження результатів моделювання проводилось експериментальне вимірювання температури за допомогою попередньо відкаліброваної термопари. За основу модифікованого генетичного алгоритму, на якому базується стратегія вибору параметрів шліфування, покладено класичний генетичний алгоритм, що містить базові принципи, властиві всім еволюційним алгоритмам оптимізації: побудови фенотипу, селекції, схрещування, мутації тощо. Для дослідження швидкості збіжності модифікованого генетичного алгоритму було виконано оптимізацію технологічного процесу обробки покриттів в умовах даної задачі за допомогою інших еволюційних методів, таких як метод мурашиної колонії, метод рою часток та метод розсіювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку моделей бездефектного шліфування та розробці методів пошуку оптимальних значень параметрів обробки плазмових покриттів:

- отримала подальший розвиток математична модель термомеханічного стану деталей з покриттям в процесі шліфування, яка відрізняється від існуючих врахуванням впливу температур та напружень на утворення припалень, шліфувальних тріщин, налипань та інших дефектів, що дозволило підвищити якість моделювання досліджуваного технологічного процесу;

- вперше розроблено метод оцінки адгезійної міцності зчеплення нанесеного шару та основи, що полягає у врахуванні умов, за яких відбувається розрив адгезійних зв'язків і відшаровування покриття під час шліфування, та дозволяє підвищити ефективність експериментальної оцінки міцності зчеплення плазмових покриттів;

- вперше запропонований метод оцінки характеристик плазмових покриттів, відмінність якого полягає у врахуванні впливу властивостей плазмового струменя та параметрів режиму напилювання на формування спадкових неоднорідностей структури нанесеного шару, що дозволяє підвищити ефективність оцінки пористості покриття;

- отримав подальший розвиток метод розрахунку оптимального режиму шліфування плазмових покриттів, який відрізняється від існуючих оцінкою втрат матеріалу покриття на припуски, що дозволяє знизити кількість нанесеного матеріалу в технологічному процесі напилення та обробки плазмових покриттів;

- отримав подальший розвиток метод оптимізації технологічного процесу шліфування за допомогою генетичного алгоритму, відмінність якого полягає у застосуванні паралельного еволюційного пошуку та комбінованого підходу до селекції параметрів шліфування з різним ступенем пристосованості, що дозволяє підвищити оперативність алгоритму та знизити його чутливість до локальних екстремумів.

Практичне значення одержаних результатів. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість підвищення продуктивності та якості обробки плазмових покриттів за рахунок використання САПР технологічного процесу шліфування, що забезпечує оптимізацію параметрів обробки на основі модифікованого генетичного алгоритму.

Розроблено САПР проектування процесу шліфування плазмових покриттів

«PLASMOSHLIF», яка базується на запропонованих моделях та методах.

Випробування розробленої системи САПР були проведені у холдинговій компанії «Мікрон». В якості об'єкта проектування обрано деталь типу вал, що потребує нанесення зносостійкого плазмового покриття. В результаті виробничих випробувань встановлено, що застосування САПР «PLASMOSHLIF» дозволило знизити кількість бракованих деталей на 18 % при збільшенні продуктивності технологічного процесу обробки на 12 %. САПР «PLASMOSHLIF» прийнято до впровадження в холдинговій компанії «Мікрон», і розрахунковий економічний ефект від впровадження складає 27 000 грн. на рік.

Запропоновані моделі та методи, а також алгоритми та програми, розроблені для їхньої реалізації, впроваджені в навчальний процес в Одеському національному політехнічному університеті і використовуються в дисциплінах, які вивчають системи комп'ютерного проектування, а також у курсовому та дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Основний зміст роботи, теоретичні та практичні результати, висновки і дослідження, представлені до захисту, одержані автором особисто. У публікаціях, написаних у співавторстві, автору належать: вдосконалення моделей та методів проектування впливу режимів технологічного процесу обробки і нанесення плазмових покриттів на їхні характеристики [1, 4, 7 – 9]; виведення залежності пористості нанесеного шару плазмового покриття від характеристик процесу напилювання [1, 5]; створення імітаційної моделі температурного поля та перевірка її на відповідність реальним тепловим процесам, що відбуваються в деталі з покриттям в процесі шліфування [2]; розробка методів оцінки адгезійної та когезійної міцності у матеріалі покриття [6, 10, 11]; визначення умов бездефектної обробки плазмових покриттів [3, 4]; розробка математичної моделі та модифікованого методу генетичного алгоритму для оптимізації процесу шліфування плазмових покриттів [3, 12].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися та обговорювалися на XXV Міжнародній науково-технічній конференції «Високі технології: тенденції розвитку» (Харків – Одеса, 2017); Міжнародній інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2016)» (Вінниця, 2016); Міжнародній науковій та методологічній конференції «Університетська наука – 2016» (Маріуполь, 2016); IX Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перший крок у науку» (Луганськ, 2014); XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2018); 18th International Conference «Research and Development in Mechanical Industry» (Vrnjačka Banja, Serbia, 2018); XXVI Міжнародній науково-технічній конференції «Високі технології: тенденції розвитку» (Харків – Одеса, 2018).

Публікації. Результати дисертаційних досліджень викладені в 12 наукових публікаціях, серед них: 1 стаття в іноземному виданні, 6 статей у наукових фахових виданнях зі спеціального переліку МОН України, які входять до міжнародних наукометричних баз, 1 теза доповіді та 4 статті за результатами доповідей на конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків. Обсяг дисертації – 120 сторінок основного тексту. Дисертація містить 52 рисунки, 4 таблиці, список використаних джерел (117 найменувань), а також 3 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність, відповідність державним науковим програмам, вимогам МОН України, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також об'єкт та предмет дослідження, сформульовані мета дослідження і його задачі, вказано особистий внесок здобувача.

У першому розділі проаналізовано існуючі САПР шліфування, їхні переваги та недоліки, а також математичний апарат, покладений в їхню основу. З'ясовано, що попередні дослідження режимів шліфування проводились для зразків, що мають суцільну структуру, а проектування процесу обробки деталей з плазмовим покриттям за допомогою існуючих САПР призводить до значних відхилень. Класичні методи розв'язку багатокритеріальних оптимізаційних задач виявилися малопридатними для визначення оптимальних параметрів обробки плазмових покриттів через нелінійність цільових функцій та велику кількість обмежувальних умов, пов'язаних з процесом шліфування. Також були розглянуті попередні спроби розв'язку задачі оптимізації процесу шліфування за допомогою метаевристичних стратегій та алгоритмів. Застосування еволюційних методів дозволяє знайти перспективні варіанти розв'язку, але для задачі вибору оптимальних параметрів обробки плазмових покриттів такий підхід потребує врахування особливостей даного технологічного процесу. Через надмірне збільшення температур та напружень під час шліфування плазмових покриттів, спричинене неточними результатами моделювання та оптимізації, у нанесеному шарі виникає ризик утворення поверхневих та структурних дефектів, таких як припалення, тріщини, відшаровування покриття тощо.

У другому розділі побудована математична модель термомеханічного стану деталей з покриттям в процесі шліфування, наведені результати експериментального дослідження температурного поля при шліфуванні плазмових покриттів, запропоновано оцінку пористості нанесеного шару та адгезійної міцності зчеплення покриття з основним матеріалом деталі, визначені умови бездефектної обробки поверхні.

Процеси теплопередачі при шліфуванні деталей з плазмовим покриттям описуються рівнянням нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \begin{matrix} 0 \leq x < \infty, \\ -\infty < y < \infty \end{matrix} \quad (1)$$

де $T(x, y, \tau)$ – температура в момент часу τ у точці з координатами (x, y) ; α – коефіцієнт теплопровідності.

Рівняння пружності Ламе в переміщеннях може бути використане для аналізу напружено-деформованого стану нанесеного шару:

$$\frac{1}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \Delta \bar{v} = \frac{4G(1+\mu)}{1-2\mu} \delta_c \cdot \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \Delta \bar{v} = \frac{4G(1+\mu)}{1-2\mu} \delta_c \cdot \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (3)$$

де u, v – компоненти вектора зміщень у точці (x, y) ; Θ – значення деформації; μ, G – сталі Ламе; δ_c – товщина плазмового покриття; $\bar{u}(x, y) = \frac{v}{2G}$; $\bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G}$.

Розподіл сил при шліфуванні деталі з покриттям представлений на рис. 1.

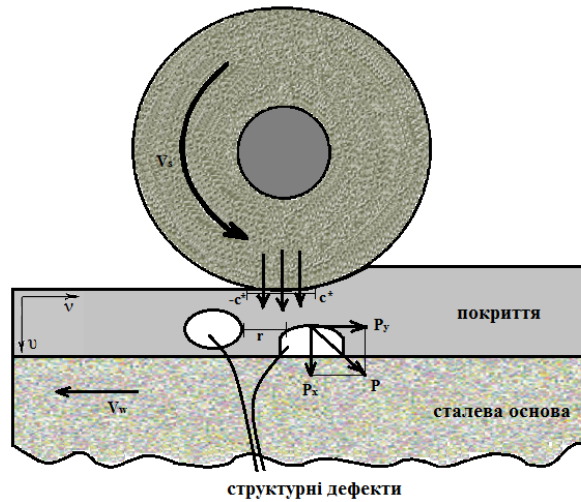


Рисунок 1 – Схема процесу шліфування плазмового покриття

Початкові умови для даної задачі мають вигляд:

$$T(x, y, 0) = 0. \quad (4)$$

Граничні умови для температурного та деформаційного полів можуть бути записані наступним чином:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q(y, \tau)}{\lambda_c}, \quad |y| < c^* \quad (5)$$

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} + \gamma T = 0, \quad |y| > c^*$$

$$\sigma_x(x, y, \tau) \Big|_{x=0} = \tau_{xy}(x, y, \tau) \Big|_{x=0} = 0, \quad (6)$$

де $q(y, \tau)$ – тепловий потік, утворений в результаті взаємодії між оброблюваною деталлю та шліфувальним кругом; $2c^*$ – довжина зони контакту круга з поверхнею; λ_c – коефіцієнт теплопровідності матеріалу покриття; γ – коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем; τ_{xy} та σ_x – дотичні та нормальні напруження.

Розв'язок рівняння теплопровідності передбачає визначення температурного поля шляхом інтегральних перетворень Фур'є функції $T(x, y, \tau)$ по змінній y та перетворень Лапласа функції $T(x, y, \tau)$ по змінній τ . Оскільки в межах поставленої задачі особливе значення відіграють умови, за яких відбувається розвиток дефектів, необхідно додатково визначити температуру на глибині від поверхні та вздовж напрямку руху шліфувального круга. Відтак, математична модель температурного поля деталі з плазмовим покриттям в процесі шліфування має наступний вигляд:

$$T(x, y, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda_c} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{V_s}\right) H\left(\frac{L+kl}{V_s}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} f(x, y, \tau, \tau') d\tau' \quad (7)$$

$$T(h, 0, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda_c} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{V_s}\right) H\left(\frac{L+kl}{V_s}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \psi(x, \tau, \tau') d\tau' \quad (8)$$

$$T_k(0, y, \tau) = \frac{CV_s}{\pi\lambda_c l \sqrt{V_w}} \int_0^{\tau} \int_{-c}^c \frac{\chi(\eta, \tau) \cdot e^{\frac{(y-\eta)^2}{4(\tau-\tau')}}}{2\sqrt{\pi(\tau-\tau')}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi(\tau-1)}} + \gamma e^{\gamma^2(\tau-\tau')} [1 + \Phi(\gamma\sqrt{\tau-\tau'})] \right\} d\eta d\tau' \quad (9)$$

$$T_k^{\max}(L, 0) = \frac{CV_s \alpha}{\lambda_c l \cdot (V_w)^2} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{V_w \sqrt{Dt}}{\alpha}\right) \right] \quad (10)$$

де V_w – швидкість оброблюваної деталі; D та C – діаметр та ширина шліфувального круга.

Для перевірки відповідності отриманої математичної моделі проведено експериментальні дослідження процесу шліфування зносостійких плазмових покриттів на основі композиційного порошку карбіду титану, плакованого твердим розчином фосфору в нікелі. Результати вимірювання температурного поля деталі з покриттям в процесі обробки добре узгоджуються з розрахунковими значеннями. На рис. 2 кривою 1 позначені температури, отримані внаслідок моделювання, а кривою 2 – дані експериментального дослідження за тих самих умов.

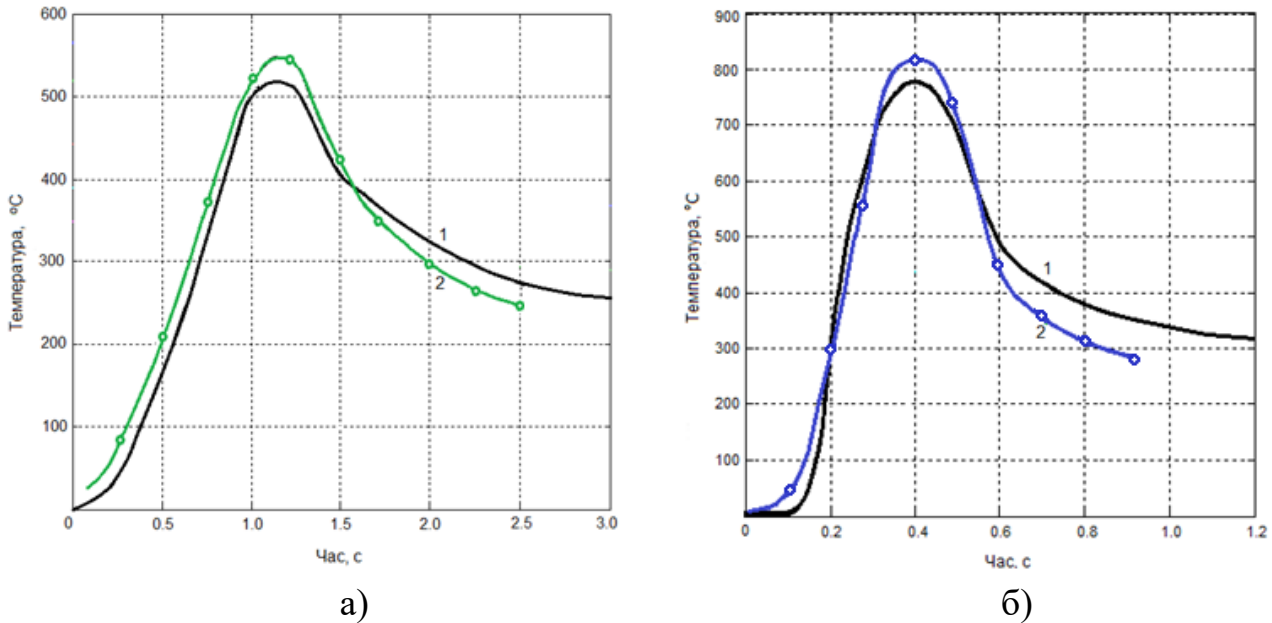


Рисунок 2 – Розподіл температури з часом в шарі покриття:
 а) на глибині 1,05 мм та швидкості поздовжньої подачі 0,01 м/с;
 б) на глибині 0,25 мм та швидкості поздовжньої подачі 0,03 м/с

Оцінка якості моделювання проводилася за допомогою методу найменших квадратів. На основі відповідних розрахунків можна зробити висновок, що сума квадратів відхилень для температур, визначених за допомогою розробленої моделі краще наближує експериментальні дані, ніж моделювання температурного поля для деталі із суцільною структурою.

Враховуючи градієнт температур та стрибки векторів зміщень та напружень на межі розподілу покриття з основним матеріалом деталі, а також критерії міцності та руйнування, можна визначити умови, за яких відбувається утворення шліфувальних тріщин. Для того, щоб уникнути розвитку тріщин в процесі обробки матеріалу покриття, напруження, що виникають на ділянці інтенсивного охолодження

$$\sigma_{\max}(x, \tau) = 2E \frac{1 + \mu_p}{1 - \mu_p} \alpha_t T_k \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) \quad (11)$$

повинні бути обмежені величинами

$$\sigma_{\max}(x, \tau) \leq \sigma_{\lim}. \quad (12)$$

Система обмежень, що поєднує значення температур та глибину поширення тепла і дозволяє попередити виникнення припалень в процесі обробки плазмових покриттів, може бути записана наступним чином:

$$\begin{cases} T(x, y, \tau) \leq T_M; \\ T(h, 0, \tau) \leq T_{s.c}; \\ T_k(0, y, \tau) \leq [T]; \\ T_k^{\max}(L, 0) \leq [T]. \end{cases} \quad (13)$$

де T_M – максимальна величина миттєвої температури; T_k – постійна складова температури, усереднена по кількості абразивних зерен.

З огляду на умови розривності розв'язку для неоднорідностей нанесеного шару та аналіз внутрішніх дефектів структури покриття, критерій локального руйнування можна виразити за допомогою нерівності:

$$\ell_0 < \frac{D \cdot \alpha \cdot \lambda_c^2 V_w K_c^2}{\pi^2 \left[C \cdot V_s \cdot E(1 + \mu_p) \alpha_t \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{V_w \sqrt{Dt}}{\alpha\tau}\right) \right) \right]} \quad (14)$$

де K_c – тріщиностійкість оброблюваного покриття; E – модуль Юнга; μ_p – коефіцієнт Пуассона матеріалу покриття; t – глибина шліфування; α_t – температурний коефіцієнт лінійного розширення; ℓ_0 – характерний лінійний розмір структурного дефекта. Під час експериментів параметр ℓ_0 можна визначити як розмір пор в нанесеному шарі покриття.

На основі проведених досліджень з'ясовано, що пористість плазмового покриття залежить від теплових та когезійних властивостей матеріалу покриття, середнього розміру частинок напилуваного порошку, природи плазмоутворюючого газу та швидкості плазмового струменю:

$$N_{por} = \xi \cdot Bi \cdot d^{\frac{E_{vdw}}{E_k}}, \quad (15)$$

де ξ – коефіцієнт, що враховує когезію нанесеного шару; Bi – число Біо; d – середній діаметр частинок порошку; E_{vdw} – енергія взаємодії Ван-дер-Ваальса між частинками та поверхнею деталі; E_k – кінетична енергія частинки при зіткненні з поверхнею.

Адгезійна міцність зчеплення покриття з основою залежить від поверхневої енергії між нанесеним шаром та основним матеріалом деталі. Крім того, чим більшою є товщина нанесеного покриття, тим менша його міцність зчеплення з основою. Виходячи з аналізу поверхневої енергії на межі розподілу покриття і основи, адгезійну міцність зчеплення можна визначити за формулою:

$$\theta_{adh} = \frac{1}{\sqrt{\pi\delta_c}} \cdot \sqrt{(\cos\varphi + 1)\sigma_{ed} \cdot G}. \quad (16)$$

де δ_c – товщина покриття; φ – крайовий кут змочування; σ_{ed} – поверхневий натяг; G – модуль пружності.

Щоб не допустити розриву адгезійних зв'язків та відриву покриття від основного матеріалу деталі, адгезійна міцність зчеплення повинна бути більшою за напруження, що руйнують зчеплення:

$$\theta_{adh} > \sigma_y. \quad (17)$$

Проведені експериментальні дослідження підтверджують теоретичні обґрунтування запропонованих оцінок пористості плазмового покриття та міцності зчеплення покриття з основою. За допомогою представлених умов бездефектної обробки поверхні встановлюється співвідношення між технологічними параметрами шліфування та характеристиками температурного і деформаційного полів та забезпечується необхідна якість поверхні при шліфуванні деталей з плазмовими покриттями.

У третьому розділі розглянуто постановку задачі вибору оптимальних параметрів шліфування деталей з плазмовим покриттям, проаналізовано особливості класичного генетичного алгоритму оптимізації, можливі ускладнення при його роботі та шляхи їхнього вирішення. Виходячи з особливостей технологічного процесу шліфування плазмових покриттів, розроблено модифікований генетичний алгоритм для розв'язку поставленої задачі.

Визначення оптимальних технологічних параметрів процесу шліфування плазмових покриттів зводиться до багатокритеріальної оптимізаційної задачі. Розв'язок цієї задачі полягає у пошуку таких параметрів шліфування, за яких досягається максимальна продуктивність обробки при мінімальних втратах матеріалу покриття на припуски і забезпечується необхідна якість поверхні:

$$Z_1 = \max \left\{ \frac{1000 \cdot a \cdot b}{L \cdot h \cdot k_T \cdot (C + b + \Delta)} \cdot V_w \cdot V_{tr} \cdot \sum_{i=1}^N t_i^2 \right\}; \quad (18)$$

$$Z_2 = \min \left\{ \sum_{i=1}^N t_i \cdot n_i \right\}. \quad (19)$$

$$\begin{cases} R_a \leq R_a^*; \\ \varepsilon_T \leq \varepsilon_T^*; \\ T(x) \leq T_{\max}; \\ \sigma_{\max}(x, \tau) \leq \sigma_{\lim}; \\ \sigma_y < \theta_{adh}; \\ \ell_0 < \ell_0^*, \end{cases} \quad (20)$$

де R_a та R_a^* – отримана і задана шорсткість обробленої поверхні; ε_T та ε_T^* – похибка на отриманий розмір деталі і граничний допуск; T та T_{\max} – температура при шліфуванні і максимальна температура, за якої можливо уникнути припалень на поверхні деталі з покриттям; σ_{\max} – максимальне значення локальних напружень; σ_{\lim} – напруження, при яких починається розвиток шліфувальних тріщин; θ_{adh} – адгезійна міцність зчеплення покриття з основою; σ_y – дотичні напруження, що руйнують зчеплення; l_0 та l_0^* – лінійний розмір дефекту структури і розмір дефектів, що призводять до локального руйнування.

Вектор технологічних параметрів, які можуть бути задані під час проектування процесу шліфування покриття, включає швидкість круга, поздовжню швидкість оброблюваної деталі, глибину шліфування та кількість проходжень шліфувального круга з цією глибиною, тобто пошук розв'язків поставленої задачі здійснюється для набору допустимих значень вектору $\bar{X} = (V_s, V_w, t_1, n_1, \dots, t_i, n_i)$.

У випадку багатокритеріальної оптимізації розв'язок задачі являє собою певний компроміс, представлений множиною Парето-оптимальних векторів параметрів технологічного процесу. Оскільки наведені умови та критерії оптимальності вимагають значних обчислювальних витрат, на початкових етапах розв'язку було вирішено реалізувати паралельний генетичний алгоритм із подальшим зведенням отриманих результатів у спільну множину батьківських особин.

Паралельний еволюційний алгоритм передбачає формування двох підгруп на множині допустимих розв'язків, у межах яких здійснюється пошук особин відповідно до їхньої пристосованості за критеріями Z_1 та Z_2 . На кожній ітерації виконуються оператори селекції, схрещування та мутації хромосом, властиві класичному генетичному алгоритму. Крім того, перевіряється умова міграції особин між підгрупами, необхідна для формування спільної множини перспективних розв'язків. У якості умови міграції може розглядатися номер ітерації або ступінь збіжності хромосом у підгрупі. Коли пошук Парето-оптимальних рішень у різних підгрупах зосереджується в деякій спільній області простору допустимих розв'язків, представляється доцільним перейти до розгляду загальної оптимізації за критеріями (18) та (19) шляхом побудови адитивної згортки згідно з методом зваженої суми критеріїв. Відтак, комплексний критерій оптимальності матиме наступний вигляд:

$$Z = w_1 \cdot Z_1 - w_2 \cdot Z_2 \quad (21)$$

В залежності від пріоритету того чи іншого критерію при нанесенні покриття та його обробці, значення коефіцієнтів обирають таким чином, щоб вони знаходились у межах $[0; 1]$, а їхня сума $w_1 + w_2 = 1$. Вагові коефіцієнти можуть бути задані в явному вигляді або визначені аналітично у такий спосіб, щоб направити еволюційний пошук у напрямку оптимального рішення. Для оцінки значень вагових коефіцієнтів слід розглянути множину перспективних розв'язків та їхню пристосованість з точки зору критеріїв оптимальності (рис. 3).

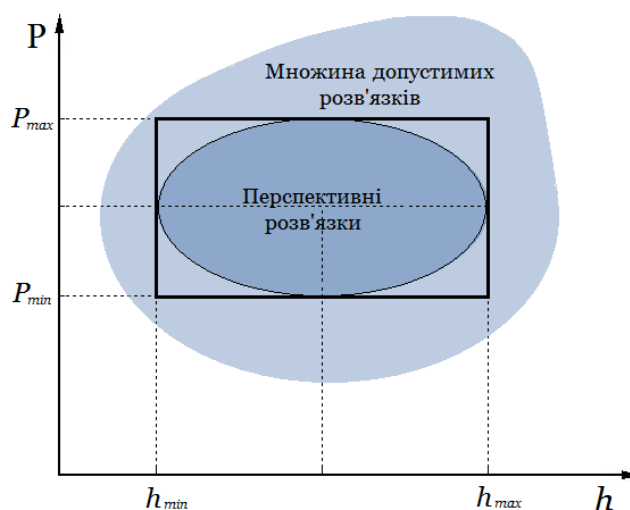


Рисунок 3 – Пристосованість розв'язків в просторі критеріїв оптимальності

Для кожного з критеріїв оптимальності вагові коефіцієнти розраховуються за формулами:

$$w_1 = \frac{1}{P_{\max} - P_{\min}}; \quad w_2 = \frac{1}{h_{\max} - h_{\min}}. \quad (22)$$

Оскільки координати екстремальних точок (P_{\max}, h_{\max}) ; (P_{\max}, h_{\min}) ; (P_{\min}, h_{\min}) ; (P_{\min}, h_{\max}) змінюються протягом усього розв'язку задачі, значення вагових коефіцієнтів оновлюватимуться на кожній ітерації оптимізаційного процесу. Таким чином, вага критеріїв оптимальності адаптуватиметься відповідно до напрямку ідеальної точки на кожному етапі генетичного алгоритму.

Селекція батьківських особин на етапі загальної оптимізації за комплексним критерієм (21) повинна сприяти стабільності еволюційного пошуку та запобігати виродженню популяції до досягнення глобального екстремуму. Для задачі оптимізації параметрів шліфування необхідно також враховувати особливості технологічного процесу обробки покриттів. Принцип формування кожної наступної популяції в межах комбінованого підходу до селекції особин з різним ступенем пристосованості, що ґрунтується на стратегії елітизму та мутації найменш життєздатних хромосом, наведений на рис. 4.

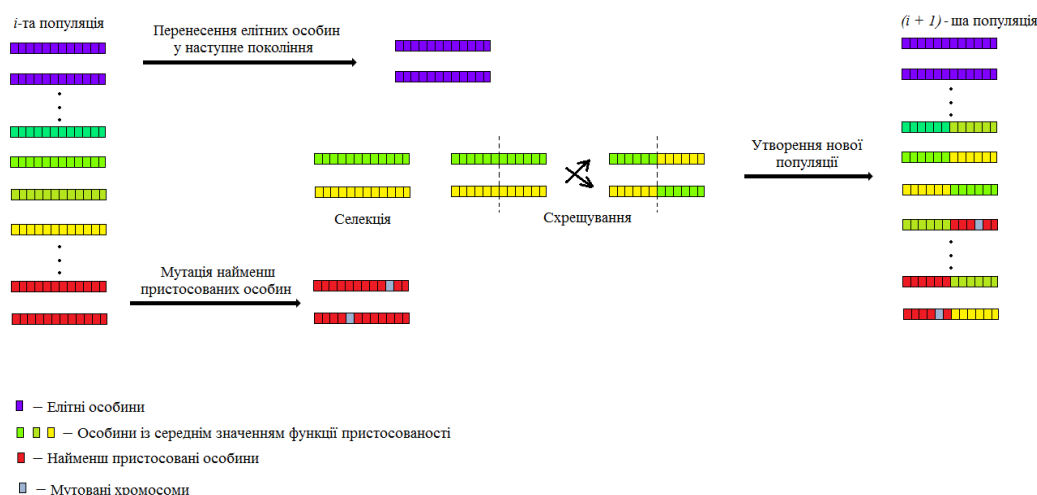


Рисунок 4 – Схема комбінованого підходу до утворення нової популяції

Загальний вигляд модифікованого генетичного алгоритму для оптимізації процесу шліфування плазмових покриттів представлений на рис. 5.

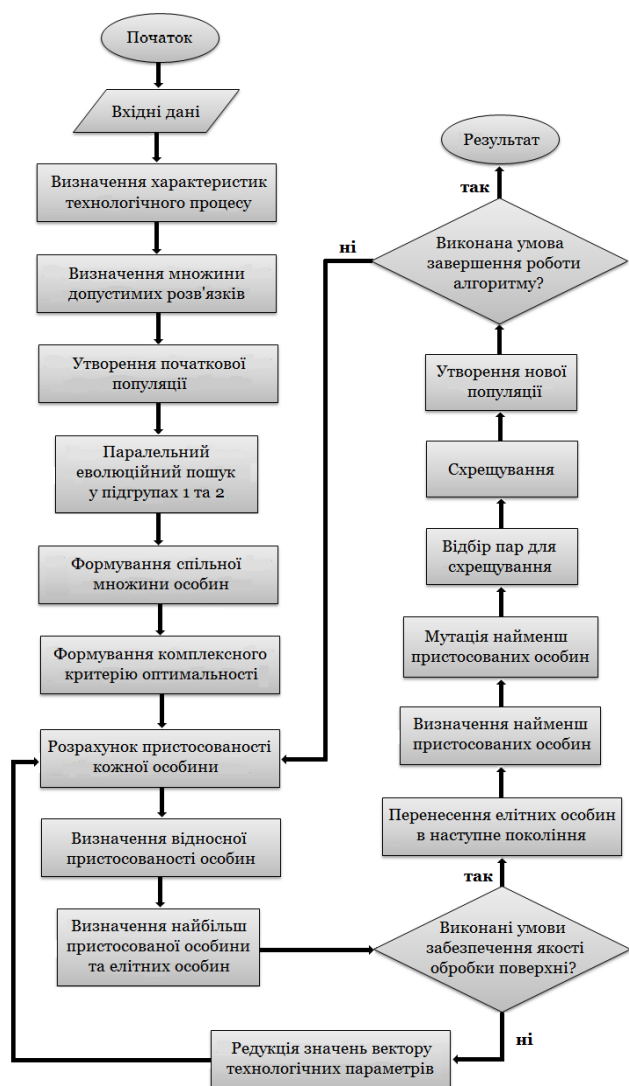


Рисунок 5 – Модифікований генетичний алгоритм оптимізації процесу шліфування плазмових покриттів

У випадку, якщо на певному етапі розв'язку задачі оптимізації процесу шліфування плазмових покриттів умови забезпечення якості обробки поверхні не виконуються, необхідно зменшити значення вектору технологічних параметрів \bar{X} на мінімальну величину Δ , яку дозволяє заданий шліфувальний верстат. Таким чином відбуватиметься редукція $(V_s - \Delta V_s, V_w - \Delta V_w, t_1 - \Delta t_1, n_1, \dots, t_i - \Delta t_i, n_i)$ доти, поки умови забезпечення якості обробки поверхні не будуть виконані.

Для того, щоб порівняти ефективність роботи модифікованого генетичного алгоритму з результатами роботи класичного генетичного алгоритму та інших еволюційних методів, що використовуються для оптимізації процесу шліфування, були проведені дослідження алгоритмів з огляду на їхню надійність, тобто частку успішних запусків, та середню кількість ітерацій, протягом яких було знайдено розв'язок поставленої задачі. Надійність алгоритмів для заданих параметрів досліджених еволюційних методів виявилась практично однаковою, тому більш ефективним вважався алгоритм з меншою часовою складністю.

На пошук оптимального рішення даної задачі за допомогою модифікованого генетичного алгоритму в середньому знадобилося біля 44 секунд проти 110 секунд для класичного генетичного алгоритму, 79 секунд для методу мурашиної колонії, 83 та 66 секунд для методу рою часток і методу розсіювання відповідно. Таким чином, застосування модифікованого генетичного алгоритму дає можливість скоротити час, необхідний для визначення оптимального рішення.

Четвертий розділ присвячений розробці системи САПР шліфування плазмових покриттів, програмній реалізації запропонованих математичних моделей та методів, а також результатам практичного застосування створеної САПР.

Для вибору оптимальних параметрів режиму обробки плазмових покриттів розроблено САПР «PLASMOSHLIF», яка складається з блоку задання вхідних

даних, інформаційної підсистеми, підсистем аналізу, моделювання, оптимізації та контролю параметрів режиму шліфування (рис. 6).



Рисунок 6 – Схема взаємозв'язків між модулями в розробленій САПР ТП шліфування плазмових покриттів

При програмній реалізації САПР «PLASMOSHLIF» підсистему моделювання процесу шліфування плазмових покриттів, підсистему вибору оптимальних параметрів шліфування та підсистему контролю було об'єднано в програмному пакеті модулів, у межах кожного з яких передбачений аналіз необхідних для вирішення певної задачі характеристик. Отримані результати у вигляді набору розв'язків задачі оптимізації, графіків та протоколу роботи алгоритму відображаються через інтерфейс користувача. Додатковий модуль вироблення рекомендацій щодо характеристик шліфувального круга дозволяє визначити абразивний матеріал, твердість, зернистість, структуру та зв'язку шліфувального круга, щоб запобігти утворенню налипань та виривів, а також шліфувальних тріщин під час обробки плазмового покриття кругом з недостатньою твердістю. На рис. 7 наведена загальна структура розробленої САПР шліфування плазмових покриттів.

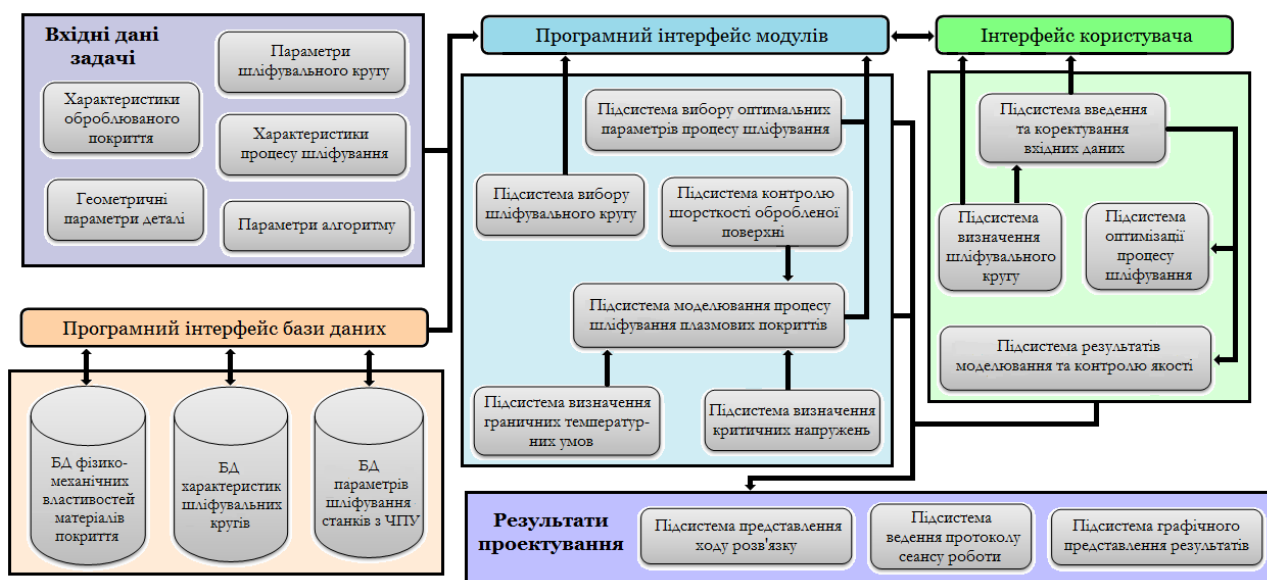


Рисунок 7 – Структура САПР шліфування плазмових покриттів

В результаті практичних випробувань САПР «PLASMOSHIF», створеної на основі математичної моделі термомеханічного стану деталей при шліфуванні плазмових покриттів та модифікованому генетичному алгоритмі оптимізації параметрів обробки, вдалося підвищити продуктивність технологічного процесу шліфування на 12 %. Впровадження розробленої САПР у холдинговій компанії «Мікрон» дозволило також зменшити кількість деталей зі шліфувальними дефектами на 18 %, що свідчить про успішність виконання умов забезпечення якості обробки поверхні.

ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу існуючих САПР виявлено, що техніка розрахунку, покладена в основу їхнього програмного забезпечення, призводить до суттєвих відхилень при проектуванні процесу шліфування деталей з плазмовим покриттям, які можуть стати причиною утворення поверхневих та структурних дефектів в нанесеному шарі. Особливості обробки плазмових покриттів потребують вдосконалення математичної моделі температурного поля та напружено-деформованого стану деталі з покриттям в процесі шліфування, а вибір оптимальних параметрів режиму обробки повинен ґрунтуватися на методі оптимізації, що враховує складність процесу та велику кількість обмежуючих умов.

2. Розроблена математична модель термомеханічного стану плазмових покриттів в процесі шліфування враховує вплив структурних неоднорідностей нанесеного шару за допомогою додаткових умов, що накладаються на компоненти зміщень та напружень деформаційного поля деталі. Забезпечення якості обробки поверхні передбачає обмеження значень температур та напружень, що спричиняють утворення дефектів та руйнування покриття, а також досягнення заданої шорсткості поверхні.

3. Для виконання умов бездефектної обробки плазмового покриття визначена залежність між параметрами режиму напилювання та пористістю нанесеного матеріалу, а також чинники, що впливають на утворення адгезійних зв'язків між

основою та шаром покриття. Експериментальні результати підтверджують теоретичні обґрунтування запропонованих оцінок пористості плазмового покриття та адгезійної міцності його зчеплення з основою.

4. Модифікований генетичний алгоритм, розроблений для оптимізації процесу шліфування плазмових покриттів та побудови САПР процесу обробки, створено на основі паралельного еволюційного пошуку та комбінованого підходу до селекції особин з різним ступенем пристосованості. Порівняння результатів роботи модифікованого генетичного алгоритму з іншими еволюційними методами оптимізації виявило скорочення часу, необхідного для визначення оптимального рішення без зниження надійності розв'язку задачі.

5. Результати імітаційного моделювання температурного поля деталі з покриттям добре узгоджуються з емпіричними даними, а оцінка відхилення теоретичних значень температур від результатів експерименту дозволяє стверджувати, що моделювання температурного поля деталі з покриттям в процесі шліфування краще наближує експериментальні дані, ніж моделювання температурного поля для деталі із суцільною структурою.

6. На основі математичної моделі термомеханічного стану, умов бездефектної обробки та модифікованого методу генетичного алгоритму розроблено САПР технологічного процесу шліфування плазмових покриттів «PLASMOSHLIF», що складається з блоку задання вхідних даних, інформаційної підсистеми, підсистем аналізу, моделювання, оптимізації та контролю параметрів режиму шліфування. Випробування створеної САПР проводилося для визначення параметрів режиму обробки плазмових покриттів на основі композиційних матеріалів з надтвердою фазою, для яких вдалося зменшити число поверхневих та структурних дефектів та визначити оптимальні параметри шліфування.

7. Впровадження розробленої системи САПР «PLASMOSHLIF» в Одеській холдинговій компанії «Мікрон» при шліфуванні деталей типу вал дозволило знизити кількість бракованих деталей на 18 % при збільшенні продуктивності технологічного процесу обробки на 12 %. Розрахунковий економічний ефект від впровадження складає 27 000 грн. на рік.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття в іноземних виданнях

1. Usov A.V., Tonkonogyi V.M., Dašić P.V., Rybak O.V. Modelling of Temperature Field and Stress–Strain State of the Workpiece with Plasma Coatings during Surface Grinding // Machines. MDPI, Basel, Switzerland. – 2019. – Vol. 7, Is. 1. – 15 p.

Статті у наукових фахових виданнях

2. Тонконогий В.М., Рибак О.В. Моделювання та експериментальне дослідження процесів теплопередачі при шліфуванні деталей з плазмовим покриттям // Різання та інструмент в технологічних системах. Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – Вип. 90. – С. 100-108. (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Ulrichsweb Global Serials Directory).

3. Тонконогий В.М., Рибак О.В. Вибір параметрів шліфування плазмових покриттів при багатокритеріальній оптимізації технологічного процесу // Сучасні

технології в машинобудуванні. Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – Вип. 13. – С. 60-68. (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Ulrichsweb Global Serials Directory).

4. Усов А.В., Тонконогий В.М., Рибак О.В. Розробка САПР технологічного процесу шліфування плазмових покриттів // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. Краматорськ, ДДМА. – 2018. – № 1 (43). – С. 188-192.

5. Тонконогий В.М., Сіньковський А.С., Рибак О.В. Аналіз характеристик композиційних порошків для плазмового напилювання на основі TiC – Ni(P) – Cu при розробці САПР ТП шліфування покриттів // Резание и инструменты в технологических системах. Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – Вип. 88. – С. 216-223. (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Ulrichsweb Global Serials Directory)

6. Сіньковський А.С., Янюк М.Ф., Рибак О.В. Високотемпературні теплоізоляційні матеріали на основі віскерів карбіду кремнію, вирощених методом хімічних транспортних реакцій // Високі технології в машинобудуванні. Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 1. – С. 131-138.

7. Тонконогий В.М., Сіньковський А.С., Рибак О.В. Врахування властивостей композиційних порошків на основі TiC, плакованого Ni(P), при розробці САПР ТП // Сучасні технології в машинобудуванні. Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – Вип. 12. – С. 31-40. (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Ulrichsweb Global Serials Directory)

Матеріали конференцій та інші видання

8. Tonkonogiy V., Usov A., Dašić P., Rybak O., Bovnegra L. Modeling of Temperature Field and Stress-Strain State of the Workpiece with Plasma Coatings During Surface Grinding // Journal of Research and Development in Mechanical Industry (JRaDMI). Vrnjačka Banja, Serbia. – 2018. – Vol. 10, Is. 2. – P. 81-90.

9. Усов А.В., Тонконогий В.М., Рибак О.В. Розробка САПР технологічного процесу шліфування плазмових покриттів // Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку». Краматорськ: ДДМА. – 2018. – С. 84.

10. Сіньковський А.С., Рибак О.В. Композиційні порошкові матеріали на основі карбіду вольфраму для газотермічного напилювання // Матеріали Міжнародної Інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2016)». Вінниця: ВНТУ. – 2016. – С. 179-181.

11. Сіньковський А.С., Янюк Н.Ф., Рибак О.В. Високотемпературна вата на основі монокристаллов карбіда кремнію // Conference proceedings of the International Scientific and Methodological Conference «University Science – 2016». – Mariupol: Priazovskiy State Technical University. – 2016. – С. 129-131.

12. Юхименко Б.И., Рыбак О.В. Математическая модель определения оптимальной стратегии размещения атомных электростанций в регионе // Матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перший крок у науку». Том 2. Луганськ: ЛНУ ім. Тараса Шевченка. – 2014. – С. 506-512.

АНОТАЦІЯ

Рибак О.В. Математичне моделювання, аналіз та оптимізація в САПР технологічного процесу шліфування плазмових покриттів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – Системи автоматизації проектувальних робіт. – Одеський національний політехнічний університет, Міністерство освіти і науки України, Одеса, 2019.

Дисертація присвячена розробці САПР процесу шліфування плазмових покриттів. При проектуванні термомеханічного стану та пошуку оптимальних параметрів обробки плазмових покриттів існуючі САПР призводять до значних відхилень. В процесі шліфування високі значення температур та напружень, що виникають в нанесеному шарі, можуть стати причиною утворення поверхневих та структурних дефектів, таких як шліфувальні припалення та тріщини, фазові перетворення матеріалу покриття та відшаровування нанесеного шару від основи.

Для того, щоб попередити виникнення та розвиток шліфувальних дефектів, розроблено математичну модель температурного поля та напружено-деформованого стану деталі з покриттям в процесі шліфування. Побудована математична модель дозволяє визначити функціональні взаємозв'язки між технологічними параметрами обробки поверхні та умовами бездефектного шліфування, спираючись на температурні залежності, критерії міцності та руйнування. Виходячи з особливостей процесу плазмового напилювання, запропоновано оцінку пористості нанесених покриттів, а також міцності зчеплення покриття з основою для врахування впливу неоднорідностей структури поверхневого шару. Дослідження розподілу температур при шліфуванні деталей з покриттям доводять, що теоретичні розрахунки на основі представленої моделі виявляються досить близькими до експериментальних результатів.

Задача визначення оптимальних параметрів шліфування плазмових покриттів передбачає досягнення максимальної продуктивності при мінімальних втратах матеріалу покриття на припуски і може бути представлена як задача багатокритеріальної оптимізації з набором обмежуючих умов, що забезпечують необхідну якість обробки поверхні. Розв'язок даної задачі потребує застосування еволюційних методів, таких як генетичні алгоритми, що дозволяють знайти набір оптимальних векторів технологічних параметрів режиму обробки. З огляду на особливості процесу шліфування плазмових покриттів, запропоновано модифікований генетичний алгоритм оптимізації, який враховує властивості нанесеного матеріалу, шліфувального круга та режимів обробки, а також характеристики шліфувального верстата. Розроблений алгоритм базується на паралельному еволюційному пошуку та комбінованому підході до селекції особин з різним ступенем пристосованості для забезпечення різноманітності популяції та запобігання передчасної збіжності. Результати роботи модифікованого генетичного алгоритму порівняно з іншими еволюційними методами при пошуку оптимальних параметрів шліфування плазмових покриттів. Експериментальні дослідження

підтвердили ефективність модифікованого генетичного алгоритму зі збереженням надійності розв'язку задачі.

На основі побудованої математичної моделі температурного поля та напружено-деформованого стану нанесеного шару в процесі шліфування, а також модифікованого генетичного алгоритму для вибору оптимальних параметрів обробки створено САПР технологічного процесу шліфування плазмових покриттів. Проведено виробничі випробування розробленої САПР «PLASMOSHLIF» із позитивним технічним ефектом.

Ключові слова: математична модель, плазмові покриття, шліфування, система автоматизованого проектування, якість обробки поверхні, термомеханічний стан, багатокритеріальна оптимізація.

АННОТАЦИЯ

Рыбак О.В. Математическое моделирование, анализ и оптимизация в САПР технологического процесса шлифования плазменных покрытий. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектных работ. – Одесский национальный политехнический университет, Министерство образования и науки Украины, Одесса, 2019.

Диссертация посвящена разработке САПР процесса шлифования плазменных покрытий. При проектировании термомеханического состояния и поиске оптимальных параметров обработки плазменных покрытий существующие САПР приводят к значительным отклонениям. В процессе шлифования высокие значения температур и напряжений, возникающих в нанесенном слое, могут стать причиной образования поверхностных и структурных дефектов, таких как шлифовальные прижоги и трещины, фазовые превращения и отслоя нанесенного покрытия от основы.

Для того, чтобы предотвратить появление и развитие шлифовальных дефектов, разработана математическая модель температурного поля и напряженно-деформированного состояния детали с покрытием в процессе шлифования. Созданная математическая модель позволяет определить функциональные зависимости между технологическими параметрами обработки поверхности и условиями бездефектного шлифования, основываясь на ограничении температур, критерии прочности и разрушения. Учитывая особенности процесса плазменного напыления, предложена оценка пористости нанесенных покрытий, а также прочности сцепления покрытия с основой для анализа влияния неоднородностей структуры поверхностного слоя. Исследование распределения температур при шлифовании деталей с покрытием доказали, что теоретические расчеты на основе представленной модели оказываются достаточно близки к экспериментальным результатам.

Задача определения оптимальных параметров шлифования плазменных покрытий предполагает достижение максимальной продуктивности при минимальной потере материала покрытия на припуски и может быть представлена как задача многокритериальной оптимизации с набором ограничивающих условий,

которые обеспечивают необходимое качество обработки поверхности. Решение данной задачи требует применения эволюционных методов, таких как генетические алгоритмы, позволяющих найти набор оптимальных векторов технологических параметров режима обработки. Ввиду особенностей процесса шлифования плазменных покрытий, предложен модифицированный генетический алгоритм оптимизации, который учитывает свойства нанесенного материала, шлифовального круга и режимов обработки, а также характеристики шлифовального станка. Разработанный алгоритм основывается на параллельном эволюционном поиске и комбинированном подходе к селекции особей с разным уровнем приспособленности для обеспечения разнообразия популяции и предотвращения преждевременной сходимости. Результаты работы модифицированного генетического алгоритма сравнили с другими эволюционными методами при поиске оптимальных параметров шлифования плазменных покрытий. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность модифицированного генетического алгоритма при сохранении надежности решения задачи.

На основе построенной математической модели температурного поля и напряженно-деформированного состояния нанесенного слоя в процессе шлифования, а также модифицированного генетического алгоритма для выбора оптимальных параметров обработки создана САПР технологического процесса шлифования плазменных покрытий. Проведены производственные испытания разработанной САПР «PLASMOSHLIF» с положительным техническим эффектом.

Ключевые слова: математическая модель, плазменные покрытия, шлифование, система автоматизированного проектирования, качество обработки поверхности, термомеханическое состояние, многокритериальная оптимизация.

ABSTRACT

Rybak O.V. Mathematical modelling, analysis and optimization in CAD of technological process of grinding plasma coatings. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.13.12 – Aided design systems. – Odessa National Polytechnic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2019.

The presented thesis is focused on the process of grinding plasma coatings CAD development. Analysis of the existing CAD systems revealed considerable deviations from practical results of plasma coatings grinding. Therefore, high values of temperatures and stresses generated in the surface layer during its grinding may cause different defects such as grinding burns and cracks, structural changes of the coating material and the destruction of adhesive contacts between the coating layer and the substrate.

In order to prevent grinding defects generation and propagation, mathematical model of the temperature field and the stress-strain state of the workpiece with plasma coatings in the process of grinding is developed. Based on the temperature, strength and fracture criteria, this mathematical model makes it possible to determine functional relationship between technological parameters of surface processing and the conditions of zero-defect grinding. Due to the special features of plasma coatings, structural heterogeneities generated while coatings are being sprayed, as well as coating adhesion are

also considered. Research of the temperature field profile appeared to be quite close to theoretical calculations based on the presented model.

Definition of the optimal parameters for grinding plasma coatings may be considered as multi-objective optimization problem with a system of conditions that provide the required quality of surface processing. This approach demands for applying evolutionary algorithms such as genetic algorithm to solve the stated problem. Taking into account special characteristics of the considered technological process, modification of the classical genetic algorithm for optimization of plasma coatings grinding is presented in this thesis. The developed algorithm is based on the parallel evolutionary search and combined method of selection for chromosomes with different values of the fitness function. In order to ensure population diversity and prevent premature convergence, a number of testings have been carried out comparing results of optimization of plasma coatings grinding parameters using modified genetic algorithm to other evolutionary methods. These experiments have proved that applying modified genetic algorithm provides high efficiency of solving process and reliability of the obtained results.

On the basis of the presented mathematical model of the temperature thermal field and the stress-strain state of the surface layer during its grinding as well as the modified genetic algorithm for optimal technological parameters search, CAD system of the plasma coatings grinding process has been developed. Experimental testings of the presented «PLASMOSHLIF» CAD system have been successful, so it was accepted to implementation in industry.

Keywords: mathematical model, plasma coatings, grinding, computer-aided design, surface quality, thermomechanical state, multi-objective optimization.