

РОЗРОБКА МОДИФІКОВАНОГО ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПЛОСКОГО ШЛІФУВАННЯ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ

¹Національний університет «Одеська політехніка», Одеса

Шліфування поверхонь з нанесеним плазмовим покриттям передбачає досягнення заданої точності та шорсткості деталі і водночас має на меті унеможливлення утворення та розвитку дефектів, таких як тріщини, сколювання, припикання, відшаровування покриття від основи тощо.

Розглянуто оптимізацію технологічного процесу плоского шліфування, яка полягає у пошуку таких параметрів обробки, за яких досягається максимальна продуктивність за мінімальної втрати матеріалу покриття. Для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації з великою кількістю обмежувальних умов запропоновано використовувати еволюційний пошук параметрів на множині допустимих режимів технологічного процесу обробки. Оскільки наведені умови та критерії оптимальності вимагають значних обчислювальних витрат, на початкових етапах розв'язання вирішено реалізувати паралельний генетичний алгоритм. Коли пошук Парето-оптимальних рішень у різних підгрупах зосереджується в деякій спільній області простору допустимих розв'язків, то пропонується перейти до розгляду загальної оптимізації шляхом побудови адитивної згортки згідно з методом зваженої суми критеріїв. Враховуючи характеристики процесу плоского шліфування та умови забезпечення якості оброблення поверхні, запропоновано модифікований генетичний алгоритм для системи автоматизованого проектування процесу шліфування плазмових покриттів. Пошук оптимального рішення відбувається у просторі параметрів, що визначається швидкістю та глибиною різання, властивостями покриття та шліфувального круга, основним часом обробки, температурою в зоні обробки, величиною і знаком поверхневих напружень тощо. Порівняння результатів роботи модифікованого генетичного алгоритму з класичним генетичним алгоритмом та іншими еволюційними методами, що використовуються для оптимізації процесу шліфування, проводилось шляхом серії випробувань з метою оцінювання швидкості їхньої збіжності. Дослідження виявило скорочення часу, необхідного для визначення оптимального рішення, без зниження надійності розв'язку задачі, що підтверджує перевагу модифікованого генетичного алгоритму під час пошуку оптимальних технологічних параметрів шліфування плазмових покриттів.

Ключові слова: плоске шліфування, плазмові покриття, багатокритеріальна оптимізація, еволюційний пошук, генетичний алгоритм.

Вступ

Одним з інноваційних шляхів поліпшення експлуатаційних властивостей машин є нанесення плазмових покриттів на робочі поверхні деталей, що набуває все більшого поширення в сучасній промисловості. Окрім додаткових можливостей, які відкриває інженерія робочих поверхонь з погляду функціональності готових виробів, важливу роль для промисловості відіграє економічна доцільність напилення плазмових покриттів. Поверхневий шар значною мірою визначає фізичні та хімічні властивості деталі під час її експлуатації, що дозволяє уникнути виробництва суцільної деталі з вартісних та дефіцитних матеріалів. В процесі шліфування поверхонь деталей з плазмовим покриттям існує ризик утворення та розвитку дефектів таких як тріщини, сколювання, припикання, відшаровування покриття від основи та ін. Зазначені дефекти унеможливають подальше використання отриманих виробів, що, зі свого боку, призводить до економічних збитків. Разом з обмеженнями, пов'язаними з розвитком дефектів, забезпечення якості обробленої поверхні включає вимоги щодо заданої точності та шорсткості готової деталі. Таким чином, на вибір параметрів процесу шліфування плазмових покриттів впливає велика кількість факторів.

Вибір параметрів технологічного процесу обробки плазмових покриттів передбачає оптиміза-

цію продуктивності та зменшення втрат матеріалу покриття під час шліфування. Перспективним напрямком розв'язання складної оптимізаційної задачі з великою кількістю параметрів та технологічних обмежень є застосування еволюційних методів, за допомогою яких можна визначити оптимальні режими роботи для кожного конкретного способу шліфування, матеріалу та розмірів шліфувального круга та інших умов. Перевага таких методів, зокрема генетичного алгоритму, полягає в тому, що результат, отриманий на початковій стадії, поступово уточнюється на основі аналізу попередніх рішень. Така схема розв'язання оптимізаційної задачі дозволяє знайти велику кількість перспективних варіантів, які містяться у сформованій базі даних проектування режимів технологічного процесу обробки.

Приклади розв'язання задачі вибору оптимальних параметрів процесу шліфування за допомогою багатокритеріального еволюційного алгоритму, подані у попередніх дослідженнях [1]–[5], проводились для зразків, що мають суцільну структуру. Як матеріал оброблюваної заготовки зазвичай використовувалась конструкційна сталь, з невисокою вартістю, а тому втрата матеріалу в процесі шліфування не впливає на ціноутворення готової продукції. Натомість, матеріали плазмових покриттів часто характеризуються високою вартістю і дефіцитністю, а тому є головними факторами ціноутворення, що матиме вплив на формулювання критерію оптимізації. Крім того, під час шліфування плазмових покриттів слід враховувати різні властивості матеріалу покриття та основи, а також можливість розриву адгезійних зв'язків та відшаровування покриття від основного матеріалу деталі. У статті запропоновано генетичний алгоритм для системи автоматизованого проектування шліфувальних операцій, покликаний визначити оптимальні параметри шліфування в процесі обробки плазмових покриттів.

Мета роботи полягає у розробці модифікованого генетичного алгоритму для пошуку оптимальних параметрів плоского шліфування плазмових покриттів.

Результати дослідження

Оптимізація процесу плоского шліфування плазмових покриттів передбачає пошук таких параметрів обробки, які одночасно відповідають критеріям максимізації продуктивності шліфування за мінімальних втрат матеріалу покриття на припуски і забезпечують необхідну якість поверхні [6], [7].

$$P \rightarrow \max ; \quad (1)$$

$$\delta \rightarrow \min . \quad (2)$$

$$\begin{cases} R_a \leq R_a^*, \\ \varepsilon_T \leq \varepsilon_T^*, \\ T(x) \leq T_{\max}, \\ \sigma_{\max}(x, \tau) \leq \sigma_{\lim}, \\ \sigma_y < \theta_{adh}, \\ \ell_0 < \ell_0^*, \end{cases} \quad (3)$$

де P — продуктивність обробки деталей з покриттям; δ — величина припуску на шліфування; 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 під час шліфування і максимальна температура, за якої можливо уникнути припикань на поверхні деталі з покриттям; σ_{\max} — максимальне значення локальних напружень; σ_{\lim} — поверхневі напруження, за 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.

У цьому випадку розв'язок задачі є певним компромісом, представленим множиною Парето-оптимальних векторів параметрів технологічного процесу. Оскільки наведені умови та критерії оптимальності вимагають значних обчислювальних витрат, на початкових етапах розв'язання вирішено реалізувати паралельний генетичний алгоритм за рахунок кластерної системи з подальшим зведенням отриманих результатів у спільну множину батьківських особин. Такий підхід передба-

час рівномірний розподіл популяції між процесорами системи та незалежне виконання еволюційного пошуку кожним з цих процесорів [8].

Перевагою паралельного генетичного алгоритму є те, що в межах окремих підгруп в різних частинах простору допустимих розв'язків здійснюється відносно незалежний пошук найкращих рішень, які за певних умов обмінюються між популяціями. Відбір хромосом для схрещування відбувається за принципом турнірної селекції, причому краща особина в кожній підгрупі обирається на основі критерію оптимальності, закріпленого для цієї підгрупи. Таким чином, окремі підгрупи поступово зосереджують паралельний пошук в області, перспективній з погляду обох критеріїв оптимальності. Це дозволить зменшити обчислювальні витрати, необхідні для розв'язання оптимізаційної задачі з нелінійними цільовими функціями та складними обмежувальними умовами, а також знизити ймовірність передчасної збіжності до локального екстремуму.

Основний недолік паралельних генетичних алгоритмів полягає у тому, що на певному етапі розв'язання ефективність оптимізації поступово знижується [9]. Отже, коли пошук Парето-оптимальних рішень у різних підгрупах зосереджується в деякій спільній області простору допустимих розв'язків, вважається доцільним перейти до розгляду загальної оптимізації за критеріями продуктивності обробки та мінімізації втрат матеріалу покриття шляхом побудови адитивної згортки згідно з методом зваженої суми критеріїв. Для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації в цьому випадку може бути побудована адитивна функція, яка є сумою критеріїв, зважених коефіцієнтами відносно ступеня їхньої важливості. Відтак, комплексний критерій оптимальності матиме такий вигляд:

$$Z = w_1 Z_1 - w_2 Z_2. \quad (4)$$

де $Z_1 = P$ — продуктивність технологічного процесу; $Z_2 = \delta$ — втрата матеріалу покриття; w_1 та w_2 — вагові коефіцієнти, які можуть бути задані в явному вигляді або визначені аналітично у такий спосіб, щоб направити еволюційний пошук у напрямку оптимального рішення. В залежності від пріоритету будь-якого критерію при нанесенні покриття та його обробці, значення коефіцієнтів вибирають таким чином, щоб вони знаходились у межах $[0; 1]$, а їхня сума $w_1 + w_2 = 1$.

Селекція батьківських особин на етапі загальної оптимізації за комплексним критерієм (4) повинна сприяти стабільності еволюційного пошуку та запобігати виродженню популяції до досягнення глобального екстремуму. Для задачі оптимізації параметрів шліфування метод селекції має також враховувати особливості технологічного процесу обробки покриттів.

Під час розв'язання задачі оптимізації процесу плоского шліфування плазмових покриттів разом з умовами підтримки різноманітності та попередження передчасної збіжності особливе значення відіграють умови забезпечення якості оброблення поверхні. У випадку, якщо на певному етапі розв'язання умови забезпечення якості оброблення не виконуються, необхідно зменшити значення вектора технологічних параметрів \bar{X} на мінімальну величину Δ , яку дозволяє заданий шліфувальний верстат. Таким чином, відбуватиметься редукція значень керувальних параметрів допоки показники якості обробленої поверхні не будуть забезпечені [10].

Умови забезпечення якості оброблення поверхні визначаються в залежності від характеристик оброблюваного покриття, параметрів шліфувального круга та геометрії деталі. Важливу роль для утворення початкової популяції та формування множини допустимих розв'язків також відіграє вибір шліфувального верстата, який задає обмеження значень швидкості оброблення та інші важливі параметри процесу плоского шліфування. Інформація, що використовується для розрахунків під час розв'язання поставленої задачі, міститься у відповідних базах даних інформаційної системи проектування процесу оброблення плазмових покриттів. На рис. 1 показано послідовність дій для отримання всіх необхідних відомостей перед початком розв'язання задачі.

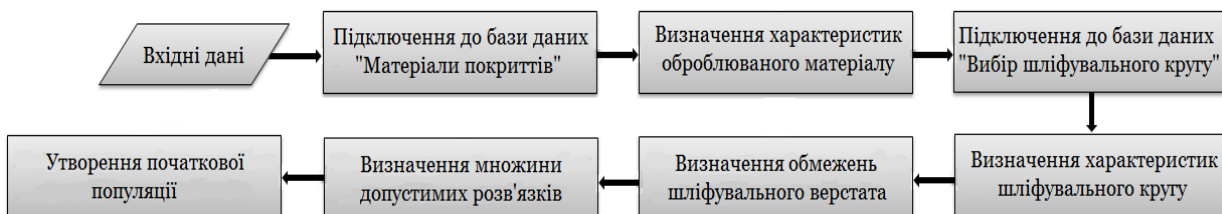


Рис. 1. Визначення характеристик процесу плоского шліфування плазмових покриттів

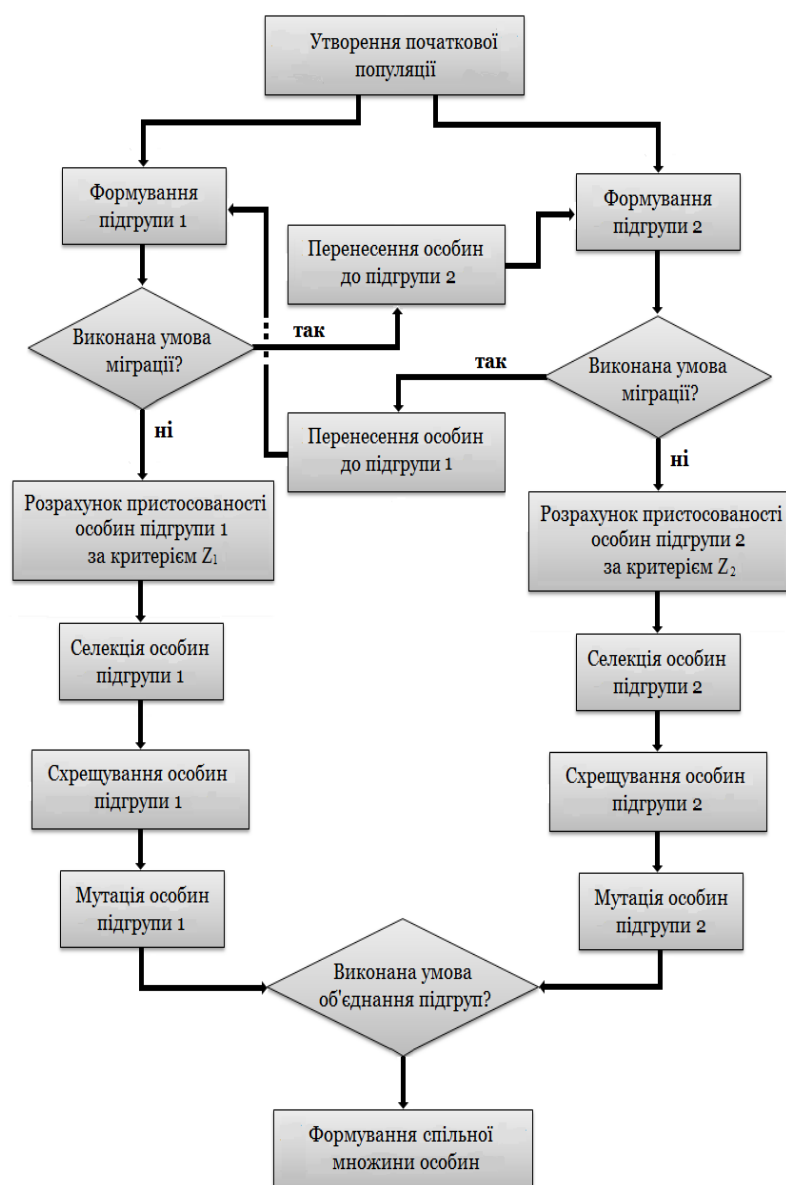


Рис. 2. Паралельний еволюційний пошук

Для того, щоб порівняти ефективність роботи модифікованого генетичного алгоритму з результатами роботи класичного генетичного алгоритму та інших еволюційних методів, що використовуються для оптимізації процесу плоского шліфування, проведено серію випробувань з метою оцінювання швидкості їхньої збіжності. Значення цільової функції на кожній ітерації визначалося відносно максимального значення, отриманого в результаті розв'язання задачі. Основні параметри роботи досліджених алгоритмів подані у таблиці.

Значення параметрів досліджених алгоритмів

Параметр еволюційного методу	Значення
Розмір популяції	20
Кількість ітерацій	250
Селекція	турнірний відбір
Схрещування	одноточковий кросинговер
Кількість елітних особин	3
Ймовірність мутації	0,30
Ймовірність інверсії	0,05

Паралельний еволюційний алгоритм, що реалізується на початковому етапі оптимізаційного процесу, передбачає формування двох підгруп на множині допустимих розв'язків. В межах цих підгруп 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. Як умова міграції може розглядатися номер ітерації або ступінь збіжності хромосом у підгрупі [11]. Умовою завершення паралельного еволюційного пошуку та об'єднання підгруп є перевірка перетину множини розв'язків у підгрупах. Відповідний алгоритм показаний на рис. 2.

Загальний вигляд модифікованого генетичного алгоритму для оптимізації процесу шліфування плазових покриттів показаний на рис. 3. Блоки, які на рис. 1, 2 представлені детально, на рис. 3 зображені схематично. Умовою завершення роботи алгоритму є досягнення такого рівня збіжності, за якого покращення отриманого результату не спостерігається.

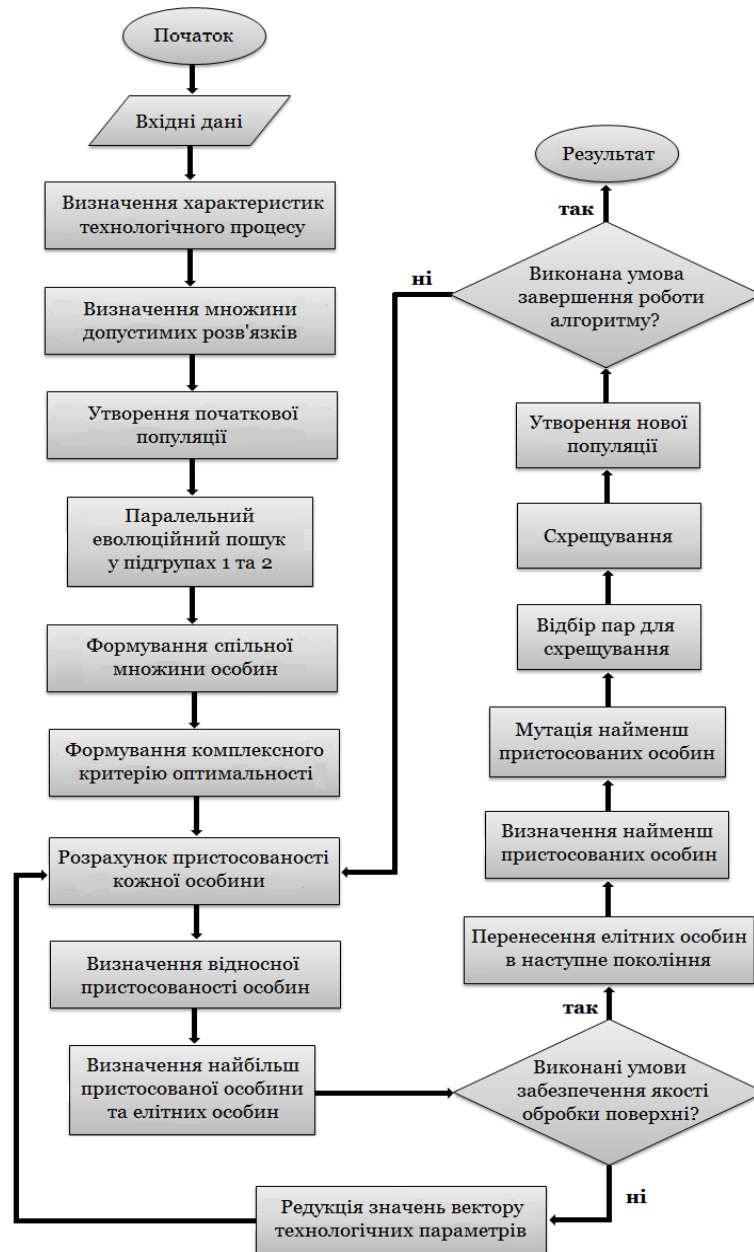


Рис. 3. Модифікований генетичний алгоритм оптимізації процесу плоского шліфування плазмових покриттів

Оцінювання алгоритмів проводилося з огляду на їхню надійність, тобто частку успішних запусків, та середню кількість ітерацій, протягом яких знайдено розв'язок поставленої задачі. Надійність алгоритмів для заданих параметрів досліджених еволюційних методів виявилась практично однаковою, тому ефективнішим вважався алгоритм з меншою часовою складністю. На пошук оптимального розв'язку цієї задачі за допомогою модифікованого генетичного алгоритму в середньому знадобилося близько 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, паралельний еволюційний пошук на початковому етапі роботи алгоритму дає можливість скоротити час, необхідний для визначення оптимального рішення.

Наведені експериментальні дані свідчать про те, що застосування модифікованого генетичного алгоритму, розробленого для процесу плоского шліфування плазмових покриттів, дозволяє значно підвищити результативність розв'язання задачі вибору технологічних параметрів обробки поверхні.

Висновки

Для розв'язання задачі визначення оптимальних параметрів плоского шліфування плазмових покриттів побудовано модифікований генетичний алгоритм, який враховує особливості розгляну-

того технологічного процесу та дозволяє досягти необхідної якості обробленої поверхні. Через нелінійність цільових функцій та складні обмежувальні умови поставленої задачі на початковому етапі розв'язання реалізовано паралельний еволюційний пошук з подальшим зведенням отриманих результатів у спільну множину батьківських особин. Таким чином багатокритеріальний оптимізаційний процес переходить до загальної оптимізації шляхом побудови адитивної згортки згідно з методом зваженої суми критеріїв. Порівняння результатів роботи модифікованого генетичного алгоритму з іншими еволюційними методами оптимізації виявило його перевагу у пошуку оптимальних параметрів процесу плоского шліфування плазмових покриттів. Скорочення часу, необхідного для визначення оптимального рішення без зниження надійності розв'язку задачі, підтверджує ефективність модифікованого генетичного алгоритму для оптимізації процесу плоского шліфування плазмових покриттів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] K. M. Lee, M. R. Hsu, J. H. Chou, and C. Y. Guo, "Improved differential evolution approach for optimization of surface grinding process," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, issue 5, pp. 5680-5686, 2011.
- [2] O. Güven, "Application of the Taguchi method for parameter optimization of the surface grinding process," *Materials Testing*, vol. 57, pp. 43-48, 2015. <https://doi.org/10.3139/120.110674>.
- [3] A. Slowik, and J. Slowik, "Multi-objective optimization of surface grinding process with the use of evolutionary algorithm with remembered Pareto set," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, issue 7, pp. 657-669, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1013-0>.
- [4] P. J. Pawar, R. V. Rao, and J. P. Davim, "Multiobjective optimization of grinding process parameters using particle swarm optimization algorithm," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, issue 6, pp. 424-431, 2010.
- [5] G. Zhang et al., "Multi-objective optimization for surface grinding process using a hybrid particle swarm optimization algorithm," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 71, is. 9-12, pp. 1861-1872, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5571-z>.
- [6] В. М. Тонконогий, і О. В. Рыбак, «Вибір параметрів шліфування плазмових покриттів при багатокритеріальній оптимізації технологічного процесу», *Сучасні технології в машинобудуванні*. Харків: НТУ «ХПШ», вип. 13, с. 60-68, 2018.
- [7] A. V. Usov, V. M. Tonkonogiy, P. V. Dašić, and O. V. Rybak, "Modelling of Temperature Field and Stress-Strain State of the Workpiece with Plasma Coatings during Surface Grinding," *Machines*. MDPI, Basel, Switzerland, vol. 7, is. 1, 15 p. 2019. <https://doi.org/10.3390/machines7010020>.
- [8] P. A. Жуков, і П. В. Плехов, «Реализация параллельного генетического алгоритма на архитектуре NVIDIA CUDA», *Juvenis scientia*, № 3, с. 8-10, 2016.
- [9] E. Cantu-Paz, "Efficient and accurate parallel genetic algorithms," *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, 143 p., 2002. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4369-5>.
- [10] О. В. Рыбак, «Математичне моделювання, аналіз та оптимізація в САПР технологічного процесу шліфування плазмових покриттів.» дис. канд. техн. наук, Одеса: ОНПУ, 2019, 162 с.
- [11] V. Tonkonogiy, P. Dašić, O. Rybak, and T. Lysenko, "Application of the Modified Genetic Algorithm for Optimization of Plasma Coatings Grinding Process," *Springer Nature Switzerland AG 2020. I. Karabegović (Ed.): NT 2019, Lecture Notes in Networks and Systems*, 76, pp. 199-211, 2019.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 13.10.2021

Рыбак Ольга Володимирівна — канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій проектування та дизайну, e-mail: olga.vol.rybak@gmail.com.

Національний університет «Одеська політехніка», Одеса

O. V. Rybak¹

Development of the Modified Genetic Algorithm for Searching Parameters of Plasma Coatings Surface Grinding Process

¹Odesa Polytechnic National University

Grinding surfaces with sprayed plasma coatings implies achieving the specified accuracy and roughness of a finished workpiece, and at the same time is intended to avoid occurring and development of various defects, such as cracks, chipping, grinding burns, peeling the coating off the substrate etc. Optimization of this technological process consists in search-

ing such grinding parameters that provide maximum grinding productivity and minimal loss of the coating material. In order to solve multi-objective optimization problem with large number of limiting conditions, evolutionary parameters search on the set of acceptable regimes of technological process is suggested to be used in this paper. Since presented conditions and optimality criteria require significant computational burden, parallel genetic algorithm is implemented at the initial stages of problem solving. When searching Pareto optimal solutions in different subsets is concentrated in some shared space of feasible solutions, it is suggested to consider general optimization by building an additive function according to the weighted sum criteria method. Depending on the grinding process characteristics and the conditions that ensure quality of surface processing, modified genetic algorithm for the computer-aided design system of plasma coatings grinding process is presented in this paper. Searching for the optimal solution is carried out in the space of system parameters defined by velocity and depth of cut during grinding, features of the sprayed coatings and the grinding wheel, time of processing, temperature, stresses etc. Comparative performance of the modified genetic algorithm with classical genetic algorithm and other evolutionary methods used for grinding process optimization was carried out by set of tests in order to evaluate their convergence rate. This research reveals reducing the time needed to determine optimal solutions without reducing their reliability that confirms an advantage of the modified genetic algorithm for searching optimal technological parameters of plasma coatings grinding process.

Keywords: surface grinding, plasma coatings, multicriteria optimization, evolutionary search, genetic algorithm.

Rybak Olha V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Information Technologies and Design, e-mail: olga.vol.rybak@gmail.com

О. В. Рыбак¹

Разработка модифицированного генетического алгоритма для выбора параметров процесса плоского шлифования плазменных покрытий

¹Национальный университет «Одесская политехника», Одесса

Шлифование поверхностей с нанесенным плазменным покрытием предполагает достижение заданной точности и шероховатости детали и одновременно нацелено на то, чтобы предотвратить образование и развития дефектов, таких как трещины, скалывания, прижигания, отслаивания покрытия от основания и т.п.

Рассмотрена оптимизация технологического процесса плоской шлифовки, которая заключается в поиске таких параметров обработки, при которых достигается максимальная производительность при минимальной потере материала покрытия. Для решения задачи многокритериальной оптимизации с большим количеством ограничительных условий, предложено использовать эволюционный поиск параметров на множестве допустимых режимов технологического процесса обработки. Поскольку приведенные условия и критерии оптимальности требуют значительных вычислительных затрат, на начальных этапах решения реализован параллельный генетический алгоритм. Если поиск Парето-оптимальных решений в разных подгруппах сосредотачивается в некоторой общей области пространства допустимых решений, то предложено перейти к рассмотрению общей оптимизации путем построения аддитивной свертки согласно методу взвешенной суммы критериев. Учитывая характеристики процесса плоской шлифовки и условия качества обработки поверхности, предложен модифицированный генетический алгоритм для системы автоматизированного проектирования процесса шлифования плазменных покрытий. Поиск оптимального решения происходит в пространстве параметров, определяемых скоростью и глубиной резания, свойствами покрытия и шлифовального круга, основным временем обработки, температурой в зоне обработки, величиной и знаком поверхностных напряжений. Сравнение результатов работы модифицированного генетического алгоритма с классическим генетическим алгоритмом и другими эволюционными методами, которые используются для оптимизации процесса шлифования, проводилось путем серии испытаний для оценки скорости их сходимости. Исследование выявило сокращение времени, необходимого для определения оптимального решения, без снижения надежности решения задачи, что подтверждает преимущество модифицированного генетического алгоритма при поиске оптимальных технологических параметров шлифовки плазменных покрытий.

Ключевые слова: плоская шлифовка, плазменные покрытия, многокритериальная оптимизация, эволюционный поиск, генетический алгоритм.

Рыбак Ольга Владимировна — канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий проектирования и дизайна, e-mail: olga.vol.rybak@gmail.com