

УДК 004.78:004.056

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-104-113

Тетяна Смірнова

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПИЛЕННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ

Актуальність теми дослідження. У наш час будь-яка галузь виробництва потребує застосування інформаційних технологій. Виготовлення деталей із покриттями, їх зміцнення та відновлення не є винятком. У цій роботі запропонована формалізація структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи, наведена її реалізація.

Постановка проблеми. Комбінаторна складність технологічного процесу налічує чотири можливих варіанти. Для такої кількості варіантів, є доцільним проведення оптимізації для чотирьох ланцюгів технологічних операцій, з обранням результату, що матиме кращий результат згідно ваговій функції. Аналізування руху інформації при проведенні оптимізації технологічного процесу на основі ланцюга технологічних операцій виявляє потребу в забезпеченні в інформаційній системі, що є актуальною задачею. Також актуальним є необхідність підтримки в інформаційній системі визначення залежностей між величинами аналітичними методами, таблично, алгоритмічно та за допомогою імітаційних моделей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У теперішній час активно розроблюються інформаційні системи підтримки прийняття рішень для забезпечення оптимізації окремих технологічних процесів. Однак не вистачає систем для вирішення задачі побудови оптимізованого ланцюга технологічного процесу та систем вибору більш оптимального технологічного процесу. Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що питання застосування інформаційних технологій у вигляді відповідних експертних систем в технологічних процесах дуже актуальне. Тому проблема оптимізації ланцюга технологічного процесу в інформаційному забезпеченні експертних систем, актуальна.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Інформаційні одиниці є функціонально різними, деякі величини мають здатність змінювати функціональну здатність переходом від шуканих величин до обмежень на технологічну операцію, що накладає на систему керування змінними додаткові функціональні можливості та універсальність до трансформації моделювання технологічного процесу.

Постановкою завдання є формалізація та реалізація структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи.

Виклад основного матеріалу. Зроблено формалізацію технологічного процесу електродугового напилення та запропоновано реалізацію структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи.

Висновки відповідно до статті. У результаті аналізу руху інформації при проведенні оптимізації технологічного процесу на основі ланцюга технологічних операцій виявлено потребу в забезпеченні в інформаційній системі.

Ключові слова: технологічний процес; електродугове напилення; експертна система.

Рис.: 2. Табл.: 4. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Нині будь-яка галузь виробництва потребує застосування інформаційних технологій. Виготовлення деталей із покриттями, їх зміцнення та відновлення не є винятком. У цій роботі розглянуто формалізацію та запропоновано реалізацію структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи.

Постановка проблеми. Комбінаторна складність технологічного процесу налічує чотири можливих варіанти. Для такої кількості варіантів, є доцільним проведення оптимізації для чотирьох ланцюгів технологічних операцій, з обранням результату, що матиме кращий результат згідно з ваговою функцією. Аналізування руху інформації при проведенні оптимізації технологічного процесу на основі ланцюга технологічних операцій виявлено потребу в забезпеченні в інформаційній системі, що є актуальним завданням. Також актуальним є необхідність підтримки в інформаційній системі визначення залежностей між величинами аналітичними методами, таблично, алгоритмічно та за допомогою імітаційних моделей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У теперішній час активно розроблюються інформаційні системи підтримки прийняття рішень для забезпечення оптимізації окремих технологічних процесів [1-8]. Систем для вирішення задачі побудови оптимізованого ланцюга технологічного процесу та систем вибору більш оптимального технологічного процесу не вистачає. Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що питання застосування інформаційних технологій у вигляді відповідних експертних систем в технологічних процесах дуже актуальне [1-3; 5-8]. Тому проблема оптимізації ланцюга технологічного процесу в інформаційному забезпеченні експертних систем актуальна.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Інформаційні одиниці є функціонально різними, деякі величини мають здатність змінювати функціональну здатність переходом від шуканих величин до обмежень на технологічну операцію, що накладає на систему керування змінними додаткові функціональні можливості та універсальність до трансформації моделювання технологічного процесу.

Метою статті є формалізація та реалізація структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи.

Виклад основного матеріалу.

Формалізація структури технологічного процесу електродугового напилення.

Технологічний процес електродугового напилення в процесі створення виробів із покриттям, а також при відновленні або зміцненні поверхонь деталей, складається з поетапної обробки:

- 1) струменево-абразивної обробки (САО);
- 2) при потребі нанесення підшару;
- 3) основний процес нанесення покриття;

4) доведення утвореної поверхні з покриттям до необхідних розмірів і якості (параметри R_z або R_a) методами механічної обробки (МО), найчастіше чорновим або чистовим шліфуванням і методами поверхнево-пластичної обробки (ППД), а саме обкаткою кульками й роликками, електроконтактною обробкою та інше.

Перший етап призначений для збільшення шорсткості поверхні деталі, на яку наноситься покриття, для отримання необхідної адгезійної міцності (міцності зчеплення) системи «основа-покриття». Підшар має функцію усунення несумісності властивостей основного матеріалу (матеріалу поверхні деталі, на яку наноситься покриття) та матеріалу покриття. Для забезпечення міцності зчеплення системи «основа-покриття» використовують підшар із молібдену або ніхрому.

Основний процес нанесення покриття здійснюється розплавленням його електричною дугою і перенесенням за допомогою струменя стисненого повітря на поверхню деталі. Для запобігання утворення окислів і регулювання вмісту вуглецю, у повітря можна додавати пропан, завдяки горінню якого зменшується вміст кисню в струмені, а швидкість витоку газу в струмені може сягати кілька швидкостей звуку.

Доведення поверхні до стандартів деталі проводять механічною обробкою на шліфувальних верстатах, методами поверхнево-пластичного деформування, електроконтактною обробкою та іншими.

У результаті огляду процесу створення поверхонь деталей із покриттями методом електродугового напилення (ЕДН) отримано таку структурну схему ланцюга технологічних операцій (рис. 1):



Рис. 1. Структура операцій створення поверхонь деталей із покриттями методом електродугового напилення

Відповідно до початкових умов та вимог до результату, друга технологічна операція може і не виконуватися, тому комбінаторна складність технологічного процесу (ТП) має чотири можливих варіанти. Для такої кількості варіантів є доцільним проведення оптимізації для чотирьох ланцюгів технологічних операцій з обранням результату, що матиме кращий результат згідно з ваговою функцією.

Схема руху інформації в процесі оптимізації технологічного процесу створення поверхонь деталей із покриттями методом ЕДН наведена на рис. 2.

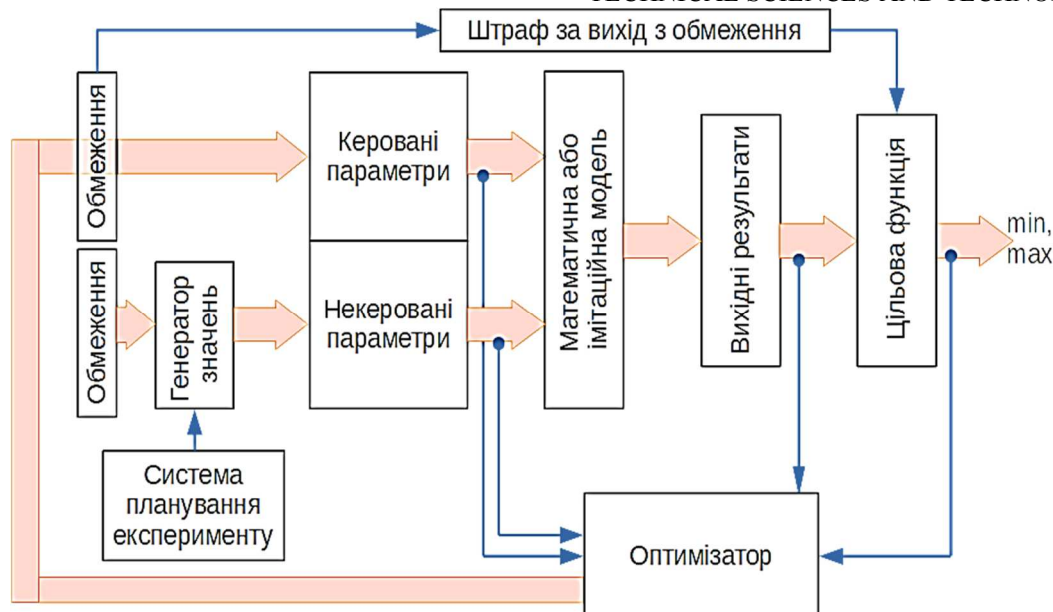


Рис. 2. Схема руху інформації в процесі оптимізації технологічного процесу створення поверхонь деталей із покриттями методом ЕДН

Як видно зі схеми руху інформації на рис. 2, яка побудована на основі [1, рис. 4], кожна технологічна операція повинна відокремити такі вектори величин:

– \vec{X} – контрольовані величини процесу. Для цих величин існують обмеження $x_{\min,j} \leq x_j \leq x_{\max,j}$;

– \vec{V} – відомі але не контрольовані величини процесу;

– \vec{Z} – невідомі та не контрольовані величини;

– \vec{R} – випадкові величини, що впливають на процес;

– \vec{Y} – параметри, які досягаються в процесі технологічної обробки.

Для вказаних величин технологічного процесу є рівняння (1), де параметри процесу \vec{X} є шуканою величиною:

$$\vec{Y} = F(\vec{X}, \vec{V}, \vec{Z}, \vec{R}), \quad (1)$$

Однак для технологічного процесу, який складається з ланцюга технологічних операцій, рівняння (1) перетворюється в систему рівнянь (2):

$$\begin{cases} \vec{Y}_k = F_k(\vec{X}_k, \vec{V}_k, \vec{Z}_k, \vec{R}_k), \\ \vec{Y}_{k-1} = F_{k-1}(\vec{X}_{k-1}, \vec{V}_{k-1}, \vec{Z}_{k-1}, \vec{R}_{k-1}), \\ \dots \\ \vec{Y}_1 = F_1(\vec{X}_1, \vec{V}_1, \vec{Z}_1, \vec{R}_1), \end{cases} \quad (2)$$

де результати попередньої технологічної операції можуть бути частково або повністю вводити як параметр наступної технологічної операції, тобто:

$$\vec{X}_i \cap \vec{Y}_{i-1} \neq \emptyset.$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

На практиці невідомі та випадкові параметри не враховують, або допускають їх використання, як випадкових величин. У разі наявності переліку таких випадкових параметрів, необхідно визначити (або визначають) межі зміни керованих величин за допомогою методів або аналітичного оцінювання відхилення результату, або використавши повнофакторний експеримент, при змінюванні лише величин, які входять до \vec{Z} та \vec{R} .

Технологія електродугового напилення складається з трьох операцій (3):

$$\begin{cases} \vec{Y}_3 = F_3(\vec{X}_3 \cup \vec{Y}_2, \vec{V}_3, \vec{Z}_3, \vec{R}_3), \\ \vec{Y}_2 = F_2(\vec{X}_2 \cup \vec{Y}_1, \vec{V}_2, \vec{Z}_2, \vec{R}_2), \\ \vec{Y}_1 = F_1(\vec{X}_1, \vec{V}_1, \vec{Z}_1, \vec{R}_1), \end{cases} \quad (3)$$

де F_1 – математична модель абразивно-струменевої обробки (САО); F_2 – математична модель процесу нанесення підшару; F_3 – математична модель процесу нанесення основного шару (покриття).

Завдяки розділенню технологічних операцій спрощується побудова цільової функції. Окремо будуються функції за такими параметрами:

Відповідність до вимог готового виробу:

$$G(\vec{Y}_3) = \sum_{i=0}^{n-1} \text{ReLu}(\vec{Y}_e - \vec{Y}_3)_i, \quad (4)$$

де \vec{Y}_e – вимоги до виробу, як n -вимірний вектор значень, \vec{Y}_3 – результат обробки; i – індекс параметру у векторі; $\text{ReLu}()$ – функція відсікання від'ємних значень (5):

$$\text{ReLu}(x) = \begin{cases} x, & \text{if}(x > 0), \\ 0, & \text{if}(x \leq 0). \end{cases} \quad (5)$$

Мінімальне значення (4) є нуль, коли всі параметри відповідають або перевищують задані вимоги. Так можна формувати вимоги до різальних кромek інструментів, наприклад, плугів. У разі потреби штрафування системи, коли результати обробки також перевищують задані параметри, можна $\text{ReLu}()$ замінити абсолютним значенням або квадратичною функцією. Це відбувається, коли деталі взаємодіють тертю. Тоді поверхні повинні мати схожі характеристики матеріалів, тому що тут є важливим зменшення саме відхилення параметрів від заданих величин, і перевищення вимог до твердості так само погано як і недостача. Часто для таких випадках використовують Декартову відстань на багатовимірному просторі, що відкриває можливість використовувати для багатьох випадків аналітичні методи оптимізації – метод найменших квадратів. У розглянутому прикладі створення різального інструменту з покриттям підвищення вимог щодо зносостійкості, твердості, міцності зчеплення покриття з основою, зверху не регламентується, тому використання обмеження за мірою (4) є обґрунтованим.

Для врахування часових T та матеріальних M витрат, відповідно використовують залежності (6):

$$\begin{aligned} T &= \sum_{k=1}^3 T_k(\vec{X}_k \cup \vec{Y}_{k-1}, \vec{V}_k), \\ M &= \sum_{k=1}^3 M_k(T_k, \vec{X}_k \cup \vec{Y}_{k-1}, \vec{V}_k), \\ \vec{Y}_0 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

До системи (6) додано $\vec{Y}_0 = 0$, бо перша операція не вимагає результатів попередньої, тому до керованих величин першої операції додається пуста множина.

До матеріальних витрат входять заробітна плата працівникам, оренда приміщення, та інші параметри, які залежать від часу проведення технологічної операції, видів і об'ємів матеріалів та енергоносіїв у грошовому еквіваленті. Повна функція витрат G , результат якої повинен бути дійсним числом, є лінійною комбінацією (4) та (6):

$$G = c_0 G(\vec{Y}_3) + c_1 \sum_{k=1}^3 M_k + c_2 \sum_{k=1}^3 T_k \rightarrow \min, \quad (7)$$

де c_0, c_1, c_2 – додатні дійсні коефіцієнти, які відбивають пріоритетність досягнення тих чи інших показників.

У випадках необхідності дотримання технічних вимог до виробу та обмеженні максимального часу виробництва, вираз (7) можна представити в іншій формі, наприклад:

$$\begin{cases} G(\vec{Y}_3) = 0, \\ c_1 \sum_{k=1}^3 M_k + c_2 \sum_{k=1}^3 T_k \rightarrow \min. \end{cases} \quad (8)$$

Це свідчить про поділ вагового виразу на вимоги та критерій оптимальності, де вимог може бути кілька, а критерій оптимальності повинен бути єдиним. У разі відсутності критичних вимог, критерію оптимальності (7) достатньо для оптимізації ланцюга технологічних операцій.

Реалізація структури технологічного процесу електродугового напилення.

Відповідно до формалізованих записів (3), (6) та (8) для побудови системи оптимізації потрібно визначити перелік використовуваних змінних та залежностей.

З погляду матеріалознавства, методом повнофакторного планування та проведення експерименту визначено параметри, які з достатньою точністю дають керування результатами обробки [10]. Також для визначення міцності зчеплення часто доступні дані. Приклад експериментальної залежності зміни міцності зчеплення основи з нанесеним покриттям наведено в табл. 1 [9].

Таблиця 1

Вплив способу підготовки поверхні із сталі 20 на міцність зчеплення її з покриттям із порошкового дроту 40X13

Спосіб підготовки поверхні	Шорсткість R_z , мкм	Міцність зчеплення, МН/м ²
Механічна обробка (точіння)	10	50
	14	65
	16	120
Струменево-абразивна обробка корундом зернистістю 450-980 мкм при тиску повітря 0,45 МПа	20	56
	22	101
	24	115
	27	140
	36	90
	38	65
	39	35
Струменево-абразивна обробка сталевими кульками 0,5...1 мм при тиску повітря 0,45 МПа протягом 150 с	2..3	43..72

У результаті, для першої операції струменево-абразивної обробки маємо основні параметри:

- t_1 – час обробки;
- p_1 – тиск повітря в системі обробки;

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

- P_1 – енергоспоживання устаткування для струменево-абразивної обробки;
- r_1 – час амортизації устаткування;
- m_1 – вартість устаткування;
- m_{P1} – вартість енергетичних ресурсів та матеріалів, які використовуються за одиницю часу в обраному режимі роботи;
- σ – твердість матеріалу, який обробляється.

Однак не всі вказані величини впливають на міцність зчеплення покриття:

$Y_1 = H (<t_1, p_1, \sigma, \{\text{хімічний склад основи}\}, \{\text{вид покриття}\}, \{\text{технологія нанесення покриття}\}>)$.

де – $t_1 = T_1 (<p_1, \sigma >)$ – тут час обробки залежить від тиску повітря в системі, тобто від сили взаємодії абразиву з матеріалом та від твердості оброблювального матеріалу. Абразив у цьому процесі вважається незмінним і входить до вартості устаткування;

– $M_1 = M_1 (<t_1, r_1, P_1, m_1, m_{P1}, p_1 >)$ – матеріальні витрати здебільшого залежать від часу роботи устаткування та його зносостійкості. Ці параметри можна виразити з режиму навантаження та часу роботи. Також залежить від режиму роботи й потужність енергоспоживання. Ці величини можна визначити з робочого тиску повітря в системі та часу роботи системи, який потрібний до досягнення бажаного результату. Матеріальні витрати зводять до скалярної величини через їхню вартість, або за кількістю або за часом використання в процесі.

У випадках нехтування вартістю процесу на користь зменшення часу виробництва, функцією вартості знехтувати повністю не можна, бо устаткування при перенавантаженні може вийти з ладу, що зупинить виробничий процес. Тому розрахунок розпадається на оптимізацію за мінімізацією часу з обмеженням на гарантованість залишення устаткування в стані можливості обробити задану кількість деталей.

Залежність вказаних величин можна побачити в табл. 2.

Таблиця 2

Величини, які враховуватимуться в підготовчому етапі створення виробів із покриттям, а також при відновленні або зміцненні поверхонь деталей

№	Назва	Позначення	Залежність
1	Час обробки	t_1	Шукане/задане $p_1, \sigma, \{\text{вид покриття}\}, \{\text{технологія нанесення покриття}\}$
2	Тиск повітря в системі обробки	p_1	Шукане $t_1, \sigma, \{\text{вид покриття}\}, \{\text{технологія нанесення покриття}\}$
3	Енергоспоживання устаткування для струменево-абразивної обробки	P_1	Шукане, p_1
4	Час амортизації устаткування	r_1	Задане, p_1
5	Вартість устаткування	m_1	Задане
6	Вартість енергетичних ресурсів та матеріалів	m_{P1}	Задане
7	Твердість матеріалу, який обробляється	σ	Задане
8	Хімічний склад основи	$\{\text{хімічний склад основи}\}$	Шукане/задане, з переліку доступних $\{\text{вид покриття}\}, \{\text{технологія нанесення покриття}\}$
9	Вид покриття	$\{\text{вид покриття}\}$	Шукане/задане, з переліку доступних $\{\text{хімічний склад основи}\}, \{\text{технологія нанесення покриття}\}$
10	Технологія нанесення покриття	$\{\text{технологія нанесення покриття}\}$	Шукане/задане, з переліку доступних $\{\text{хімічний склад основи}\}, \{\text{вид покриття}\}$
11	Міцність зчеплення (адгезійна міцність)	A_1	$t_1, p_1, \{\text{хімічний склад основи}\}, \{\text{технологія нанесення покриття}\}, \{\text{вид покриття}\}$

У табл. 2 наведено назви величин, які враховуються в процесі оптимізації технологічної операції струменево-абразивної обробки поверхні для підвищення адгезії A до заданого значення при мінімальних витратах ресурсів. Деякі величини з таблиці мають взаємну залежність, що свідчить про те, що система утворює систему, можливо нелінійних, рівнянь з кількома невідомими. В загальному випадку таку систему розв'язувати аналітично є не доцільним з причини відсутності способів аналітичного розв'язання або значної складності цих методів розв'язання.

Натомість, для вираження групи шуканих параметрів через відомі параметри з виконанням накладених на них обмежень та досягнення мінімального/максимального значення вагової функції, яка виражає обсяг витрат, використовують чисельні методи та аналітичні регресійні поліноми за експериментальними даними, які або дозволяють отримати аналітичний розв'язок або прямо виражають параметри процесу через задані результати та обмеження.

Наступні етапи обробки проводять на однаковому устаткуванні, лише процеси відмінні в матеріалах, які утворюють шар та підшар, а також відрізняються товщиною шару та прошарку.

Прошарок використовується в технології електродугового напилення, коли матеріал поверхневого шару має хімічну несумісність з основним матеріалом, або основний шар не може утворити достатню адгезійну міцність із основним матеріалом. Тому матеріал для утворення прошарку має бути хімічно нейтральним до матеріалу деталі та основного шару і мати достатню адгезію до матеріалів основи та покриття. В особливо важких випадках є виправданим використання прошарку з молібдену або ніхрому, який має високу адгезію з більшістю матеріалів. Важливим є те, що для адгезійного прошарку достатньо нанесення матеріалу шаром в декілька десятків мікрон, тому використання молібдену або ніхрому не призводить до значного зростання вартості процесу. Приведемо результати експериментів з нанесення покриттів методом електродугового напилення [10] (табл. 3).

Таблиця 3

Величини, які враховуватимуться на етапі електродугового напилення при створенні покриттів при виготовленні деталей або їх відновленні та зміцненні

№	Назва	Позначення	Залежність
1	Напруга дуги	U	Шукане 28...34 В
2	Дистанція напилення	L	Шукане 80...200 мм
3	Діаметр дроту	d	Шукане 1,2...2,2 мм
4	Товщина прошарку/покриття	h	Шукане 0,5...3,0 мм – для покриття <0,5 – для прошарку
5	Тиск в камері	p	Шукане 2...10 МПа
6	Швидкість ковзання	v	Шукане 2,0...2,75 м/с
7	Пористість	ρ	Шукане/задане, <10%
8	Мікротвердість	σ	Шукане/задане, 6900..73000 МПа
9	Зносостійкість	J	Шукане/задане, 11...15 мкм/км (10^{-12})
10	Хімічний склад основи	{хімічний склад основи}	Задане, з переліку доступних {вид покриття}
11	Вид покриття	{вид покриття}	Шукане/задане, з переліку доступних {хімічний склад основи}

На жаль, моделювання фізико-хімічних процесів при електродуговому нанесенні покриттів є складним, у результаті чого відокремити незалежні параметри майже неможливо. Тому для побудови математичних залежностей для електродугового напилення було використано метод регресійного аналізу на отриманих експериментально даних [10] (табл. 4).

Таблиця 4

Експеримент з виявлення залежності між керованими та шуканими величинами процесу електродугового напилення

Фактори	Напруга дуги	Дистанція напилення	Діаметр дроту	Товщина покриття	Навантаження	Швидкість ковзання	Міцність зчеплення	Зносостійкість
№ експ.	U , В	L , мм	d , мм	h , мм	P , МПа	$V_{ск}$, м/с	A , МПа	J_h , мкм/км (10^{-9})
1	30	140	1,6	1,5	6	2,3	115	0,014
2	32	100	1,4	2,5	4	2,6	90	0,013
3	29	180	2	1	8	2,15	120	0,013
4	34	200	1,2	2	8	2	95	0,014
5	30	120	1,8	0,5	2	2,45	100	0,012
6	28	160	1,6	1,5	10	2,75	80	0,015
7	31	80	2,2	3	4	2,3	110	0,013
8	29	160	1,2	3	2	2	80	0,011
9	32	100	1,8	1,5	8	2,45	115	0,015
10	31	200	1,4	1	6	2,6	70	0,014
11	28	140	2	2,5	10	2,15	90	0,015
12	32	120	1,4	1	6	2,15	105	0,013
13	29	180	2	2,5	2	2,6	90	0,012
14	30	80	1,6	2	10	2,75	120	0,015
15	34	140	2,2	0,5	4	2,3	60	0,013
16	29	120	1,2	2	6	2,15	75	0,012

Відповідно до обраного методу реалізації математичної моделі процесу, користувач інформаційної системи повинен мати можливість використовувати аналітичні моделі, табличне задання залежності між величинами, або аналітичні або алгоритмічні методи числових засобів моделювання процесу, який оптимізується.

Висновки відповідно до статті. У результаті аналізування руху інформації при проведенні оптимізації технологічного процесу на основі ланцюга технологічних операцій виявлено потребу в забезпеченні в інформаційній системі можливості:

- визначення множини технологічних операцій F_k ;
- забезпечення для кожної з операцій перелік керованих \vec{X}_k та некерованих \vec{V}_k параметрів з їх обмеженнями;
- завдання методів розрахунку близькості виконання поставлених вимог $G(\vec{Y}_k)$;
- завдання методів розрахунку часових та матеріальних витрат по кожній технологічній операції за формулами (7) або (8);
- забезпечення таблично, аналітично або комп'ютерним симулюванням реалізації методів моделювання технологічних операцій (3).

У результаті аналізу технологічних операцій підготовки поверхні деталей методом струменево-абразивної обробки, з метою підвищення адгезії покриття з основою, та нанесення електродуговим методом підшарку та шару основного покриття, виділено величини, які можуть виступати як характеристики результатів технологічної операції та як керовані

параметри технологічних операцій. Зазначено необхідність підтримки в інформаційній системі визначення залежностей між величинами аналітичними методами, таблично, алгоритмічно та за допомогою імітаційних моделей. Розглянуті інформаційні одиниці є функціонально різними, деякі величини мають здатність змінювати функціональну здатність переходом від шуканих величин до обмежень на технологічну операцію, що накладає на систему керування змінними додаткові функціональні можливості та універсальність до трансформації моделювання технологічного процесу.

Список використаних джерел

1. Хох В. Д., Мелешко Є. В., Якименко М. С. Дослідження методів побудови експертних систем. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2016. Вип. 4(40). С. 48–52.
2. Скрипка К. І., Зенкин М. А. Експертна система автоматизованого вибору способів відновлення спрацьованих деталей. *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. 2004. № 1 (28). С. 66–68.
3. Лимаренко В. В. Інформаційна система підтримки рішень для автоматизації створення технологічних процесів механообробки деталей високоточного обладнання: дис. ... канд. техн. наук / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2019.
4. Анфёров М. А., Селиванов С. Г. Структурная оптимизация технологических процессов в машиностроении. Уфа: Гилем, 1996. 185 с.
5. Балдин К. В., Уткин В. Б. Информационные системы в экономике: учебник. 5-е изд. Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К0», 2008. 395 с.
6. Искусственный интеллект. Кн. 1. Системы общения и экспертные системы / под ред. Э. В. Попова. Москва: Радио и связь, 1990. 464 с.
7. Корнеев В. В., Гарев А. Ф., Васютин С. В., Райх В. В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. Нолидж, 2000. 352 с.
8. Макарчук Т. А., Минаков В. Ф., Щугорева В. А. Облачные решения построения информационных систем управления ресурсами организации. *Research Journal of International Studies*. 2014. № 1 (20). С. 68–69.
9. Харламов Ю. О., Романченко О. В., Міцик А. В. Міцність зчеплення детонаційно-газових покриттів на основі карбідів вольфраму та хрому. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 1 (249). С. 99–107.
10. Ворона Т. В. Підвищення зносостійкості сталевих газотермічних покриттів електроконтактною обробкою з використанням вуглецевовмісних наповнювачів: дис. ... канд. техн. наук / Національна академія наук України, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля. Київ, 2016.

References

1. Khokh, V. D., Meleshko, Ye. V., Yakymenko, M. S. (2016). Doslidzhennia metodiv pobudovy ekspertnykh system. [Research of methods of construction of expert systems]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Control, navigation and communication systems*, 4 (40), 48–52 [in Ukrainian].
2. Skrypka, K. I., Zenkyn, M. A. (2004). Ekspertna sistema avtomatyzovanoho vyboru sposobiv vidnovlennia spratsovanykh detalei [Expert system for automated choice of ways to recover parts]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky – Bulletin. Engineering sciences*, 1 (28), 66–68 [in Ukrainian].
3. Lymarenko, V. V. (2019). *Informatsiina sistema pidtrymky rishen dlia avtomatyzatsii stvorennia tekhnolohichnykh protsesiv mekhanoobrobky detalei vysokotochnoho obladdnannia* [Information support system for automation of creation of technological processes for machining parts of high-precision equipment]. (Candidate's thesis). National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv [in Ukrainian].
4. Anferov, M. A., Selivanov, S. G. (1996). *Struktornaia optymyzatsiia tekhnolohycheskykh protsessov v mashynostroenyy* [Structural optimization of technological processes in mechanical engineering]. Ufa: Guelem [in Russian].
5. Baldyn, K. V., Utkin, V. B. (2008). *Informatsyonnye sistemy v ekonomike* [Information systems in economics] (5th ed.). Moscow: Dashkov & K0 Publishing and Trading Corporation [in Russian].
6. Popov, T. V. (1990). *Iskusstvennyi yntellekt. Kn. 1. Systemy obshcheniia i ekspertnye sistemy* [Artificial intelligence. Book. 1. Communication systems and expert systems]. Moscow: Radio and Communication [in Russian].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

7. Korneev, V. V., Garev, A. F., Vasiutin, S. V., Raikh V. V. (2000). *Bazy dannykh. Intelktualnaia obrabotka informatii [Databases. Intelligent processing of information]*. Nolidge [in Russian].

8. Makarchuk, T. A., Mynakov, V. F., Shchuhoreva, V. A. (2014). Oblachnye resheniya postroyeniya ynformatsyonnykh system upravleniya resursamy orhanyzatsyy [Cloud solutions for building information systems for managing an organization's resources]. *Research Journal of International Studies*, 1 (20), 68–69 [in Ukrainian].

9. Kharlamov, Yu. O., Romanchenko, O. V., Mitsyk, A. V. (2019). Mitsnist zchepлення detonatsiino-hazovykh pokryttiv na osnovi karbidiv volframu ta khromu [The adhesive strength of detonation-gas coatings based on tungsten carbides and chromium]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Bulletin of the East Ukrainian National University named after Vladimir Dahl*, 1 (249), 99–107 [in Ukrainian].

10. Vorona, T. V. (2016). *Pidvyshchennia znosostykosti stalevykh hazotermichnykh pokryttiv elektrokontaktnoiu obrobkoiu z vykorystanniam vuhletsevovmisnykh napovniuvachiv [Increase of wear resistance of steel gas-thermal coatings by electro-contact processing with use of carbon-containing fillers]*. (Candidate's thesis). National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Superhard Materials. V. M. Granny, Kyiv [in Ukrainian].

UDC 004.78:004.056

Tatiana Smirnova

FORMALIZATION AND IMPLEMENTATION OF THE STRUCTURE OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ELECTRIC ARC SPRAYING FOR THE OPTIMIZATION EXPERTS SYSTEM

Relevance of the research topic. Currently, any industry requires the use of information technology. Reinforcement and restoration of parts is no exception. In this paper, we consider formalization and propose the implementation of the structure of the technological process of electric arc spraying for an optimization expert system.

Formulation of the problem. The combinatorial complexity of the process has four possible options. For such a number of options, it is advisable to carry out optimization for four chains of technological operations, with the choice of the result that will have the best result in terms of weight function. Analysis of the movement of information during the optimization of the technological process on the basis of the chain of technological operations revealed the need for support in the information system is an urgent task. Also relevant is the need for support in the information system for determining the dependencies between values by analytical methods, tabularly, algorithmically and using simulation models.

Analysis of recent research and publications. Currently, information systems for decision support are being actively developed to ensure the optimization of individual technological processes. There are not enough systems to solve the problem of constructing an optimized technological process chain and systems for choosing a more optimal technological process. An analysis of recent studies and publications has shown that the issues of using information technologies in the form of relevant expert systems in technological processes are very relevant. Therefore, the problem of optimizing the process chain in the information support of expert systems is relevant.

Highlighting previously unresolved parts of a common problem. Information units are functionally different, some quantities have the ability to change the functional ability by moving from the desired values to the restrictions on the technological operation, imposes additional functionality and versatility on the variable management system to the transformation of the process simulation.

The aim of the article is to formalize and implement the structure of the technological process of electric arc spraying for an optimization expert system.

Statement of the main material. The formalization of the technological process of electric arc spraying is made and the implementation of the structure of the technological process of electric arc spraying for the optimization expert system is proposed.

Conclusions. As a result of the analysis of the movement of information during the optimization of the technological process on the basis of the chain of technological operations, the need for providing an information system is identified.

Keywords. Technological process; electric arc spraying; expert system.

Fig.: 2. Table: 4. References: 10.

Смірнова Тетяна Віталіївна – кандидат технічних наук, докторант Центральноукраїнського національного технічного університету (просп. Університетський, 8, м. Кропивницький, 25006, Україна).

Smirnova Tetiana – PhD in Technical Sciences, Doctoral Central Ukrainian National Technical University (8 University Av., 25006 Kropyvnytskyi, Ukraine).

E-mail: sm.tetyana@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6896-0612>