

УДК 621.9.042

О.Л. Кондратюк, Ю.І. Сичов, А.О. Скоркін

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ ТРАЄКТОРІЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ПЕРА ЛОПАТОК ТУРБІН

Розглядається можливість застосування багатоінструментальних верстатів зі ЧПК для обробки всього комплексу поверхонь пера лопаток. Здійснена оптимізація вибору траєкторії обробки за критерієм мінімуму трудомісткості.

Ключові слова: механічна обробка, верстат, інструмент, перо лопатки.

Вступ

Однією із проблем механічної обробки комплексу поверхонь пера турбінних лопаток на верстатах із числовим програмним керуванням є визначення оптимальних траєкторій переміщення різального інструменту, розмірів і форми. При цьому кількість різальних інструментів, послідовно обробні різні елементи поверхні пера, повинне бути мінімальним. Поява подібного завдання пов'язане з тим, що трактова поверхня пера лопатки являє собою єдиний комплекс різних поверхонь, що плавно сполучаються між собою. У цей комплекс входять опуклі й увігнуті поверхні різної кривизни і довжини (спинка, корито пера, крайки, сполучення пера із хвостовиком і полками). Традиційно технологія механічної обробки таких поверхонь будувалася на роздільній обробці спинки й корита, крайок, ділянок сполучення пера з полками й хвостовиком [1]. Перевага такої обробки – більша продуктивність, недолік – низька точність формоутворення через переустановку лопаток з верстата на верстат, і жолоблення заготівель між операціями й у процесі обробки від зусилля різання. Виключити ці фактори повністю практично неможливо [2].

Класифікація існуючих методів досліджень

Великий внесок у розвиток теорії і практики механообробки і підвищення довговічності лопаток

турбін внесли вчені Військової Повітряної Інженерної Академії ім. Н.Е. Жуковського (ВВИА ім. Н.Е. Жуковського), Московського Державного Технічного Університету ім. Н.Э. Баумана (МГТУ ім. Н.Э. Баумана).

Дослідження процесу

Розглянемо можливість застосування багатоінструментальних верстатів зі ЧПК для обробки всього комплексу поверхонь із одного установа. Нехай є деталь, форма якої описується складною замкнутою поверхнею, представлена множиною базових точок:

$$B = \left\{ (x_k, y_k, z_k) \mid k = \overline{1, N} \right\}, \quad (1)$$

де x_k, y_k, z_k – координати k -ї точки поверхні; N – число базових точок, що визначають оброблювану поверхню.

Будемо вважати, що в складі розглянутої поверхні виділені окремі частини (ділянки), обумовлені підмножинами базових точок $B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_p$, де довільна j -а ділянка описується N_j точками, що

становлять множину $B_j: \left(\sum_{j=1}^p N_j = N \right)$:

$$B = \left\{ (x_k, y_k, z_k) \mid k = \overline{1, N_j}, j = \overline{1, p} \right\}. \quad (2)$$

Виготовлення розглянутої деталі здійснюється на верстаті зі ЧПК, оснащеному m інструментами.

Кожний з наявних інструментів може обробляти певну підмножину ділянок поверхні деталі.

Можливі варіанти розподілу інструментів при обробці поверхні деталі будемо описувати матрицею

$$R = [r_{ij}]_{m \times p}, \quad (3)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-м інструментом можливо проводити} \\ & \text{обробку } j\text{-ї ділянки поверхні;} \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Відзначимо, що матриця (3) будується на основі попереднього аналізу технології виготовлення розглянутої деталі. Обробка i -м інструментом j -ї ділянки може здійснюватися з використанням різних траєкторій його руху.

Будемо вважати, що для двох довільних точок ($s \in B_j$ і $l \in B_j$), обумовлених координатами (x_s, y_s, z_s) і (x_l, y_l, z_l), допускаються переміщення i -го інструмента як від точки s у точку l , так і в протилежному напрямку.

Будемо описувати кожну j -у ділянку поверхні неорієнтованим графом G_j , ребрами якого є всілякі відрізки, що з'єднують будь-які пари базових точок $s \in B_j$ і $l \in B_j$, $j = \overline{1, p}$. Цей граф – повний [3].

Рух i -го інструмента по ребру $(s, l) \in G_j$ характеризується наступними параметрами: $t_{sl}^{(i)}$ – час обробки відрізка (s, l) ; $\sigma_{sl}^{(i)}$ – кінематична погрішність обробки поверхні між точками з координатами (x_s, y_s, z_s) і (x_l, y_l, z_l).

При виборі інструмента для обробки j -ї ділянки і траєкторії його руху будемо враховувати наступні вимоги:

1) траєкторія руху інструмента повинна пройти через всі базові точки B_j оброблюваної ділянки, від початкової точки $s_{\text{нач}} \in B_j$ до кінцевої точки $s_{\text{кон}} \in B_j$;

2) розрахункова кінематична погрішність обробки кожної ділянки не повинна перевищувати заданої;

3) вибір інструмента виробляється із заданої множини m інструментів;

4) сумарний час обробки повинен бути мінімальним.

При побудові математичної моделі оптимізації вибору виду інструментів і траєкторій їх руху будемо використовувати формальну постановку завдання про комівояжера [4], доробивши її з обліком другої і третьої вимог.

Будемо вважати, що для обробки j -ї ділянки використовується інструмент i -го виду. Уведемо в графі G_j фіктивні ребра $(0, s_{\text{поч}})$ і $(l_{\text{кон}}, 0)$, що з'єдну-

ють фіктивну вершину «0» з початковою і кінцевою точками розглянутої ділянки. Для побудови оптимальної траєкторії обробки ділянки i -м інструментом уведемо в розгляд «булеві» змінні:

$$\xi_{sl}^{(i)} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-й інструмент повинен переміщатися} \\ & \text{від точки } s \in B_j \text{ до точки } l \in B_j; \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

На ці змінні повинні бути накладені обмеження

$$\xi_{sl}^{(i)} \in \{0; 1\}, \quad s, l = \overline{0, N_j}, \quad (4)$$

З урахуванням цих обмежень умова, що i -й інструмент один раз входить у процесі обробки в кожну базову точку ділянки, записується таким чином:

$$\sum_{s=0}^{N_j} \xi_{sl}^{(i)} = 1, \quad l = \overline{0, N_j}. \quad (5)$$

Аналогічна умова, що інструмент у процесі обробки один раз виходить із кожної точки, є:

$$\sum_{s=0}^{N_j} \xi_{sl}^{(i)} = 1, \quad s = \overline{0, N_j}. \quad (6)$$

У процесі обходу i -м інструментом всіх N_j базових точок повинна вийти замкнута траєкторія, що починається і закінчується у фіктивній точці «0». У теорії графів [3] і технології машинобудування [5] такий маршрут називається циклом.

Нехай $u_s^{(i)}$ і $u_l^{(i)}$ – додаткові змінні, які можуть приймати речовинні значення:

$$-\infty < u_s^{(i)} < \infty, \quad s = \overline{0, N_j}; \quad -\infty < u_l^{(i)} < \infty, \quad l = \overline{0, N_j}. \quad (7)$$

Тоді, з [4], умови відсутності в траєкторії руху i -го інструмента підциклів [3] можливо записати як

$$u_s^{(i)} - u_l^{(i)} + N_j \xi_{sl}^{(i)} \leq N_j - 1, \quad s, l = \overline{0, N_j}, \quad s \neq l. \quad (8)$$

Вибір виду інструмента для обробки j -ї ділянки будемо здійснювати за допомогою «булевих» змінних:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо для обробки } j\text{-ї ділянки} \\ & \text{використовується } i\text{-го виду;} \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Обмеження на ці змінні записуються як

$$\eta_{ji} \in \{0; 1\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, p}. \quad (9)$$

Умови, що для обробки кожної ділянки використовується тільки один вид інструмента, можна представити рівнянням

$$\sum_{i=1}^m \eta_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, p}. \quad (10)$$

Нехай у технології обробки деталі задані необхідні значення точності обробки $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_p$ на кожній з ділянок. Тоді умови забезпечення заданих вимог по точності обробки деталі можна представити як

$$\max_{(sl) \in G_j} \left\{ \sum_{i=1}^m \delta_{sl}^{(i)} \xi_{sl}^{(i)} \eta_{ji} \right\} \leq \Delta_j, \quad j = \overline{1, p}, \quad (11)$$

де $\delta_{sl}^{(i)}$ – погрішність обробки при русі i -го інструмента з s -ї точки в l -у точку поверхні.

Витрати часу на обробку j -ї ділянки при виборі виду застосовуваного інструмента і траєкторії його руху можна визначити виразом

$$T_j = \sum_{i=1}^m \sum_{s=0}^{N_j} \sum_{l=0}^{N_j} r_{ij} t_{sl}^{(i)} \xi_{sl}^{(i)} \eta_{ji},$$

де r_{ij} – елементи матриці R ; $t_{sl}^{(i)}$ – час проходження i -го інструмента з s -ї точки в l -у точку траєкторії.

Загальні витрати часу на виготовлення розглянутої деталі з урахуванням цього виразу запишуться як

$$T = \sum_{j=1}^p T_j = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{s=0}^{N_j} \sum_{l=0}^{N_j} r_{ij} t_{sl}^{(i)} \xi_{sl}^{(i)} \eta_{ji} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Таким чином, розв'язуване завдання оптимізації формулюється в такий спосіб: знайти значення змінних $\xi_{sl}^{(i)}$, $s, l = \overline{0, N_j}$, що дають мінімум цільової функції (12), для заданих змінних η_{ji} , $j = \overline{1, p}$, $i = \overline{1, m}$, при виконанні умов (4) – (11).

Вид цільової функції і обмежень сформульованого завдання показує, що вона належить до класу завдань нелінійного дискретнонеперервного програмування [6] великої розмірності через значне число базових точок $N_1, N_2, \dots, N_p \dots$. Розв'язання таких завдань за прийнятний час можливо за допомогою генетичних алгоритмів [7].

Розглянемо запропонований метод на прикладі рішення завдання оптимізації траєкторії руху та вибору інструмента при фрезеруванні лопатки п'ятого щабля компресора низького тиску. Фрезерування здійснюється на верстаті ОЦ зі ЧПУ NX-155 фірми «Starrag» з наступними характеристиками: – контурне числове програмне забезпечення; – максимальна довжина оброблюваної лопатки 700 мм; – значення робочих переміщень по осях, подачі і прискореного ходу наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення робочих переміщень по осях

Назва переміщення	Макс. знач.
Переміщення	
Поздовжнє X, мм	1500
Поперечне Z, мм	400
Вертикальне Y, мм	400
Кругове A, град.	не обмежено
Поворот B, град.	± 40
Подачі	
Паралельно осям X, Y, Z, мм/хв	2500
Кругове A, об/хв	20
Поворот B, об/хв	3,4
Прискорений хід	
Поздовжній X, поперечний Z, мм/хв	8000
Вертикальний Y, мм/хв	4000
Кругове A, об/хв	20
Поворот B, об/хв	3,4

Траєкторія розроблялася для точки контакту інструмента з поверхнею деталі. При обробці деталей центр інструмента рухається по еквідистанте до поверхні деталі, що складається з опорних точок і елементарних ділянок між сусідніми опорними точками. Профіль пера і трактова поверхня полки хвостовика лопатки задаються відповідно до конструкторського креслення набором точок поверхні, що представляють собою множину (1) базових точок V . Поверхню даної лопатки можна розбити на наступні ділянки, обумовлені підмножиною базових точок спинки пера V_1 (рис. 1, а), підмножиною базових точок корита пера V_2 (рис. 1, б), підмножиною базових точок вхідної крайки V_3 (рис. 2, а), підмножиною базових точок вихідної крайки V_4 (рис. 2, б), підмножиною базових точок трактової поверхні полки хвостовика V_5 (рис. 3), підмножиною базових точок ділянки сполучення V_6 (рис. 4).

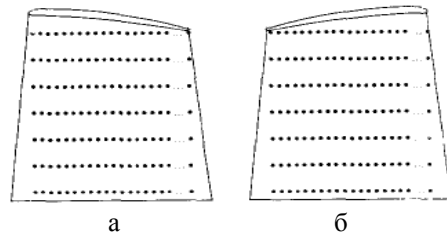


Рис. 1. Підмножина базових точок: а – спинки пера V_1 ; б – корита пера V_2

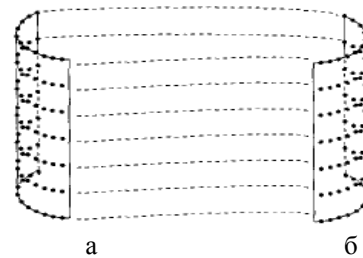


Рис. 2. Підмножина базових точок: а – вхідної кромки V_3 ; б – вихідної кромки V_4

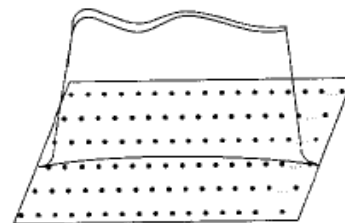


Рис. 3. Підмножина базових точок трактової поверхні полки хвостовика V_5

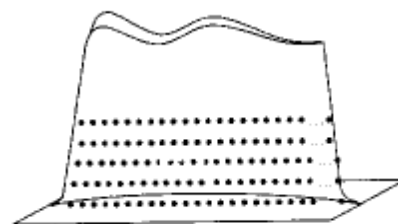


Рис. 4. Підмножина базових точок ділянки сполучення V_6

Кожна підмножина B_1 і B_2 має по 231 точки, які задані по рядках координатами X_k, Y_k, Z_k у просторі. Підмножини B_3 і B_4 задані набором 7 координат центрів окружностей і радіусів вхідної і вихідної крайок для кожного рядка з координатами Z_k .

Множини базових точок підмножин B_3 і B_4 одержуємо по наступних формулах:

$$X_{ij} = r_j \cos \varphi_{ij}; \quad Y_{ij} = r_j \sin \varphi_{ij}; \quad Z_{ij} = Z_j,$$

де r_j – радіус окружності крайки в j -му перетині; φ_{ij} – кутова координата i -ї точки окружності крайки в j -му перетині; Z_j – координата j -го перетину.

Таким чином, множини точок вхідний і вихідний крайок мають вигляд

$$B_3 = \bigcup_{\substack{i=1 \dots n_1 \\ j=1 \dots n}} \{X_{ij}^{BX}, Y_{ij}^{BX}, Z_{ij}^{BX}\};$$

$$B_4 = \bigcup_{\substack{i=1 \dots n_2 \\ j=1 \dots n}} \{X_{ij}^{BIX}, Y_{ij}^{BIX}, Z_{ij}^{BIX}\},$$

де n – кількість перетинів; n_1 і n_2 – кількість точок окружності вхідної і вихідної крайок, необхідних для обробки із заданою точністю і необхідною якістю поверхні.

Покладемо, що кожна j -а ділянка поверхні лопатки обробляється окремим інструментом (з обліком, що спинка пера лопатки може бути оброблена одним інструментом, корито – іншим, вхідна крайка обробляється третім інструментом, а вихідна – четвертим). Таким чином, для обробки всієї поверхні лопатки необхідно максимум 4 інструменти. При цьому можливо скорочення кількості інструментів, якщо обробляти спинку й корито одним інструментом, а вхідну і вихідну крайки – іншим. П'ятишпиндельний верстат NX-155 дозволяє здійснити зміну інструментів у процесі обробки без зупинки верстата. Технологічним процесом визначені інструменти для обробки лопатки: на першій і другій ділянках – фреза R32, $z = 4$; на третій, четвертій і п'ятій ділянках – фреза R5, $z = 4$; на шостій ділянці – фреза R3, $z = 4$. З обліком цього можна сформуувати матрицю $R_{4 \times 6}$:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Подача i -го інструмента уздовж траєкторії, що забезпечує задану стійкість інструмента, вибирається в кожній точці з технологічних міркувань. Матриця подач $\{S_{sl}^{(i)}\}$ може бути задана заздалегідь або визначатися в кожній точці по формулах. Набір подач для обробки лопатки п'ятого щабля наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Набір подач для обробки лопатки п'ятого щабля

Номер ділянки	Напрямок обробки	
	Поперек пера	Уздовж пера
1	320	350
2	300	320
3	200	250
4	200	250
5	382	382
6	75	75

Відстань між сусідніми точками траєкторії руху інструмента визначається по формулі

$$L_{sl} = \sqrt{(X_s - X_l)^2 + (Y_s - Y_l)^2 + (Z_s - Z_l)^2}.$$

Тоді час проходження i -го інструмента з s -ї точки в l -у можна визначити по формулі

$$t_{sl}^{(i)} = \frac{L_{sl}}{S_{sl}^{(i)}} = \frac{\sqrt{(X_s - X_l)^2 + (Y_s - Y_l)^2 + (Z_s - Z_l)^2}}{S_{sl}^{(i)}}. \quad (14)$$

Таким чином, цільова функція (12) має наступні значення параметрів:

$p = 6$; $m = 4$; $N_1 = 231$; $N_2 = 231$; $N_3 = 7 n_{i1}$; $N_4 = 7 n_{i2}$; r_{ij} – елементи матриці (13); $t_{sl}^{(i)}$ – обчислюються по формулі (14).

Формування множин B_1 і B_2 здійснюється шляхом потрібного перекладу системи координат: із системи $X_N O_N Y_N$, у якій задані координати точок кожного профільного перетину конструкторським кресленням, у систему верстата XOY (рис. 5).

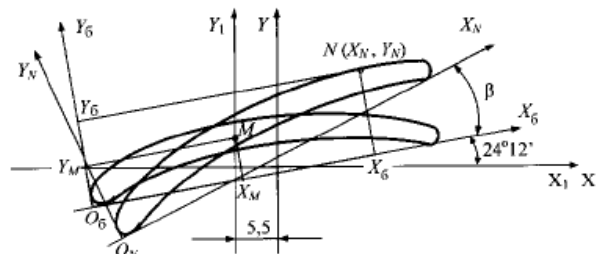


Рис. 5. Переклад системи координат із системи $X_N O_N Y_N$ в систему верстата XOY

Координати точки $N(X_N, Y_N)$ профільних перетинів задані в кресленні в системі $X_N O_N Y_N$, поверненої щодо системи першого перетину $X_6 O_6 Y_6$ навколо центра мас – точки M – на кут β . Точка M задана в системі $X_6 O_6 Y_6$ координатами (X_M, Y_M) .

Координати точки O_N у системі $X_6 O_6 Y_6$ визначаються по таких формулах:

$$X_{O_N} = X_M + \sqrt{X_M^2 + Y_M^2} \cos \alpha;$$

$$Y_{O_N} = Y_M + \sqrt{X_M^2 + Y_M^2} \sin \alpha,$$

де $\alpha = \beta + \pi + \arctg Y_M / X_M$.

Тоді точка N профільного перетину в системі $X_6 O_6 Y_6$ має наступні координати:

$$\begin{aligned} X_6 &= X_{O_N} + X_N \cos \beta - Y_N \sin \beta; \\ Y_6 &= Y_{O_N} + X_N \sin \beta + Y_N \cos \beta. \end{aligned} \quad (16)$$

Звідси координати точки N у системі XOY:

$$\begin{aligned} X &= (X_6 - X_M) \cos(-24,2^\circ) + (Y_6 - Y_M) \sin(24,2^\circ) - 5,5; \\ Y &= -(X_6 - X_M) \sin(-24,2^\circ) + (Y_6 - Y_M) \sin(-24,2^\circ). \end{aligned} \quad (17)$$

Масив координат точок, отриманих по формулі (17), є базовим для виконання алгоритму пошуку оптимальної траєкторії руху інструмента за критерієм мінімуму трудомісткості. Для цього використаний евристичний метод.

1. Інструмент підводять до початкової точки $x_{\text{поч}}$ першої ділянки B_1 . Причому в якості початкової може бути обрана будь-яка технологічно обґрунтована точка оброблюваної поверхні.

2. У даній точці будується роза напрямків. Плошке її зображення не означає, що інструмент буде переміщатися в площині XOZ. У кожному з восьми напрямків визначається третя координата з умови, що отримана точка належить оброблюваній поверхні. У кожній з восьми точок визначається трудомісткість по формулі (14). Вибирається напрямок, що відповідає найменшій трудомісткості.

3. В обраному напрямку здійснюється обробка певним інструментом з певним значенням подачі і визначається погрішність обробки на даній ділянці. Якщо погрішність перевищує задану точність, то даний напрямок відкидається і вибирається інший, з ледве більшою трудомісткістю.

4. Обробка вважається закінченою, коли інструмент обійде всі базові точки поверхні.

По описаному алгоритму була складена програма та зроблено розрахунок траєкторії обробки пера лопатки п'ятого шабля компресора низького тиску газотурбінного двигуна. Результат розрахунку (траєкторія руху інструмента, що забезпечує мінімум трудомісткості при обробці пера лопатки) схематично показано на рис. 6. У процесі розрахунку видаються номер точки, її координати в системі верстата, значення подачі, номер ділянки, якій належить дана точка, номер інструмента і накопичене значення трудомісткості. Трудомісткість обробки обраного маршруту склала 6,2 хв.

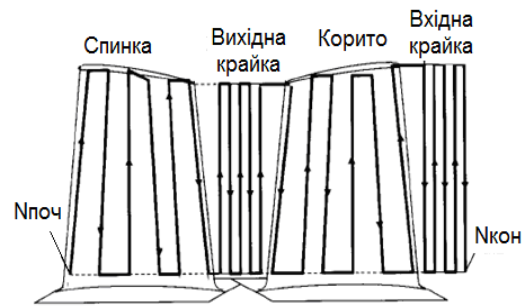


Рис. 6. Траєкторія руху інструмента, що забезпечує мінімум трудомісткості при обробці пера лопатки

Висновки

Даний тип фрезерування пера лопатки є самим продуктивним і застосовується на плоских не закручених лопатках і при чорновому фрезеруванні. Такий тип фрезерування використовує фірма «Stargag» для обробки крайок. Однак якщо взяти до уваги точність обробленої поверхні, то найбільш оптимальним буде обробка спіральним способом або уздовж профільних перетинів. Для порівняння був зроблений розрахунок трудомісткості обробки уздовж профільних перетинів. Для цього маршруту вона склала 8,49 хв.

Список літератури

1. *Размерное и безразмерное формообразование поверхностей деталей* / А.Г. Братухин, Р.М. Халимуллин, Ф.С. Юнусов и др. – М.: Машиностроение, 1996. – 272 с.
2. *Лунев А.Н. Адаптивное формообразование лопаток шлифованием* / А.Н. Лунев, Л.Т. Моисеева, Ф.С. Юнусов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2002. – 135 с.
3. *Берж К. Теория графов и ее применение* / К. Берж. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 346 с.
4. *Кузин Л.Т. Основы кибернетики. Математические основы кибернетики* / Л.Т. Кузин. – М.: Энергия, 1973. – Т. 1. – 504 с.
5. *Справочник технолога машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А.Г. Касимовой и Р.К. Мецеракова. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 1. – 660 с.*
6. *Таха Х. Введение в исследование операций: в 2 кн. / Х. Таха. – М.: Мир, 1985. – Кн. 2. – 496 с.*
7. *Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности* / Г.К. Воронковский, К.В. Махотило и др. – Х.: Основа, 1997. – 112 с.

Надійшла до редколегії 28.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Я. Мовшович, Харківський НДІ технології машинобудування, Харків.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ТРАЕКТОРИИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРА ЛОПАТОК ТУРБИН

О.Л. Кондратюк, Ю.И. Сычев, А.О. Скоркин

Рассматривается возможность применения многоинструментальных станков с ЧПУ для обработки всего комплекса поверхностей пера лопаток. Осуществлена оптимизация выбора траектории обработки по критерию минимума трудоемкости.

Ключевые слова: механическая обработка, станок, инструмент, перо лопатки.

OPTIMIZATION OF CHOICE OF TRAJECTORY OF TREATMENT OF SURFACES OF FEATHER OF SHOULDER-BLADES OF TURBINES

O.L. Kondratyuk, Yu.I. Sychev, A.O. Skorkin

The possibility of mnogoinstrumental machine tools with numerical control obrobki vsogo complex surfaces feather vanes from one place. Carried out optimization of choice of the path processing on the criterion of minimum effort.

Keywords: machining, machine tool, pen blades.