

УДК 621.9.04:621.914-529



П. І. Літовченко



В. А. Сало



В. М. Нечипоренко



В. П. Раківненко

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЛОПАТОК РОБОЧИХ КОЛІС ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

*На основі геометричного аналізу складної криволінійної поверхні міжлопаткового простору запропонована методика автоматизованого розрахунку керуючої геометричної інформації верстата з ЧПК для оброблення суцільних робочих коліс (моноколів) газотурбінних двигунів. Методику рекомендується використовувати у системах САМ при підготовці керуючих програм для верстатів з ЧПК.*

*Ключові слова:* газований канал, поверхня корита і спинки лопатки, схема формоутворення, координати точок траєкторії, кінцева фреза, програмована точка інструмента, формоутворення і формоутворюючі елементи.

**Постановка проблеми.** Лопатки суцільних робочих коліс газотурбінних двигунів (ГТД), компресорів та ін. утворюють сукупність газових каналів, які обмежені складними криволінійними дискретно заданими поверхнями робочих лопаток. Моноколеса звичайно обробляють електрохімічними методами або на верстатах з ЧПК. Останнім часом електрохімічні методи застосовуються дуже рідко через великі екологічні проблеми. При формоутворенні моноколів на верстатах з ЧПК виникають труднощі математичного характеру, обумовлені дискретністю завдання робочих поверхонь лопаток, малою жорсткістю кінцевих інструментів, складністю траєкторії їхнього руху, високою ймовірністю пошкодження номінальних поверхонь лопаток при їх нерегламентованому контакті з інструментом – “підрізами”.

Отже, актуальними є розроблення ефективних математичних моделей формоутворення складних криволінійних поверхонь моноколів на верстатах з ЧПК і їх реалізація у вигляді методик автоматизованого розрахунку керуючої геометричної інформації з наступним використанням у системах САМ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Результати останніх досліджень [1, 2] свідчать про те, що для попередньої обробки як моноколів ГТД, так і знімних лопаток застосовується фрезерування міжлопаткових каналів кінцевими фрезами на верстатах з ЧПК. При цьому ведеться пошук нових технологічних схем обробки коліс. Так, на підприємстві АО “Мотор Січ” для попередньої обробки моноколів впроваджено гідроабразивну обробку на 5-координатному верстаті з ЧПК. При цьому підвищується собівартість коліс, але застосування такої обробки для високоміцних коліс з титанових та інших жароміцних сплавів цілком виправдане, що особливо важливо для коліс, виготовлених із важкооброблюваних матеріалів [3, 4].

У дисертації [5] автором розроблено кінематичні схеми і математичні моделі багатокординатного формоутворення міжлопаткових каналів кільцевим інструментом, аналітичні залежності конфігурації і розмірів ріжучого інструмента від параметрів міжлопаткових каналів коліс та технологію прорізування міжлопаткових каналів залежно від кінематичної схеми обробки колеса.

Для основних видів коліс ГТД розробляються нові ефективні схеми формоутворення кінцевою фрезою [6]. Одночасно удосконалюються системи геометричного моделювання, що використовуються при підготовці програм для верстатів з ЧПК. Іноді для компенсації неточності виготовлення коліс використовують раціональні пресові посадки колеса на вал, що забезпечують якісне центрування колеса і виключають його торцеве і радіальне биття [7].

© П. І. Літовченко, В. А. Сало, В. М. Нечипоренко, В. П. Раківненко, 2019

Разом з удосконаленням технології пропонуються і нові методи описування геометрії робочих коліс, наприклад, за допомогою теорії R-функцій [8, 9]. Крім того, ведуться дослідження, спрямовані на підвищення міцності елементів коліс [10, 11]. Недоліком вказаних методів є їх недостатня універсальність для різних схем формування.

**Метою дослідження** є розроблення на основі аналізу геометричної інформації про деталь ефективної універсальної методики розрахунку параметрів траєкторії інструмента при обробці моноколеса ГТД, яка може застосовуватися для оброблення з точковим і лінійним торканням деталі та інструмента на верстатах з ЧПК.

**Виклад основного матеріалу.** Складна геометрична форма і характер взаємного розташування лопаток ускладнюють не тільки математичну обробку даних кресленика і підготовку геометричної інформації для керуючих програм верстатів з ЧПК, а й переміщення інструмента в зоні обробки при виконанні умов формування [6].

Газові міжлопаткові канали робочих коліс (рис. 1), обмежені з трьох боків коритом 4, спинкою 2 і ділянкою поверхні маточини 3, відносять до досліджуваного класу поверхонь. З погляду на теорію багатопараметричних відображень [12] вони мають складну геометричну структуру, що складається з перенесення, обертання і зміни масштабу твірної.

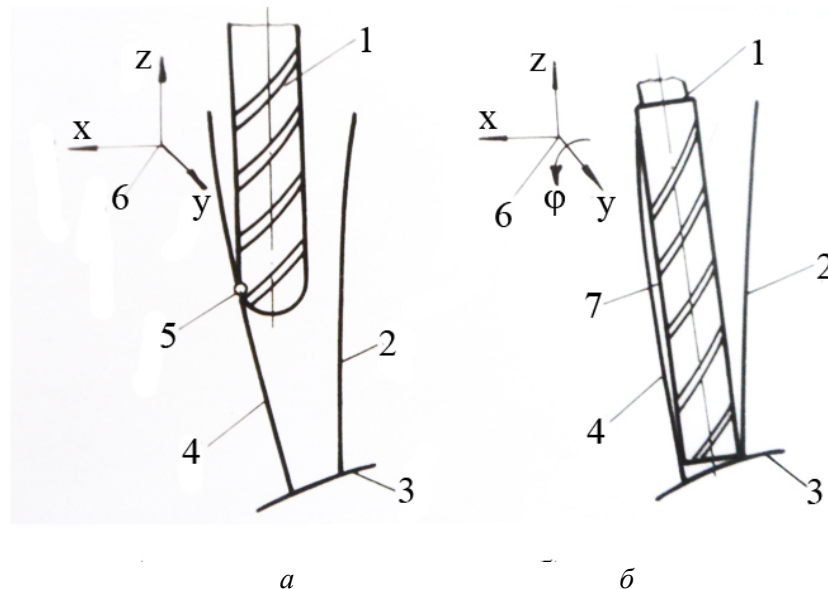


Рис. 1. Схеми формування газового каналу моноколеса:

*a* – трикоординатна схема; *б* – чотирикоординатна схема

(1 – пальцева фреза; 2 – спинка; 3 – маточина; 4 – корито;

5 – точка торкання фрези і деталі при 3-координатній схемі; 6 – система координат фрези;

7 – лінія торкання (твірна фрези) при 4-координатній схемі)

Важливою умовою вибору оптимальної схеми формування каналових поверхонь складної криволінійної форми є врахування геометричних особливостей оброблюваної поверхні. Геометричний аналіз поверхні газового каналу дозволяє не тільки заздалегідь вибрати габарити інструментів, визначити схеми формування, а й намітити маршрутну технологію обробки. Для реалізації запропонованої схеми обробки необхідно отримати траєкторії інструмента при формуванні корита однієї і спинки іншої, сусідньої з нею лопатки, тобто бічних поверхонь одного газового каналу. При цьому торець фрези формує ділянку маточини, яка розташована між коритом і спинкою (“дно” газового каналу). Після формування одного каналу робоче колесо

провертається, наприклад, за допомогою ділильної головки на два кутових кроки (обробка здійснюється через один канал).

Для побудови математичної моделі спочатку було взято кінематичну схему формоутворення. При цьому вважалось, що поверхня газового каналу може бути оброблена за двома схемами: з трьома і чотирма керованими координатами. У випадку трикоординатної обробки (рис. 1, а) спрощується підготовка керуючої геометричної інформації. Крім того, трикоординатний верстат з ЧПУ має більшу жорсткість, ніж чотирикоординатний, що підвищує точність обробки. Однак використання чотирьох керованих координат забезпечує лінійне торкання інструментальної та формоутворюваної поверхонь, що значно збільшує продуктивність обробки. З використанням апарату відображень і структурного підходу до моделювання формоутворення [12] чотирикоординатна схема узагальнюватиме в собі схеми з меншим числом координат, тому була вибрана саме вона (рис. 1, б).

Інструментом взято кінцеву фрезу з конічною ріжучою частиною, яка є більш жорсткою, ніж кінцева фреза з циліндричною ріжучою частиною. В процесі формоутворення оброблювана поверхня деталі є нерухомою, а інструмент робить такі формоутворюючі рухи (рис. 2): паралельне перенесення  $\bar{l}_1$  уздовж осі  $X$ ; паралельне перенесення  $\bar{l}_2$  уздовж осі  $Y$ ; паралельне перенесення  $\bar{l}_3$  уздовж осі  $Z$ ; поворот  $\bar{\varphi}$  навколо осі  $X$ .

За такої кінематичної схеми обробки в результаті складного руху формотворного елемента ріжучої кромки фрези (вважається, що кромка співпадає з твірною) отримуємо образ – лінійчату кінематичну поверхню. Цей результат формоутворення матимемо відповідно до принципу алгоритмічної спільності: рух формотворного елемента співпадає з рухом прообразу поверхні деталі повздовж напрямної. Отримана поверхня з деяким ступенем точності замінює номінальну поверхню виробу, тобто здійснюється часткове формоутворення поверхні лінією як формотворним елементом.

Щоб виконати формоутворення за даною моделлю, необхідно визначити траєкторію інструмента, якому належить формотворний елемент. Траєкторія фрези – це траєкторія точки, жорстко зв'язаної з нею (рис. 3, б). Таким чином, розрахунок траєкторії фрези зводиться до визначення координат послідовності її опорних точок.

Методика розрахунку траєкторії фрези впливає з регламентуючих умов торкання оброблюваної та інструментальної поверхонь або умов апроксимації кривих, які окреслюють профіль перерізу газового каналу, що утворює інструмент. Аналітично ця умова виражається таким чином:

$$\bar{r}_d = \bar{r}_\phi; \quad \ddot{\beta}_d = \ddot{\beta}_\phi, \quad (1)$$

де  $\bar{r}_d$  і  $\bar{r}_\phi$  – радіуси-вектори оброблюваної та інструментальної поверхонь;  $\beta_d$  – кут нахилу дотичної до оброблюваної поверхні в даній точці до осі  $Z_1$ ;  $\beta_\phi$  – кут нахилу твірної фрези до осі  $Z_1$ .

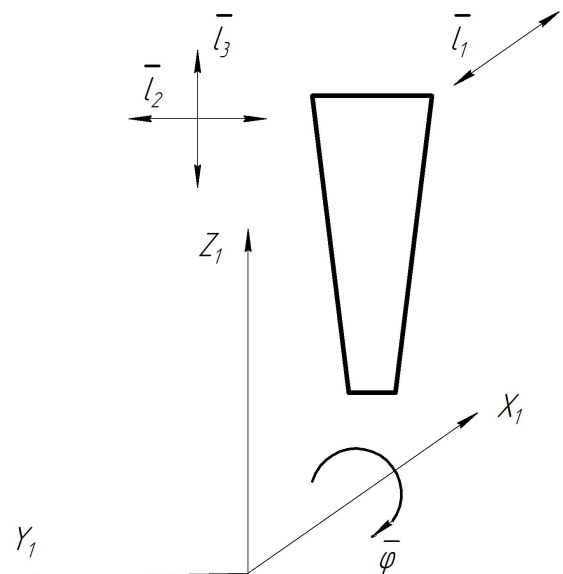


Рис. 2. Кінематична схема  
формоутворення газового каналу

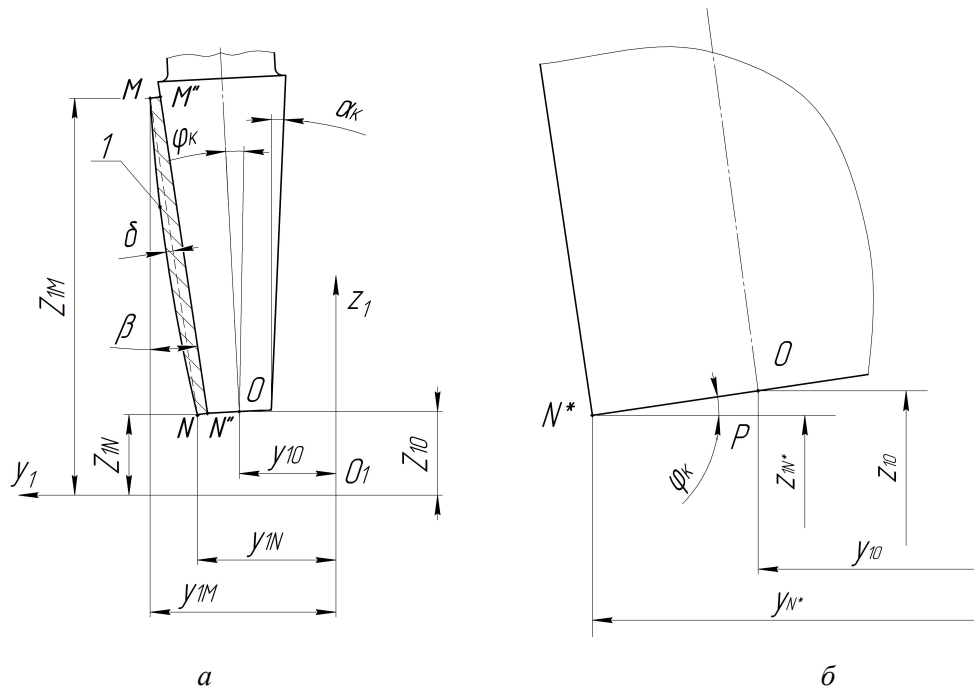


Рис. 3. До визначення координат траєкторії фрези і кута нахилу її осі:  
 а – схема апроксимації перерізу деталі твірною інструмента;  
 б – схема визначення координат програмованої точки

З рис. 3 випливає, що умови (1) виконуються лише в точках  $M$  та  $N$ , у решті точок існує похибка апроксимації  $\delta$ . Розрахунок траєкторії можна виконувати лише після попередньої математичної обробки даних кресленника деталі і геометричного аналізу її робочих поверхонь. При цьому використано як поверхню деталі її дискретну модель – координати точок перерізу газового каналу. Вказану дискретну модель можна перетворити у наближено-аналітичну з використанням методики, викладеної у статті [12]. Однак у даному випадку такий перехід недоцільний через те, що обробка попередня і апроксимація здійснюється інтерполятором верстата з ЧПК, використовуючи точки перерізів газового каналу як вузлові. При застосуванні дискретної моделі регламентуючі умови для кожного з перерізів мають такий вигляд:

$$\bar{r}_{di} = \bar{r}_{\phi i}; \quad \bar{\beta}_{di} = \bar{\beta}_{\phi i}, \quad (2)$$

де  $i = 1, 2, 3, \dots, N$  – номери перерізів газового каналу, що визначаються координатами  $X_i$ .

Вибрана як інструмент фреза з конічною ріжучою частиною (див. рис. 3, а) має такі параметри: діаметри верхньої  $D$  і нижньої  $d$  підстав, довжина ріжучої частини  $l$ , кут нахилу твірної фрези до її осі  $\alpha$ . З рис. 3, а випливає, що кут нахилу осі фрези до координатної осі  $z$  можна визначити в кожному  $i$ -му перерізі зі співвідношення

$$\phi_i = \beta_i \mp \alpha_k, \quad (3)$$

де верхній знак відповідає куту нахилу у випадку обробки корита, а нижній – спинки.

На рис. 3 спинка умовно не показана, оскільки всі геометричні побудови для розрахунку параметрів траєкторії фрези при формоутворенні спинки аналогічні побудові для корита. Кут нахилу твірної фрези  $\beta_i$  визначається з використанням умови апроксимації  $\delta \leq Z_q$ , де  $Z_q$  – сумарний нормальний припуск на попередню обробку спинки і корита, а  $\delta$  – нормальний припуск під наступну чистову або напівчистову обробку:

$$\beta_i = \operatorname{arctg} \frac{y_{1Mi} - y_{1Ni}}{z_{1Mi} - z_{1Ni}}, \quad (4)$$

де  $y_{1Mi}, y_{1Ni}, z_{1Mi}, z_{1Ni}$  – координати граничних точок кривої 1, що є  $i$ -м перерізом корита (спинки).

Кут нахилу твірної фрези до її осі визначається її габаритними розмірами:

$$\alpha_k = \frac{D-d}{2l}. \quad (5)$$

Підставляючи вирази (4) та (5) у формулу (3), отримаємо остаточний вигляд залежності для визначення миттєвого значення кута  $\varphi$ :

$$\varphi_i = \operatorname{arctg} \frac{y_{1Mi} - y_{1Ni}}{z_{1Mi} - z_{1Ni}} \mp \operatorname{arctg} \frac{D-d}{2l}. \quad (6)$$

Для визначення координат програмованої точки  $O$  фрези переходили від апроксимуючої прямої до відрізка твірної інструмента. Координати точок визначали з урахуванням необхідного припуску для подальшої обробки за формулами:

$$\begin{aligned} x_{1M'i} &= x_{1Mi}; y_{1M'i} = y_{1Mi} \mp \frac{\delta}{\cos \delta_i}; z_{1M'i} = z_{1Mi}. \\ x_{1N'i} &= x_{1Ni}; y_{1N'i} = y_{1Ni} \mp \frac{\delta}{\cos \delta_i}; z_{1N'i} = z_{1Ni}. \end{aligned} \quad (7)$$

З трикутника (див. рис. 3, б) визначали:

$$N'P = \frac{d}{2} \cos \varphi_i; OP = \frac{d}{2} \sin \varphi_i. \quad (8)$$

Координати точки визначали із співвідношень:

$$x_{1Oi} = x_{1N'i}; y_{1Oi} = y_{1N'i} - N'P; z_{1Oi} = z_{1N'i} + OP. \quad (9)$$

Підставляючи значення  $x_{1N'i}, y_{1N'i}, z_{1N'i}$  з виразів (7) у формули (9) з урахуванням залежностей (8), отримали остаточний вигляд формул для розрахунку траєкторії кінцевої фрези у процесі оброблення поверхні газового каналу:

$$\begin{aligned} x_{1Oi} &= x_{1Ni}; \\ y_{1Oi} &= y_{1Ni} \mp \frac{\delta}{\cos \left( \operatorname{arctg} \frac{y_{1Mi} - y_{1Ni}}{z_{1Mi} - z_{1Ni}} \right)} - \frac{d}{2} \cos \varphi_i; \\ z_{1Oi} &= z_{1Ni} + \frac{d}{2} \sin \varphi_i. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким чином, отримано аналітичні вирази (6), (10) для розрахунку кутового і лінійних переміщень інструмента по всіх керованих координатах верстата. Подальшим завданням є дослідження траєкторії інструмента на відсутність “підрізів” (інтерференції інструментальної та формоутворюваної поверхонь) і розроблення узагальненого структурного алгоритму розрахунку. Після реалізації такого алгоритму на комп’ютері отримані масиви числової інформації можна кодувати і вводити в систему верстата з ЧПК.

Із аналізу наведених на рис. 4 і 5 графіків випливає, що переміщення програмованої точки фрези у процесі оброблення корита і спинки корелює з дискретними точками перерізів відповідних елементів газового каналу.

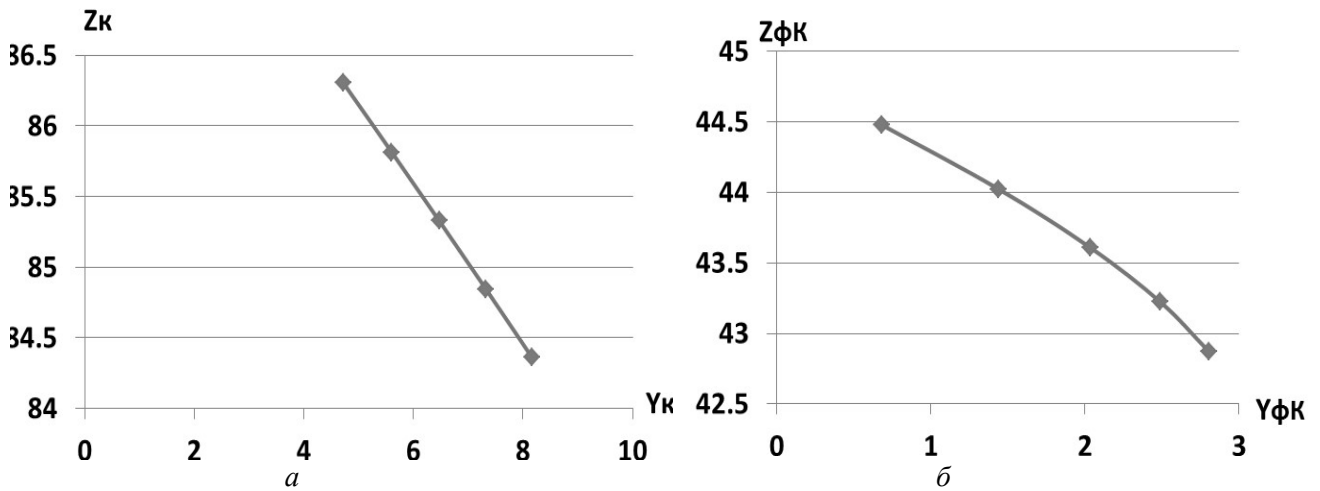


Рис. 4. Формування корита лопатки робочого колеса:  
 $a$  –  $i$ -й переріз поверхні корита;  $\bar{b}$  – траєкторія програмуємої точки фрези  
 при формуванні  $i$ -го перерізу корита

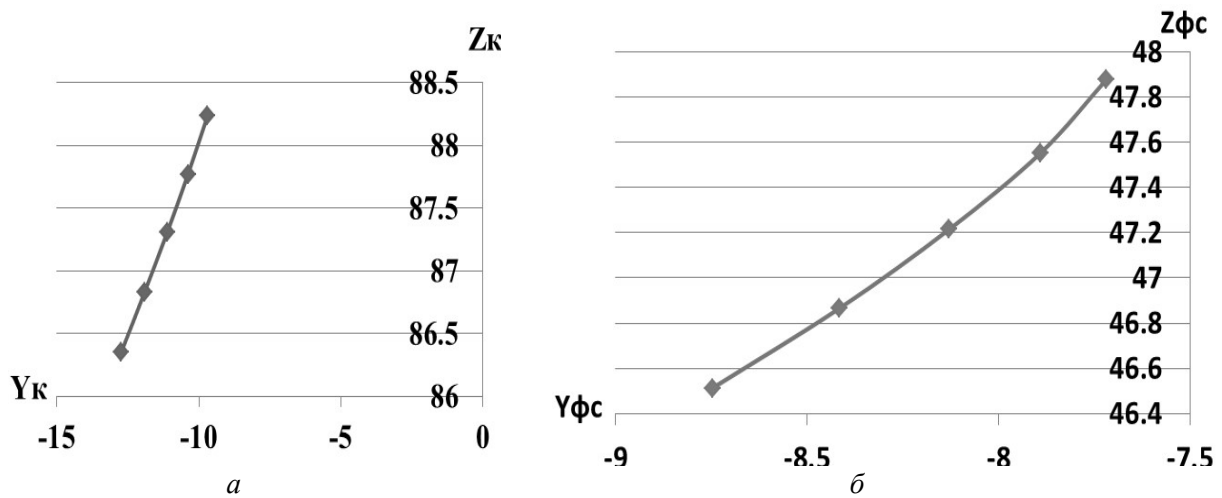


Рис. 5. Формування спинки лопатки робочого колеса:  
 $a$  –  $i$ -й переріз поверхні спинки;  $\bar{b}$  – траєкторія програмуємої точки фрези  
 при формуванні  $i$ -го перерізу

На рис. 6 наведені графіки зміни кута нахилу осі фрези до її вертикальної осі, які показують, що значення кутів значно змінюються при переміщенні фрези. Це підтверджує прийняте рішення про використання чотирикоординатної схеми формування, яка складається з лінійних переміщень по осях  $X, Y, Z$  і повороту  $\varphi$  навколо осі  $Y$ .

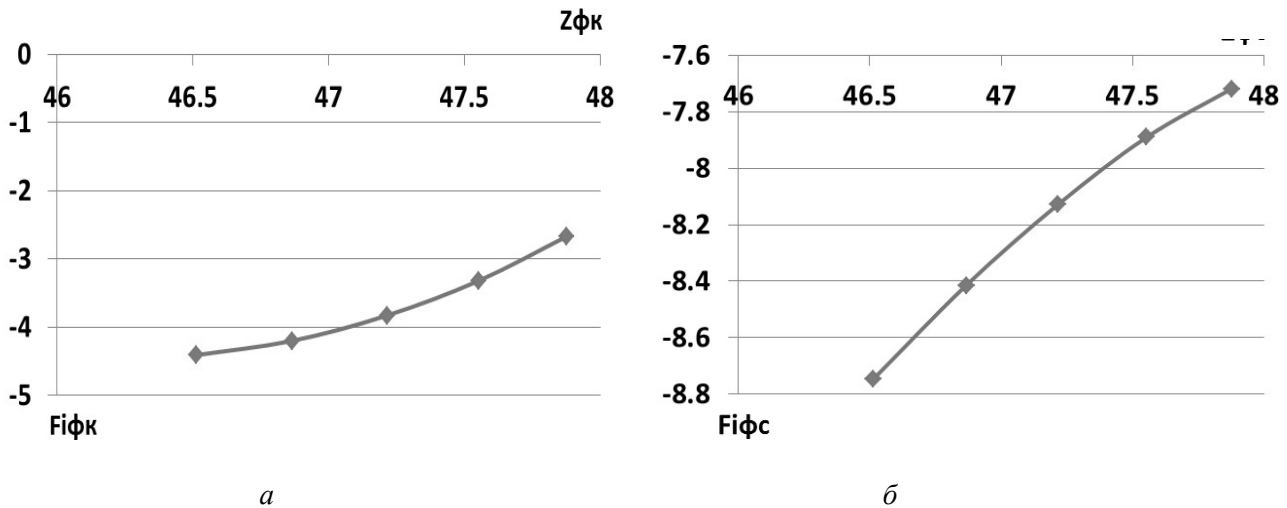


Рис. 6. Зміна кута нахилу осі фрези до вертикальної осі газового каналу:  
а – при формуванні  $i$ -го перерізу поверхні корита; б – при формуванні  $i$ -го перерізу  
поверхні спинки

### Висновки

На основі дослідження та аналізу дискретно заданих поверхонь корита, спинки і маточини розроблено математичну модель формування газового каналу моноколеса ГТД на верстаті з ЧПК. Аналіз результатів автоматизованого розрахунку параметрів траєкторії фрези підтверджує необхідність застосування чотирикоординатної схеми формування. На основі розробленої моделі отримані методика та алгоритм розрахунку керуючої геометричної інформації для формування моноколеса ГТД на верстаті з ЧПК. Перспективною областю застосування результатів є їх включення до складу систем САЕ/CAD/CAM.

### Перелік джерел посилання

1. Современные методы предварительной обработки моноколёс ГТД на станках с ЧПУ/ В. Ф. Мозговой и др. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2015. № 8. С. 5–10. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit\\_2015\\_8\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2015_8_3).
2. Крымов В. В. Производство лопаток газотурбинных двигателей. Москва: Машиностроение-Полёт, 2002. 376 с.
3. Панасенко В. А., Качан А. Я., Мозговой В. Ф. Черновая обработка центробежных моноколёс ГТД с применением плунжерного фрезерования на обрабатывающих центрах с ЧПУ. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 7 (84). С. 48–51.
4. Раківненко В. П., Кириченко О. М., Гребеник Л. А. Дослідження динамічної міцності дисків з фізично нелінійною характеристикою матеріалів, які застосовуються у зразках озброєння та військової техніки. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2017. Вип. 1(29). С. 110–113.
5. Курылев Д. В. Основы формообразования межлопаточных каналов осевых моноколес при предварительном прорезании кольцевым инструментом: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. Казань, 2016. 134 с. <http://www.ulstu.ru/main?cmd=file&object=13888>.
6. Забезпечення умов формування поверхонь робочих коліс газотурбінних двигунів / П. І. Літовченко та ін. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2017. Вип. 2(30). С. 83–87.
7. Новый научно обоснованный метод автоматизованого проектування посадок з натягом / П. І. Літовченко та ін. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2013. Вип. 1(21). С. 74–79.

8. Використання теорії R-функцій для створення раціональних посадок з натягом / В. М. Нечипоренко та ін. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2016. Вип. 2 (28). С. 72–76.

9. Сало В. А. О концентрации напряжений около отверстия в упругой сферической оболочке. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*: сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского. Харьков, 2004. Вып. 2 (37). С. 66–72.

10. Сало В. А., Нечипоренко В. М. Дослідження міцності пружної циліндричної конструкції під дією локального навантаження. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2017. Вип. 2(30). С. 76–82.

11. Сало В. А., Литовченко П. И., Чижиков И. В. Напряженно-деформированное состояние упругой цилиндрической панели с отверстием. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*: сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского. Харьков, 2011. Вып. 1 (65). – С. 63–70.

12. Перепелица Б. А., Літовченко П. І. Математическое и программное обеспечение структурного метода моделирования формообразования поверхностей. *Теория и методы автоматизации проектирования*. Минск: Ин-т техн. кибернетики, 1985. С. 112–122.

*Стаття надійшла до редакції 04.11.2019 р.*

**УДК 621.9.04:621.914-529**

**П. И. Литовченко, В. А. Сало, В. Н. Нечипоренко, В. П. Ракивненко**

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЛОПАТОК РАБОЧИХ КОЛЕС ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*На основе геометрического анализа сложной криволинейной поверхности межлопаточного пространства предложена методика автоматизированного расчета управляющей геометрической информации станка с ЧПУ для обработки сплошных рабочих колес (моноколес) газотурбинных двигателей. Методику рекомендуется использовать в системах САМ при подготовке управляющих программ для станков с ЧПУ.*

*Ключевые слова: газовый канал, поверхность корыта и спинки лопатки, схема формообразования, координаты точек траектории, концевая фреза, программируемая точка инструмента, формообразование и формообразующие элементы.*

**UDC 621.9.04: 621.914-529**

**P. Litovchenko, V. Salo, V. Nechiporenko, V. Rakivnenko**

### **MATHEMATICAL MODEL OF FORMING OF IMPELLER BLADES OF GTE**

*The actual problem of the formation of complex curved surfaces of the blade channels of solid impellers (unicycles) of a gas turbine engine is formulated and presented. When forming GTE unicycles on CNC machines, mathematical difficulties arise because of the discreteness of the task of the working surfaces of the blades, the low rigidity of the end tools, the complexity of their trajectory, the high probability of damage to the surfaces of the blades when they are inadvertently in contact with the tool - "undercuts". A detailed analysis of the specialized literature is performed. It is established that for the processing of GTE unicycles, milling of blade channels by end mills on CNC machines is used. Other technological methods are also used, for example, hydroabrasive treatment on a 5-coordinate CNC machine, shaping with a ring tool. The low universality of the listed methods and technologies, the use of laborious methods for the analytical*



*description of the surfaces of parts and tools, toolpaths of cutting tools are noted. The issues of geometric analysis of the surfaces of the gas channel, bounded by the "pressure side" and "back" of the adjacent blades, as well as by the section of the monowheel hub, are considered. The rationale for the choosing the shaping scheme depending on the geometry of the gas channel is given. A universal methodology based on the analysis of the geometric information about the part has been developed and described for calculating the parameters of the tool path when processing unicycles, which can be used in processing with point and linear contact of the part and tool. A mathematical model of the gas channel shaping on a four-coordinate CNC machine has been developed, a methodology and algorithm for calculating control geometric information for the shaping of GTE unicycles on a CNC machine have been obtained. A promising area of application of the results is their inclusion in the structure of CAD / CAM systems.*

*Key words: gas channel, surface of the pressure side and back of the blade, shaping scheme, coordinates of trajectory points, end mill, programmable tool point, shaping and shaping elements.*

**Літовченко Петро Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.  
[http:// orcid.org/0000-0002-4483-597X](http://orcid.org/0000-0002-4483-597X)

**Сало Валентин Андрійович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.  
[http:// orcid.org/0000-0003-2533-0949](http://orcid.org/0000-0003-2533-0949)

**Нечипоренко Володимир Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.  
[http:// orcid.org/0000-0002-4727-7344](http://orcid.org/0000-0002-4727-7344)

**Раківненко Валерія Павлівна** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.  
[http:// orcid.org/0000-0002-6136-6191](http://orcid.org/0000-0002-6136-6191)