

**КІНЕМАТИКА ПРОЦЕСУ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ  
ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ**

*Визначено закономірності кінематики магнітно-абразивної обробки (МАО) лопаток ГТД, запропоновано методики визначення основних конструктивних параметрів роторних верстатів та розробки технологічних операцій МАО лопаток.*

*Определены основные закономерности кинематики магнитно-абразивной обработки (МАО) лопаток ГТД, предложены методики определения основных конструктивных параметров роторных станков и разработки технологических операций МАО лопаток.*

**Постановка проблеми і  
аналіз попередніх досліджень**

Незважаючи на впровадження високопродуктивного устаткування і нових методів обробки, ще порівняно велика доля ручної праці в загальній трудомісткості виготовлення окремих найбільш складних і відповідальних деталей ГТД і, у першу чергу, лопаток компресора, що мають складну просторову форму, відносно низьку жорсткість і високі вимоги до точності геометричних параметрів і стану поверхневого шару.

Індивідуальні особливості робітника-полірувальника при ручному слюсарному доопрацюванні лопаток ГТД значно впливають на якість поверхневого шару лопаток, викликаючи нестабільність його характеристик. Зменшення об'єму ручного доопрацювання пера лопатки сприяє як зниженню трудомісткості виготовлення двигуна, так і підвищенню його ресурсу за рахунок стабілізації характеристик поверхневого шару. Знизити трудомісткість ручного доопрацювання можна шляхом підвищення точності машинної обробки пера лопатки на остаточному етапі формоутворення пера.

Успіхи, досягнуті в області освоєння заготовок з малими припусками під обробку (0,3–0,5 мм) [1], зробили актуальною розробку технології обробки тонких заготовок лопаток компресора високого тиску з важкооброблюваних матеріалів. Обробка пера лезовим і абразивним інструментом є проблематичною через значну силову і теплову дію на тонке перо лопатки.

Враховуючи зазначене, в якості полірувально-зміцнювальної обробки лопаток може успішно використовуватись магнітно-абразивна обробка (МАО), яка забезпечує також підвищення межі витривалості [2–5]. МАО деталей типу лопаток ГТД вимагає дотримання ідентичних умов силової взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею. Досягнення цієї мети можливе за рахунок надання лопаткам певного наперед заданого закону

руху в робочих зонах з урахуванням їх реальних розмірів і просторової конфігурації [5–7]. Особливо це важливо для лопаток вищих порядків складності з градієнтним по висоті пера закручуванням.

**Метою** даної роботи є визначення залежності вихідних кінематичних параметрів (кутів атаки і сумарної швидкості різання) від геометрії пера лопатки та від вхідних кінематичних параметрів: базування у кільцевій ванні, кількості, типів та послідовності рухів, співвідношення їх швидкостей, а також від основних розмірів робочої зони, ротора та заготовки.

Враховуючи конструктивні особливості лопаток різних типів та вимоги до їх виготовлення, для моделювання кінематики процесу МАО обрано лопатку турбіни ГТД (рисунок 1, а), яка поєднує в собі конструктивні особливості компресорних та турбінних лопаток: профілі 1–7 поперечних перерізів сильно вигнуті (відносні прогини  $\delta f = 0,2\text{--}0,4$ , перо має великий кут закрутки  $\Delta_{\Delta 0} \approx 11,7^\circ$  (рисунок 1, б); профілі верхніх поперечних перерізів (8–11) лопатки змінюються мало ( $\delta f = 0,03\text{--}0,12$ ), перо має малий кут закрутки  $\Delta_{\Delta 0} \approx 1,3^\circ$ .

Оскільки профілі спинки і корита 1–7 поперечних перерізів лопатки істотно змінюються по висоті, обробка лопатки виконується по зонах (рисунок 1, в). Висота зони обирається таким чином, щоб різниця кутів атаки в усіх точках нижнього, середнього та верхнього перерізів кожної із зон не перевищувала допустимої величини  $\Delta_{\text{злон}} = \pm 10^\circ$  [8, 9]. Поверхню лопатки-представника розбито на шість зон висотою  $H_{\text{пн}} = 20$  мм кожна.

При моделюванні кінематики МАО [8, 9] лопатка здійснює такі рухи: головний рух різання при обертанні ротора навколо осі кільцевої ванни зі швидкістю  $\vec{V}_p$ ; коливання лопатки навколо осі коливання зі швидкістю  $\vec{V}_a$  (кругова подача). Коливання виконується навколо осі  $Z_1$ , або навколо осі, що паралельна їй і знаходиться на відстані  $L$  від неї; рух осциляції  $V_0$  вздовж осі  $Z_1$ .

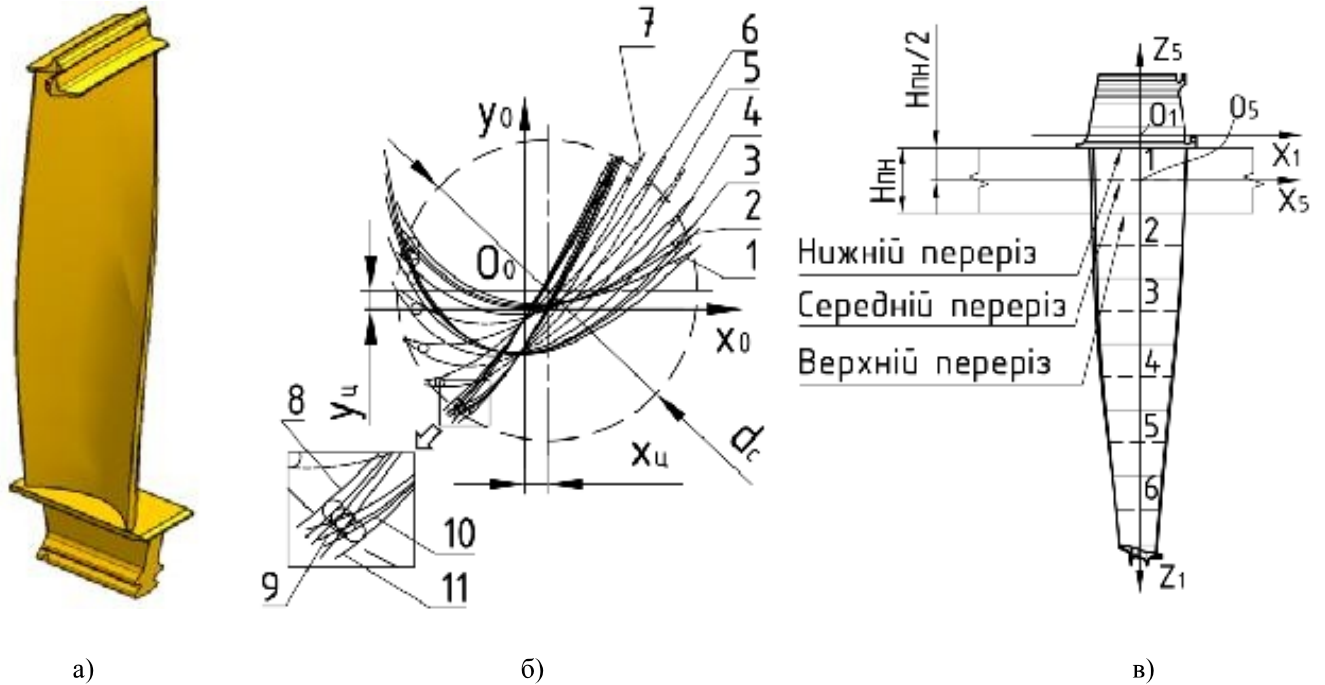


Рисунок 1 — Розбиття лопатки на зони: а) зовнішній вигляд лопатки; б) форми середніх поперечних перерізів зон та положення осі коливання; в) оброблені зони  $x_c$  та  $y_c$  — координати кола мінімального радіусу  $d_c$ , до якого потрапляють проекції кіл вхідних та вихідних кромки пера на площину полицки хвостовика;  $H_{пн}$  — висота полюсного наконечника

Загальна матриця координатних перетворень [8, 9]:

$$MRT_{1-7} = MT(0, 0, T_z) \cdot MR_z(\Phi) \cdot MT(0, R_{cp} \cdot L, 0) \cdot MR_z(\alpha) \cdot MT(0, L, 0) \cdot MR_z(\alpha_{кор}),$$

де  $\alpha_{кор}$  — кут коригувального повороту лопатки, який дорівнює куту закрутки пера в середньому перерізі оброблюваної зони.

Для знаходження координат точок профілів спинки та корита пера по осях  $X$  та  $Y$  використовувалась інтерполяція кубічними сплайнами. Кінематичні параметри визначались у двох зонах-представниках: першій та шостій (рисунок 1).

Операція MAO лопатки складається із двох переходів, у кожному з яких лопатка здійснює прямий і зворотний ходи (коливання) у русі кругової подачі. Перший перехід — обробка на вхідну кромку, другий — обробка на вихідну кромку. Екстремальні значення кутів атаки на спинці і кориті пера за повний оберт лопатки досягають  $\chi \approx \pm 89,6^\circ$  (рисунок 2). Збільшення швидкості коливального руху незначно змінює значення екстремумів. За повний оберт лопатки навколо осі коливання криві  $\chi = f(\alpha)$  перетинають пряму  $\chi_{опт}$  декілька разів.

Абсциси точок перетину запропоновано використати як кінцеві положення лопатки у коливальному русі. Кути  $\alpha$ , при яких у початковій і кінцевій точках профілю куту атаки до поверхні лопатки дорівнюють оптимальному куту  $\chi_{опт}$ , прийняті за початкове  $\alpha_{ст}$  і кінцеве  $\alpha_{кн}$  кутові положення робочого діапазону.

На рисунку 2 кінці діапазонів показано вертикальними пунктирними лініями. При реверсі голов-

ного і коливального рухів амплітуда коливання

$\alpha_{АК} = \alpha_{кн} - \alpha_{ст}$  змінюється. У межах можливих діапазонів куту атаки на поверхнях спинки та корита пробігають значення від  $\chi_{опт}$  до  $\chi_{max}$  умови обробки змінюються від ударного зміцнення до вигладжування та полірування.

При розробці технологічної операції виконується перевірка можливості коливання лопатки з заданою амплітудою за заданою шириною робочої зони, а при проектуванні верстата визначається необхідна ширина робочої зони для забезпечення заданої амплітуди. Обидві задачі вирішуються моделюванням повороту нижнього та верхнього перерізів кожної із зон лопатки з одного кінцевого положення до іншого з певним кроком та визначенням мінімальних та максимальних відстаней точок профілів до осі коливання. Зміна величини міжосьової відстані (між віссю кільцевої ванни та віссю коливання лопатки) при  $D_{cp} = const$  у діапазоні  $|\delta D_v| = 0-0,5$  ( $\delta D_v = (D_{cp} - D_v) / D_{cp}$ ) для першої зони і в діапазоні  $|\delta D_v| = 0-0,9$  для шостої зони призводить до зміни значень кінцевих положень та амплітуди коливання у межах  $5-20^\circ$ . Сталі максимальні амплітуди при обмеженій величині ширини робочої зони кільцевої ванни мають місце при  $|\delta D_v| = 0,025-0,06$ .

Рух осциляції поздовж осі коливання лопатки призводить до зменшення максимальних значень кутів атаки, звуження діапазонів коливань на кілька градусів і їх зміщення: при додатному напрямі швидкості осциляції у напрямку зменшення кутів  $\alpha$ , а при від'ємному напрямі швидкості осциляції — у бік збільшення

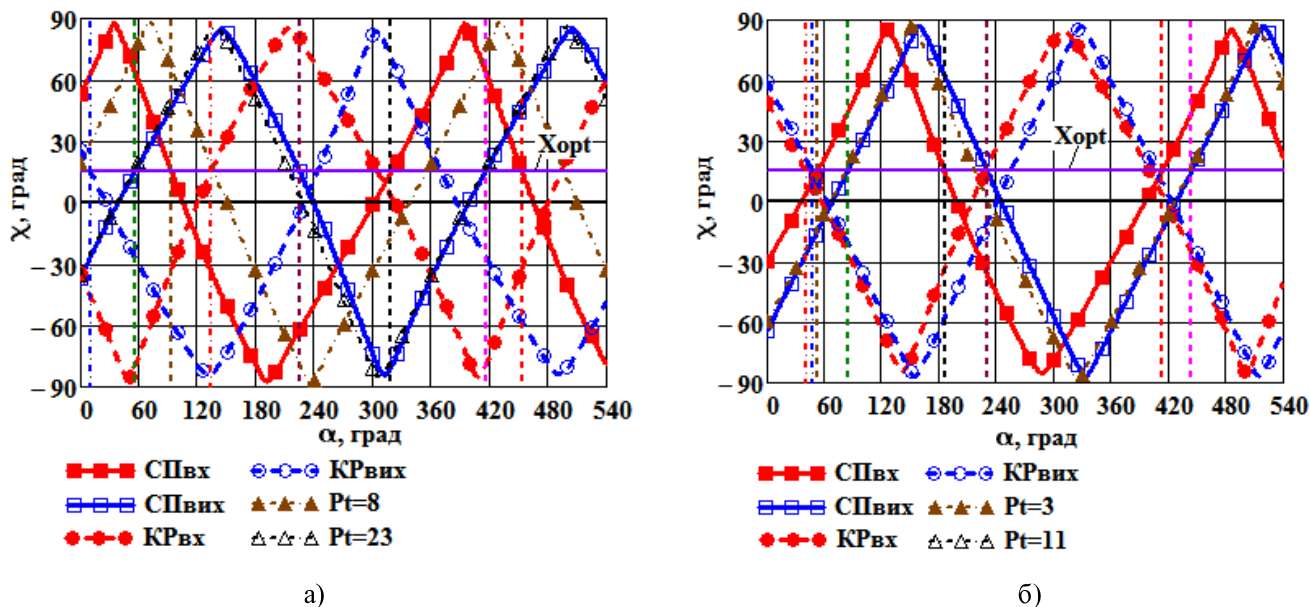


Рисунок 2 — Залежності кутів атаки в кінцевих точках профілю лопатки від кута повороту та можливі кінцеві положення ( $D_{cp} = 200$  мм): а) при обробці першої зони, зворотний хід ( $V_p = -V_{p0}$ ,  $V_a/V_p = 0,1$ ,  $L=0$ ,  $P_t=27$  точок на профілі); б) при обробці шостої зони, прямий хід ( $V_p = -V_{p0}$ ,  $V_a/V_p = -0,1$ ,  $L=15$ ,  $P_t=14$  точок на профілі);  $SP_{vx}$  — вхідна точка спинки;  $SP_{vix}$  — вихідна точка спинки;  $KR_{vx}$  — вхідна точка корита;  $KR_{vix}$  — вихідна точка корита

кутів  $\alpha$ . При  $V_o/V_p = 0,5$ , максимальні значення кутів атаки наступні: на спинці  $\chi_{SP_{max}} \approx 63^\circ$ , на кориті

$\chi_{KR_{max}} \approx 64^\circ$ . На сумарну швидкість різання помітний вплив чинять швидкості осциляції величиною  $|V_o/V_p| > 0,3$ .

Жодний із можливих діапазонів не забезпечує рівномірної обробки профілю спинки і корита за один перехід. Придатними для розробки операцій MAO є діапазони менші  $180^\circ$ , у межах яких (або поблизу їх границь) відрізки залежностей  $\chi = f(\alpha)$  знаходяться над горизонталлю  $\chi = \chi_{opt}$  (рисунок 2): для вхідної і вихідної точок спинки або корита; для вхідної точки спинки і вихідної точки корита або для вихідної точки спинки і вхідної точки корита. Для кінцевого аналізу обирається діапазон, максимальний із можливих для двох переходів, якщо значення кутів атаки в кінцевих позиціях відрізняються не більше ніж на  $10^\circ$ , або максимально можливий у межах одного переходу. В останньому випадку при зміні переходу (реверсі головного руху) виконується установочий зворот із кінцевої позиції першого переходу до кінцевої позиції другого переходу.

Для вибору найбільш раціональних діапазонів для кожної із зон для всієї сукупності потрібних переходів запропоновано застосувати показники:

- критерій інтенсивності MAO  $k_{кеф}$ , з урахуванням його структури (відносного відхилення кута атаки

$$\varepsilon R_{\chi_{opt}} \text{ та відносного активного кута } t_{p\chi} \text{ [8, 9];}$$

- рівномірність розподілу критерію інтенсивності MAO  $k_{кеф}$  по поверхні зони у вигляді максимальних

відхилень його середніх величин  $R_{k_{max}}$  та середніх величин його складових  $R_{\chi_{max}}$  та  $R_{\chi_{tp_{max}}}$  по профілю за всю операцію;

- величину необхідної ширини робочої зони кільцевої ванни.

Значення критеріїв для  $\chi_{opt} = 15^\circ$  наведено у таблиці 1.

При обробці профілю першої зони найбільш раціональним є четвертий діапазон ( $\alpha_{ст1} = 305^\circ$ ,  $\alpha_{кн1} = 423^\circ$ ) (рисунок 3, а, б), максимальне значення ширини кільцевої ванни для якого  $H_{kv4} = 27,6$  мм. При обробці профілю шостої зони найбільш раціональним є перший діапазон ( $\alpha_{ст6} = 14^\circ$ ,  $\alpha_{кн6} = 50^\circ$ ) (рисунок 3, в, г), максимальне значення ширини кільцевої ванни для якого  $H_{kv1} = 18,2$  мм.

Величина діаметра середнього циліндра у межах  $D_{cp} = 200-800$  мм суттєво не впливає на величини кутів атаки, їх максимальні значення змінюються не більше, ніж на один градус. Збільшення  $D_{cp}$  призводить до зменшення максимальних значень  $\vec{V}_{\Sigma}$  і наближення її середніх значень до  $V_{p0}$ . Збільшення відстані  $L$  при підтримці лінійної швидкості коливального руху на сталому рівні призводить до зростання необхідної ширини робочої зони, амплітуди коливаний сумарної швидкості різання  $\vec{V}_{\Sigma}$  та до значної нерівномірності обробки.

Для експериментальної перевірки доцільності запропонованого методу розробки операцій MAO лопаток проведено експериментальні дослідження

Таблиця 1 — Граничні значення критеріїв інтенсивності MAO

$\chi_{opt}$	$\varepsilon R_{\chi_{opt\min}}$	$\varepsilon R_{\chi_{opt\max}}$	$k_{кеф_{opt}}$	$k_{кеф_{\min}}$	$k_{кеф_{\max}}$	$k_{кеф_{доп-}}$	$k_{кеф_{доп+}}$	$k_{кеф_{рац-}}$	$k_{кеф_{рац+}}$
15°	-7	5	1.0	-7.0	6.0	≈ -0.2	1.2	≈ 0.33	≈ 1.7

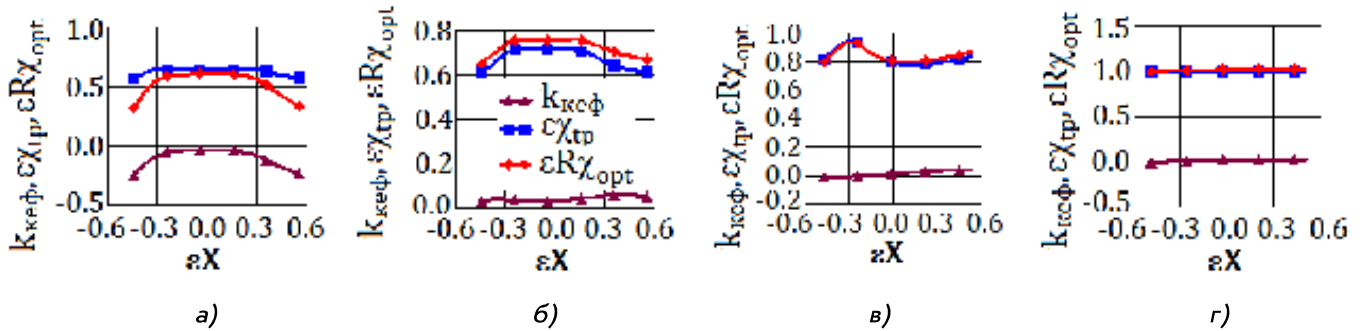


Рисунок 3 — Розподіл середніх величин критеріїв інтенсивності MAO по профілю лопатки при обробці першої та шостої зон за цикл ( $D_v=200$  мм;  $L=0$  мм): а), б) перша зона, діапазон 4; в), г) шоста зона, діапазон 1; а), в) — спинка; б), г) — корито;  $\varepsilon X = x_i / (x_{28} - x_i)$ ,  $x_i$ ,  $x_1$ ,  $x_{28}$  — ординати поточної, першої та останньої точок профілю

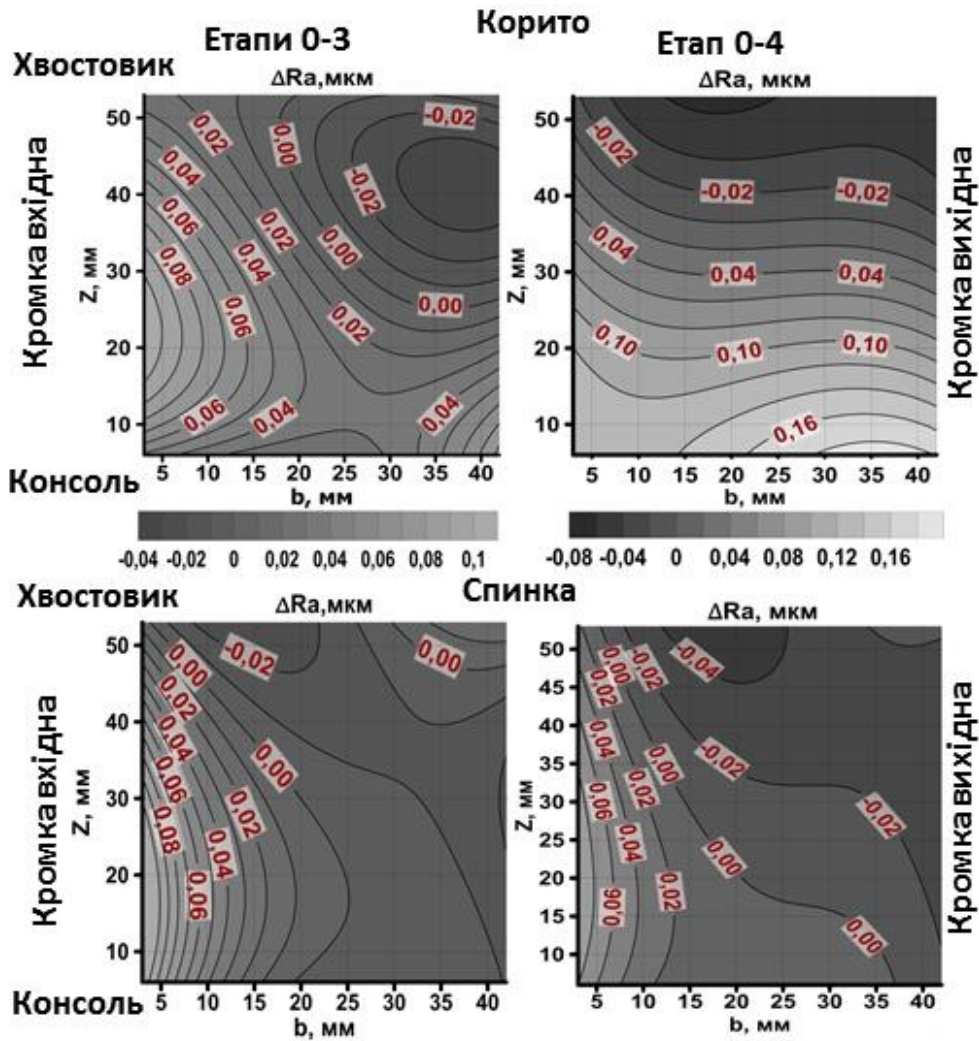


Рисунок 4 — Топограми зміни шорсткості поверхні лопатки при MAO



процесу обробки лопаток компресора ГТД із сплаву ЭИ-961, час напрацювання яких складав 2500 годин. Швидкість головного руху складала 3–3,5 м/с, кут коливань  $\alpha = \pm 14^\circ$  та частота коливань  $n_{\text{пк}} = 1-2$ , що було визначено за розробленою методикою. Індукція магнітного поля в робочій зоні складала 0,25–0,35 Тл. Для аналізу кінетики процесу МАО лопаток повний технологічний цикл обробки був розбитий на чотири етапи: 1 етап — час обробки 55 с; 2 етап — час обробки 55 с + 50 с; 3 етап — час обробки 55 с + 50 с + 75 с; 4 етап — реверс обертання (на вихідну кромку) час обробки 115 с. Топограми зміни шорсткості поверхні (рисунок 4) свідчать про досить високу рівномірність обробки.

### Висновки

1. Для забезпечення регульованого керування процесами переважного полірування або зміцнення оброблюваних поверхонь лопаток останні повинні виконувати наступні формотворчі та установчі рухи:

- головний рух різання зі швидкістю  $V_{\text{рo}}$  ;

- рух додаткової кругової подачі (рух коливання)

зі швидкістю  $0.1V_{\text{рo}} \leq |V_{a0}| \leq 0.5V_{\text{рo}}$  для 1-4 зон (для профілів великої кривизни з відносним прогином профілю  $\delta f > 0,1$ ) і  $0.1V_{\text{рo}} \leq |V_{a0}| \leq 0.2V_{\text{рo}}$  для 5-6 зон (для профілів малої кривизни з відносним прогином  $\delta f < 0,1$ );

- рух осциляції вздовж осі Z системи координат опису профілів зі швидкістю  $0.1V_{\text{рo}} \leq |V_{o0}| \leq 0.5V_{\text{рo}}$  ;

- установчий рух компенсації кута закрутки оброблюваної зони, який визначається по середньому перерізу зони.

2. За кінцеві кутові положення лопатки у русі додаткової кругової подачі потрібно прийняти кутові положення, які відповідають умовам:

- у кінцевих точках профілю кути атаки до поверхні лопатки дорівнюють оптимальному куту атаки, притаманному фізико-механічним властивостям поверхні та умовам обробки лопатки, з допустимими відхиленнями;

- усередині діапазону кути атаки на оброблюваній поверхні більші оптимального кута з допустимими відхиленнями.

3. Встановлено, що при дотриманні цих умов кожна точка профілю лопатки піддається дії магнітно-абразивного порошку, який спливає на оброблювану поверхню під кутом атаки, що змінюється від оптимального до найбільшого значення, що визначається кривизною профілю, співвідношенням швидкостей головного і коливального рухів, величиною плеча коливань та прийнятими значеннями кінцевих кутових положень.

### Література

1. Смирнов, Г.В. Проектирование технологии окончательной электрохимической обработки лопа-

ток газотурбинных двигателей с учетом технологической наследственности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2007. — №1 — С. 217—222.

2. Грязнов, Б.А. Влияние композиционного многослойного ионно-плазменного покрытия на сопротивление усталости рабочих лопаток компрессоров ГТД / Б.А. Грязнов, В.С. Майборода, Ю.С. Налимов та ін. // Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций: труды конф., 6-9 июня 2000 г., Киев, Т.2 / Отв. редактор В.Т. Троценко. — К.: НАН України, Ин-т пробл. прочности. — 2000. С.757—762.

3. Грязнов, Б.А. Вплив комплексної магнітно-абразивної обробки і композиційних покриттів на характеристики втоми робочих лопаток ГТД / Б.А. Грязнов, В.С. Майборода, Ю.С. Налимов та ін. // Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні: міжнар. наук.-техн. конф. 9-11 листопада 2001 р.: тези доп. — К., 2001. — С. 33—34.

4. Грязнов, Б.А. Исследование влияния видов обработки поверхности и многослойного покрытия пера лопаток на их характеристики сопротивления усталости / Б.А. Грязнов, В.С. Майборода, Ю.С. Налимов и др. // Проблемы прочности. — 1999. — №5. — С.109—116.

5. Майборода, В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ...докт. техн. наук: 05.03.01/Майборода Віктор Станіславович. — Київ, 2001. — 404 с.

6. Гейчук, В.М. Закон движения лопаток ГТД при магнитно-абразивной обработке в условиях кольцевой магнитной системы / В.М. Гейчук, В.С. Майборода // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". — Машиностроение. — 2003. — Вып. 44. С. 187—189.

7. Степанов, О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной формы: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06/Степанов Олег Васильевич. — Киев, 1997. — 145 с.

8. Гейчук, В.М. Кінематика магнітно-абразивної обробки багатогранних непереточуваних твердосплавних пластин в магнітній системі типу "кільцева ванна" / В.М. Гейчук, В.С. Майборода // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. праць ЖДТУ. — Житомир: ЖДТУ. — 2010. — Вип.8. — С.41—76.

9. Гейчук В.М. Математична модель кінематики процесу магнітно-абразивної обробки комплексів поверхонь//Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наукових праць ЖДТУ. — Житомир: ЖДТУ. — 2011. — Вип. 10. — С. 99—114.

Надійшла 20.09.2012 року