Зростання коефіцієнта K з 4,5…6,7 до 8,5…9,7 свідчить про перехід від видалення піків поверхні після фрезерування до формування специфічного плато. Згідно з Ульманом [6], це вказує на завершення трансформації профілю – 8 годин це час, необхідний для «стирання технологічної пам'яті» матеріалу.

Висновки.

1. Експериментально доведено справедливість правил Хашимото для віброабразивного полірування з наповнювачем RMB/D1 – швидкість покращення поверхні прямо пропорційна початковій шорсткості, що веде до конвергенції результатів незалежно від діаметра фрези до 8-ї години обробки.

2. Час віброабразивної обробки 8 годин є раціональним для гарантованого досягнення межі шорсткості (Ra≈0,1 мкм) на ділянках з найбільш грубою поверхнею (фреза 3,2 мм) за умови використання обробки лопаток без закріплення.

Рекомендації для подальших досліджень. Впродовж досліджень впливу вібраційної обробки на якість бажано провести вивчення поверхневого наклепу, а саме впливу 8-годинної обробки на створення залишкових напружень стискання (віброзміцнення) та їх зв'язку з втомною міцністю лопаток.

Список посилань

1. Rosler Ceramic Tumbling Media [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.precisionfinishinginc.com/rosler-ceramic-media (дата звернення: 31.03.2026).

2. State-of-the-Art on Vibratory Finishing in the Aviation Industry [Електронний ресурс] / DR-NTU. – Режим доступу : https://dr.ntu.edu.sg/bitstreams/e0116e96-5d12-4a54-9139-b1aa6376c20a/download (дата звернення: 31.03.2026).

3. Hashimoto F., DeBra D. B. Modelling and Optimization of Vibratory Finishing Process // CIRP Annals. – 1996. – Vol. 45. – P. 303–306.

4. Kittredge J. Understanding Vibratory Finishing Revisited // Products Finishing. – 1998. – Vol. 62. – P. 8.

5. J. F. Archard та W. Hirst, "The Wear of Metals under Unlubricated Conditions", Proceedings of the Royal Society A, Vol. 236, No. 1206, pp. 397–410, 1956

6. Uhlmann E., Dethlefs A., Eulitz A. Investigation into a geometry-based model for surface roughness prediction // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 75. – P. 815–823.

УДК 621.438

Уланов С. О., PhD, доцент
Качан О. Я., докт. техн. наук, професор
Національний університет «Запорізька політехніка», kachantad@gmail.com

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ КРОМОК ДЕТАЛЕЙ ГТД ВІЛЬНИМ АБРАЗИВОМ

Основною тенденцією сучасного авіадвигунобудування є підвищення надійності й ресурсу деталей авіаційних газотурбінних двигунів у процесі їхнього виробництва із застосуванням прогресивних технологічних методів. Аналіз пошкоджень і руйнувань дисків, валів, лопаток авіаційних двигунів у процесі експлуатації показав, що основною їхньою причиною є зниження опору втомленості. Обідна частина дисків через наявність пазів «ластівкин хвіст», гострих кутів, міжпазових виступів, усіляких радіусних сполучень та кромок визначає високий рівень концентрації напружень.

Для підвищення продуктивності на фінішних операціях дисків компресора й зварених барабанів одержала поширення обробка в псевдозрідженому абразиві із застосуванням повітряних струменів. Встановлено, що обробка зварених барабанів псевдозрідженим абразивом із застосуванням повітряних струменів підвищує їх довговічність в 2,2 рази.

Мета роботи полягає у розробці моделі процесу обробки поверхонь кромок деталей у псевдозрідженому шарі абразиву із застосуванням повітряних струменів для визначення основних параметрів процесу обробки.

Експериментальні дослідження впливу схем обробки та технологічних умов проводилися на зразках – дисках з алюмінієвого сплаву Д1Т, а також на натурних деталях – типових представників дисків компресорів, виготовлених зі сплавів ВТ3–1, ВТ9 та ЭИ698–ВД.

Дослідження проводилися на дослідно-промислових установках моделі АПС-600А. Застосовувалося стандартне шліфувальне зерно карбіду кремнію зеленого 63С й електрокорунду білого 24А різної зернистості, а також їх суміші. У процесі дослідження вихідними рівняннями були відомі залежності для динамічного тиску повітряних струменів, що натікають на перешкоду, а також зміна параметрів плоских струменів на шляху їхнього розширення від зрізу сопла до оброблюваної поверхні.

Відповідно до запропонованої моделі:

- обробка поверхні кромки деталі 1 виконувалась при впливі на абразивне середовище 2, яке перебуває в псевдозрідженому стані, повітряним струменем 3. При цьому вісь симетрії O - O_1 повітряного струменя 3 спрямована по бісектрисі кута грані кромки деталі 1 (рис. 1);
- при витіканні із сопла повітряний струмінь розширюється симетрично щодо осі;
- розподіл динамічного тиску нерівномірний з максимумом на осі й рівний нулю на границях поверхні кромки деталі.

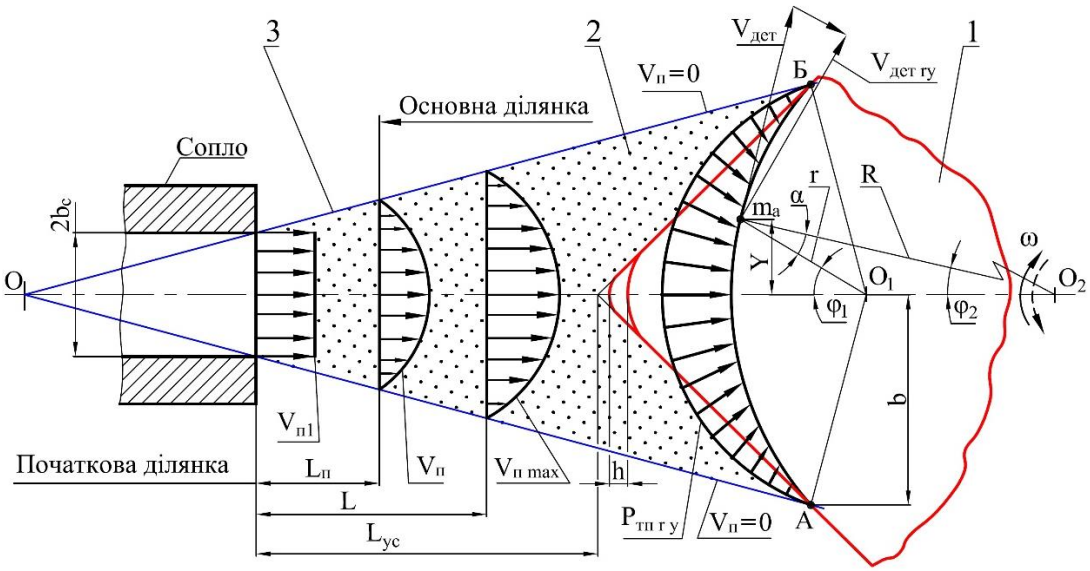

Рис. 1 – Модель процесу обробки кромки деталі вільним абразивом із застосуванням повітряного струменя

Динамічний тиск повітряного струменя в точках поверхні визначається як функція від густини повітря та квадрату швидкості струменя в заданій точці. Абразивна частка масою m_a буде робити обробку поверхні кромки в точці з координатою Y за умови, що тиск повітряного струменя перевищує граничний тиск мікрорізання.

Реалізація запропонованої схеми на практиці дозволила встановити такі технологічні особливості:

- обробка дисків у суміші 63С50 + 63С25 дозволила скоротити час їхньої обробки до 6...8 хвилин, тобто в 1,5 рази в порівнянні з обробкою монозерном;
- обробка диска з матеріалу ЭИ698-БД у суміші із накладенням на деталь вібрацій із частотою 20-55 Гц й амплітудою 2...3 мм скоротило час обробки до 16 хвилин;
- одночасно з округленням кромок забезпечується полірування полотна до шорсткості 0,16...0,32 мкм на титанових дисках і 0,32 мкм на дисках із жароміцного сплаву. Знімання металу по полотну становить 0,01...0,04 мм;
- за результатами експериментальних випробувань дисків із титанового сплаву ВТ3-1 сполучення збільшення радіуса викружки з наступною обробкою підвищує довговічність до появи тріщини в 6 разів, а живучість диска з тріщиною в 5,5 разів.

На основі проведених досліджень розроблено модель процесу обробки поверхонь кромок деталей вільним абразивом у псевдозрідженому стані із застосуванням повітряних струменів, що дозволило отримати основні закономірності для визначення параметрів процесу та встановити його ключові технологічні характеристики відповідно до запропонованої моделі.

Список посилань

1. Агишев Б. М., Елашов А. А., Моисеенко Н. В. Применение методов поверхностного пластического деформирования для повышения усталостной прочности дисков компрессора авиационных ГТД. *Проблемы прочности.* 1977. № 3. С. 114–116.

2. Качан О. Я., Уланов С. О. Встановлення закономірностей обробки дисків в псевдозрідженому шарі абразиву. *Космічна наука і технологія*. 2023. Т. 29. № 6. С. 62-67. https://doi.org/10.15407/knit2023.06.062

3. Качан О. Я., Уланов С. О. Підвищення довговічності зварних барабанів роторів компресорів обробкою в псевдозрідженому шарі абразиву // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2022. – № 1. – С. 53–57. https://doi.org/10.15588/1607-6885-2022-1-7

4. Качан О. Я., Уланов С. О. Модель процесу обробки кромок деталей авіакосмічної техніки вільним абразивом із застосуванням повітряних струменів. *Космічна наука і технологія*. 2024. Т. 30. № 5. С. 29–35. https://doi.org/10.15407/knit2024.05.029

УДК 621.438.4

Омельченко Ю.В., аспірант
Уланов С.О., PhD, доцент
Національний університет «Запорізька політехніка», yuomelch45@gmail.com

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ЛОПАТОК ГТД

Сучасні робочі лопатки є одними з найбільш високонавантажених деталей газотурбінних двигунів (ГТД). Вони функціонують у надзвичайно складних експлуатаційних умовах. Це високі температури та циклічні термомеханічні навантаження, які супроводжуються інтенсивною газовою корозією. Окрім цього, матеріал отримує значний вплив природніх абразивів (пісок, пил і т. д). Такі фактори впливу зумовлюють прискорену деградацію поверхневих шарів матеріалу. З'являється втомне руйнування деталі та ерозійний знос. Також часто можна спостерігати ефект кавітаційного пошкодження пера лопатки.

В сучасних умовах експлуатації повітряних суден, пріоритетним завданням є мінімізація експлуатаційних витрат та підвищення ресурсу експлуатації ГТД без радикальної зміни його конструкції та без заміни базових сплавів. Таку задачу можна вирішити шляхом збільшення показників втомної міцності та зносостійкості критичних деталей ГТД через використання технологічних методів зміцнюючої поверхневої обробки матеріалу цих деталей.

Метою даної роботи є систематичний аналіз ефективності окремих технологій поверхневого зміцнення та дослідження синергетичного ефекту, що виникає при їх комплексному застосуванні, для досягнення максимального приросту ресурсу авіаційних деталей.

Аналіз окремих методів зміцнення.

Сучасний арсенал методів фінішної обробки дозволяє цілеспрямовано впливати на фізико-механічні властивості поверхні.

На основі аналізу ефективності використання 13 найпоширеніших методів поверхневої зміцнювальної обробки було визначено найбільш практичні та економічно обґрунтовані:

1. Механічне зміцнення (LSP). Лазерно-ударна обробка (Laser Shock Peening) змінення створюється через дію мікровибухової плазмової хвилі, ініційованої лазерним імпульсом.