УДК 621.924 : 62-253.51

Гребенніков М.О., аспірант
Національний університет «Запорізька політехніка», mg.asp.2023@gmail.com
АТ «Івченко-прогрес», GrebennikovMA@ivchenko-progress.com
Гончар Н.В., канд. техн. наук, доцент
Національний університет «Запорізька політехніка», gonchar@zp.edu.ua

ОБҐРУНТУВАННЯ УНІФІКАЦІЇ ЧАСУ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ЛОПАТОК ГТД З РІЗНИМ ВИХІДНИМ МІКРОРЕЛЬЄФОМ

У даній роботі досліджується феномен конвергенції параметрів шорсткості (Ra, Rz) лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) з жароміцного сплаву, що мають різну технологічну передісторію (профіль лопаток сформовано фрезеруванням кінцевими фрезами Ø3,2 мм та Ø12 мм), при віброабразивної обробці. На підставі експериментальних даних та аналізу існуючих математичних моделей обґрунтовується необхідність встановлення єдиного часового інтервалу обробки для досягнення «межі шорсткості» та формування однорідної опорної поверхні, незалежно від вихідного стану та способу фіксації заготовок.

Вступ. Фінішна обробка пера лопаток ГТД є критичним етапом, що визначає аеродинамічний ККД та втомну довговічність двигуна. Одним із завдань сучасного авіабудування є створення відтворюваних технологічних процесів особливо відповідальних деталей, таких як лопатки авіаційного двигуна, що можуть забезпечити задану якість поверхні (Ra≤0,2 мкм) при збереженні жорстких геометричних допусків аеродинамічних профілів. Віброабразивне полірування є фінішною обробкою, що дає прогнозований результат при варіативності вихідних параметрів процесу, таких як наповнювач, тривалість обробки і амплітуда коливань. Особливий інтерес становить використання високоефективного наповнювача RMB/D1, який належить до категорії швидкорізальних керамічних середовищ [1]. Незважаючи на значні відмінності у вихідній шорсткості після фрезерування інструментами різного діаметра, практика показує необхідність уніфікації часу обробки до 8 годин, що потребує теоретичного обґрунтування.

Аналіз сучасних теорій вібраційної обробки. Процес формування поверхні при віброабразивному впливі традиційно описується як «чорний ящик» через стохастичний характер взаємодії тіл [2]. Однак ряд фундаментальних досліджень дозволяє систематизувати цей процес.

Правила Хашимото [3]. Згідно з першою теорією, шорсткість поверхні знижується експоненційно до досягнення постійного значення, яке називається «межею шорсткості», що є інваріантним для конкретної комбінації «матеріал-наповнювач». Друге правило стверджує – чим вища різниця між вихідною шорсткістю поверхні та межею шорсткості, тим вища швидкість знімання матеріалу на початковому етапі.

Теорія «Тетраедра взаємозалежності» [4]. Якість поверхні визначається взаємодією чотирьох факторів: обладнання, наповнювача, деталі та технологічної рідини. Середовище RMB/D1, маючи високу щільність та різальну здатність, виступає домінуючим фактором, що нівелює вплив вихідного мікрорельєфу.

Механізм зношування за Арчардом [5]. Обсяг матеріалу, що видаляється, прямо пропорційний нормальній силі та шляху тертя. У закріпленому стані нормальні сили різання, враховуючи масу наповнювача, вищі, що прискорює досягнення межі шорсткості, але підвищує ризик виникнення браку за геометрією.

Експериментальні дані та обговорення. У ході випробувань порівнювалися лопатки, які були оброблені в установках R220 у вільному стані (без закріплення) та FBA 24 з закріпленням по хвостовій частині у спеціальному пристосуванні, з використанням наповнювача RMB/D1 в обох випадках. Результати вимірювань показників шорсткості

представлено в таблиці 1. Графічна залежність цих показників від часу обробки показана на рис. 1.

Таблиця 1 – Зміна показників шорсткості Ra (мкм) після віброабразивної обробки

Спосіб обробки лопаток / Установка	Діаметр фрези, якою сформована поверхня, мм	№ дослідження	Вихідний стан профілю лопатки	Час обробки, годин				Зниження Ra (мкм)
				2	4	6	8	
з закріпленням / FBA 24	3,2	1	0,70	0,31	0,19	0,11	0,09	0,61
	12	2	0,39	0,27	0,25	0,16	0,10	0,29
у вільному стані / R220	3,2	3	0,77	0,40	0,26	0,19	0,13	0,64
	12	4	0,39	0,28	0,17	0,14	0,11	0,28

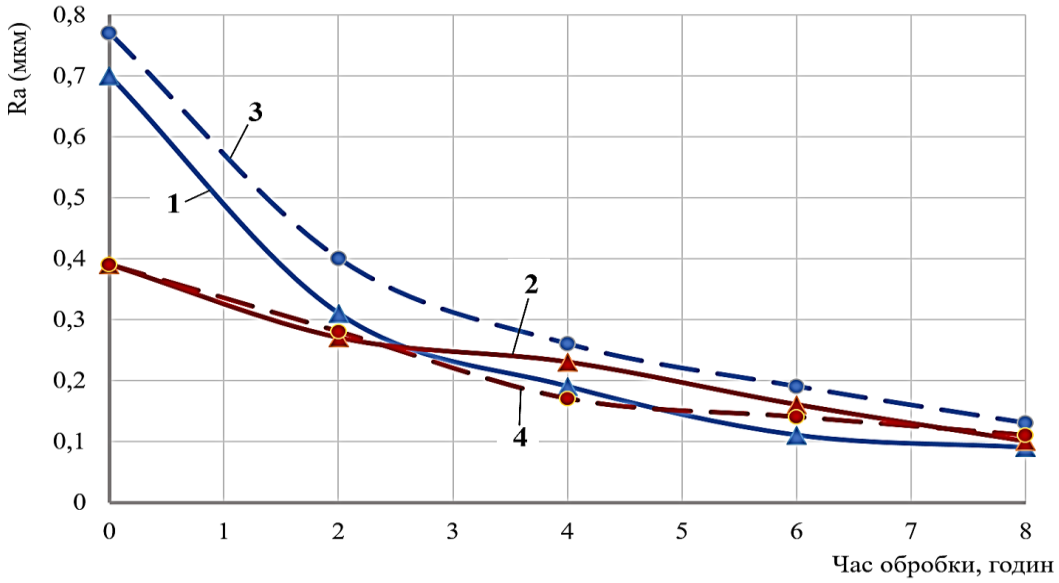

Рис. 1 – Графічна залежність показників шорсткості від часу обробки (цифрами вказані криві за номерами дослідження з Таблиці 1).

Аналіз конвергенції. Вихідна різниця в шорсткості між поверхнями після фрез Ø3,2 мм та Ø12 мм сягала 0,31…0,38 мкм (майже в 2 рази). Однак, до 8-ї години обробки ця різниця скорочується, до статистично незначущих 0,01…0,015 мкм. Це підтверджує друге правило Хашимото: поверхні з більш грубим рельєфом втрачають шорсткість значно швидше (0,61…0,64 мкм проти 0,28…0,29 мкм за весь цикл).

Обґрунтування 8-годинного циклу. Як видно з рис. 1, в інтервалі 6…8 годин крива шорсткості виходить на асимптотичне плато – межа становить близько 0,09…0,11 мкм. Припинення процесу на 4-й або 6-й годині не забезпечило б гарантованого запасу за якістю для поверхні після фрези діаметром 3,2 мм, де Ra на 6-й годині все ще може становити 0,19 мкм (на межі допуску 0,2).

Еволюція топографії (Rz/Ra). Аналіз коефіцієнта K=Rz/Ra (табл. 2) показує його зростання в часі.

Таблиця 2 – Зміна співвідношення K = Rz/Ra в часі (для обробки у вільному стані).

Діаметр фрези, якою сформована поверхня, мм	Час обробки, годин				
	Вихідний стан	2	4	6	8
3,2	6,77	7,28	6,73	8,16	8,54
12	4,56	5,93	7,41	8,79	9,72

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.