

<https://doi.org/10.15407/knit2024.05.029>  
УДК 621.438

**О. Я. КАЧАН**, д-р техн. наук, проф.

ORCID 0009-0007-5897-8633

E-mail: kachantad@gmail.com

**С. О. УЛАНОВ**, д-р філософії

ORCID 0000-0003-0418-8971

E-mail: ulanov@zr.edu.ua

Національний університет «Запорізька політехніка»  
вул. Жуковського 64, Запоріжжя, Україна, 69063

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ КРОМОК ДЕТАЛЕЙ АВІАКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ ВІЛЬНИМ АБРАЗИВОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПОВІТРЯНИХ СТРУМЕНІВ

---

*Виконано теоретичні дослідження запропонованої моделі процесу обробки поверхонь кромки деталей вільним абразивним зерном, яке перебуває у псевдозрідженому стані у повітряному струмені. Розроблялись моделі процесу і визначались його параметри, що забезпечували б високий рівень якості обробки. 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. При цьому розглядалася схема розширення плоского струменя, що витікає із сопла й залежності для визначення її основних параметрів.*

*Розроблено модель процесу обробки поверхонь кромки деталей вільним абразивом. Відповідно до запропонованої моделі обробка поверхні кромки деталі відбувається при дії повітряного струменя на абразивне середовище, що перебуває у псевдозрідженому стані. При цьому вісь симетрії повітряного струменя спрямовано по бісектрисі кута грані кромки деталі. При витіканні із сопла повітряний струмінь розширюється симетрично до її осі. Аналітичні дослідження запропонованої моделі процесу обробки поверхонь кромки деталей дозволили встановити основні закономірності й визначити основні параметри процесу обробки. На основі розробленої моделі й отриманих закономірностей процесу обробки кромки деталей вільним абразивом, який перебуває в псевдозрідженому стані, встановлено технологічні особливості обробки поверхонь кромки деталей, що забезпечують високий рівень параметрів якості.*

**Ключові слова:** модель процесу обробки, повітряний струмінь, вільний абразив, псевдозріджений стан, поверхня кромки, деталь.

---

Цитування: Качан О. Я., Уланов С. О. Модель процесу обробки кромки деталей авіакосмічної техніки вільним абразивом із застосуванням повітряних струменів. *Космічна наука і технологія*. 2024. 30, № 5 (150). С. 29–35. <https://doi.org/10.15407/knit2024.05.029>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## ВСТУП

Основною тенденцією сучасного авіадвигунобудування є підвищення надійності й ресурсу деталей авіаційних газотурбінних двигунів у процесі їхнього виробництва. Застосування прогресивних технологічних методів забезпечує підвищення якості обробки несівних поверхонь найбільш відповідальних деталей авіаційних газотурбінних двигунів, що впливає на їхню надійність і ресурс у процесі експлуатації.

Широке поширення в авіадвигунобудуванні отримав метод обробки в псевдозрідженому шарі абразиву дисків, зварних барабанів, кілець та інших деталей як без застосування повітряних сопел, так і з їхнім застосуванням.

Сутність обробки дисків компресора полягає в тому, що в робочій камері установки за допомогою потоку повітря, що подається через пористі грати під шар абразиву, створюють «киплячий» шар абразиву, який перебуває в псевдозрідженому стані. Він має малу в'язкість і високу текучість.

У псевдозріджений шар абразиву поміщають диск і надають обертання навколо його осі з високою швидкістю (порядку  $V_{\text{дет}} = 15...30$  м/с). Відбувається знімання матеріалу з високою інтенсивністю (приблизно  $2...4$  мкм/хв) за рахунок взаємодії оброблюваних поверхонь із абразивними частками.

## АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз пошкоджень і руйнувань дисків, валів, лопаток авіаційних двигунів у процесі експлуатації показав, що основною їхньою причиною є зменшення опору втомності [6]. У роботі [1] показано можливість підвищення опору втомності дисків компресора газотурбінних двигунів (ГТД) за рахунок застосування прогресивних технологічних методів. У роботі [9] досліджувався вплив методів фінішної обробки пазів дисків компресора на їхню витривалість у діапазоні робочих температур. Результати досліджень дозволили встановити основні закономірності витривалості ободної частини дисків компресора високого тиску зі сплаву ЕИ 698-ВД у робочому діапазоні температур і оцінити вплив технологічних методів на їхню несівну здатність.

У роботі [2] показано вплив комбінованих обробно-зміцнювальних методів обробки на несівну здатність дисків компресора. Установлено, що основним критерієм несівної здатності дисків компресора є опір втомному руйнуванню міжпазових виступів як основному виду пошкоджуваності даної деталі, які істотно залежать від стану поверхневого шару.

У роботі [3] виконано дослідження впливу поверхнево-пластичного деформування сталевими мікрокульками на підвищення опору втомності дисків компресора ГТД. Установлено, що зміцнювальна обробка дисків компресора низького тиску мікрокульками підвищує межу витривалості та зменшує чутливість до концентрації напруг.

Вплив концентраторів напруг на опір втомності дисків ГТД показано в роботі [8]. Обідна частина дисків через наявність пазів «ластівчин хвіст», гострих кутів, міжпазових виступів, усіяких радіусних сполучень, кромek, що визначає високий рівень концентрації напруг, а також залежність опору втомності деталі від концентраторів напруг.

Для підвищення продуктивності на фінішних операціях дисків компресора й зварних барабанів отримала поширення обробка у псевдозрідженому абразиві із застосуванням повітряних струменів [5, 7]. Обробка зварних барабанів псевдозрідженим абразивом із застосуванням повітряних струменів підвищує їхню довговічність у 2.2 раза.

**Мета роботи:** розробити модель процесу обробки поверхонь кромek деталей у псевдозрідженому шарі абразиву із застосуванням повітряних струменів для визначення основних параметрів процесу обробки.

**Методи дослідження.** Проводилися теоретичні дослідження запропонованої моделі процесу обробки поверхонь кромek деталей вільним абразивним зерном, що перебуває в псевдозрідженому стані, із застосуванням повітряних струменів.

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. При цьому розглядалася схема розширення, витікаючого із сопла плоского струменя й залежності для визначення її основних параметрів.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальні дослідження впливу схем обробки та технологічних умов проводилися на зразках — дисках діаметром 145 мм і товщиною 8 мм, виготовлених з алюмінієвого сплаву Д1Т, а також на натурних деталях — типових представниках дисків компресорів, виготовлених зі сплавів ВТЗ-1, ВТ9 та ЭИ698-ВД. Використовувалися дослідно-промислові установки моделі АПС-600А із застосуванням стандартного шліфувального зерна карбіду кремнію зеленого 63 С і електрокорунду білого 24 А зернистістю № 20, 40, 50, 80 за ДСТУ 3647-71, а також суміші шліфувальних зерен різної зернистості. Контроль розмірів деталей до і після обробки дисків проводився методами та засобами, які застосовуються в серійному виробництві АТ «Мотор Січ».

Диски компресора з титанових і жароміцних сплавів оброблялися шліфзерном 63С25 і сумішшю шліфзерен 63С50 + 63С25 при рівному масовому співвідношенні компонентів у суміші за схемою (рис. 1).

Обробку дисків компресорів з попередньо підготовленими фасками по кромках дна пазів або по всьому контуру пазів обробляють за схемою, відповідно до якої оброблювану деталь 1, частково занурену в шар абразиву 2 на глибину  $h$ , обертають навколо горизонтальної осі 3 шпинделя, а на підготовлені на кромках пазів фаски та, при необхідності, і на інші елементи дисків (наприклад, грані виступів, виїмки, кишені і т. п.) спрямовують повітряні струмені із сопел 5, розміщених у шарі або струмені абразиву з ежекторних сопел 6, встановлених поза шаром абразиву (рис. 1). Сопла встановлюють на відстані  $l$  від оброблюваних поверхонь або кромки і під кутом установки  $\alpha$  (рис. 1).

За рахунок реверсного обертання до задирки прикладається знакозмінне навантаження, що створює схему руйнування від втоми, причому збільшення частоти реверсування збільшує швидкість його руйнування.

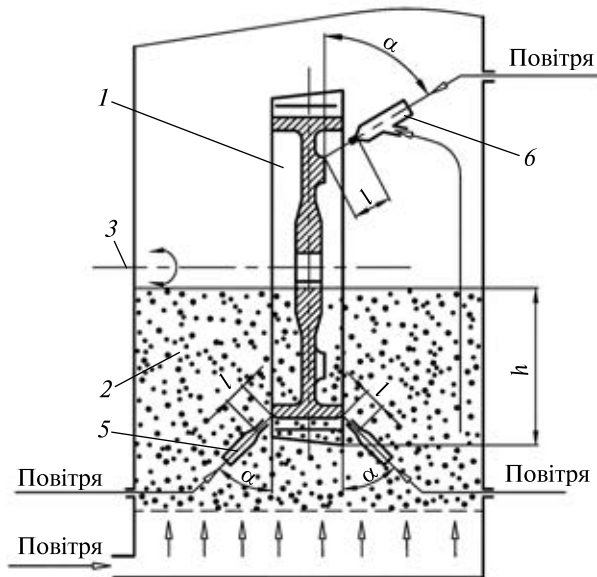


Рис. 1. Схема обробки дисків компресора в псевдозрідженому шарі абразиву з повітряними соплами

Обробка дисків IV ступеня КНТ, III і V ступенів КВТ у суміші 63С50 + 63С25 дозволила скоротити час їхньої обробки до 6...8 хв, тобто в 1.5 раза порівняно з обробкою зерном 63С25. Час обробки диска VI ступеня КВТ з матеріалу ЭИ698-ВД становив 40 хв при обробці зерном 63С25 і 24 хв при обробці в суміші 63С50 + 63С25. Обробка цього ж диска в суміші 63С50 + 63С25 із накладенням на деталь вібрацій із частотою 20...55 Гц і амплітудою 2...3 мм за схемою скоротило час обробки до 16 хв. При збільшенні розміру зерна від 200 до 800 мкм знімання металу з суцільних поверхонь збільшилось у 1.8...2.5 раза.

Радіуси скруглення кромки по контуру паза становлять 0.2...0.3 мм, крім денця, де радіус заокруглення кромки становить близько 0.1 мм при необхідному 0.4...0.6 мм, що вимагає попередньої ручної обробки цих місць. Одночасно з округленням кромки забезпечується полірування полотна до шорсткості  $Ra = 0.63$  мкм (вихідна шорсткість  $Ra = 1.25...2.5$  мкм) на титанових дисках і  $Ra = 1.25$  мкм (вихідна шорсткість  $Ra = 2.5$  мкм) на дисках із жароміцного сплаву, при цьому знімання металу по полотну становить 0.01...0.04 мм.



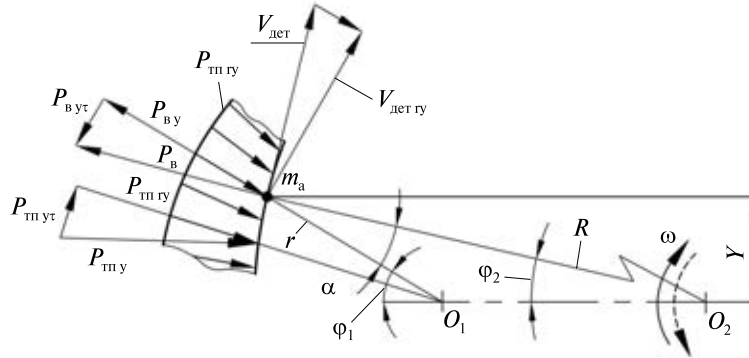


Рис. 3. Кінематична схема обробки абразивною часткою поверхні кромки деталі

на абразивну частку масою  $m_a$ , що перебуває в точці поверхні з координатою  $Y$ , діє відцентрова сила  $P_{в\ у}$  (див. рис. 3):

$$P_{в\ у} = P_{в} \cdot \cos \alpha,$$

де  $P_{в} = m_a \cdot V_{дет}^2 / R$  — відцентрова сила, що діє на абразивну частку  $m_a$  при обертанні деталі,  $R$  — радіус обертання деталі навколо центра  $O_2$ ,  $V_{дет}$  — лінійна швидкість деталі при обробці,  $V_{дет} = \omega \cdot R$ ,  $\omega$  — частота обертання деталі навколо центра  $O_2$ ,  $m_a = \rho_3 \cdot \pi d_3^3 / 6$  — маса абразивної частки в точці поверхні кромки з координатою  $Y$ ,  $\rho_3$  — щільність абразивного зерна,  $d_3$  — діаметр абразивної частки, що перебуває в точці оброблюваної поверхні кромки з координатою  $Y$ ,  $\alpha = \phi_1 - \phi_2$  — кут між радіусами  $r$  і  $R$  у точці поверхні з координатою  $Y$ .

Абразивна частка масою  $m_a$  буде здійснювати обробку поверхні кромки в точці з координатою  $Y$  за умови

$$P_{тп\ гу} \cdot \pi d_3^2 / 4 - \rho_3 \pi d_3^3 / 6 \cdot V_{дет}^2 / R > P_{тп\ гу\ гр} \cdot \pi d_3^2 / 4, \quad (3)$$

де  $P_{тп\ гу\ гр}$  — граничний тиск повітряного струменя, при якому абразивна частка масою  $m_a$ , що перебуває на оброблюваній поверхні кромки з координатою  $Y$ , здійснює її обробку. Для забезпечення обробки поверхні кромки деталі відповідно до методики [8] потрібно задавати тип сопла (наприклад щілинне), його ширину  $2b_c$ , відстань  $L_{yc}$  до оброблюваної кромки деталі (див. рис. 2). Довжину початкової ділянки  $L_{п}$  повітряного струменя визначаємо за формулою

$$L_{п} = 10.3b_c. \quad (4)$$

Безрозмірну довжину  $\bar{L}_{yc}$  та півширину повітряного струменя визначаємо за формулами

$$\bar{L}_{yc} = \frac{L_{yc}}{L_{п}}, \quad (5)$$

$$b = b_c \cdot (2.47\bar{L} + 1), \quad (6)$$

де  $\bar{L} = L / L_{п}$  — безрозмірна довжина,  $L$  — відстань від зрізу сопла. Швидкість повітря  $V_{п\ max}$  на осі основної ділянки повітряного струменя (максимальна в даному перерізі) дорівнює

$$\frac{V_{п\ max}}{V_{п1}} = \frac{1}{\sqrt{0.715\bar{L} - 0.285}}. \quad (7)$$

Динамічний тиск  $P_{тп\ max}$  на осі основної ділянки повітряного струменя (максимальна в даному перерізі) становить

$$\frac{P_{тп\ max}}{P_{тп1}} = \frac{1}{0.715\bar{L} - 0.285}. \quad (8)$$

Динамічний тиск у перетинах основної ділянки повітряного струменя  $P_{тп\ у}$ , що перебуває на відстані  $Y$  від її осі  $O - O_1$ , дорівнює

$$\frac{P_{тп\ у}}{P_{тп\ max}} = (1 - \eta^{3/2})^4, \quad (9)$$

де  $\eta = Y / b$  — відносна відстань від точки з координатою  $Y$ , виражена в частках від її поточної півширини  $b$ .

Максимальне значення  $P_{тп\ max}$  встановлюють із умови забезпечення максимальної інтенсивності обробки при обмеженні  $Ra = 0.4 \dots 0.6$  мкм:

$$\frac{dh}{dt} = K_1 \cdot P_{тп\ max} \cdot V_{дет\ гу} \rightarrow \max, \quad (10)$$

де  $K_1$  — коефіцієнт обробки,  $K_1 = 0.2...0.4$ ,  $h$  — розмір лінійного знімання матеріалу (див. рис. 1) у напрямку осі  $O - O_1$ ,  $t$  — час обробки (час контакту абразивної частки з поверхнею кромки деталі),  $Ra$  — параметр шорсткості оброблюваної поверхні,  $V_{\text{дет гу}}$  — швидкість деталі в точці поверхні кромки з координатою  $Y$  (див. рис. 3),  $V_{\text{дет гу}} = V_{\text{дет}} \cdot \cos\alpha$ .

Тиск на зрізі сопла  $P_{\text{тп1}}$ , що відповідає тиску  $P_{\text{тп max}}$ , отриманому з (10), визначаємо за формулою (8):

$$P_{\text{тп1}} = P_{\text{тп max}} \cdot (0.715\bar{L} - 0.285). \quad (11)$$

Тиск  $P_{\text{тп у}}$  на абразивну частку в точці поверхні кромки з координатою  $Y$ , що забезпечують об-

робку, визначаємо за формулою (9)

$$P_{\text{тп у}} = P_{\text{тп max}} \cdot (1 - \eta^{3/2})^4. \quad (12)$$

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено модель процесу обробки поверхонь кромки деталей вільним абразивом, який перебуває у псевдозрідженому стані під дією повітряних струменів.

2. Отримано основні закономірності для визначення параметрів процесу обробки поверхонь кромки вільним абразивом із застосуванням повітряних струменів.

3. Установлено основні параметри процесу обробки поверхонь кромки деталей відповідно до запропонованої моделі.

## ЛІТЕРАТУРА

- 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.
- Гончар Н. В., Сахно А. Г., Яценко В. К. Регулирование характеристик выносливости дисков компрессора, работающих в условиях умеренно-повышенных температур. *Придніпровський наук. вісник. Машинобудування та техн. науки*. 1988. № 50 (177). С. 24—33.
- Катоев Н. К. Повышение надежности работы дисков компрессора низкого давления ГТД. *Совершенствование процессов абразивно-отделочной и упрочняющей технологии в машиностроении*: сб. науч. тр. Пермь: Пермский политехн. ин-т, 1984. С. 109—113.
- Качан А. Я., Титов В. А., Мозговой В. Ф., Уланов С. О. Технологические особенности формирования параметров качества несущих поверхностей валов компрессоров ГТД. *Вісник двигунобудування*. 2014. № 2. С. 186—191.
- 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.
- Качан О. Я., Уланов С. О. Встановлення закономірностей обробки дисків у псевдозрідженому шарі абразиву. *Космічні матеріали та технології*. 2023. № 6. С. 62—67.
- Кремень З. И. Основные закономерности и области применения процесса турбоабразивной обработки. *Турбоабразивная обработка деталей сложного профиля*: тез. докл. Ленинград, 1987. С. 4—5.
- Петухов А. Н. *Сопротивление усталости деталей ГТД*. Москва: Машиностроение, 1993. 332 с.
- Петухов А. Н., Вахромеев А. М. Сопротивление усталости дисков компрессора. *Проблемы прочности*. 1983. № 4. С. 84.

## REFERENCES

- Agishev B. M., Elashov A. A., Moiseenko N. V. (1977). Application of methods of surface plastic deformation to increase the fatigue strength of compressor disks of aircraft GTE. *Problems of strength*, № 3, 114—116.
- Gonchar N. V., Sakhno A. G., Yatsenko V. K. (1988). Regulation of endurance characteristics of compressor disks operating at moderately high temperatures. *Prydniprovskiyi naukovyi vestnik. Mechanical engineering and technical sciences*, № 50 (177), 24—33.
- Katoev N. K. (1984). Increasing the reliability of the low-pressure compressor GTE disks. *Improvement of abrasive finishing and hardening processes in mechanical engineering: a collection of scientific papers*. Perm: Perm Polytechnic Institute, 109—113.
- Kachan A. Y., Titov V. A., Mozgovi V. F., Ulanov S. O. (2014). Technological features of forming quality parameters of bearing surfaces of GTE compressor shafts. *Visnyk dvyhynobuduvannya*, № 2, 186—191.
- Kachan O. Y., Ulanov S. O. (2022). Increasing the durability of welded drums of compressor rotors by processing in a fluidized abrasive layer. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, № 1, 53—57.

6. Kachan O. Y., Ulanov S. O. (2023). Establishment of regularities of disk processing in a fluidized abrasive layer. *Space materials and technologies*, № 6, 62—67.
7. Kremen Z. I. (1987). Basic regularities and areas of application of the process of turboabrasive treatment. *Turboabrasive machining of complex profile parts: abstracts*, Leningrad, 4—5.
8. Petukhov A. N. (1993). *Fatigue resistance of GTE parts*. Moscow: Mashinostroenie, 332 p.
9. Petukhov A. N., Vakhromeyev A. M. (1983). Fatigue resistance of compressor disks. *Problems of strength*, № 4, 84.

Стаття надійшла до редакції 02.04.2024

Після доопрацювання 30.09.2024

Прийнято до друку 02.10.2024

Received 02.04.2024

Revised 30.09.2024

Accepted 02.10.2024

O. Ya. Kachan, Dr. Sci. in Tech., Prof.

ORCID 0009-0007-5897-8633

E-mail: kachantad@gmail.com

S. O. Ulanov, Ph. D., associate prof.

ORCID 0000-0003-0418-8971

E-mail: ulanov@zp.edu.ua

National University Zaporizhzhia Polytechnic

64, Zhukovsky Str., Zaporizhzhia, 69063 Ukraine

#### MODEL OF THE PROCESS OF PROCESSING THE EDGES OF AEROSPACE PARTS WITH FREE ABRASIVE USING AIR JETS

In this work, models of the process of machining the surfaces of parts edges with free abrasive in a fluidized state using air jets were developed to determine the process parameters that ensure a high level of quality. Theoretical studies were carried out on the proposed model of the process of machining the surfaces of parts edges with free abrasive grain in a fluidized state using air jets.

In the research, the initial equations were based on the known dependencies for the dynamic pressure of air jets hitting an obstacle and the change in the parameters of plane jets along the path of their expansion from the nozzle cut to the treated surface. At the same time, the scheme of expansion of the plane jet flowing from the nozzle and the dependencies for determining its main parameters were considered.

A model of the process of machining the surfaces of the edges of parts with a free abrasive in a fluidized state using air jets was developed. According to the proposed model, the surface of the edge of the part is treated by exposure to the abrasive medium, which is in a fluidized state, with an air jet. In this case, the symmetry axis of the air jet is directed along the bisector of the angle of the workpiece edge.

When the air jet flows out of the nozzle, it expands symmetrically about its axis.

Analytical studies of the proposed model of the process of machining the surfaces of parts' edges made it possible to establish the main regularities and determine the main parameters of the machining process.

Based on the developed model and the obtained regularities of the process of machining the edges of parts with a free abrasive in a fluidized state using air jets, the technological features of machining the surfaces of the edges of parts that provide a high level of quality parameters have been established.

**Keywords:** a model of the machining process, air jet, free abrasive, fluidized state, edge surface.