

<https://doi.org/10.15407/knit2023.06.062>
УДК 621.438

О. Я. КАЧАН, д-р техн. наук, проф.

ORCID 0000-0002-7258-9104

E-mail: kachantad@gmail.com

С. О. УЛАНОВ, д-р філософії, доцент

ORCID 0000-0003-0418-8971

E-mail: ulanov@zp.edu.ua

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

ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ОБРОБКИ ДИСКІВ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ АБРАЗИВУ

У даній роботі встановлено основні закономірності обробки дисків у псевдозрідженому шарі абразиву. Дослідження проводилися на установці АПС-600А при обробці дисків у псевдозрідженому шарі абразиву. При обробці дисків застосовувалося абразивне зерно групи 24А, 63С і суміші абразивних зерен 24А63+24А20 (50 % + 50 %). Зернистість абразивних зерен змінювалася в діапазоні № 20...80. Оброблювані диски виготовлялися зі сплавів ВТ3-1, ВТ-9, ЭИ698-ВД, сталі 45 НРС 38...45 і алюмінієвого сплаву ДІТ.

Кругова швидкість деталей становила $V_d = 5...40$ м/с, максимальна витрата повітря — 2000 Нм³/ч. Тиск зріджувального абразиву повітря у повітряподавальній камері — 5...6 кПа. Диск занурювали у зріджений шар абразиву на глибину 0.2...1.2 радіуса диска.

Отримано залежності змінання різних матеріалів з оброблюваної поверхні дисків від швидкості деталі, зернистості й марки абразивного зерна.

Експериментально досліджено залежність зношування абразивного зерна від швидкості деталі і від її положення по висоті шару абразиву, що дозволило призначити раціональні режими обробки дисків у псевдозрідженому шарі абразиву. Встановлено основні закономірності обробки дисків у псевдозрідженому шарі абразиву, а також вивчено вплив основних параметрів процесу обробки на продуктивність і стійкість абразивного зерна. Експериментально встановлено основні закономірності процесу обробки дисків у псевдозрідженому шарі абразиву, що дозволяють визначити основні параметри, технологічні умови й режими фінішної операції виготовлення деталей.

Ключові слова: псевдозріджений шар абразиву, диск, повітря, закономірність, параметри, режими обробки, продуктивність, зношування абразивного зерна.

ВСТУП

Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик деталей ГТД є одним із важливих напрямків сучасного авіадвигунобудування.

Формування у поверхневому шарі несучих поверхонь деталей високих значень параметрів

якості забезпечує їхні високі експлуатаційні характеристики.

Основними деталями ротора осьового компресора ГТД є вали, диски, робочі лопатки, до яких висувають високі вимоги виготовлення для забезпечення експлуатаційних характеристик.

Цитування: Качан О. Я., Уланов С. О. Встановлення закономірностей обробки дисків у псевдозрідженому шарі абразиву. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 6 (145). С. 62—67. <https://doi.org/10.15407/knit2023.06.062>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Ці деталі характеризуються складною простою формою, високою точністю геометричних розмірів і форми, невисокою шорсткістю та високим рівнем параметрів якості поверхневого шару, що впливає на вибір технології їхнього виготовлення.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У процесі експлуатації дисків компресорів ГТД основними причинами їхнього пошкодження, які частіше зустрічаються, є руйнування від втоми [4, 10]. При цьому вогнище зародження тріщини від втоми може бути розташоване на поверхнях граней паза для лопатки.

Протягування пазів у дисках із жароміцних і титанових сплавів характеризується високою продуктивністю та якістю обробки.

Найбільший внесок у технологічне забезпечення параметрів якості поверхневого шару оброблених поверхонь дисків компресора роблять фінішні технологічні методи. Серед них віброабразивна обробка, обкатування роликami, галтування, дробоструменева обробка, ультразвукове зміцнення сталевими кульками обідної частини дисків, струменева обробка мікрокульками, обробка дисків компресора у псевдозрідженому шарі абразиву тощо.

Віброабразивна обробка дисків компресора забезпечує шорсткість поверхні до $R_z = 0.8$ мкм при вихідній шорсткості $R_z = 1.9$ мкм. При цьому у поверхневому шарі виникають залишкові напруження стиску до 786.0 МПа з глибиною поширення до 22.4 мкм [3].

При обкатуванні роликami галтелі підвищується довговічність дисків удвічі [1, 9].

Ультразвукове зміцнення обідної частини дисків компресора сталевими кульками підвищує межу витривалості на 30...35 % [2, 7, 8].

Зміцнення сталевими мікрокульками діаметром 0.06...0.6 мм і швидкістю польоту 60...80 м/с забезпечує у поверхневому шарі залишкові стискні напруження до 250...370 МПа на глибину до 0.08 мм. Довговічність зразків підвищується на 50...70 % [6].

Обробка дисків компресора в псевдозрідженому шарі абразиву дозволяє:

- зменшити шорсткість поверхонь з $R_a = 2.5...50$ мкм до $R_a = 0.2...0.4$ мкм,

- видалити задирки,
- скруглити гострі кромки,
- обробляти складні поверхні дисків,
- видалити нагар, окалину, окисні плівки.

Обробка створює у поверхневому шарі залишкові стискні напруження до 200...270 МПа (для сплаву ЭИ 698-ВД) і 280...320 МПа (для сплаву ВТ3-1). Границя витривалості дисків компресора підвищується на 17.0...35.0 % [5].

Комбіновані методи фінішної обробки значно підвищують ефективність їхнього опору втомленості порівняно з кожним зі складових технологічних методів.

Ціль роботи: встановлення основних закономірностей обробки дисків у псевдозрідженому шарі абразиву.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ Й ОБЛАДНАННЯ

Обробку дисків у псевдозрідженому шарі абразиву проводили на установці АПС600А. На рис. 1 зображено схему обробки. Деталь 1 поміщали в шар абразивного зерна 2 і задавали необхідну швидкість V_d . Абразивне зерно 2 містилося в ємкості 3 на опорній решітці 4, під яку подавали потік Q_d повітря, який зріджував шар абразиву (рис. 1).

Технологічні умови й режими обробки. При обробці дисків застосовувалося абразивне зерно групи 24А зернистістю № 20...80 зі швидкістю повітря, що зріджувало абразив, 0.95...1.12 м/с.

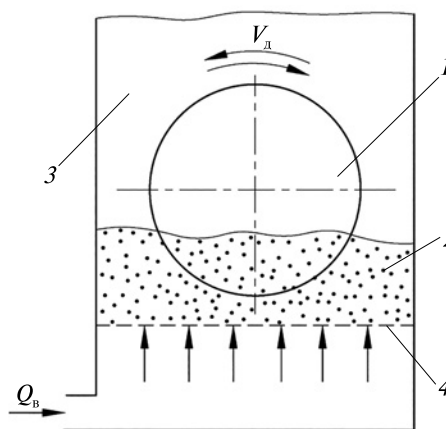


Рис. 1. Схема обробки дисків у псевдозрідженому шарі абразиву (1 — деталь, 2 — шар абразивного зерна, 3 — ємність, 4 — опорна решітка)

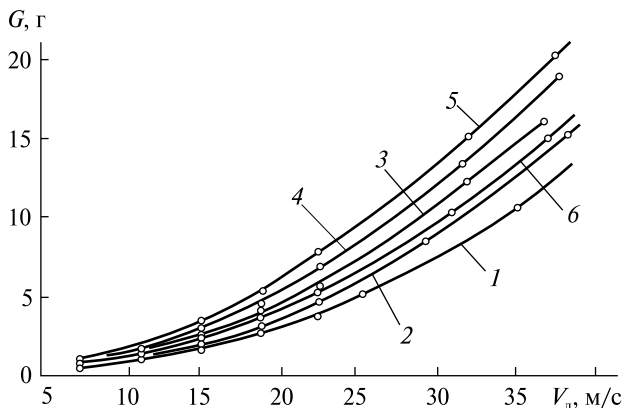


Рис. 2. Залежність масового знімання G від швидкості V_d при обробці дисків. Матеріал — Д1Т: 1 — 24А20, 2 — 24А40, 3 — 24А50, 4 — 24А63, 5 — 24А80, 6 — суміш 24А63 + 24 А20 (50 % + 50 %)

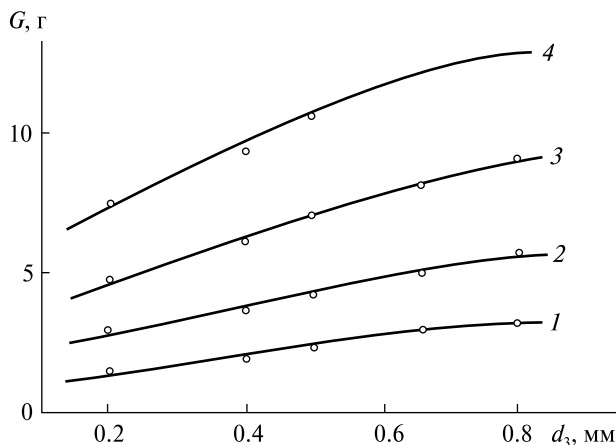


Рис. 3. Залежність масового знімання G від зернистості шліфзерна d_3 при обробці дисків. Шліфзерно 24А. Матеріал — Д1Т: залежності 1—4 — для швидкостей деталі $V_d = 15, 20, 25, 30$ м/с відповідно

Також застосовувалися абразивне зерно групи 63С зернистістю № 50 і суміш абразивного зерна 24 А 63 + 24 А 20 (50 % + 50 %). Оброблювані диски виготовлялися із сплавів ВТ3-1, ВТ9, ЭИ698-ВД, сталі 45 HRC 38...45, алюмінієвого сплаву Д1Т. Колова швидкість деталі становила $V_d = 5...40$ м/с, час обробки — 3...6 хв, максимальна витрата повітря сягала 2000 Нм³/год, тиск повітря у камері — 5...6 кПа. Диск занурювали в зріджувальний шар абразиву на глибину 0.2...1.2 R_d (R_d — радіус диска).

Експериментальні результати дослідження процесу обробки дисків у псевдозрідженому шарі абразиву. При обробці суцільних поверхонь у вигляді дисків діаметром 145 мм і товщиною 8 мм із алюмінієвого сплаву Д1Т визначали вплив швидкості деталі на продуктивність.

Обробка деталі у всьому діапазоні швидкостей від 7.5 до 40 м/с (рис. 2) підвищує продуктивність. Зі збільшенням розміру зерна продуктивність обробки деталі підвищується (рис. 3). При збільшенні розміру зерна від 200 до 800 мкм знімання металу з суцільних поверхонь збільшилось у 1.8...2.5 раза (див. рис. 3).

Оброблюваний матеріал. Титанові сплави мають найкращу оброблюваність. Оброблюваність сплаву ЭИ698-ВД в 1.35...1.45 раза нижча від оброблюваності титанових сплавів як при обробці шліфзерном 24А40, так і шліфзерном 24А80 (рис. 4).

Сталь 45, загартована до HRC38...45, має оброблюваність, у 1.5...1.55 раза нижчу, ніж титанові сплави, і у 1.08...1.13 раза нижчу, ніж сплав ЭИ698-ВД при обробці як шліфзерном 24А50, так і шліфзерном 63С50 (рис. 5).

Продуктивність обробки всіх випробуваних матеріалів шліфзерном 63С50 нижча, ніж при обробці шліфзерном 24А50 (див. рис. 5), тому що твердіше і крихкіше зерно карбиду кремнію великих розмірів зношується та руйнується більш інтенсивно, ніж зерно електрокорунду білого.

Зношування абразиву. Результати експериментальних досліджень зношування абразивного зерна при обробці дисків (суцільні поверхні) шліфзерном різної зернистості й марки, залежно від швидкості деталі, представлено на рис. 6, 7. Відношення $\Delta H / H_0$ зменшення ΔH висоти нерухомого шару абразиву протягом досліду до первісного її значення H_0 характеризує величину зношування шліфзерна в шарі, що складається із двох величин: зменшення висоти шару внаслідок збільшення насипної маси шару через зношування й притуплення ріжучих кромek часток у процесі обробки, та винесення абразивних часток із шару повітряним потоком внаслідок дроблення абразиву в результаті ковзної або ударної взаємодії його з деталлю.

При обробці суцільних поверхонь, коли знімання металу відбувається переважно в резуль-

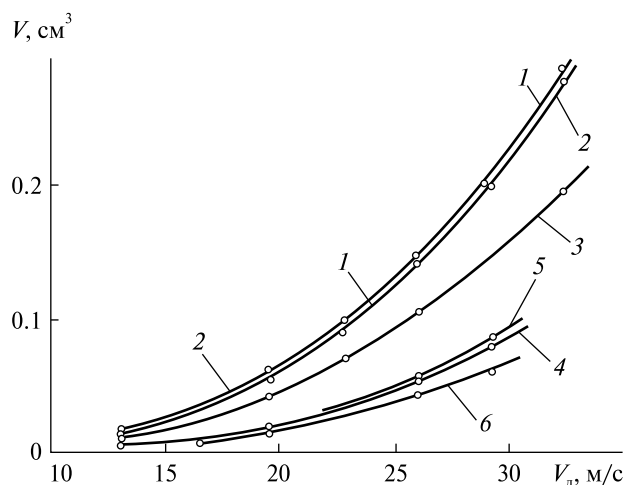


Рис. 4. Залежність об'ємного знімання V різних матеріалів від швидкості і зернистості абразиву d_3 : 1 — матеріал ВТ3-1, шліфзерно 24А80; 2 — ВТ9, 24А80; 3 — ЭИ698-ВД, 24А80; 4 — ВТ3-1, 24А40; 5 — ВТ9, 24А40; 6 — ЭИ698-ВД, 24А40

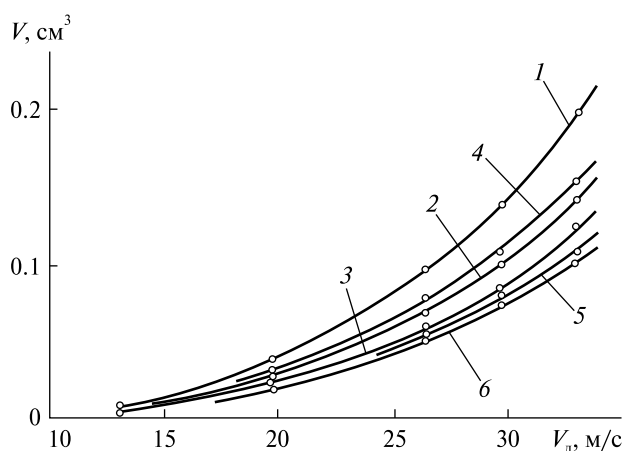


Рис. 5. Залежність об'ємного знімання V різних матеріалів від швидкості деталі V_d і марки шліфзерна: 1 — матеріал ВТ3-1, шліфзерно 24А50; 2 — ЭИ698-ВД, 24А50; 3 — сталь 45, 24А50; 4 — ВТ3-1, 63С50; 5 — ЭИ698-ВД, 63С50; 6 — сталь 45, 63С50

таті ковзної взаємодії абразиву з деталлю, ступінь зношування незначний як при обробці зерном карбіду кремнію зеленого (63С50), так і при обробці зерном електрокорунду білого (24А50), але зношування зерна 63С50 при цьому приблизно в два рази вище, ніж зерна 24А50 (див. рис. 7, криві 1 і 3).

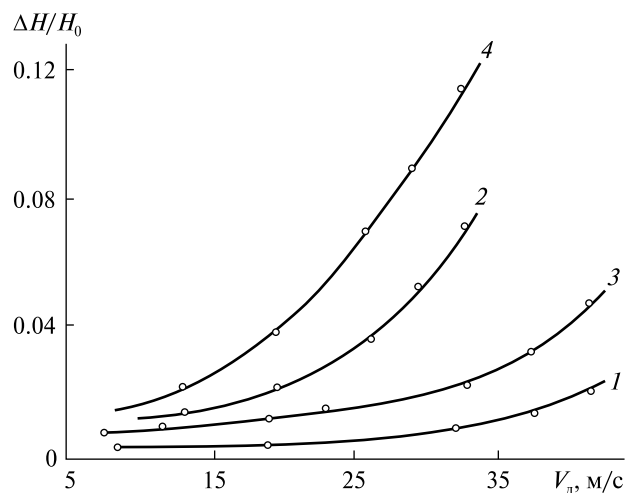


Рис. 6. Залежність зношування шліфзерна $\Delta H/H_0$ від швидкості деталі V_d : 1 і 3 — суцільна оброблювана поверхня, шліфзерно 24А50 і 63С50 відповідно; 2 і 4 — переривчаста оброблювана поверхня, шліфзерно 24А50 і 63С50

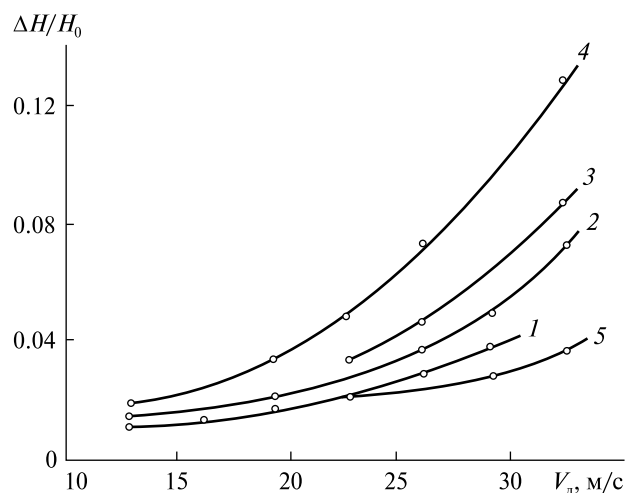


Рис. 7. Залежність зношування шліфзерна $\Delta H/H_0$ від швидкості деталі V_d для переривчастої оброблюваної поверхні: 1—5 — шліфзерно 24А40, 24А50, 24А63, 24А80, 24А63+24А20 (50 % + 50 %) відповідно

Зношування абразиву суттєво зростає при обробці переривчастих поверхонь, коли знімання металу відбувається в основному в результаті ударного характеру взаємодії зерна з деталлю, при цьому руйнування зерна карбіду кремнію зеленого 63С у 1.5...2 рази більше, ніж зерна електрокорунду білого 24А.

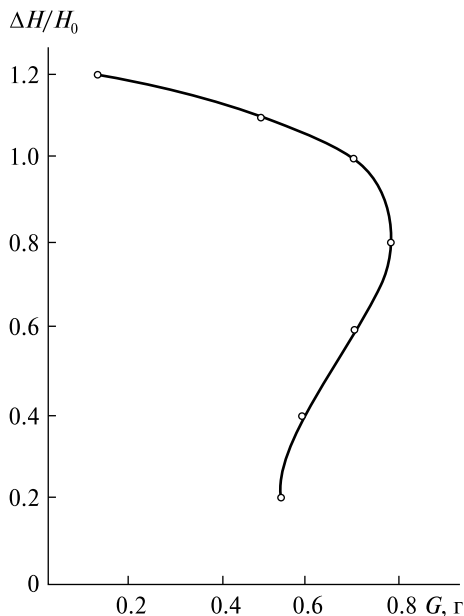


Рис. 8. Залежність знімання металу G від положення деталі по висоті шару $\Delta H/H_0$ шліфзерна

Зношування при обробці переривчастих поверхонь суттєво збільшується зі збільшенням зернистості абразиву і швидкості деталі. На величину зношування істотно впливають геометрична форма та розміри виступів і западин переривчастих поверхонь оброблюваних деталей.

Положення деталі по висоті шару. Максимальна продуктивність обробки досягається при роз-

ташуванні деталі в шарі на відстані, що дорівнює 0.5...0.7 висоти псевдозрідженого абразиву від площини решітки.

З метою кількісної оцінки продуктивності обробки залежно від положення деталі по висоті шару були проведені дослідження з обробки дисків-зразків діаметром 145 мм і товщиною 8 мм при їхньому обертанні навколо вертикальної осі на експериментальній установці.

Величина $\Delta H/H_0$ на рис. 8 позначає відносну відстань нижнього торця деталі від площини розподільних решіток. Максимальна продуктивність обробки спостерігається в області 0.6...1.0 вихідної висоти нерухомого шару, а відношення максимальної продуктивності становить близько 1.5.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально встановлені закономірності, що визначають залежність знімання різних матеріалів із оброблюваної поверхні від швидкості деталі, зернистості й марки абразивного зерна.

2. Експериментально досліджено зношування абразивного зерна від швидкості деталі та від її положення на висоті шару зерна, що дозволило встановити раціональні діапазони основних параметрів процесу обробки дисків у псевдозрідженому шарі абразиву.

ЛІТЕРАТУРА

1. Агишев Б. М. Применение методов поверхностного пластического деформирования для повышения усталостной прочности дисков компрессоров авиационных ГТД. *Пробл. прочности*. 1977. № 3. С. 114—119.
2. Гончар Н. В., Яценко В. К., Павленко Д. В. Выносливость ободной части дисков компрессоров из жаропрочного сплава ЭИ698-ВД в условиях рабочих температур. *Вестн. двигателестроения*. 2004. № 3. С. 20—23.
3. Карташев Б. Н., Родиченко А. Е. Виброобработка дисков ГТД. *Авиационная пром-сть*. 1976. № 3. С. 23—25.
4. Качан А. Я., Уланов С. А. Упрочняющая обработка деталей ротора осевого компрессора ГТД: зб. наук. пр. Дніпровського держ. техн. ун-ту (технічні науки). Кам'янське: ДДТУ, 2018. Тем. вип.: Машини і пластична деформація металу, 307 с.
5. Качан А. Я., Уланов С. А. Повышение долговечности дисков компрессоров из титановых сплавов обработкой в псевдооживленном слое абразива. *Нові матер. і технології в металургії та машинобудуванні*. 2019. № 2. С. 31—37. DOI: 10.15588/1607-6885-2019-2-5.
6. Петухов А. Н. Сопrotивление усталости дисков компрессоров. *Пробл. прочности*. 1983. № 4. С. 84—87.
7. Сахно А. Г. Оптимизация режима ультразвукового упрочнения ободной части дисков компрессора. *Авиационная пром-сть*. 1993. № 2. С. 12—13.
8. Яценко В. К. Оценка усталостной прочности межпазовых выступов дисков компрессора. *Авиационная пром-сть*. 1990. № 11. С. 24—26.
9. Качан А., Уланов С., Berezovsky E. Echnological support of the gas-turbine engine parts bearing capacity by plastic deformation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 11. P. 183—187.
10. Mattingly J. D., Heiser W. H., Pratt D. T. *Aircraft Engine Design* (Second Ed.). Reston, Amer. Inst. Aeronautics and Astronautics, 2002. 687 p.

REFERENCES

1. Agishev B. M. (1977). Application of surface plastic deformation methods to increase the fatigue strength of aircraft GTE compressor disks. *Probl. Strength*, № 3, 114–119.
 2. Gonchar N. V., Yatsenko V. K., Pavlenko D. V. (2004). Endurance of the rim part of compressor disks made of heat-resistant alloy EI698-VD at operating temperatures. *Bull. Engine Engineering*, № 3, 20–23.
 3. Kartashev B. N., Rodichenko A. E. (1976). Vibroprocessing of GTE disks. *Aviation industry*, № 3, 23–25.
 4. Kachan A. Ya., Ulanov S. A. (2018). *Hardening treatment of rotor parts of the GTE axial compressor*. Proc. Dnipro State Technical University (Technical Sciences). Thematic issue: Machines and plastic deformation of metal. Kamianske: DSTU, 307 p.
 5. Kachan A. Ya., Ulanov S. A. (2019). Improving the durability of compressor disks made of titanium alloys by processing in a fluidized layer of abrasive. *New materials and technologies in metallurgy and machine-building*, № 2, 31–37.
- DOI: 10.15588/1607-6885-2019-2-5.
6. Petukhov A. N. (1983). Fatigue resistance of compressor disks. *Probl. strength*. № 4, 84–87.
 7. Sakhno A. G. (1993). Optimization of the regime of ultrasonic hardening of the rim part of the compressor disks. *Aviation industry*, № 2, 12–13.
 8. Yatsenko V. K. (1990). Evaluation of the fatigue strength of the intergroove protrusions of the compressor disks. *Aviation industry*, № 11, 24–26.
 9. Kachan A., Ulanov S., Berezovsky E. (2015). Echnological support of the gas-turbine engine parts bearing capacity by plastic deformation. *Metallurgical and Mining Industry*, № 11, 183–187.
 10. Mattingly J. D., Heiser W. H., Pratt D. T. (2002). *Aircraft Engine Design* (Second Ed.). Reston, Amer. Inst. Aeronautics and Astronautics, 687 p.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2023

Після доопрацювання 20.09.2023

Прийнято до друку 20.09.2023

Received 24.02.2023

Revised 20.09.2023

Accepted 20.09.2023

O. Ya. Kachan, Dr. Sci. in Tech, Professor of the Department of Aviation Engine Technology

ORCID 0000-0002-7258-9104

E-mail: kachantad@gmail.com

S. O. Ulanov, Ph.D., associate professor of the Department of Aviation Engine Technology

ORCID 0000-0003-0418-8971

E-mail: ulanov@zp.edu.ua

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

64 Zhukovsky Str., Zaporizhzhia, 69063 Ukraine

DETERMINATION OF REGULARITIES OF TREATMENT OF DISKS IN A FLUIDIZED BED OF ABRASIVE

In this work, the main regularities of processing disks in a fluidized bed of abrasive are established. The research was carried out on the АПІС-600А installation when processing disks in a fluidized bed of abrasive.

When processing discs, abrasive grains of groups 24А, 63С, and a mixture of abrasive grains 24А63+24А20 (50 % + 50 %) were used. The grain size of the abrasive grains varied in the range № 20 ... № 80. The processed disks were made of such alloys as VT3-1, VT-9, EI698-VD, steel 45 HRC 38...45, and aluminum alloy D1T.

The peripheral speed of the parts is $V_p = 5...40$ m/s. The maximum air consumption is 2000 Nm³/h. The pressure of the air that liquefies the abrasive in the air-falling chamber is 5...6 kPa. The disk was immersed in a liquefied layer of abrasive to a depth of 0.2...1.2 of the radius of the disk.

The regularities of the dependence of the removal of various materials from the machined surface of the disks on the speed of the part, the grain size, and the brand of the abrasive grain have been established.

The dependence of abrasive grain wear on the speed of the part and on its position along the height of the abrasive layer was experimentally established, which allowed for assigning rational modes of processing discs in a fluidized layer of abrasive.

The main regularities of the processing of disks in a fluidized bed of abrasive have been established, and the influence of the main parameters of the processing process on the productivity and stability of the abrasive grain has been determined.

The main regularities of the process of processing discs in a fluidized bed of abrasive have been established experimentally, which allows for determining the main parameters, technological conditions, and modes of the finishing operation of parts manufacturing.

Keywords: fluidized layer of abrasive, disk, air, regularity, parameters, processing modes, performance, abrasive grain wear.