

УДК 621.515.5-2

- Пухальська Г.В. канд. техн. наук, доцент кафедри технологія машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: puhalska66@gmail.com, ORCID 0000-0001-8118-4179
- Субботін С.О. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: subbotin@zp.edu.ua, ORCID 0000-0001- 5814-8268
- Леощенко С.Д. аспірант кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: sergleo.zntu@gmail.com, ORCID 0000-0001-5099-5518
- Безхлібний Д.О. аспірант кафедри технологія машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: dmitriym713@gmail.com, ORCID 0009-0002-3403-4615

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ МЕТОДУ ОБРОБКИ КУЛЬКАМИ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ ПЕРА ЛОПАТОК, ЩО МАЮТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ УШКОДЖЕННЯ

Методи дослідження. Механічний метод для дослідження залишкових напруг, розроблений акад. Давиденковим, експериментальний метод для визначення витривалості лопаток, методи покрокової регресії для побудови регресійних моделей.

Отримані результати. Дослідження геометрії пера лопаток свідчить, що найбільша зміна геометрії лопаток відбувається у периферійній зоні (перетини А7-А7 і А8-А8). Результати вимірювань показують, що з боку корита мікротвердість поверхні суттєво нижча, ніж спинки, а найбільші значення шорсткості зафіксовані в периферійній зоні корита з боку входної кромки, що відповідає місцю максимального експлуатаційного пошкодження. Досліджено параметри поверхневого шару та визначено схему та оптимальний режим обробки лопаток сталевими кульками в магнітному полі, що призводить до підвищення межі витривалості на 39% порівняно з лопатками, що мають напрацювання в експлуатації. Побудовані регресійні моделі частот власних коливань і напрацювання лопаток для двох двигунів, що експлуатувалися в однакових умовах, але мають різне напрацювання. Особливу увагу треба приділяти заходам, які можуть мінімізувати ерозійний знос кромки лопаток та підвищити ресурс роботи двигунів.

Наукова новизна. Запропонован новий метод обробки пера лопаток кульками в магнітному полі, який дозволяє диференційовано обробляти перо лопатки: тільки кромку або все перо. Також метод дозволяє обробляти перо лопаток з експлуатаційними пошкодженнями, що призводить до підвищення витривалості лопаток.

Практична цінність. Виконані дослідження дозволяють рекомендувати використання методу обробки пера лопаток сталевими кульками в магнітному полі як технологічну операцію для відновлення лопаток компресора, що мають експлуатаційні пошкодження у вигляді вибоїн на входних кромках.

Ключові слова: лопатка, ерозія, ушкодження, шорсткість, мікротвердість, кульки, магнітне поле, витривалість, регресійна модель.

Вступ

У проблемі підвищення довговічності авіаційних газотурбінних двигунів важлива роль належить надійності лопаток компресора та вентилятора. Важливу роль відіграє підвищення стійкості лопаток до пошкодження сторонніми предметами. Поверхневе пластичне деформування (ППД), що широко застосову-

ється в двигунобудуванні, являє собою сукупність процесів, що дозволяють, як правило, знизити шорсткість поверхні деталі, створити поверхневий шар зі сприятливими (стискаючими) залишковими напругами, отримати в ньому більш однорідну структуру, створити необхідний рельєф поверхні, знизити вплив на опір втоми концентраторів напруг та ін., що в кін-

цевому рахунку дозволяє підвищити опір втоми матеріалу деталі [1–4].

Практика показує, що інтенсивний наклеп тонкостінних деталей (зокрема тонких кромки лопаток) зазвичай супроводжується «підшаровими» руйнуваннями та різким зниженням межі витривалості. Для підвищення несучої здатності таких деталей необхідно використовувати дуже «м'які» режими ППД, диференціюючи режими в різних зонах, або застосовувати різні види обробки. Підбираючи оптимальну схему та режим зміцнюючої обробки, можна формувати поверхневий шар із заданими параметрами [5]. При обробці лопаток з титанових сплавів необхідно враховувати складність геометрії пера лопаток і наявність тонких кромки.

У зв'язку з цим особливу значущість набуває дослідження технологічних можливостей методу обробки лопаток компресора із експлуатаційними пошкодженнями сталевими кульками в магнітному полі, а також впливу зміцнення на межу витривалості лопаток.

Аналіз досліджень та публікацій

Коли військові гелікоптери та транспортні літаки злітають і вимушено сідають на пустельну або просту злітно-посадкову смугу, пісок і пил викликають ерозію лопатей літака твердими частинками, що призводить до зниження продуктивності компресора і порушення цілісності конструкції, що серйозно впливає на надійність двигуна [6].

У роботі [7] було проведено дослідження ерозійного зносу газотвердотільного потоку лопатки компресора в аеротурбульному двигуні. У дослідженні було спроектовано та виготовлено стенд для випробування сплаву Ti-6Al-4V на ерозійний знос. Швидкості частинок протестували з використанням велосиметрії зображення частинок при різних тисках повітря. Результати показали, що ділянки зносу зосереджені на притискній поверхні лопатки ротора, а також на верхніх лопатки статора, що всмоктує і притискує. Максимальна концентрація зносу спостерігалася поблизу передньої кромки 80% прольоту і поблизу передньої і задньої кромки 95% прольоту на лопаті ротора [7].

У роботі [8] зазначається, що швидкість зношування пера робочих лопаток прямо пропорційна концентрації абразивних частинок у повітряному потоці. Вказується, що міжремонтний ресурс двигуна, що експлуатується в умовах високо запиленої атмосфери, набагато менше встановленого конструктором і обмежується ерозією робочих лопаток компресора.

У роботі [9] на підставі статистичного аналізу було встановлено, що максимальний відсоток усунення двигунів від експлуатації через пошкодження лопаток компресора відбувається саме внаслідок ерозійного зношування робочих лопаток компресора і становить близько 30...35%, що можна порівняти з усуненням двигуна від експлуатації через попадання сто-

ронніх предметів під час зльоту зі злітно-посадкової смуги – 25...30 %.

Ступінь і характер ерозійного зносу залежать від дисперсного складу та кількості пилу, що засмоктується в двигун [10, 11]. Для подальшої експлуатації вертолітного двигуна небезпечні такі дефекти на лопатках: фреттинг-корозія на хвостовій частині та ерозійне зношування по перу, які призводять до поступового руйнування матеріалу, тобто зниження надійності техніки та виникнення небезпеки помпажу двигуна. Результати досліджень ерозійної дії на лопатки компресора підтверджують нелінійний розподіл зносу за висотою лопатки [12]. Поява вибоїн біля основи лопаток або на вхідних і вихідних краяхах небезпечніше, ніж у зовнішніх кінців лопаток. В авіаційній промисловості діє галузевий стандарт [13], який призначений для визначення механічних пошкоджень, допустимих під час експлуатації або підлягаючих виправленню при різному виді ремонтів, або вимагають заміни пошкоджених лопаток на двигуні. Стандарт чітко визначає величини механічних ушкоджень, допустимих під час експлуатації. Стандарт нормує величини пошкоджень, які підлягають ремонту або не допустимі на лопатках під час експлуатації, а також зони, в яких такі ушкодження не допускаються. Ушкодження відрізняються як розмірами, та й формою, і навіть місцем розташування. Ушкодження від попадання сторонніх предметів створюють серйозну проблему, оскільки вона пов'язана з достроковим зніманням двигунів через пошкодження лопаток вибоїнами, перебиранням двигуна, заміною великої кількості лопаток та балансуванням ротора компресора [14].

Лопатки ротора компресора вертолітного двигуна ТВ3-117 – найбільш навантажені деталі, що піддаються дії статичних, динамічних та циклічних навантажень, тому їх виготовляють з титанових сплавів, що не поступаються іншим легким сплавам до жаростійкості. Вертолітні двигуни експлуатуються в умовах підвищеної запиленості на ґрунтових майданчиках аеродромів, у пустелях, що супроводжується пошкодженням робочих лопаток компресора внаслідок зіткнення з частинками ґрунту. Стикаючись з лопатками, частинки пилу в залежності від їх розмірів, мінералогічного складу, умов зіткнення залишають на них пошкодження у вигляді вибоїн, подряпин, рисок [15]. Найбільша ушкоджуваність лопаток спостерігається в периферійній зоні пера по вхідних та вихідних кромках. Аналіз експлуатації двигунів показав, що I ступінь суттєво відрізняється від інших щаблів за кількістю лопаток, що мають вибоїни. Число лопаток з вибоїнами глибиною не менше 0,3 ... 0,5 мм на I ступені компресора приблизно в 4 рази більше, ніж на будь-якої наступної ступені [16].

Тому проблема ремонту лопаток, що мають експлуатаційні ушкодження, наприклад, із застосуванням обробки пера методами поверхневого пластичного деформування, зокрема сталевими кульками в магнітному полі, дуже актуальна.

Мета роботи

Метою даної роботи є дослідження технологічних можливостей методу обробки пера лопаток кульками в магнітному полі лопаток, що мають експлуатаційні ушкодження. Було проведено дослідження геометрії та частот власних коливань лопаток компресора з титанового сплаву ВТ8, що надійшли з експлуатації та після обробки сталевими кульками в магнітному полі. Виконано дослідження параметрів поверхневого шару (шорсткість, мікротвердість, залишкові напруги) лопаток, що мають експлуатаційні пошкодження пера. Визначена оптимальна схема та режим обробки. Проведено дослідження параметрів поверхневого шару лопаток компресора зі сплаву ВТ8, які мали експлуатаційні ушкодження після обробки сталевими кульками в магнітному полі. Досліджено вплив обробки лопаток компресора, які мали експлуатаційні ушкодження пера, сталевими кульками у магнітному полі на витривалість лопаток. Побудовані регресійні моделі частот власних коливань і напрацювання лопаток.

Матеріал і методика досліджень

Як об'єкт досліджень обрані лопатки I ст. компресора дв. ТВ3-117, виготовлені зі сплаву ВТ8, які мають експлуатаційне пошкодження пера лопаток двигунів.

Величину мікротвердості визначали як середнє значення по десяти відбиткам правильної форми на поверхнях спинки та корита в зоні вхідної та вихідної кромки лопаток. Навантаження на піраміду становило 1 Н. Вимірювання параметрів шорсткості Ra і Rz виконували за допомогою профілометра «Pertometer M3» вздовж осі лопатки в прикореневій та периферійній частинах лопатки в зоні вхідної та вихідної кромки. Залишкові напруги визначали механічним методом на приладі ППОН-2 - вимірювання прогину консольно закріпленого зразка, вирізаного з лопатки електроерозійним методом при послідовному знятті шарів металу електролітичним поліруванням. Дослідження геометрії профілю пера проводили за допомогою приладу ПОМКЛ. Вимірювання частот власних коливань лопаток проводили на приладі МКАТ-КМ. Вимірювання геометрії пера лопаток були проведені штангенциркулем із цифровим табло точністю до 0,01 мм. Визначення меж витривалості лопаток проводили прискореним методом на базі $N=2 \cdot 10^7$ циклів із наступним перерахунком із застосуванням коефіцієнта $\alpha=0,8$ на базу $N=10^8$ циклів [17]. Для побудови регресійних моделей використовувалися методи покрокової регресії.

Результати дослідження та їх обговорення

Дослідження проведено на двох двигунах, що експлуатувалися в однакових умовах, але мають різне напрацювання і, відповідно, різний ступінь пошкодження лопаток: дв. Д1 - 1971 год. Д2 - 990 год. Характер ушкодження кромки лопаток наведено на рис. 1.



Рис. 1. Лопатка I-го ступеня дв. ТВ3-117 із пошкодженнями пера

Експлуатаційні пошкодження пера створюють не тільки концентратори напружень, але і призводять до зміни геометрії лопаток [18-21]. Для досліджень із двох двигунів було відібрано по 20 лопаток, які не мають грубих механічних пошкоджень. Дослідження геометрії пера лопаток полягало у вимірі хорди, товщин вхідної та вихідної кромки С1 та С2 у перерізах А2-А2.....А8-А8 (табл. 1, 2). Результати вимірювань свідчать про те, що найбільша зміна геометрії параметрів пера лопаток відбувається у периферійній зоні (перетин А7-А7 і А8-А8). Результати вимірювання величин частот власних коливань лопаток на дв. Д1 та Д2 не перевищують значень, обумовлених технічними умовами. Для подальших досліджень було обрано лопатки дв. Д1, що мають більш велику ступінь експлуатаційних пошкоджень.

На трьох лопатках була виміряна шорсткість поверхні пера в периферійній та прикореневій зонах поблизу вхідної та вихідної кромки з боку спинки та корита. Результати вимірювань представлені у табл. 3. На рис. 2 представлені посередні значення за даними табл. 3.

Таблиця 3 - Результати вимірювання шорсткості поверхні пера лопаток

№ лоп.	Параметри шорсткості	Корито			
		Вхідна кромка		Вихідна кромка	
		Перифер. зона	Прикор. зона	Перифер. зона	Прикор. зона
Д1-30	Ra, мкм	2,1	1,7	1,6	0,7
	Rz, мкм	13,4	12,1	9,9	5,5
Д1-31	Ra, мкм	2,1	1,8	0,9	0,8
	Rz, мкм	12,0	11,1	7,1	6,0
Д1-32	Ra, мкм	2,4	1,9	1,1	0,7
	Rz, мкм	14,0	11,5	7,1	4,7
Спинка					
Д1-30	Ra, мкм	0,4	0,4	0,6	0,6
	Rz, мкм	2,7	2,8	3,8	3,4
Д1-31	Ra, мкм	0,6	0,5	0,8	0,7
	Rz, мкм	3,3	3,2	5,2	3,8
Д1-32	Ra, мкм	0,4	0,4	0,4	0,4
	Rz, мкм	2,8	2,9	3,5	3,1

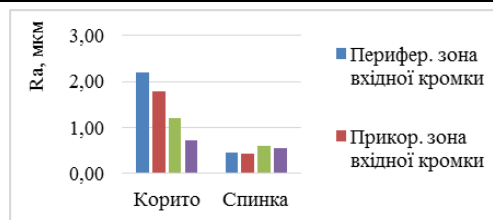


Рис. 2. Результати вимірювання шорсткості поверхні пера лопаток (посередні значення)

Таблиця 1 – Результати вимірів геометрії пералопаток (дв. Д1)

№ п/п	A2- A2	A3- A3	A4- A4	A5- A5	A6- A6	A7- A7	A8- A8
Хорда, мм							
1	26,53	26,91	27,59	28,17	28,30	28,18	27,68
2	26,60	26,77	27,62	28,19	28,36	28,20	27,01
3	26,44	26,83	27,53	28,05	28,23	28,16	27,53
4	26,52	26,92	27,84	28,39	28,30	28,12	27,28
5	26,72	27,16	27,79	28,16	28,23	28,14	27,75
6	26,70	27,07	27,82	28,35	28,28	28,44	27,57
7	26,25	26,65	27,25	27,75	27,93	27,72	27,03
8	26,20	26,60	27,34	27,81	27,92	27,13	27,36
9	26,51	26,85	27,61	28,12	28,25	27,96	27,26
10	26,19	26,58	27,25	27,74	27,88	27,79	27,41
11	26,56	26,98	27,65	27,91	28,00	28,02	27,77
12	25,54	27,14	27,97	28,36	28,32	28,01	27,46
13	26,36	26,76	27,45	28,07	28,20	27,95	27,67
14	26,51	27,00	27,78	28,22	28,25	28,15	27,74
15	26,70	27,03	27,53	28,08	28,02	27,78	27,53
....
20	26,59	26,95	27,58	28,24	28,41	28,35	27,91
C ₁ , мм							
1	1,39	1,16	0,89	0,70	0,52	0,39	0,35
2	1,37	1,21	0,90	0,71	0,62	0,48	0,39
3	1,53	1,32	0,98	0,80	0,65	0,51	0,43
4	1,25	1,04	0,81	0,59	0,45	0,36	0,33
5	1,35	1,11	0,91	0,70	0,60	0,42	0,43
6	1,57	1,39	0,99	0,77	0,68	0,54	0,39
7	1,46	1,23	0,96	0,77	0,62	0,47	0,38
8	1,42	1,22	0,97	0,73	0,59	0,45	0,35
9	1,42	1,25	0,93	0,82	0,64	0,48	0,41
10	1,41	1,20	0,97	0,81	0,63	0,47	0,38
11	1,48	1,26	0,98	0,73	0,60	0,47	0,38
12	1,46	1,16	0,86	0,71	0,54	0,45	0,38
13	1,47	1,27	0,74	0,96	0,57	0,45	0,38
14	1,31	1,06	0,84	0,68	0,60	0,48	0,42
15	1,43	1,25	0,99	0,79	0,62	0,47	0,39
....
20	1,57	1,38	1,00	0,76	0,66	0,52	0,43
C ₂ , мм							
1	0,54	0,46	0,42	0,38	0,37	0,33	0,29
2	0,68	0,62	0,44	0,39	0,35	0,30	0,22
3	0,60	0,54	0,40	0,35	0,32	0,28	0,24
4	0,62	0,51	0,45	0,39	0,34	0,27	0,22
5	0,57	0,45	0,38	0,33	0,27	0,25	0,21
6	0,70	0,62	0,45	0,38	0,33	0,30	0,23
7	0,62	0,57	0,44	0,38	0,36	0,33	0,28
8	0,58	0,55	0,50	0,43	0,37	0,37	0,28
9	0,65	0,58	0,44	0,40	0,38	0,37	0,33
10	0,68	0,59	0,51	0,42	0,36	0,33	0,27
11	0,68	0,61	0,43	0,37	0,35	0,35	0,31
12	0,62	0,47	0,40	0,37	0,32	0,30	0,27
13	0,64	0,55	0,41	0,36	0,35	0,32	0,28
14	0,58	0,51	0,44	0,38	0,34	0,29	0,25
15	0,72	0,67	0,55	0,42	0,35	0,33	0,30
....
20	0,63	0,55	0,42	0,38	0,34	0,31	0,23

Таблиця 2 - Результати вимірів геометрії пералопаток (дв. Д2)

№ п/п	A2- A2	A3- A3	A4- A4	A5- A5	A6- A6	A7- A7	A8- A8
Хорда, мм							
1	26,44	26,92	27,73	26,80	28,37	28,20	27,85
2	26,65	26,96	27,51	27,98	28,11	28,03	27,72
3	26,66	27,04	28,03	28,48	28,44	28,28	28,03
4	26,97	27,22	27,76	28,17	28,27	28,22	27,88
5	26,58	27,02	27,73	28,19	28,27	28,23	27,90
6	26,83	27,27	28,03	28,34	28,47	28,25	27,94
7	26,65	27,10	28,78	28,21	28,30	28,16	27,60
8	26,54	27,00	27,73	28,26	28,44	28,36	28,15
9	26,59	27,01	27,75	28,20	28,35	28,33	28,14
10	26,53	27,07	27,91	28,22	28,08	27,90	27,58
11	26,71	27,07	27,70	28,09	28,30	28,42	27,43
12	26,88	27,23	27,79	27,09	28,28	28,27	28,11
13	26,71	26,92	27,55	28,07	28,33	28,15	27,99
14	26,70	27,00	27,64	28,09	28,23	28,36	28,18
15	26,55	27,15	27,75	28,18	28,35	28,35	27,95
....
20	26,63	27,01	27,86	28,22	28,31	28,25	28,00
C ₁ , мм							
1	1,30	1,12	0,88	0,69	0,63	0,54	0,50
2	1,34	1,24	1,02	0,79	0,64	0,56	0,50
3	1,31	1,18	0,87	0,66	0,64	0,60	0,57
4	1,31	1,17	0,94	0,72	0,58	0,53	0,51
5	1,12	1,07	0,87	0,69	0,62	0,56	0,47
6	1,27	1,15	0,91	0,75	0,65	0,58	0,55
7	1,30	1,15	0,90	0,69	0,61	0,52	0,50
8	1,29	1,13	1,00	0,80	0,65	0,52	0,47
9	1,39	1,20	0,98	0,71	0,65	0,57	0,52
10	1,20	1,10	0,90	0,75	0,65	0,60	0,56
11	1,41	1,21	0,91	0,71	0,61	0,57	0,50
12	1,23	1,12	0,98	0,77	0,74	0,67	0,60
13	1,40	1,25	1,05	0,82	0,62	0,53	0,50
14	1,34	1,23	0,95	0,72	0,56	0,53	0,48
15	1,41	1,20	0,92	0,72	0,67	0,62	0,55
....
20	1,20	1,15	0,95	0,63	0,56	0,58	0,57
C ₂ , мм							
1	0,60	0,55	0,42	0,37	0,32	0,27	0,21
2	0,58	0,53	0,43	0,38	0,31	0,25	0,22
3	0,62	0,52	0,41	0,39	0,27	0,23	0,23
4	0,62	0,54	0,40	0,37	0,28	0,25	0,21
5	0,60	0,52	0,43	0,38	0,27	0,27	0,20
6	0,61	0,53	0,44	0,39	0,29	0,24	0,23
7	0,60	0,51	0,42	0,37	0,30	0,25	0,22
8	0,62	0,52	0,43	0,38	0,29	0,24	0,24
9	0,58	0,48	0,41	0,36	0,28	0,24	0,23
10	0,59	0,48	0,43	0,37	0,31	0,24	0,21
11	0,61	0,50	0,43	0,38	0,30	0,26	0,22
12	0,59	0,49	0,42	0,37	0,32	0,23	0,21
13	0,61	0,52	0,43	0,38	0,31	0,25	0,21
14	0,62	0,51	0,44	0,37	0,32	0,26	0,22
15	0,61	0,52	0,42	0,38	0,29	0,26	0,22
....
20	0,59	0,44	0,36	0,35	0,31	0,25	0,21

За результатами вимірювань найбільші значення шорсткості зафіксовані у периферійній зоні корита з боку вхідної кромки, що відповідає місцю максимальних експлуатаційних ушкоджень. Параметр Ra досягає 2,1 – 2,4 мкм. Залишкові напруги визначали на лопатках механічним методом. На рис. 3 представлена еюра, побудована за середніми значеннями величин залишкових напруг, виміряних на двох лопатках.

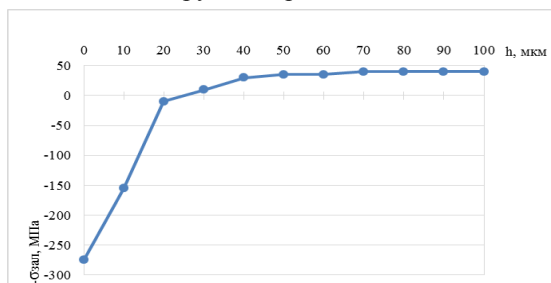


Рисунок 3. Еюра розподілу залишкових напружень

Величина залишкових напруг стиснення на поверхні досягає 270 МПа; а на глибині близько 23 мкм стискаючі напруги переходять у напруги розтягнення. Мікротвердість визначали на лопатці з боку спинки та корита. Результати вимірювань представлені у табл. 4, рис. 4

Таблиця 4 - Результати досліджень мікротвердості пера лопатки

Спинка Н _ц , МПа			Корито Н _ц , МПа		
Вхідна кромка	C _{max}	Вихідна кромка	Вхідна кромка	C _{max}	Вихідна кромка
4058	4223	4133	3317	3761	3400

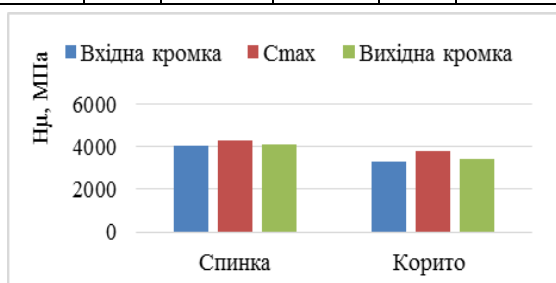


Рисунок 4. Результати вимірів мікротвердості пера лопатки

Результати вимірювань показують, що з боку корита мікротвердість поверхні пера в процесі експлуатації суттєво знижується та значно нижча, ніж на спинці. Це може бути пов'язано з ушкодженнями, що виникають в процесі експлуатації двигунів.

Три партії лопаток, що мають експлуатаційні пошкодження пера (по 5 шт. у партії), були оброблені сталевими кульками в магнітному полі за двома технологічними схемами:

- схема № 1 - по спинці та кориту в зоні вхідної кромки (див. рис. 5);
- схема № 2 (комбінована обробка) – спочатку перо по одному режиму, а потім додатково зона вхідної кромки за іншим режимом (див. рис. 6).



Рисунок 5. Схема №1 обробки пера лопаток (спинка та корито поблизу вхідної кромки)



Рисунок 6. Схема №2 - комбінована обробка пера лопаток

Режими обробки розрізнялись діаметром кульок та часом обробки. Перша партія лопаток була оброблена за схемою №1, режим №1 (див. табл. 5).

Таблиця 5 – Параметри режиму № 1 обробки пера лопаток

Параметри режиму обробки			
Позначення режиму обробки	№ лопаток	d, мм	τ, хв
№ 1	1,2,3,4,5	0,35	30

Другу партію лопаток було оброблено за схемою № 2: перо – режим № 2 (табл. 6), додатково зона поблизу вхідної кромки – за режимом № 3 (табл. 6). Третю партію лопаток обробляли за схемою № 2: перо – режим № 4 (табл. 6), додатково зона вхідної кромки – за режимом № 5 (табл. 6).

Таблиця 6 – Параметри режимів обробки пера лопаток

Параметри режиму обробки			
Позначення режиму обробки	№ лопаток	d, мм	τ, хв
№ 2	7,8,9,10,12	0,68	30
№ 3	7,8,9,10,12	0,35	20
№ 4	14,16,17,19,20	1,6	30
№ 5	14,16,17,19,20	0,35	30

Після обробки пера лопаток сталевими кульками в магнітному полі виконано вимір хорди, C1 та C2 у перерізах A2-A2.....A8-A8. Як видно з результатів вимірювань зміна параметрів геометрії пера лопаток після обробки сталевими кульками в магнітному полі незначна: хорда в перерізі A2-A2 - до 0,07 мм, в перерізі A8-A8 - в межах 0,02-0,05 мм, розмір C1 – до 0,07 мм та C2 – в межах 0,05 – 0,1 мм.

Результати вимірювання величин частот власних коливань лопаток і товщини профілю після обробки сталевими кульками магнітному показують, що обро-

бка лопаток сталевими кульками в магнітному полі практично не змінює частоту власних коливань лопаток – зміни в межах 6 Гц, що не перевищує значень, що обумовлені технічними умовами. Товщина профілю пера в результаті обробки не змінюється.

На двох лопатках з кожної партії була виміряна шорсткість поверхні пера в периферійній та прикореневій зонах поблизу вхідної та вихідної кромок з боку спинки та корита. Результати вимірювань представлені у табл. 7. На рис. 7 та 8 представлені посередні значення за даними табл. 7

Таблиця 7 – Результати вимірювання шорсткості поверхні пера лопаток

№ схеми, № режиму	Умовний № лопатки	Параметр шорсткості	Вхідна кромка		Вихідна кромка	
			Перифер. зона	Прикор. зона	Перифер. зона	Прикор. зона
Корито						
№1, №1	Д1-5	Ra, мкм	0,9	0,6	1,0	0,5
		Rz, мкм	4,3	3,9	7,1	3,7
	Д1-2	Ra, мкм	0,9	0,7	1,0	0,5
		Rz, мкм	4,5	3,8	6,3	4,2
№2, №2+№3	Д1-7	Ra, мкм	1,6	1,02	0,9	0,2
		Rz, мкм	8,1	5,5	6,2	1,8
	Д1-9	Ra, мкм	1,98	1,0	0,7	0,2
		Rz, мкм	9,9	6,2	5,0	1,8
№2, №4+№5	Д1-17	Ra, мкм	1,0	0,5	0,6	0,4
		Rz, мкм	6,2	2,7	4,8	2,0
	Д1-19	Ra, мкм	1,0	0,6	0,5	0,4
		Rz, мкм	6,2	3,9	4,0	1,8
Спинка						
№1, №1	Д1-5	Ra, мкм	0,3	0,3	0,3	0,6
		Rz, мкм	1,6	1,5	2,4	3,7
	Д1-2	Ra, мкм	0,3	0,5	0,3	0,6
		Rz, мкм	1,8	2,4	2,4	5,0
№2, №2+№3	Д1-7	Ra, мкм	0,3	0,3	0,2	0,2
		Rz, мкм	1,5	1,7	1,7	1,1
	Д1-9	Ra, мкм	0,2	0,4	0,2	0,2
		Rz, мкм	1,3	2,2	1,4	1,0
№2, №4+№5	Д1-17	Ra, мкм	0,4	0,3	0,3	0,4
		Rz, мкм	1,9	1,8	1,6	2,1
	Д1-19	Ra, мкм	0,4	0,3	0,3	0,4
		Rz, мкм	2,0	1,7	2,0	1,9

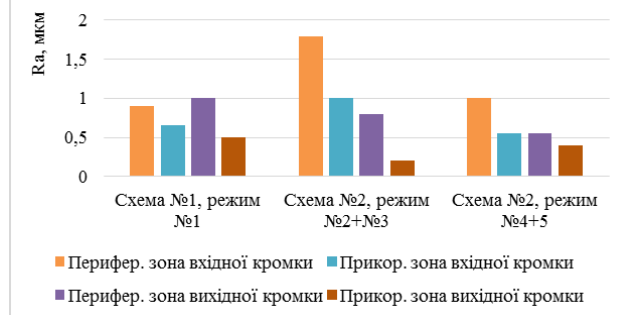


Рисунок 7. Результати вимірювання шорсткості поверхні пера лопаток (посередні значення, корито)

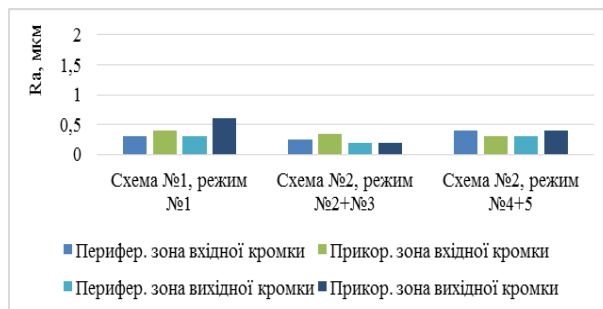


Рисунок 8. Результати вимірювання шорсткості поверхні пера лопаток (посередні значення, спинка)

Як очевидно з табл. 7 найбільше зниження значень шорсткості спостерігається в периферійній та прикореневій зоні корита з боку вхідної кромки та забезпечується при обробці пера лопаток за схемою №1, режим №1 (обробка тільки вхідної кромки) та за схемою №2 (комплексна обробка), режими №4+№5 – спочатку перо, а потім зона вхідної кромки.

Мікротвердість пера лопатки після обробки кульками в магнітному полі визначали посередині пера лопатки з боку корита на вхідній кромці та по S_{max} . Результати вимірювань представлені у табл. 8, рис. 9. Таблиця 8 – Результати досліджень мікротвердості пера лопатки

№ режиму	Корито			
	Вхідна кромка		S_{max}	
	H_{μ} , МПа	$d_{отп}$, мкм	H_{μ} , МПа	$d_{отп}$, мкм
1	4302	20,8	3644	31,9
2,3	4265	20,9	3800	22,1
4,5	4481	20,3	4196	21,0

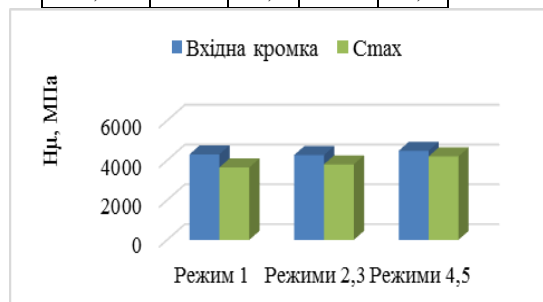


Рисунок 9. Результати досліджень мікротвердості пера лопатки

Як видно з табл. 8 комплексна обробка лопаток за схемою №2 – режим №4+режим №5 забезпечує найбільше підвищення мікротвердості поверхні у зоні вхідної кромки – до 4481 МПа, що має позитивно позначитися на експлуатаційних характеристиках лопаток.

Дослідження впливу обробки сталевими кульками у магнітному полі на витривалість лопаток, що мали експлуатаційні пошкодження пера були проведені на лопатках, відібраних з двох двигунів: умовні номери Д10 (напрацювання 797 год) та Д11 (напрацювання 850 год), що мали пошкодження пера в експлуатації (вибоїни глибиною 0,5 мм), що перевищу-

ють допустимі норми. Дослідження геометрії пера лопаток полягало у вимірі хорди в перерізах А2-А2 та А8-А8, тобто. у перерізах, що наочно характеризують ступінь зносу пера. Ступінь зносу профілю пера лопаток не дозволяє їх подальшу експлуатацію без відновлювального ремонту. Результати вимірювання величин частот власних коливань лопаток на двигунах Д10 і Д11 відповідають технічним вимогам креслення.

Дві партії лопаток, що мали експлуатаційні ушкодження пера (по 12 шт. у партії), були оброблені сталевими кульками в магнітному полі за двома технологічними схемами, які показали найкращі характеристики поверхневого шару за попередніми дослідженнями.

Першу партію лопаток (дв. Д11) було оброблено за схемою № 1, режим № 1: по спинці та кориту в зоні вхідної кромки ($d_{ш}=0,35$ мм, $\tau=30$ хв.).

Другу партію лопаток (дв. Д10) було оброблено за схемою № 2: перо – режим № 4 ($d_{ш}=1,6$ мм, $\tau=30$ хв), додатково зона поблизу вхідної кромки – за режимом № 5 ($d_{ш}=0,35$ мм, $\tau=30$ хв).

Результати випробувань на втому представлені у табл. 9-12.

Таблиця 9 - Результати випробувань лопаток (дв. Д11) у стані надходження з експлуатації (вихідні лопатки)

№ п/п	Рівень навантаження σ , МПа	Кількість циклів, $N \times 10^6$	Результати випробувань	Примітка
1	500	20,0	Не зр.	-
2	500	1,85	Зруйн.	$l=17$ мм, спинка
3	470	12,61	Зруйн.	$l=22$ мм, вх. кромка
4	440	20,0	Не зр.	-
5	440	20,0	Не зр.	-
6	440	20,0	Не зр.	-
7	440	2,05	Зруйн.	$l=28$ мм, спинка
8	410	20,0	Не зр.	-
9	410	20,0	Не зр.	-
10	410	20,0	Не зр.	-
11	410	20,0	Не зр.	-
12	410	20,0	Не зр.	-
13	410	20,0	Не зр.	-

Відповідно до методики межа витривалості з урахуванням 10^8 циклів становитиме $410 \times 0,8 = 328$ МПа.

Таблиця 10 – Результати випробувань лопаток, зміцнених за схемою №1 (реж. №1)

№ п/п	Рівень навантаження σ , МПа	Кількість циклів, $N \times 10^6$	Результати випробувань	Примітка
1	530	20,0	Не зр.	-
2	560	20,0	Не зр.	-
3	590	0,56	Зруйн.	$l=23$ мм, спинка

№ п/п	Рівень навантаження σ , МПа	Кількість циклів, $N \times 10^6$	Результати випробувань	Примітка
4	560	1,12	Зруйн.	По кориту у радіусі переходу
5	530	20,0	Не зр.	-
6	530	20,0	Не зр.	-
7	530	20,0	Не зр.	-
8	530	20,0	Не зр.	-
9	530	20,0	Не зр.	-

Відповідно до методики межа витривалості з урахуванням 10^8 циклів становитиме $530 \times 0,8 = 424$ МПа
Таблиця 11 – Результати випробувань лопаток (дв. Д10) у стані надходження з експлуатації (вихідні лопатки)

№ п/п	Рівень навантаження σ , МПа	Кількість циклів, $N \times 10^6$	Результати випробувань	Примітка
1	500	12,44	Зруйн.	$l=23$ мм, вх. кромка
2	470	15,34	Зруйн.	$l=28$ мм, вих. кромка
3	440	20,0	Не зр.	-
4	440	20,0	Не зр.	-
5	440	16,05	Зруйн.	$l=40$ мм, спинка
6	410	20,0	Не зр.	-
7	410	20,0	Не зр.	-
8	410	20,0	Не зр.	-
9	410	20,0	Не зр.	-
10	410	20,0	Не зр.	-
11	410	20,0	Не зр.	-

Відповідно до методики межа витривалості з урахуванням 10^8 циклів становитиме $410 \times 0,8 = 328$ МПа.

Таблиця 12 - Результати випробувань лопаток, зміцнених за схемою №2 (реж. №4+реж. №5)

№ п/п	Рівень навантаження σ , МПа	Кількість циклів, $N \times 10^6$	Результати випробувань	Примітка
1	570	20,0	Не зр.	-
2	600	20,0	Не зр.	-
3	630	19,0	Зруйн.	$l=31$ мм, вх. кромка
4	600	17,27	Зруйн.	$l=32$ мм, вх. кромка
5	570	20,0	Не зр.	-
6	570	20,0	Не зр.	-
7	570	20,0	Не зр.	-
8	570	20,0	Не зр.	-
9	570	20,0	Не зр.	-

Відповідно до методики межа витривалості з урахуванням 10^8 циклів становитиме $570 \times 0,8 = 456$ МПа.

Межа витривалості лопаток, зміцнених сталевими кульками в магнітному полі за схемою №1

(реж. №1) - по спинці та кориту в зоні вхідної кромки збільшилася на 29%, а зміцнених за схемою №2 (реж. №4+реж. №5) – комбінована обробка - на 39% порівняно з лопатками, які мають напрацювання в експлуатації.

З наведених результатів випливає, що обробка за схемою №2 (реж. №4+реж. №5) - комбінована обробка пера лопатки є оптимальною і призводить до підвищення межі витривалості на 39% порівняно з лопатками, які мають напрацювання в експлуатації.

В даній роботі також були побудовані регресійні моделі частот власних коливань і напрацювання лопаток для двох двигунів, що експлуатувалися в однакових умовах, але мають різне напрацювання: дв. Д1 - 1971 год. та Д2 – 990 год. Спочатку було здійснено відбір інформативно значимих ознак (для цього використовувалися методи покрової регресії). Відбір ознак дозволяє відкинути малоінформативні ознаки, які ускладнюють модель, знижують її інтерпретабельність, інколи ж і вносять помилкові (зашумлені) дані, які знижують точність моделі. Після цього, використовуючи відібрані групи ознак, будувалися регресійні моделі. Як регресійні моделі були обрані лінійні регресійні моделі. Оскільки попередньо було виконано відбір ознак, моделі будувалися значно швидше і відрізняються порівняльною простотою.

У вихідних даних $x_1, x_4, x_7, x_{10}, x_{13}, x_{16}, x_{19}$ - В, величина хорди в різних перерізах; $x_2, x_5, x_8, x_{11}, x_{14}, x_{17}, x_{20}$ - С1-товщина вхідної кромки; $x_3, x_6, x_9, x_{12}, x_{15}, x_{18}, x_{21}$ - С2 – товщина вихідної кромки; x_{22} - НВ - твердість вихідної лопатки, HRC; x_{23} – $\sigma_{0,2}$ - межа пластичності вихідного матеріалу, МПа; x_{24} – σ_B - межа міцності, МПа; y_1 – Т1 – величина напрацювання загальна, год; y_2 – Т2 – величина напрацювання до 1 ремонту, год; y_3 – частота власних коливань лопаток, Гц.

Були збудовані лінійні регресійні моделі. Так для першого двигуна були отримані такі моделі:

$$y_1 = 5493,3 + 787,81x_3 - 174,09x_{13} - 15979x_{15} + 907,93x_{16} - 3533,5x_{17} + 19309x_{18} - 735x_{19} - 4496,7x_{20} - 5967x_{21};$$

точність моделі: 0,0065.

$$y_2 = 1730,8 + 248,21x_3 - 54,85x_{13} - 5034,5x_{15} + 286,06x_{16} - 1113,3x_{17} + 6083,6x_{18} - 231,58x_{19} - 1416,8x_{20} - 1880x_{21};$$

точність моделі: 0,006.

$$y_3 = 1015,7 + 71,182x_6 - 0,85927x_{16} + 46,001x_{17} - 160,38x_{18} - 11,27x_{19} - 161,8x_{20} + 70,668x_{21};$$

точність моделі: 0,0058.

Для другого двигуна були отримані такі моделі:

$$y_1 = -6329,7 + 104,18x_5 + 577,55x_{16} - 887,97x_{17} - 6417x_{18} - 194,56x_{19} + 426,08x_{20} - 8265,3x_{21};$$

точність моделі: 0,005.

$$y_2 = -2883,5 + 47,46x_5 + 263,1x_{16} - 404,52x_{17} - 2923,3x_{18} - 88,633x_{19} + 194,1x_{20} - 3765,3x_{21};$$

точність моделі: 0,006.

$$y_3 = 989,16 - 3,2178x_4 - 17,851x_{16} - 57,823x_{17} - 132,7x_{18} + 10,239x_{19} + 24,261x_{20} - 22,105x_{21};$$

точність моделі: 0,0056.

Для загальної вибірки даних по двох двигунах були отримані наступні моделі:

$$y_1 = 15976 + 111,95x_{13} + 1444,9x_{14} - 2869,8x_{15} + 213,64x_{16} - 3010,7x_{17} + 3429x_{18} - 780,91x_{19} - 2449,6x_{20} - 1397x_{21};$$

точність моделі: 0,006.

$$y_2 = 6146 + 39,731x_{13} - 31,269x_{14} - 1359,9x_{15} + 38,801x_{16} - 472,48x_{17} + 788,81x_{18} - 254,39x_{19} - 411,03x_{20} - 532,82x_{21};$$

точність моделі: 0,006.

$$y_3 = 1236,9 - 31,607x_{13} + 58,769x_{14} - 66,747x_{15} + 17,876x_{16} - 64,156x_{17} + 47,107x_{18} - 6,5416x_{19} - 79,377x_{20} + 51,834x_{21};$$

точність моделі: 0,005.

Отримані регресійні моделі показують, що найбільший вплив на ресурс роботи двигуна здійснюють товщини вхідної та вихідної кромки лопаток у верхніх перерізах А6-А6.....А8-А8. На частоту власних коливань лопаток також найбільше впливає геометрія вхідної та вихідної кромки лопаток у перерізах А7-А7.....А8-А8.

Висновки

1. Проведено дослідження геометрії та частот власних коливань пера лопаток компресора з титанового сплаву ВТ8, що надійшли з експлуатації. Результати вимірювань свідчать про те, що найбільша зміна геометрії параметрів лопаток відбувається у периферійній зоні.

2. Виконано дослідження параметрів поверхневого шару (шорсткість, мікротвердість, залишкові напруження) лопаток, що мають експлуатаційні пошкодження пера.

3. Проведено дослідження геометрії пера, частот власних коливань, а також параметрів поверхневого шару пера лопаток компресора зі сплаву ВТ8, які мали експлуатаційні ушкодження після обробки сталевими кульками в магнітному полі. Зміна параметрів геометрії пера лопаток після обробки сталевими кульками в магнітному полі незначна: від 0,02-0,05 мм до 0,07– 0,1 мм. Обробка дозволяє знизити шорсткість поверхні до 0,3-0,6 мкм на кромках у зоні корита та суттєво підвищити мікротвердість.

4. Визначена схема та оптимальний режим обробки лопаток сталевими кульками у магнітному полі: обробка пера лопаток спочатку кульками діаметром 1,6 мм, $\tau=30$ хв; потім додатково зона поблизу вхідної кромки кульками діаметром 0,35 мм, $\tau=30$ хв.

5. Досліджено вплив обробки лопаток компресора зі сплаву ВТ8, які мали експлуатаційні ушкодження пера, сталевими кульками у магнітному полі на витривалість лопаток. Обробка за оптимальним режимом призводить до підвищення межі витривалості на 39% порівняно з лопатками, які мають напрацювання в експлуатації.

6. Отримані регресійні моделі показують, що при експлуатації вертольотних двигунів найбільший

вплив на ресурс роботи двигуна та частоту власних коливань лопаток впливає геометрія вхідної та вихідної кромки лопаток у перерізах А6-А6.....А8-А8. Тому особливу увагу треба приділяти заходам, які можуть мінімізувати ерозійний знос кромки лопаток та підвищити ресурс роботи двигунів.

7. Метод обробки кульками в магнітному полі забезпечує "м'яку" обробку без перенаклепу тонких крайок пера лопаток. Виконані дослідження дозволяють рекомендувати використання методу обробки пера лопаток сталевими кульками в магнітному полі як технологічну операцію для відновлення лопаток компресора, що мають експлуатаційні пошкодження у вигляді вибоїн на вхідних кромках, при ремонті лопаток компресора.

Список літератури

1. Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст] / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1963. – 346 с.
2. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин [Текст] / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 238 с.
3. Кузнецов, Н.Д., Технологические методы повышения надежности деталей машин: справочник [Текст] / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.
4. Петухов, А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД [Текст] / А.Н. Петухов – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.
5. Пухальская, Г.В. Исследование технологических возможностей метода обработки лопаток компресора стальными шариками в магнитном поле [Текст] / Г.В. Пухальская, О.Л. Лукьяненко // Вестник двигателестроения. – №1. – 2013. – С. 83-87.
6. Di, Wang. Solid Particle Erosion [Текст] / Wang Di, Yang Zhen // Advances in Turbomachinery. 2023 DOI: 10.5772/intechopen.109383
7. Li, Chao. Study on the erosive wear of the gas-solid flow of compressor blade in an aero-turboshaft engine based on the Finnie model [Текст] / Chao Li, Guangfu Bi, Jian Li, Zezhong Liu // Tribology International 2021. – № 163 – С. 1057 – 1077. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107197>
8. Перельман, Р.Г. Эрозионная прочность деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов [Текст] / Р.Г. Перельман. – М.: Машиностроение, 1980. – 245 с.
9. Шпилев, К.М. Эксплуатация летательных аппаратов в горно-пустынной местности [Текст] / К.М. Шпилев. – М.: Военное издательство, 1991. – 224 с.
10. Максимов, Н.А. Двигатели самолетов и вертолетов. основы устройства и летной эксплуатации [Текст] / Н.А. Максимов, В.А. Секистов – М.: Воениздат, 1977. – 343 с.
11. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компресора и вентилятора. ч. 1 [Текст] / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк и др. – Запорожье: Мотор Сич, 2003. – 396 с.
12. Гумеров, А.В. Моделирование эрозионного износа лопатки компрессора [Текст] / А.В. Гумеров, Р.Г. Акмалетдинов // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2011. – № 3 (27). – С. 233–239.
13. ОСТ 1 00304-79 Лопатки газотурбинных двигателей Нормирование поврежденных лопаток компрессоров от попадания посторонних предметов. [Текст] – Введ. 01.07.79.
14. Петухов, А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД [Текст] / А.Н. Петухов – М.: Машиностроение. 1993. – 233 с.
15. Детонационное нанесение покрытий на детали авиадвигателей и технологического оснащения с последующей магнитно-абразивной обработкой [Текст] / [Богуслаев В.А., Долматов А. И., Жеманюк П.Д. и др.] – Запорожье : Дека, 1996 – 366 с.
16. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД [Текст] / [Богуслаев В. А., Яценко В. К., Жеманюк П. Д. и др.]. – Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2005 г. – 559 с.
17. Лопатки газотурбинного двигателя (ГТД). Методы испытаний на усталость. (ОСТ 1.00870-77.) [Текст] – Введ. 07.78.
18. Бабенко, О.Н. Анализ результатов исследования частот и форм собственных колебаний рабочей лопатки 1 ступени КНД [Текст] / О.Н. Бабенко, Т.И. Прибора // Вестник двигателестроения. – №2. – 2018. – С. 91-98.
19. Двирник, Я.В. Влияние пылевой эрозии на газодинамические характеристики осевого компрессора ГТД [Текст] / Я.В. Двирник, Д.В. Павленко // Вестник двигателестроения. – №1. – 2017. – С. 56-66.
20. Ефанов, В.С. Эрозионная стойкость лопаток компрессора вертолетных ГТД с различными типами покрытий [Текст] / В.С. Ефанов, А.Н. Прокопенко, А.В. Овчинников, Ю.Н. Внуков // Вестник двигателестроения. – №1. – 2017. – С. 120-123.
21. Павленко, Д.В. Закономерности изнашивания рабочих лопаток компрессора вертолетных двигателей, эксплуатирующихся в условиях запыленной атмосферы [Текст] / Д.В. Павленко, Я.В. Двирник // Вестник двигателестроения. – №1. – 2016. – С. 42-51.

STUDY OF THE TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF THE BALL PROCESSING METHOD IN THE MAGNETIC FIELD OF BLADES WITH OPERATIONAL DAMAGE

- Pukhalska G.** PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machinery Engineering Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: puhalska66@gmail.com, ORCID 0000-0001-8118-4179
- Subbotin S.** Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Software Tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: subbotin@zp.edu.ua, ORCID 0000-0001-5814-8268
- Leoshchenko S.** Post-graduate student of the Department of Software Tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: sergleo.zntu@gmail.com, ORCID 0000-0001-5099-5518
- Bezkhlibnyi D.** Post-graduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dmitriym713@gmail.com, ORCID 0009-0002-3403-4615

Purpose. To conduct a study of the technological possibilities of the method of treatment with balls in the magnetic field of the pen of vanes that have operational damage.

Research methods. A mechanical method for the study of residual stresses, developed by acad. Davydenkov, an experimental method for determining the endurance of blades, stepwise regression methods for building regression models.

Results. The study of the geometry of the blade feathers shows that the biggest change in the geometry of the blades occurs in the peripheral zone (intersections A7-A7 and A8-A8). The measurement results show that the microhardness of the surface on the side of the trough is significantly lower than on the backs, and the highest values of roughness are recorded in the peripheral zone of the trough on the side of the entrance edge, which corresponds to the place of maximum operational damage. The parameters of the surface layer were studied and the scheme and optimal mode of processing blades with steel balls in a magnetic field was determined, which leads to a 39% increase in the endurance limit compared to blades that have experience in operation. Regression models of self-oscillation frequencies and blade run-in were built for two engines operated under the same conditions, but with different run-in. Special attention should be paid to measures that can minimize erosive wear of blade edges and increase the service life of engines.

Scientific novelty. A new method of processing the blade feathers with balls in a magnetic field is proposed, which allows differential processing of the blade feathers: only the edge or the entire feather. Also, the method allows you to process blade feathers with operational damage, which leads to increased durability of blades.

Practical value. The conducted studies allow us to recommend the use of the method of processing blade feathers with steel balls in a magnetic field as a technological operation for the restoration of compressor blades that have operational damage in the form of potholes on the inlet edges.

Key words: blade, erosion, damage, roughness, microhardness, balls, magnetic field, endurance, regression model.

References

1. Birger, I.A. (1963). Ostatochnye napryazheniya [Finishing tires]. Moscow: Mashinostroenie, 346 p. [in Russian].
2. Sulima, A.M., Shulov, V.A., Yagodkin, Yu.D. (1988). Poverhnostnyj sloj i ekspluatacionnye svoystva detalej mashin [Surface and exclusion facilities of machines]. Moscow: Mechanical engineering, 238 p. [in Russian].
3. Kuznetsov, N.D., Tsitlin, V.I., Volkov, V.I. (1993). Tehnologicheskie metody povysheniya nadezhnosti detalej mashin: spravochnik [Technological methods of output of the reliability of machines: the senior] Moscow: Mechanical engineering, 304 p. [in Russian].
4. Petukhov, A.N. (1993). Soprotivlenie ustalosti detalej GTD [Consumption of GTE details]. Moscow: Mechanical engineering, 240 p. [in Russian].
5. Pukhalska, G.V., Lukyanenko, O.L. (2013). Issledovanie tehnologicheskikh vozmozhnostej metoda obrabotki lopatok kompresora stalnimi sharikami v magnitnom pole [Sent a technological wazing of the method of gaping the blades of the compressor with steel layers in the magnetic field] Vestnik dvigatelestroeniya [Bulletin of motor]. № 1. P. 83-87. [in Russian].
6. Di, Wang, Zhen, Yang (2023). Solid. “Particle Erosion”. Advances in Turbomachinery. DOI: 10.5772/intechopen.109383

7. Li, Chao, Bi, Guangfu, Li, Jian, Zezhong, Liu (2021) Study on the erosive wear of the gas-solid flow of compressor blade in an aero-turboshaft engine based on the Finnie model. *Tribology International*. № 163. С. 1057 – 1077. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107197>
8. Perelman, R.G. (1980). Eroziionnaja prochnost detalej dvigatelej i energoustanovok letatelnyh apparatov [Erosion strength of engine parts and aircraft power plants], Moscow, Mechanical engineering, 245 p. [in Russian].
9. Shpilev, K.M. (1991) Jekspluatacija letatelnyh apparatov v gorno-pustynnoj mestnosti [Operation of aircraft in the mountain-desert area], Moscow, Military publishing house, 224 p. [in Russian].
10. Maximov, N.A., Sekistov, V.A. (1977). Dvigateli samoletov i vertoletov. [Engines of aircraft and helicopters]. Osnovy ustrojstva i letnoj ekspluatcii. [Fundamentals of the device and flight operation]. Moscow: Military publishing house, 343 p.
11. Boguslaev, V.A., Muravchenko, F.M., Zhemaniuk, P.D. et al. (2003). Tehnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnyh harakteristik detalej GTD [Technological removal of the exclusive characteristics of GTD parts]. Lopatki kompressora i ventilyatora [Compressor blades and fan]. Part 1. Zaporizhzhia: Motor Sich, 396 p.
12. Gumerov, A. V., Akmaledtinov, R. G. (2011). Modelirovanie erozionnogo iznosa lopatki kompressora [Modeling of erosion wear of the compressor blade]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta [Bulletin of the Samara State Aerospace University], no. 3 (27), pp. 233– 239 [in Russian].
13. OST 1 00304-79 Lopatki gazoturbinnnyh dvigatelej [blades of gas turbine motors] Normirovanie povrezhdenij lopatok kompressorov ot popadaniya postoronnyh predmetov [Normiatrics have arranged blades of compressor shoes from the hit of outstanding objects]. Introduction. 01.07.79. [in Russian].
14. Petukhov, A.N. (1993). Soprotivlenie ustalosti detalej GTD [Consumption of GTE details]. Moscow: Mechanical engineering. 233 p. [in Russian].
15. Boguslaev, V.A., Dolmatov, A.I., Zhemaniuk, P.D. etc. (1996). Detonacionnoe nanesenje pokrytij na detali aviadvigatelej i tehnologicheskogo osnasheniya s posleduyushej magnitno-abrazivnoj obrabotkoj [Detonational application is covered on details of aviators and technological equipment with the following magnetic-abrasive intercostal]. Zaporizhzhia: Deca, 366 p. [in Russian].
16. Boguslaev, V.A., Yatsenko V.K., Zhmanyuk P.D., etc. (2005). Otdelochno-uprochnyayushaya obrabotka detalej GTD [Oblulo-reversing of the details of GTE]. Zaporizhzhia, out. OAO "Motor Sich", 559 p. [in Russian].
17. Lopatki gazoturbinnogo dvigatelya (GTD). Metody ispytanij na ustalost. The blades of the gas turbine motor (GTD). Methods are sophisticated. (OST 1.00870-77.) Introduction. 07.78. [in Russian].
18. Babenko O.N., Prybora T.I. (2018). Analiz rezultatov issledovaniya chastot i form sobstvennyh kolebanij rabochej lopatki 1 stupeni KND [Analysis of the result of the frequencies and forms of core robes of blades 1 degrees KND] Vestnik dvigatelestroeniya [Bulletin of motor]. №2. P. 91-98. [in Russian].
19. Dvirnik Ya.V., Pavlenko. D.V. (2017). Vliyanie pylevoj erozii na gazodinamicheskie harakteristiki oseвого kompressora GTD [Intelligent erosion on gas -dudy characteristics of the hazel compressor GTD] Vestnik dvigatelestroeniya [Bulletin of motor]. № 1. P. 56-66. [in Russian].
20. Efanov V.S., Prokopenko A.N., Ovchinnikov A.V., Vnukov Y.N. (2017). Eroziionnaya stojkost lopatok kompressora vertoletnyh GTD s razlichnymi tipami pokrytij [The erosion stands of the blades of the compressor of the helicopter GTD with different types are covered] Vestnik dvigatelestroeniya [Bulletin of motor]. № 1. P. 120-123. [in Russian].
21. Pavlenko D.V., Dvirnik Ya.V. (2016). Zakonomernosti iznashivaniya rabochih lopatok kompressora vertoletnyh dvigatelej, ekspluatiruyushih v usloviyah zapylennoj atmosfery [The legislability of the competing blades of the compressor of the helicopter engines, excluding in the lifting atmosphere] Vestnik dvigatelestroeniya [Bulletin of motor]. № 1. P. 42-51. [in Russian].