

УДК 621.793:620.178

Володимир Плескач канд. техн. наук, доцент кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vmpayzp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6182-4332

Іван Акімов канд. техн. наук, доцент кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: akimovi@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6076-0149

## НАДІЙНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ГАЗОАБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННІ

**Мета роботи.** Полягає в аналізі закономірностей газоабразивного зношування матеріалу лопаток авіаційних компресорів, у знаходженні захисних покриттів, які забезпечують ефективне зменшення зносу, та надання рекомендацій щодо оптимального типу захисного покриття.

**Методи дослідження.** При дослідженні використовувалася установка, конструкція якої дозволяє змінювати параметри газоабразивного зношування у широких межах, які б якнайкраще відтворювали умови зношування, що існують в авіаційних компресорах. Дослідженню піддавалися зразки зі сталі 14X17H2 і захисні шари, нанесені на неї азотуванням, нітроцементациєю і ціануванням. Дослідження проводилося із застосуванням металографічного аналізу з метою виявлення структури, яка забезпечує оптимальний захист від газоабразивного зношування.

**Отримані результати.** Проведений аналіз характеру і величини зносу матеріалів, що досліджувалися у потоці вільного абразиву залежно від швидкості абразивного потоку і його кута атаки. Визначено ступінь зменшення зносу сталі 14X17H2 при використанні захисних дифузійних покриттів. На підставі порівняльного оцінювання кількісних характеристик захисних шарів визначено покриття, яке оптимально зменшує знос сталі 14X17H2 при газоабразивному зношуванні.

**Наукова новизна.** Визначена величина кутів атаки, які відповідають максимальному зношуванню, як для сталі 14X17H2, так і для запропонованих захисних дифузійних покриттів. На підставі металографічного аналізу виявлено, який склад (вид, величина і розташування) дисперсних частинок структури поверхневого шару забезпечує оптимальний опір газоабразивному зношуванню.

**Практична цінність.** Результати роботи можуть бути використані конструкторами, що займаються виробами, які працюють в умовах газоабразивного зношування. На підставі отриманих залежностей матеріалів, що досліджувалися, від кута атаки є можливість обрати оптимальні матеріал і конфігурацію виробу таким чином, щоб зношування було мінімальним.

**Ключові слова:** надійність, зносостійкість, триботехніка, газоабразивне зношування, знос, хіміко-термічне оброблення.

### Вступ

Основна мета будь-якого виробництва – забезпечити випуск надійної продукції. Згідно з ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки» [1] *надійністю* називається властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

Для деталей машин надійність – поняття комплексне. Залежно від призначення, навантажень та умов експлуатації воно може включати у себе такі поняття, як безвідмовність, довговічність та ремонтпридатність.

*Безвідмовність* – це властивість об'єкта (деталі, складеного вузла, механізму) виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку. У зв'язку з цим виникає поняття відмови. Відмова – це подія, яка порушує працездат-

ність об'єкту, яка вимагає того чи іншого ремонту. Це може бути, наприклад, заміна запобіжника, якоїсь однієї деталі, а може бути більш-менш складний ремонт, який вимагає для відновлення працездатності тривалого часу. Характеристикою безвідмовності є час напрацювання на відмову.

*Довговічність* – це властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту. Тобто у час, який визначатиме довговічність виробу, входять всі передбачені обслуговуванням даного об'єкта техогляди, профілактичні заходи і поточні ремонти аж до досягнення граничного стану. Граничний стан – це стан об'єкта, за яким його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна, тобто відновлення його працездатності ремонтом стає неможливим або недоцільним. Граничний стан говорить про *фізичний стан* об'єкта (виробі). Але внаслідок технічного прогресу або конкуренції на ринку може з'явитися аналогічний виріб з кращими харак-

теристиками, коли фізична довговічність даного об'єкта ще не вичерпана. Така ситуація визначає його моральну довговічність.

**Ремонтпридатність** – це властивість об'єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення працездатного стану за допомогою технічного обслуговування або ремонту. Ремонтпридатність залежить в основному від призначення і умов експлуатації виробу. Вона закладається на стадії проектування. Граничний стан ремонтпридатності визначається або старінням матеріалу виробу, його критичним зношуванням або недоцільністю витрат на черговий ремонт. У деяких виробів разового використання (лампи розжарювання, ракети, транзистори тощо) ремонтпридатність збігається з першою відмовою. У деяких виробів граничний стан відновлюється періодично при певного стандартного елемента (ручний ліхтарик, кулькова ручка), і ремонт зводиться до його заміни. У більшості достатньо складних за конструкцією виробів граничний стан обмежується підвищеною інтенсивністю відмов або порушенням вимог безпеки [1–3].

У ДСТУ «Надійність техніки. Аналіз надійності» [4] викладені загальні положення, які встановлюють порядок робіт при аналізі надійності об'єкта на стадії проектування та розробки, виготовлення, експлуатації та обслуговування, а також кількісні методи аналізу надійності об'єкта. Наводиться метод прогнозування надійності за кількістю елементів. Методи нормування, оцінювання і забезпечення надійності детально викладені у роботах [5, 6].

У більшості випадків зниження довговічності деталей машин і механізмів пов'язані зі зношуванням. Згідно з ДСТУ 2823 – 94 «Зносостійкість виробів» [7] **зношуванням** називається процес відокремлювання матеріалу з поверхні твердого тіла або збільшення його залишкової деформації, що виявляється у поступовому змінюванні розмірів, форми чи маси тіла. Згідно з ДСТУ 2823-94 всі види зношування можна поділити на види, наведені на рис. 1.



Рисунок 1. Види зношування згідно з ДСТУ 2823-94

У літературі найдетальніше вивчене механічне зношування. Більшість робіт в цьому напрямі присвячено вивченню зношування в умовах тертя ковзання або котіння [8, 9], зокрема у межах трибології [10, 11]. Трибологія – це наука про тертя, зношування, змащування і взаємодію поверхонь, що контактують, при їх взаємному переміщенні. Вона займається вивченням

процесів, що відбуваються у вузлах тертя, складом і властивостями поверхневих шарів деталей вузлів тертя, вибором (або створенням) матеріалів для конкретних конструктивних вузлів тертя.

Абразивне зношування і зокрема, газоабразивне зношування, вивчається порівняно мало. Тому цьому напрямку й присвячена ця стаття.

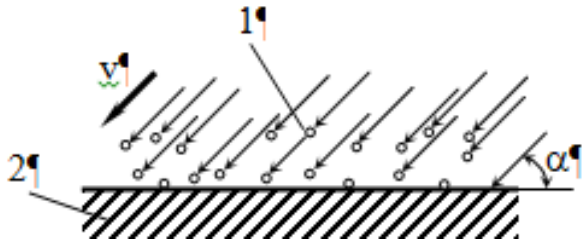
### Аналіз досліджень та публікацій

Абразивне зношування – один з найпоширеніших і найруйнівніших видів пошкодження деталей машин в експлуатації. Воно відбувається шляхом локального руйнування металевої поверхні абразивними тілами за наявності відносної швидкості пересування. Абразивні тіла – це найчастіше частинки мінерального походження, оксиди, продукти зношування, зокрема наклепані металеві частинки різноманітної форми. У процесі абразивного зношування можуть бути нерухомі (закріплені) абразивні частинки, що контактують з металевою поверхнею, яку вони обробляють, і незакріплені частинки, які при роботі механізмів пересуваються по поверхні робочих органів, або вільні частинки, що попадають у зазор сполучених деталей. Абразивному зношуванню піддаються деталі сільськогосподарських, дорожньо-будівельних гірничодобувних і транспортувальних машин, вузли металургійного, ковальсько-штампувального, металорізального обладнання; підшипники ковзання різного призначення і т.п.

Абразивне зношування ґрунтовно вивчалось такими видатними вченими, як Б. І. Костецький, І. В. Крагельський, М. М. Хрущов, М. М. Тенненбаум та ін. [12]. Вони внесли значний внесок у вивчення механізму абразивного зношування та пошуку наукових і практичних заходів із запобігання його негативних наслідків.

Газоабразивне зношування – це відділення з поверхні деталі (виробу) матеріалу абразивними частинками, що рухаються завислими у потоці з достатньою високою швидкістю. Прискорювачем частинок може бути як газовий потік, так і гравітаційні або відцентрові сили. Газоабразивні потоки можуть зношувати будівлі за певних кліматичних або метеорологічних умов; пропелери віхрових млинів; авіаційну техніку, зокрема лопатки авіадвигунів, що працюють на тимчасових запиленних аеродромах; деталі теплоенергетичних установок, які працюють на твердому паливі; пневмотранспорт (вентилятори, циклони, вигини трубопроводів) та багато інших випадків. Характер і основні закономірності газоабразивного зношування за різних умов досліджувалися такими вченими, як Г. Еванс, М. О. Крагельський, І. Р. Клейс та інші [13].

Інтенсивність газоабразивного зношування залежить від швидкості потоку  $V$  та кута його атаки  $\alpha$  (рис. 2).



**Рисунок 2.** Схема дії газоабразивного потоку:

1 – газоабразивний потік; 2 – матеріал, що зношується

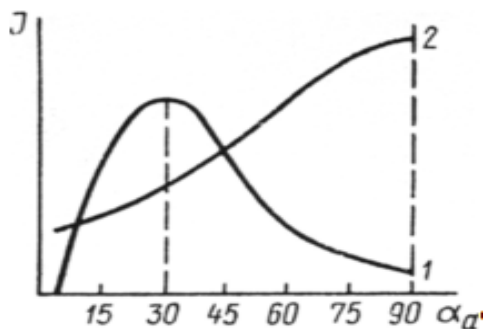
Найбільший вплив на інтенсивність газоабразивного зношування надають енергетичні чинники (швидкість і маса частинок). Залежність зносу від швидкості потоку має такий характер:

$$I = kV^m, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який залежить від властивостей абразиву і параметрів потоку газу;  $V$  – швидкість потоку, м/с;  $m$  – показник степені, що залежить від властивостей зношуваної поверхні.

Інтенсивність зношування монотонно збільшується зі збільшенням розміру і маси абразивних частинок. Крім того, на величину зносу впливає твердість і форма частинок абразиву.

Вплив кута атаки газоабразивного потоку  $\alpha$  залежить від механізму руйнування матеріалу, що зношується. При зношуванні пластичних матеріалів переважає в'язкий механізм різання-подряпування. Зі збільшенням кута атаки знос поступово збільшується до певного максимуму. Коли кут атаки наближається до  $90^\circ$ , збільшується пластична деформація металевої поверхні, яка викликає ефект її зміцнення (наклеп). Внаслідок цього знос зменшується (рис. 3). Існує тенденція збільшення кута максимального зносу зі збільшення швидкості потоку.



**Рисунок 3.** Залежність газоабразивного зносу  $I$  пластичних (1) і крихких (2) матеріалів від кута атаки  $\alpha$

Крихкі високоміцні матеріали при малих кутах атаки погано піддаються різанню-подряпуванню. При кутах атаки  $60 \dots 90^\circ$  вертикальна складова сили удару викликає збільшене крихке руйнування зношуваної поверхні.

## Мета роботи

Задача даної роботи полягає в аналізі закономірностей газоабразивного зношування матеріалу лопаток авіаційних компресорів та знаходження пропозицій до його зменшення.

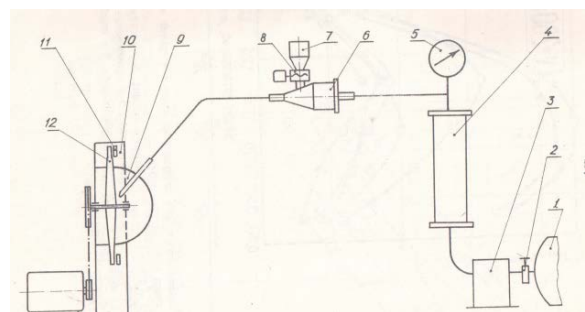
## Матеріал і методика досліджень

Вибір методики і дослідної установки для дослідження газоабразивного зношування виходили з того, щоб умови дослідження якнайкраще відтворювали умови зношування, які існують в авіаційних компресорах. При цьому конструкція установки (рис. 4) дозволяє у широких межах змінювати параметри зношування.

Основою установки є ротор, на якому закріплюється одночасно 60 зразків. Зразки щільно прилягають один до одного. Тому зношуванню піддається лише лицьовий бік зразків. Повітряний потік створюється компресором. Робочий абразив завантажується у бункер. Абразив із заданою кількістю подається дозатором у камеру змішування. Процес зношування відбувається у камері змішування.

Як абразивний матеріал використовувався кварцовий пісок з розміром частинок  $100 \dots 200$  мкм. При всіх швидкостях випробування витримувалася постійна концентрація піску у потоці:  $20 \text{ г/м}^3$ . Швидкість газоабразивного потоку змінювалася від 95 до 280 м/с. Установка дозволяла змінювати кут атаки абразивного потоку від  $20$  до  $86^\circ$ .

Величина зносу визначалася зважуванням зразків на аналітичних вагах з точністю до  $0,1$  мг. Щоб можна було порівнювати результати випробувань різної тривалості, проведених на зразках різної величини, отриманий знос  $I$  відносився до одиниці площі зразка при витраті на неї  $1 \text{ кг}$  абразиву і вимірювався у  $\text{мг/см}^2 \cdot \text{кг}$ .



**Рисунок 4.** Схема установки для випробування на газоабразивне зношування:

- 1 – компресор; 2 – кран; 3 – маслотовологовідділювач;
- 4 – ротаметр; 5 – манометр; 6 – камера змішування;
- 7 – бункер; 8 – дозатор; 9 – абразивна камера; 10 – корпус;
- 11 – зразок; 12 – ротор

В авіаційних двигунах лопатки компресора служать для створення перед камерою згоряння потоку повітря високого тиску. По довжині компресора лопатки різних ступеней працюють у різних умовах. Лопатки перших ступеней піддаються високим силовим

навантаженням і одночасно газообразивному зношуванню, а лопатки останніх ступеней працюють при температурі до 500 °С. Тому для лопаток різних ступеней можуть використовуватися різні матеріали.

Для виготовлення лопаток перших ступеней нерідко використовують сталь 14X17H2. Сталь 14X17H2 має такий хімічний склад: вуглецю – 0,11...0,17 %, хрому – 16...18 %, нікелю – 1,5...2,5 %, кремнію і марганцю – до 0,8 %, домішок – до 0,02...0,03 %; решта – залізо. У стані постачання сталь відноситься до мартенсито-феритного класу.

На підставі літературного аналізу як засіб захисту лопаток від газообразивного зношування було обрано створення поверхневого захисного шару методами хіміко-термічного оброблення. Під час дослідження розглядалися такі методи хіміко-термічного оброблення: азотування, нітроцементация і ціанування.

Зразки оброблялися згідно зі стандартними технологіями [14, 15]. Азотування проводилося в атмосфері аміаку при температурі 520<sup>0</sup> С протягом 7...8 год., що давало поверхневий шар товщиною 0,5...0,6 мм. Нітроцементацию проводили у суміші природного газу та аміаку при температурі 570<sup>0</sup> С протягом 2 год. 30 хв. Отриманий шар мав товщину 0,5...0,8 мм. Для отримання більшої зносостійкості зразки піддавалися рідинному низькотемпературному ціануванню на основі ціаністого калію при температурі 560<sup>0</sup> С протягом 4 год. Отриманий шар мав товщину 0,2...0,4 мм.

Результати досліджень

Призначення зносостійкого покриття – захист робочих поверхонь деталей і робочих органів. Тому основними питаннями проблеми надійності і довговічності є розробка заходів з підвищення їх зносостійкості. Основними параметрами, що визначають характер і величину зносу матеріалу у потоці вільного абразиву, є швидкість абразивного потоку і кут його атаки.

Залежності величини зносу від кута атаки при всіх швидкостях газообразивного потоку, які використовувалися при дослідженнях, мають однаковий характер (рис. 5).

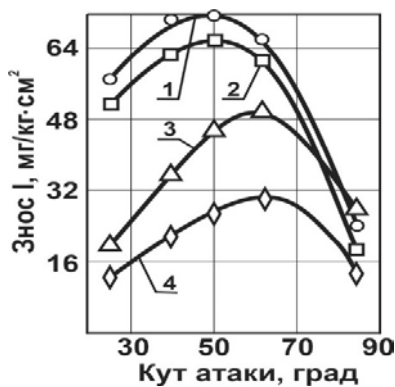


Рисунок 5. Залежність зносу сталі 14X17H2 і дифузійних шарів від кута атаки при швидкості газообразивного потоку 280 м/с:

1 – сталь 14X17H2; 2 – нітроцементування;  
3 – азотування; 4 – ціанування

Зі збільшенням кута атаки знос збільшується і, досягнувши максимуму, плавно зменшується. У кожного матеріалу кут, що відповідає максимальному зношуванню, дещо різний і залежить від структури і властивостей поверхневого шару, а отже й від механізму руйнування. Існує тенденція збільшення кута максимального зносу зі збільшенням швидкості газообразивного потоку.

Проведені дослідження підтвердили загальний характер залежності зносу від швидкості газообразивного потоку, згідний з формулою (1), (рис. 6).

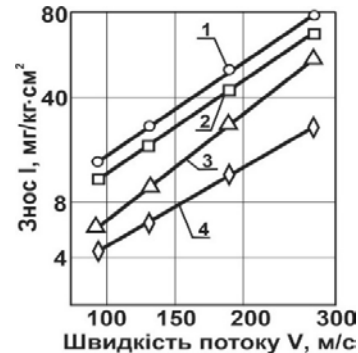


Рисунок 6. Залежність зносу сталі 14X17H2 і дифузійних шарів від швидкості газообразивного потоку:

1 – сталь 14X17H2; 2 – нітроцементування; 3 – азотування;  
4 – ціанування

Чутливість сталі і дифузійних шарів до зміни швидкості абразивного потоку практично однакова, що пов'язане зі структурою матеріалу поверхні, наявністю дрібних зміцнювальних структур, які рівномірно розсіяні в основній фазі. Показник ступеня  $m$  для дифузійних шарів наближається до 2.

### Обговорення

Аналіз отриманих результатів показує, що характер зношування незахищеної сталі та її поверхні після нітроцементування при всіх швидкостях потоку повністю співпадає. Нітроцементування знижує знос у 1,15...1,20 рази. Таке невелике зниження зносу пояснюється порівняно низькою якістю нітроцементованого шару. Поверхневі шари рихлі, його структура неоднорідна.

Азотування знижує знос у 1,8...2,4 рази, а ціанування – у 2,5...3,4 рази. Обидва дифузійні шари мають приблизно однакову мікротвердість і практично однакову структуру (рис. 7). Тому головну роль у їхній зносостійкості відіграє будова самого шару, зокрема дисперсність наявних у ньому нітридів і карбідів.

Ціанований шар відзначається надзвичайно високою дисперсністю. Нітриди азотованого шару утворюють порівняно крупні конгломерати, серед яких зустрічаються ділянки, вільні від нітридів. Очевидно, що чим дисперсніші частинки структури, які мають високу твердість (наприклад, нітриди, карбонітриди), і чим рівномірніше розташовані вони у поверхневому шарі, тим вище зносостійкість матеріалу у газообразивному потоці.



a



b

**Рисунок 7.** Структура азотованого (а) і ціанованого (б) шарів на сталі 14X17H2 (×450)

### Висновки

1. Проведений детальний аналіз закономірностей газоабразивного зношування сталі 14X17H2.
2. Для підвищення зносостійкості сталі 14X17H2 запропоновані дифузійні покриття і вивчені закономірності їх зношування у газоабразивному потоці.
3. Описаний вплив структури поверхневого шару на характер його руйнування під дією газоабразивного потоку.
4. На підставі порівняльного оцінювання кількісних характеристик захисних шарів встановлено, що для захисту лопаток зі сталі 14X17H2 від газоабразивного зношування оптимальний результат забезпечує рідинне ціанування, яке знижує її знос у 2,5...3,4 рази.

### Список літератури

1. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та значення. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1994. 75 с.
2. Івченко Л. Й. Державні стандарти в машинобудуванні і металообробці : навч. посібник / Івченко Л. Й., Петрикін В. В. – Харків : «Компанія СМІТ», 2006. 320 с.
3. Надійність машин / Канарчук В. С., Полянський С. К., Дмитрієв М.М. – К. : Либідь, 2003 – 424с.
4. ДСТУ 2861-94 Надійність техніки. Аналіз на-

дійності. – [Чинний від 1997-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1994. – 16 с.

5. Надійність машин та обладнання. Частина 1. Оцінка та забезпечення надійності машин та обладнання / Новицький А. В., Ружило З. В., Банний О. О. та ін. – К. : НУБіПУ, 2023. 209 с.

6. Васілевський О. М. Нормування показників надійності технічних засобів / Васілевський О. М., Поджаренко В. О. – Вінниця : ВНТУ, 2010 – 129 с.

7. ДСТУ 2823 – 94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1995. – 18 с.

8. Закалов О. В. Основи тертя і зношування в машинах : навч. посібник / Закалов О. В., Закалов І. О. – Тернопіль: вид-тво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 322 с.

9. Дмитриченко М. Ф. Основи тертя та зношування / Дмитриченко М.Ф., Мнацаканов Р.Г., Мікосянчик О. О. – К. : Інформавтодор, 2006 – 216 с.

10. Трибологія / Кондрачук М. В., Хабутель В. Ф., Пашечко М. І. та ін. – К. : вид-во Національного Авіаційного університету «НАУ-друк», 2009. – 232 с.

11. Bhushan B. Introduction to tribology / Bhushan B. – New York : John Wiley & Sons, 2002. – 732 p.

12. Дубровський С. С. Використання сучасних технологій при виготовленні та ремонті елементів конструкцій гірничо-збагачувального обладнання / Дубровський С. С., Реброва С. В. // Вісник Криворозького національного університету. – 2019. – Вип. 48. – С. 79–83.

13. Похмурська Г. В. Ударно-абразивне зношування поверхневих шарів, наплавлених дротами системи Fe-Cr-B-C / Похмурська Г. В., Войтович А. А. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25.3. – С. 129–135.

14. Спеціальні конструкційні матеріали : підручник / Солнцев Ю. П., Беліков С. Б., Волчок І. П., Шейко С. П. – Запоріжжя : «ВАЛПІС-ПОЛІГРАФ», 2010. – 536 с.

15. Інженерне матеріалознавство / Дубовий О. М., Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Самохін С. М. – Миколаїв : НУК, 2009. – 444 с.

Одержано 10.02.2025

## RELIABILITY OF MACHINE PARTS UNDER GAS-ABRASIVE WEAR

**Volodymyr Pleskach** Candidate of Technical Sciences, associate professor, Associate professor of the Department of Composite Materials, Chemistry and Technologies, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: vmpayzp@gmail.com*, ORCID : 0000-0002-6182-4332

**Ivan Akimov** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Composite Materials, Chemistry and Technologies, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: kafedra\_t\_met@zntu.edu.ua*, ORCID : 0000-0001-6076-014

**Purpose.** Analysis of patterns of gas-abrasive wear of the material of aircraft compressor blades, finding protective coatings that provide effective wear reduction, and providing recommendations on the optimal type of protective coating.

**Research methods.** During the study, a device was used, the design of which allows changing the parameters of gas-abrasive wear within wide limits, which would best reproduce the wear conditions existing in aviation compressors. Samples of 14X17H2 steel and protective layers applied to it by nitriding, nitrocementing, and cyanidation were tested. The study was conducted using metallographic analysis in order to identify the structure that provides optimal resistance to gas abrasive wear.

**Results.** Analysis of the nature and amount of wear of the investigated materials was carried out in the flow of free abrasive depending on the speed of the abrasive flow and its angle of attack. The degree of wear reduction of 14X17H2 steel when using protective diffusion coatings was determined. On the basis of a comparative evaluation of the quantitative characteristics of protective layers, a coating that optimally reduces the wear of 14X17H2 steel during gas abrasive wear was determined.

**Scientific novelty.** The value of the angles of attack corresponding to the maximum wear for both 14X17H2 steel and the proposed protective diffusion coatings was determined. Based on metallographic analysis, the composition (type, size, and location) of dispersed particles of the surface layer structure has been determined to provide optimal resistance to gas abrasive wear.

**Practical value.** The results of this work can be used by designers who are engaged in the development of products that operate under gas-abrasive wear conditions. Based on the obtained dependencies of the studied materials on the angle of attack, it is possible to select the optimal material and configuration of the product in such a way that the wear was minimal.

**Key words:** reliability, wear resistance, tribotechnics, gas abrasive wear, wear, chemical heat treatment.

## References

1. DSTU 2860-94 Nadiynist tekhniki. Terminy ta vyznachennya (1994). [Reliability of equipment. Terms and meanings] [in force since 1996-01-01] Kyiv, Derzhstandart Ukrainy, 75. [in Ukrainian].
2. Ivshchenko L.Yo., Petrykin V.V. (2006) Derzhavni standarty v mashynobuduvanni i menaloobrobtsi [State standards in mechanical engineering and metalworking] Kharkiv: „Kompaniya CMIT”, 320. [in Ukrainian].
3. Kanarchuk V.Ye., Polyanskiy S.K., Dmitriyev M.M. (2003). Nadiynist mashyn [Machine reliability] Kyiv, Lybid, 424. [in Ukrainian].
4. DSTU 2861-94 Nadiynist tekhniki. Analiz nadiynosti (1994) [Reliability of equipment. Reliability analysis] [in force since 1997-01-01] Kyiv, Derzhstandart Ukrainy, 16. [in Ukrainian].
5. Novytskyi A.V., Ruzhylo Z.V., Bannyi O.O., Bystryi O.M., Syvolapov V.A. (2023) Nadiynist mashyn ta obladnannya. Chastyna 1. Otsinka ta zabezpechennya nadiynosti mashyn ta obladnannya. [Reliability of machinery and equipment. Part 1: Evaluation and ensuring the reliability of machinery and equipment] Kyiv, NUBiPU. 209. [in Ukrainian].
6. Vasilevskyy O.M., Podzharenko V.O. (2010) Normuvannya pokaznykiv nadiynosti tekhnichnykh zasobiv [Standardization of reliability indicators of technical indicators] Vinnytsya, VNTU. 129. [in Ukrainian].
7. DSTU 2823-94. Znosostiykist vyrobiv. Tertya, znoshuvannya ta zماشchuvannya. Terminy ta vyznachennya (1995) [Wear resistance of products. Friction, wear and lubrication. Terms and meanings] [in force since 1996-01-01] Kyiv, Derzhstandart Ukrainy, 18. [in Ukrainian].
8. Zakalov O.V., Zakalov I.O. (2011) Osnovy tertya i znoshuvannya v mashynach [Basics of friction and wear in machines] Ternopil, vyd. TNTU im. I.Puluya, 322.
9. Dmytrychenko M.F., Mnatsakanov R.G., Mikosyanchyk O.O. (2006). Osnovy tertya ta znoshuvannya [Basics of friction and wear] Kyiv, Informavtodor. 216. [in Ukrainian].
10. Kondrachuk M.V., Khabubel V.F., Pashechko M.I., Korbut Ye.V. (2009). Trybologiya [Tribology] Kyiv, vyd. Natsionalnogo Aviatsiynogo universytetu “NAU-druk”. 232.
11. Bhushan B. Introduction to tribology (2002). New York : John Wiley & Sons, 732.
12. Dubrovskiy S.S., Rebrova S.V. (2019). Vykorystannya suchasnykh tekhnologiy pry vygotovlenni t remonti elementiv konstruktsiy girnycho-zbagachuvalnogo obladnannya [The use of modern technologies in the manufacture and repair of structural elements of mining and beneficiation equipment] Visnyk Kryvorozkogo natsionalnogo universytetu, 48, 79–83.
13. Pokhmurska G.V., Voytovych A.A. Udarno-abrazyvne znoshuvannya poverkhnevyykh shariv, naplavlenykh drotamy systemy Fe-Cr-B-C [Impact-abrasive wear of surface layers welded with wires of the Fe-Cr-B-C system] Naukovyy visnyk NLTU Ukrainy, 25.3, 129–135. [in Ukrainian].
14. Solntsev Yu.P., Belikov S.B., Volchok I.P., Sheyko S.P. (2010) Spetsialni konstruktsiyni msterialy. [Special construction materials] Zaporizhzhya, “VALPIS-POLIGRAF”, 536. [in Ukrainian].
15. Dubovyy O.M., Kazymyrenko Yu.O., Lebedyeva N.Yu., Samokhin S.M. (2009). Inzenerne materialoznavstvo [Engineering materials science] Mykolayiv, NUK. 444. [in Ukrainian].