

ІННОВАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ГАЛУЗЯХ АВІАЦІЇ, АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ, РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, РАДІОТЕХНІКИ, ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА АСУ, А ТАКОЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Джус Роман Миколайович (кандидат технічних наук, старший науковий співробітник)

<https://orcid.org/0000-0002-7079-0912>

Плешкунов Сергій Анатолійович

<https://orcid.org/0000-0002-0733-4535>

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків, Україна

ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ НОВІТНІМИ МЕТОДАМИ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ

У доповіді представлені результати порівняльної оцінки технологічних методів цементації та іонно-плазмового азотування по технології "АВІНІТ N" (АТ "ФЕД") при їх використанні для зміцнення високонавантажених вузлів авіаційної техніки. Оцінка проводилася порівнянням контактної утомної міцності при проведенні прискорених, довготривалих випробувань на багато циклову та мало циклову утомну міцність при терті кочення з проковзуванням на машині тертя 2070 СМТ-1 на зразках, виготовлених з жароміцної сталі 20Х3МВФ ГОСТ 20072. Результати можуть бути корисними для інженерів, які займаються технологіями зміцнення конструкційних матеріалів.

Ключові слова: "Авініт N"; зміцнення поверхонь азотуванням; іонно-плазмове азотування; методика прискореної оцінки; міцність при утомному зношуванні; утомне зношування; цементація.

Вступ

Постановка проблеми. Ресурс авіаційної техніки (АТ) в багатьох випадках визначається ресурсом її агрегатів, які мають у своїй конструкції пари тертя. А їх довговічність, в свою чергу, визначається величиною контактної міцності їх поверхонь, що труться. Ця міцність характеризує здатність матеріалу протистояти утомному руйнуванню [1]-[2]. Тому для подовження ресурсу АТ застосовують ряд методів підвищення контактної міцності матеріалів, з яких виготовлені пари тертя їх агрегатів. Одними з основних є хіміко-термічні методи цементації. Але на даний час розроблені і застосовуються нові методи азотування, які мають значні переваги над цементацією. Але для оцінки експлуатаційних показників конструкційних матеріалів, зміцнених за новими методами, необхідно проведення довготривалих випробувань на втомну міцність на машинах тертя, які моделюють роботу таких спряжень.

Огляд останніх публікацій. Такий стан питання обумовлює обмежену кількість досліджень по впливу азотування на величину контактної міцності матеріалів, особливо іонно-плазмовими методами азотування, які мають істотні відмінності та переваги перед традиційними пічними методами газового азотування. Останнім часом все більше застосовуються і методи азотування [3]-[5], але ще не так широко. Останнє, напевно, в значній мірі

визначається перевагою цементації перед азотуванням у формуванні зміцнених шарів великої протяжності, як одного з основних факторів, з яким пов'язують підвищення контактної міцності. Цим можна пояснити і невелику кількість робіт про вплив азотування на контактну міцність матеріалів. Однак в промисловому виробництві АТ "ФЕД" (м. Харків) метод іонно-плазмового прецизійного азотування "Авініт N" [6]-[7] використовується достатньо широко. Він має певні переваги перед традиційними методами газового азотування: значне скорочення (до 3-ох разів) тривалості дифузійного насичення азотом поверхневого шару сталі; загальне скорочення часу циклу обробки до 3-5 разів; дозволяє уникнути водневого окрихчування; забезпечує збереження розмірів (азотування «в розмір») і високу чистоту обробки поверхні, зниження крихкості азотованого шару і формування нітридних зон всіх складів без пір, внаслідок чого не потрібно доопрацювання поверхні після азотування.

Метою роботи було визначення переваг плазмового азотування за технологією "Авініт N" перед традиційними методами цементації у контактній утомній міцності. Тому автори провели дослідження впливу плазмового азотування за технологією "Авініт N" на контактну міцність від утоми жароміцної сталі 20Х3МВФ ГОСТ 20072 при терті кочення з проковзуванням поверхонь і порівняння отриманих результатів з контактною утомною міцністю такої ж сталі, зміцненої за традиційною технологією газової цементації.

Виклад основного матеріалу дослідження

Випробування проводилися на стандартній машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою «диск-диск».

Результати прискорених випробувань на втомну міцність. Виходячи з того, що випробування на утомну міцність потребують дуже довгого часу випробувань при дуже великих контактних навантаженнях, авторами було розроблено методику прискореної оцінки для порівняння контактної утомної міцності при проведенні випробувань при терті кочення з проковзуванням [8]. В якості показника оцінки утомної міцності використовували питому енергію дисипації за один цикл навантаження. Було сплановано експеримент, який передбачав реалізацію імпульсного навантаження трибосистеми (ТС) на першому етапі її роботи з одночасною

реєстрацією акустико-емісійного випромінювання [9]-[12]. Метод акустичної емісії (АЕ) довів високу ефективність реєстрації моменту переходу ТС від нормального зносу до початкового утомного руйнування. За цим критерієм зразки з азотуванням мають значну (більш, ніж в 2 рази) перевагу перед цементованими [8].

У процесі проведення випробувань встановлено, що кожен цикл випробувань складається з трьох характерних етапів: перший – етап навантаження; другий – вихід на сталий режим накопичення пошкоджень в поверхневому шарі; третій – перехід до початкових руйнувань втомного характеру.

Усереднені результати кількості циклів до початку явищ втомного руйнування та триботехнічні параметри для чотирьох пар зразків, зміцнених цементациєю та азотуванням, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Кількість циклів до початку втомного руйнування та триботехнічні параметри для чотирьох пар зразків

Вид зміцнення зразків		Коефіцієнт тертя / середньо-поверхнева температура, °С		Кількість циклів до початку явищ втомного руйнування
Ведучого	Веденого	На початку випробувань	В кінці випробувань	
Цементация	Цементация	0,054/43	0,045/45	53812
Азотування АВИНІТ N	Азотування АВИНІТ N	0,08/50	0,063/52	97875

Аналіз результатів прискорених випробувань і подальших досліджень зразків підтверджують правомірність підходів до проведення таких випробувань. Цей аналіз показує, що при питомому контактному навантаженні $\sigma = 1140$ МПа на робочих поверхнях всіх випробуваних зразків утворилися початкові осередки втомного викришування.

Метод акустичної емісії довів високу ефективність реєстрації моменту переходу трибосистем від нормального зносу до початкового втомного руйнування.

Результати довготривалих випробувань на втомну міцність. У якості оціночного показника було прийнято ваговий знос за весь період випробувань. В даному випадку оцінювалася інтегральна характеристика зносостійкості в умовах великих контактних напружень. Дана характеристика включала втрату маси через нормальний механохімічний знос і за рахунок втомного викришування. В таких умовах випробувань розділити ці дві складові зношування не представляється можливим.

Випробували по три пари тертя з певними номерами. Результати наведені в табл. 1, 2. Явищ задіру не виявлено за весь період випробувань на жодній парі зразків.

Під час випробувань реєстрували середньоповерхневу температуру і момент тертя, який перераховувався в коефіцієнт тертя (табл. 1).

До і після випробувань зразки зважували на

аналітичних лабораторних терезах ВЛА-200 з точністю до 10^{-4} гр. Визначали знос ведучого і веденого зразків, а також сумарний знос (табл. 2).

В момент відділення великої частки зносу за механізмом піттингу на діаграмі зміни коефіцієнта тертя спостерігається стрибок, тривалість якого 10-12 хвилин. На наш погляд, це обумовлено механікою руйнування. Спочатку відбувається випинання, а потім – відділення обсягу матеріалу. Після чого момент тертя стабілізується і починається вищерблення по межі дефекту. Таким чином поступово утворюється характерна полосчатість на зразках з цементациєю.

Таблиця 1

Результати вимірювання коефіцієнту тертя і температури

Зміцнення зразків		Коефіцієнт тертя / температура, °С	
Ведучого	Веденого		
Цементация		Через 24000 циклів	Через 96000 циклів
№6С*	№10С загальм.		
Азотування		Через 24000 циклів	Через 96000 циклів
№5А	№1А загальм.		
Цементация		Через 24000 циклів	Через 96000 циклів
№8С	№2С загальм.		
Азотування		Через 24000 циклів	Через 96000 циклів
№2А	№10А загальм.		
Цементация		Через 24000 циклів	Через 96000 циклів
№4С	№5С загальм.		
Азотування		Через 24000 циклів	Через 96000 циклів
№11А	№4А загальм.		

* Позначення номерів зразків, які в подальшому використовувалися для металофізичних досліджень.

Таблиця 2

Результати визначення вагового зносу зразків

Зміцнення зразків	Ваговий знос зразків, гр		Сумарний знос, гр
	Ведучих (нижніх)	Ведених (верхніх)	
Цементация/ Цементация	6С - 0,1816	10С -	0,2868
	8С - 0,1690	0,1052	0,2853
	4С - 0,2004	2С - 0,1163 5С - 0,1105	0,3109
Всього/середнє за 3 зразка	0,551/ 0,1837	0,332/ 0,1107	0,883/ 0,2943
Азотування / Азотування	5А - 0,0164	1А - 0,0104	0,0268
	2А - 0,0185	10А -	
	4А - 0,0163	0,0132 11А - 0,0122	
Всього/середнє за 3 зразка	0,0512/ 0,0171	0,0358 / 0,0119	0,087/ 0,029

Ці дослідження дали підґрунтя для проведення повноцінних довготривалих випробувань на порівняльну оцінку показників утомної міцності зразків, моделюючих роботу високонавантажени агрегати АТ при зміцненні їх поверхневого шару цементациєю та сучасним методом іонно-плазмового азотування АВІНІТ N (АТ "ФЕД") [13]. Такі випробування необхідні для впровадження іонно-плазмового методу для зміцнення реальних агрегатів АТ. Їх результати на базі 1 млн. циклів (кочення з 20%-им проковзуванням з контактним навантаженням $\sigma_{\max}=1400$ МПа, характерним для середньо- та високонавантажених агрегатів) показали, що інтегральна багатоциклова стійкість до утомного зношування (руйнування) зразків, зміцнених азотуванням (іонно-плазмовим азотуванням АВІНІТ N з глибиною шару 0,25 мм), в 10 разів вище, ніж у зразків, зміцнених цементациєю (з глибиною шару 1,2 мм) [13].

Після порівняння контактної утомної міцності при проведенні довготривалих випробувань, фахівцями і на обладнанні АТ "Мотор Січ" (м. Запоріжжя, Україна) було виконано комплексні мікроструктурні та фазові дослідження особливостей поверхневого шару пар зразків, зміцнених цементуванням, та зміцнених іонно-плазмовим азотуванням [14]. Дослідження зовнішнього вигляду обкатаної поверхні, мікроструктурний стан матеріалу, а також мікротвердість за перетином зміцненого шару визначали на кожному зразку у чотирьох зонах. Проведені поглиблені фрактографічні, мікроструктурні і фазові дослідження особливостей поверхневого шару сталевих зразків, зміцнених традиційною цементациєю та новим іонно-плазмовим азотуванням "АВІНІТ N", виявили причини значної переваги іонно-плазмового азотування перед цементуванням за показником утомної міцності. Це дає цілком обґрунтовану

основу для впровадження такої перспективної технології зміцнення для збільшення зносостійкості високонавантажених деталей агрегатів авіаційної та іншої техніки, які працюють в умовах тертя кочення з проковзуванням [14].

Всі ці дослідження [8], [13]-[14] були сплановані таким чином, щоб визначити переваги методу іонно-плазмового азотування для подовження ресурсу таких агрегатів АТ, як редуктори вертольотів, коробки приводів і т.д., тобто ТС, які складаються з зубчастих шестерень, які змащуються маслом, і які зазнають в експлуатації багатоциклове утомне зношування. Тому що воно є найбільш важливим і одночасно важкоконтрольованим видом пошкодження таких ТС [2], [15].

Але є інші види ТС в АТ, які потребують уваги. Утомний механізм пошкоджуваності поверхневого шару характеризується наявністю двох фаз: прихованого (латентного) періоду, протягом якого видиме руйнування матеріалу відсутнє при поступовому накопиченні дефектів, і фази швидкого руйнування, коли при досягненні певної концентрації мікропошкодження «утомлений» матеріал диспергується у вигляді частинок зносу [17]-[18]. Але утомний знос матеріалів може мати малоцикловий (при пластичних деформаціях) і багатоцикловий (при пружних деформаціях) характер [2]. Саме умови роботи ТС (величина діючих навантажень) визначають, за яким механізмом відбувається основна частина зношування – малоциклове чи багатоциклове. За високих навантажень такої поділ можна зробити тільки умовно. Це було враховано авторами у подальших експериментальних дослідженнях на порівняльну оцінку параметрів зносостійкості досліджуваних ТС саме від малоциклового зносу [16].

Висока вартість виготовлення та ремонту агрегатів авіаційної паливної автоматики (аксіально-поршневих насосів), а також їх невеликий ресурс, обумовлюють загальну високу ціну цієї галузі авіаційної промисловості. У зв'язку з цим у сучасному авіаційному агрегатобудуванні проводяться роботи по створенню насосів-регуляторів паливної автоматики шестеренного типу, які є дешевшими у виготовленні і ремонті та менш вимогливі до якості палива. Тому авторами було продовжено дослідження можливості застосування іонно-плазмового азотування і для таких ТС, тобто, на малоциклову утомну міцність [16].

Висновки

Попередні експерименти на контактну утому при великих навантаженнях ($\sigma_{\max} \approx 1400$ Мпа), (багатоциклове утомне зношування) показали багатократну перевагу методу зміцнення "АВІНІТ N" перед цементациєю за параметром сумарного вагового зносу (біля 10 разів) [13]. Однак, при даних умовах випробувань неможливо відізнити знос малоциклової утоми (який відбувається за механізмом утворення та руйнування на поверхнях тертя вторинних структур)

від багатоциклової утоми (при якому дефекти накопичуються у великих об'ємах поверхневого шару). Тому цілком актуальним було завдання проведення таких експериментальних випробувань для оцінки параметрів зносостійкості саме від малоциклової утоми. Для цього величина питомого навантаження в зоні контакту в експериментальних дослідженнях була знижена (у порівнянні з експериментами, проведеними у попередніх випадках [8], [13]) до $\sigma_{\max} \approx 500$ МПа (за формулою Герца) і змашування здійснювалося авіаційним гасом ТС-1. Решта умов та параметрів випробувань відповідали випробуванням на зносостійкість за механізмом багатоциклової утомної міцності [13].

Триботехнічні характеристики оцінювались за показниками вагового зносу, коефіцієнта тертя і середньоповерхневої температури випробуваних зразків. Відсутність початкових пошкоджень утомного характеру оцінювались за показниками АЕ [9]-[12], [19]-[21]. Встановлено, що перехід від нормального зношування до початкових пошкоджень утомного характеру супроводжується сигналами акустичної емісії, енергоємність яких вище від першопочаткового рівня в 5...10 разів [16].

Аналіз результатів визначення коефіцієнтів тертя свідчить про те, що коефіцієнти тертя зразків, зміцнених за технологією "AVINIT N" суттєво, приблизно на 30% менші, ніж коефіцієнти тертя, одержані при випробуваннях зразків зміцнених цементациєю [16].

Таким чином, проведений авторами комплекс експериментальних досліджень перспективної технології підвищення контактної утомної міцності методом іонно-плазмового азотування "AVINIT N" при моделюванні трибоспрямих авіаційної техніки показав її значну перевагу перед традиційним зміцненням цементациєю та може бути використаним для збільшення ресурсу авіаційної техніки.

Список використаних джерел

1. Федоров С. В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма. В кн.: *Известия КГТУ*. Калининград, 2007. № 11. С. 22–31.
2. Ибатуллин И. Д. Диагностика ресурсных характеристик элементов машин. *Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки*. №15. Самара: СамГТУ, 2002. С. 123–130.
3. Матвишин, П. В. Влияние режимов ионного азотирования на износостойкость стали X12 в коррозионно-абразивной брете. Научные труды Винницкого национального технического университета, вып. 3, ноябрь 2015. <https://trudy.vntu.edu.ua/index.php/trudy/article/view/1>.
4. Бенгина Т. А. Оптимизация технологического процесса газового азотирования: Дис. канд. техн. наук.- Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. -155с.
5. Поболь И. Ионное азотирование: твердость, выносливость, стойкость. *Наука и инновации*. №8(14). 2012. С. 18-20.
6. Сагалович О. В., Сагалович В. В. Спосіб іонно-плазмового прецизійного азотування поверхонь сталей та сплавів Avinit N. Pat. UA № 84664 від 25.10.13.

7. Сагалович О. В., Сагалович В. В. Спосіб іонно-плазмового прецизійного азотування поверхонь сталей та сплавів Avinit N. Pat. UA № 107408 від 28.12.14.

8. Стадниченко В. М., Джус Р. М., Плешкунов С. А. Методика прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів Системи озброєння і військова техніка. 2019. № 2(58). – С. 122-131. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.58.15>.

9. S. F. Filonenko, V. N. Stadnichenko and O.N. Troshin, "Research of influence of thermal resistance of elements of tribosystem on wearproofness of friction units," *Proceeding of the fourth world congress "Aviation in the XXI-st century"*, "Safety in aviation and space technology", 2010. Vol. 1, pp. 12.1–12.4.

10. Запорожец В. В., Стадниченко В. Н. Идентификация наноизносных режимов трения с использованием метода акустической эмиссии. *Технологические системы*, 2012. № 4. С. 42–56.

11. Трошин О. Н., Стадниченко Н. Г., Джус Р. Н., Гурин О.А. Информативное содержание метода акустической эмиссии для безразборной диагностики узлов авиационной техники. *Наука і техніка Повітряних Сил*. 2013. № 2 (11). С. 80–83.

12. Стадниченко В. Н., Трошин О. Н., Стадниченко Н.Г., Приймак А.В., Просьяник И. И. Классификация видов наноизноса по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме. *Збірник наукових праць ХВПС*. 2011. № 1 (27). С. 51–61.

13. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Попов В. В., Плешкунов С.А., Семенов Я.І. Порівняльна оцінка технологічних методів цементациї та іонно-плазмового азотування при їх використанні для зміцнення високонавантажених вузлів авіаційної техніки *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2020. № 2(39). С. 54-61. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.39.06>.

14. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Стадниченко В. М., Плешкунов С. А., Мікроструктурні та фазові особливості поверхневого шару, зміцненого іонно-плазмовим азотуванням, як фактор підвищення втомної міцності // *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2020. № 1(63). С. 89-95. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.63.12>.

15. Xie, Y. and Williams, J.A. The Generation of Worn Surfaces By the Repeated Interaction of Parallel Grooves, *Wear*, 1993, pp. 864-872

16. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Плешкунов С. А., Градиський Ю.О. Порівняльний аналіз параметрів зносостійкості зразків, зміцнених цементуванням та іонно-плазмовим азотуванням, працюючих в умовах багатоциклового зношування *Проблеми тертя та зношування*, 2020, №3 (88). С. 87-98, DOI: 10.18372/0370-2197.3(88).14922.

17. Громаковский Д. Г. Система понятий и структура моделей изнашивания. Трение и износ. 1997. Том 18. №1. С. 53-62.

18. Gromakovsky D. G., Kovshov A. G., Ibatullin I. D., Dynnikov A. V. Problems of Kinetics of Surface Destruction. *Proceedings of VII-th International Symposium "INTERTRIBO 2002", section B. Wear*, Slovak Republic, Stara Lesna, House of Technology, 2002, p. 57-58.

19. Zaporozhets V. V., Stadnichenko V. M. Automated Systems for Tribodiagnostics of Contact Interactions. *Journal of Friction and Wear*. 2015. Vol. 36. № 3. P. 241–248.

20. Wang Zh., Wu X., Liu X., Cao Y., Xie J. Research on feature extraction algorithm of rolling bearing fatigue evolution stage based on acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 113. 2018. P. 271 284.

21. Sause M., Hamstad M. Acoustic Emission Analysis. *Comprehensive Composite Materials II*. Vol. 7. 2018. P. 291-326.