

УДК 621.891

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.231595

## Підвищення зносостійкості важконавантажених деталей трибомеханічних систем методом комбінованого лазерно-хіміко-термічного оброблення

М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, О. В. Тісов, Є. В. Корбут, А. О. Юрчук,  
В. В. Харченко, Н. О. Науменко

Виконано аналіз стану трибологічного забезпечення в авіаційній галузі. Встановлено пріоритетність використання технологій поверхневого зміцнення для підвищення ресурсу деталей вузлів тертя. Проведено огляд сучасних комбінованих технологій азотування і лазерної обробки поверхонь сталей. Визначено механізм пошкодження сталі 30X2HВФА кульково-гвинтового підіймального механізму закрилків транспортного літака, що розвивається внаслідок недостатньої поверхневої твердості матеріалу після загально-прийнятої термічної обробки. Оже-спектральним аналізом встановлено високу концентрацію кисню на поверхні: до 41,4 % ат. Виявлено науглецювання поверхні тертя, особливо значне на поверхні пітингового пошкодження. Запропоновано комплексну технологію поверхневого зміцнення азотування+лазерне дискретне гартування. Потужність випромінювання складала 1 КВт, діаметр плями фокусування – 2,5 мм і крок між центрами плям фокусування 2,5 мм. Загальна площа обробки лазером складала 70 %. Температура сталі перевищувала  $A_{c3}$  і відповідала діапазону температур гартування. Глибина азотованого шару зростає до 400 мкм, максимальна твердість на поверхні 1350–1380 HV<sub>0,2</sub>. Спостерігається утворення суцільного азотованого шару товщиною 200–250 мкм, і перехідної зони, що складена з нітридів заліза стовпчастої форми, які проваджуються в матричний матеріал. Унаслідок цього зникає різкий градієнт механічних властивостей. Випробуваннями підтверджено, що зносостійкість комплексно обробленої поверхні в 2,1 рази вища в умовах сухого тертя, і в 4,5 рази – в умовах мащення консистентним мастилом «Ера» (РФ) при порівнянні з азотованою за загальноприйнятою технологією сталлю 30X2HВФА. Крім того, відсутнє крихке руйнування поверхні, значно знижується взаємодія з киснем

Ключові слова: трибомеханічні системи, вузли тертя, азотована сталь, дискретна лазерна обробка, зносостійкість

### 1. Вступ

В умовах зростання робочих навантажень та вимог до економічної ефективності машин, підвищення їх надійності і довговічності набувають виключно важливого значення. У вирішенні цього завдання одне із ключових місць належить забезпеченню високого рівня контактної міцності і зносостійкості деталей. Сучасні машини і транспортні засоби складаються з великої кількості важконавантажених вузлів тертя. Більшість з них виходить з ладу з причини зношування і викришування контактних поверхонь. Все це виносить поліпшення

трибологічного забезпечення таких вузлів у ряд першочергових завдань матеріалознавства і інженерії поверхні.

Прикладом таких механізмів є кульково-гвинтові підйомники механізмів закрилків та шасі транспортних літаків. Великі польотні і наземні навантаження вимагають високої міцності і пружності матеріалу та високої контактної міцності поверхні. Внаслідок дії вібраційних навантажень спостерігається локальне викришування зміцненого шару, особливо в так званих місцях “паркування” закрилків у прибраному положенні.

На сьогодні існує велика кількість різноманітних методів поверхневого зміцнення, які добре працюють в “середньостатистичних” умовах. Однак, з ряду причин вони не можуть ефективно працювати в умовах локалізованих (точкових і лінійних) контактів. Одні, наприклад, плазмові покриття, мають низьку адгезію, “класичне” азотування – різкий градієнт механічних властивостей, поверхневе гартування не забезпечує необхідної твердості тощо [1, 2]. Наразі широкого розвитку набули комплексні технології інженерії поверхні, коли 2–3 методи зміцнення виконуються послідовно [3–6]. Це дозволяє знівелювати недоліки і взаємопідсилити переваги кожного з методів. Так, плазмове напилення з наступною лазерною обробкою дозволяє знизити крихкість покриття, підвищити адгезію і загартувати матеріал основи, що створює плавний градієнт механічних властивостей [7].

Створення нових високоефективних методів поверхневого зміцнення сприятиме підвищенню конкурентоспроможності продукції машинобудування. Крім того, за рахунок зростання ресурсу поверхонь тертя, зменшаться витрати на технічне обслуговування та ремонт. В цьому плані особливо актуальними є дослідження спрямовані на подальше підвищення контактної міцності і зносостійкості деталей трибомеханічних систем авіаційної техніки [8].

Комплексні методи поверхневого зміцнення ґрунтуються на послідовному або одночасному використанні двох або більшої кількості технологічних методів технологічного впливу на матеріал. Доволі інтенсивно розвиваються методи, які поєднують лазерну обробку з термодифузійним насиченням, електроіскровим легуванням, плазмовим напиленням тощо. Застосування комплексних методів дає можливість створювати поверхневі шари з необхідними механічними властивостями і значно підвищити контактну міцність і зносостійкість деталей вузлів тертя [9–18]. Тому актуальними є дослідження, присвячені визначенню ефективності підвищення зносостійкості важконавантажених деталей трибомеханічних систем методом комбінованого лазерно-хіміко-термічного оброблення.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Методи інженерії поверхні здатні вирішити широке коло завдань. Однак застосування одного окремо взятого методу не завжди дає бажаний результат. Крім того, кожен з них має свої недоліки, з якими потрібно боротися. Нові перспективи відкриваються за використання двох чи більше методів одночасно, так звані комбіновані, чи комплексні технології. У цьому випадку, один метод

зміцнення є основним, другий – допоміжним, який зменшує недоліки першого, і підсилює ефект зміцнення.

У випадку із кульково-гвинтовим механізмом, де реалізовано складна форма контакту, методи нанесення покриттів на поверхню сталі буде неефективним, оскільки надзвичайно високі тиски між доріжкою і кулькою неодмінно призведуть до їх відшарування. Тому, на перший план виходять дифузійні методи зміцнювального оброблення. Однак і вони мають недолік – мала товщина і високий градієнт твердості між зміцненим і необробленим матеріалами. Для зменшення цього ефекту використовують різні прийоми, наприклад – розрізнену концентрацію насичувального елемента. Це збільшує товщину зміцненого поверхневого шару, але зменшує поверхневу твердість.

Для сталей, найбільше зміцнення, твердість і зносостійкість досягається шляхом азотування. Огляд досліджень [19–28] засвідчує високу ефективність комплексної технології азотування+лазерна обробка. Це дозволяє уникнути недоліків «класичного» азотування, загартувати матеріал під азотованим шаром і збільшити товщину дифузійного шару.

Лазерна пульсуюча обробка поверхні сталі під час азотування в газовому середовищі проводилася авторами [19]. Така комбінована обробка може забезпечити до чотирикратного зростання твердості на 200–400 %. Збільшення концентрації вуглецю в сталі негативно впливає на її здатність розчиняти азот і формувати зміцнювальні хімічні сполуки; також зменшується і глибина проникнення азоту в матеріал. Головними зміцнювальними фазами було визначено нітриди і карбонітриди заліза. З аналогічною метою використовувався діодний лазер: для зміцнення сталі AISI P21(США) [20]. Відмічається зростання поверхневої твердості на 40 % порівняно з необробленим матеріалом, що значно менше порівняно з попередньою роботою [19]. Зміцнювальний ефект досягнуто утворенням нітридів алюмінію, який є в складі даної сталі. Автори [21] досліджували процес лазерного азотування з використанням лазерів з різною довжиною хвилі. Ними встановлено, що довжина хвилі не впливає на процес зміцнення сталі, як і на корозійну стійкість (досліджувалися різні середовища) після обробки. Збільшення інтенсивності лазерного випромінювання з 1,5 до 3  $\text{J}/\text{cm}^2$  призводить до зростання кількості аустеніту. За подальшого збільшення інтенсивності випромінювання кількість аустеніту зменшується. Також, досліджувалося лазерне азотування в середовищі амонію [22]. Відмічається загальна товщина покриття до 150 мкм і присутність дендритів нітриду заліза. Порівняно із звичайним азотуванням, спостерігається зростання твердості на 14 %, а зносостійкості – вдвічі. Заміна азоту іншими газами теж має значний ефект [23]. Так, аргон є інертним, і слабо впливає на додаткову твердість: ефект зміцнення досягається власне гартуванням поверхні. Використання пропану забезпечує твердість до 914 HV, порівняно із 395 HV що досягається після лазерного гартування на повітрі. Така надвисока твердість пояснюється розпадом пропану і дифузією вуглецю в сталь. Однак автори не проводили дослідження вмісту водню в поверхні. Очевидно, що його вміст теж високий, сталь вірогідно окрихчена і така технологія не може бути використана для важконавантажених деталей. Цікава технологія обробки азотованої поверхні представлена в [4]. Об-

роблення фемтосекундним лазером дозволяє отримати наноструктуровану поверхню за рахунок випаровування частини матеріалу. Утворюється структура, схожа на наноіндентовану поверхню. Однак для досягнення такого результату потрібно до 500 циклів у одній точці, і був він отриманий лише для однієї марки сталі – AISI 304 (США). Однак частим недоліком методу лазерного азотування є і так висока температура процесу азотування. Разом з високоенергетичним випромінювання це може призводити не тільки до локального перегріву, але і до оплавлення, перегартування поверхні і утворення сітки поверхневих тріщин [22].

Азотування сталі в режимі обробки лазером з оплавленням поверхні досліджено в роботі [24]. Переплавлення дозволяє отримати ефект поверхневого гартування і подрібнення структури, концентрація азоту – 0,6 %. Однак значний градієнт твердості створює ризик викришування оброблених лазером ділянок. Нанесення методом лазерного наплавлення азотованих порошків маловуглецевої сталі AISI 316L (США) досліджено авторами [25]. Концентрація азоту в покритті – 0,58 %, що є хорошим результатом. Його вміст можна регулювати, змішуючи азотований порошок з неазотованим. Однак, зростання вмісту азоту в порошках призводить до високої пористості покриття, що не підходить для наших умов. Обробка лазером з оплавленням після азотування в плазмовому середовищі [26] свідчить про можливість отримання зміцнювального ефекту за рахунок подрібнення мікроструктури шляхом надшвидкого охолодження розплаву [27]. Товщина модифікованого шару сягає 250 мкм, що є прийнятним показником. Однак азотована ділянка без оплавлення має вищу міцність. Таким чином, в оплавленій зоні відбувається змішування матеріалу основи з азотованим шаром, що знижує твердість обробленої лазером поверхні. Такий результат є неприйнятним. Отже, і технології обробки лазером з оплавленням для важконавантажених деталей теж не можна застосувати.

Цікавою альтернативою, яка і показала ефективність, є дискретна точкова обробка азотованої сталі лазером після азотування.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є встановлення закономірностей зміни властивостей функціональних поверхонь важко навантажених деталей трибомеханічних систем, виготовлених зі сталі 30Х2НВФА, зміцнених за комбінованим методом: термодифузійне азотування з наступним дискретним лазерним обробленням.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- виконати аналіз експлуатаційних пошкоджень деталей кульково-гвинтових механізмів та установити причини їхнього виникнення;
- за умов, наближених до реальної роботи трибопари кульково-гвинтових механізмів, виконати триботехнічні дослідження з визначення зносостійкості зразків сталі 30ХГСН2А азотованої за стандартної технології та обробленої комбінованим методом, що включає азотування з наступним дискретним лазерним обробленням в режимі гартування.

#### 4. Аналіз пошкоджень деталей кульково-гвинтового механізму

У конструкціях сучасних повітряних суден одним із найбільш навантажених і відповідальних вузлів є кульково-гвинтові пари підіймальних механізмів випуску і прибирання закрилків. Контактна взаємодія робочих поверхонь елементів такої трибопари здійснюється в умовах тертя кочення проміжних тіл-кульок по жолобу гвинта і жолобу гайки. Конструктивно подібними і подібними до них за умовами фрикційно-контактної взаємодії є кульково-гвинтові механізми (КГМ) під'ємників стійок шасі. У нормальних режимах експлуатації за умов виключення контактних і теплових перевантажень, порушення устанавленого режиму мащення, деталі вузлів тертя кочення піддаються нормальному механоокиснювальному зношуванню. Це забезпечує їм досить високу зносостійкість і довговічність. Разом з тим, на робочих поверхнях деталей таких вузлів можуть виникати недопустимі з огляду обмеження їх довговічності дефекти, зокрема такі, як пошкодження від контактної втоми та фретинг-корозії.

Так, при дослідженні гвинта КГМ піднімача передньої опори шасі одного із літаків на гвинтовій поверхні жолоба виявлено численні пошкодження у вигляді тріщин, відшарування фрагментів металу, руйнувань, типу «пітинг» (рис. 1). В поперечному перерізі пітингових пошкоджень металографічно виявляються тріщини, які розвиваються як в глибину основного металу, так і в напрямку до поверхні (рис. 2). Форма і розміри пітингових пошкоджень відповідає класичним уявленням руйнування металів від контактної втоми.

Причиною розвитку втомного руйнування в умовах тертя кочення є циклічні нормальні та зсувні напруження, що виникають при перекочуванні з прокозванням тіла кочення по спряженій поверхні. Додатково на цей процес впливають також залишкові напруження 1-го роду, що утворюються в результаті пластичного деформування приповерхневих шарів металу [28]. В якості матеріалу для виготовлення гвинтів КГМ піднімача опори шасі застосовується сталь 30ХГСН2А, яка після термічного оброблення «гартування+відпуск» на мартенсит повинна мати твердість не нижчу за 45...48 HRC. Низьку зносостійкість від контактної втоми робочої поверхні гвинта за таких умов можна пояснити недостатньо високою поверхневою міцністю матеріалу поверхневого шару.

На рис. 3, 4 і в табл. 1 представлено результати дослідження з концентраційного розподілу хімічних елементів на робочій поверхні жолоба гвинта отримані методом Оже-спектроскопії. Дослідження проводились на непошкодженій поверхні, поблизу краю та на дні раковини пітингового пошкодження та на різній глибині від поверхні.

Аналіз отриманих результатів показує збагачення поверхневого шару киснем і вуглецем. Концентрація кисню на поверхні поблизу краю раковини складає 27,1 ат. %, на глибині 250 нм і 800 нм відповідно 41,4 ат. % і 29,2 ат. %, а на поверхні в середній частині раковини і на глибинах 250 нм і 800 нм від поверхні відповідно 7,9 %, 18,3 ат. % і 24,0 ат. %.

Це свідчить про інтенсивну взаємодію металу з киснем, що може бути результатом розвитку пластичної деформації поверхневих шарів та дії підвищених температур в зоні контакту. Максимальний вміст вуглецю спостерігається в

раковині пітингового пошкодження. Форма лінії спектру вуглецю і його концентрація свідчать про наявність в раковині графітізованої плівки.

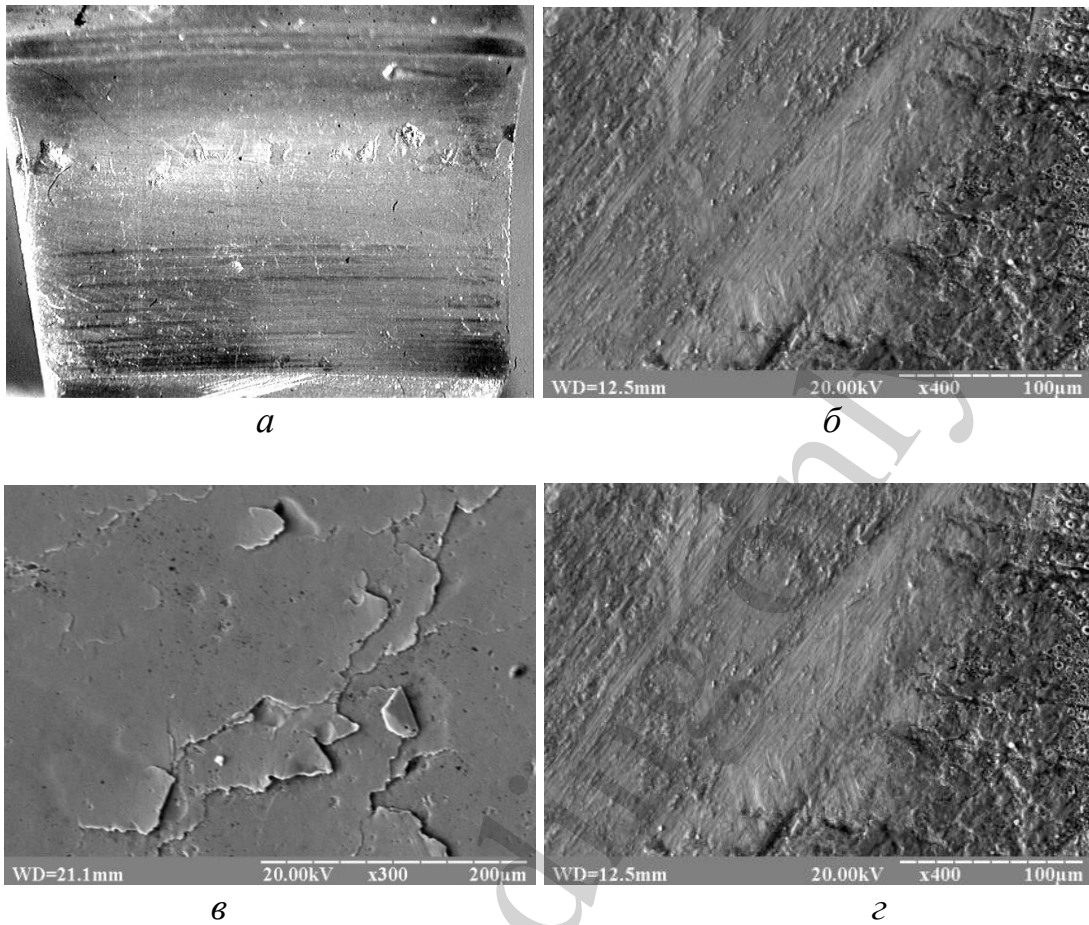


Рис. 1. Пошкоджена поверхня гвинта кульково-гвинтового механізму підняття-випуску закрилків: *a*, *б* – зовнішній вигляд ( $\times 8$ ); *в*, *г* – мікрофотографії пошкоджених ділянок

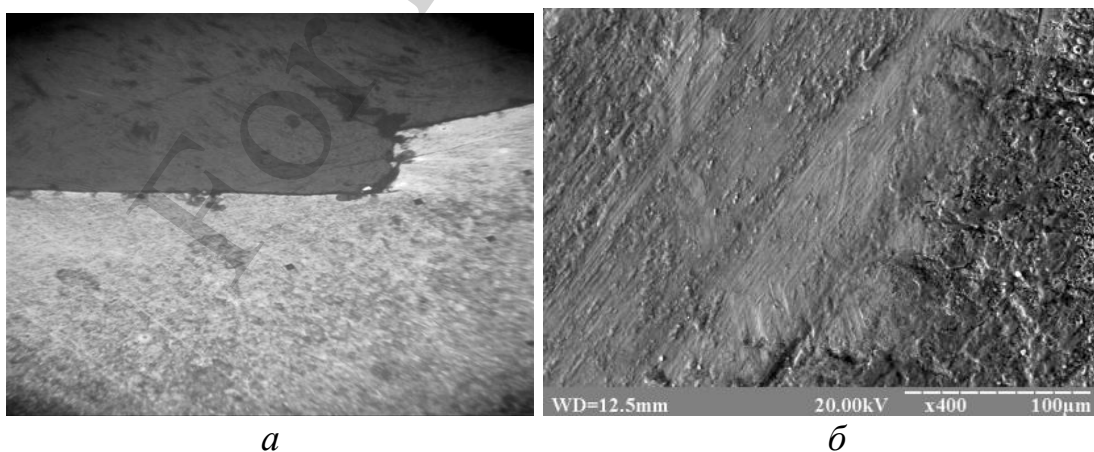
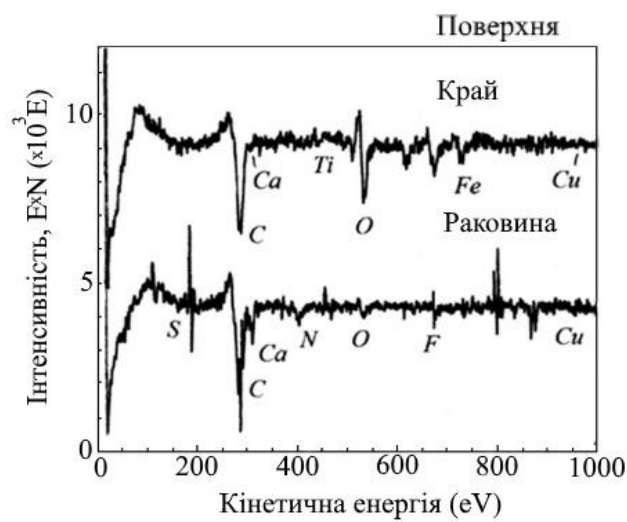
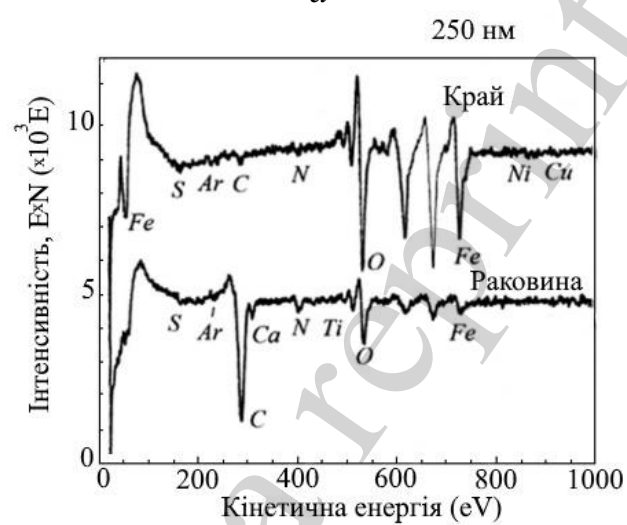


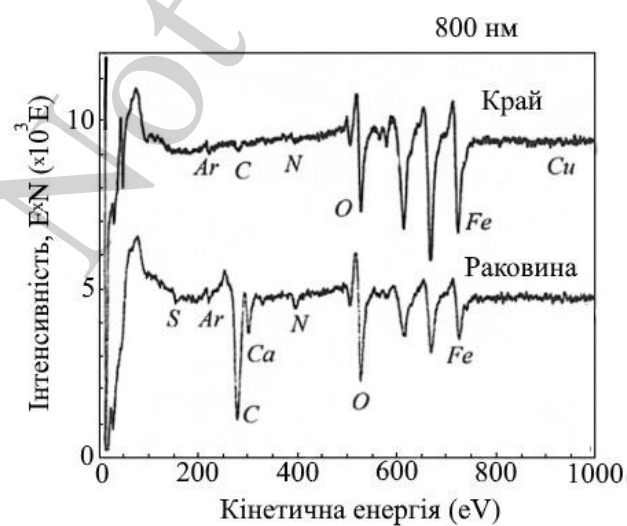
Рис. 2. Мікроструктура матеріалу в поперечному перерізі під раковиною пітингового пошкодження робочої поверхні гвинта: *a* –  $\times 100$ ; *б* –  $\times 400$



*a*



*б*



*в*

Рис. 3. Оже-спектри розподілу елементів на робочій поверхні жолоба гвинта:  
*a* – на поверхні; *б* – на глибині 250 нм; *в* – на глибині 800 нм

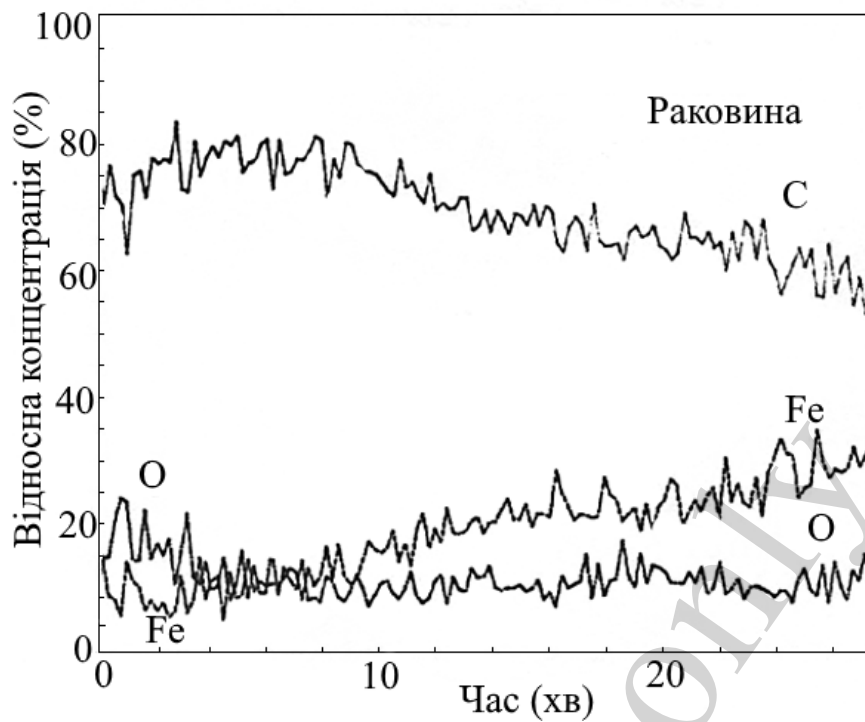


Рис.4. Оже-спектри розподілу елементів від поверхні в глиб матеріалу на дні раковини і тингового пошкодження гвинта.

Таблиця 1  
Елементарний склад мікроділянок робочої поверхні гвинта

Глибина, Нм	Концентрація елементів, ат. %									
	Fe	Ni	Cu	Ti	Ca	C	N	O	S	F
Непошкоджена поверхня										
0	18,8	0,7	—	—	0,9	48,1	2,5	29,0	—	—
Поверхня поблизу раковини (край)										
0	13,1	—	1,9	3,9	0,6	53,4	—	27,1	—	—
250	51,7	1,4	0,9	—	—	2,3	1,7	41,4	0,6	—
800	66,4	—	0,8	—	—	2,1	1,5	29,2	—	—
Поверхня на дні раковини (точка 1)										
0	—	—	—	—	3,3	55,4	10,4	6,0	—	24,9
Поверхня на дні раковини (точка 2)										
0	—	—	1,9	—	1,6	75,2	6,8	7,9	1,9	4,7
250	8,8	—	—	1,2	1,0	64,3	5,6	18,3	0,8	—
800	23,5	—	—	—	2,4	45,3	3,0	24,6	1,2	—

Навуглецювання в процесі тертя з утворенням в зонах контакту графітисованих поверхневих плівок раніш виявлялось [29, 30]. Найбільш вірогідним джерелом постачання вуглецю для взаємодії з металом в даному випадку є вуглець, що може утворюватися в результаті трибомеханічної та термічної деструкції мастильного матеріалу. На користь цього припущення свідчить той факт,



що в зоні аналізу на дні раковини пітингового пошкодження поряд із підвищеним вмістом вуглецю виявляється одночасно фосфор і сірка.

Необхідно зазначити, що під шаром графітізованої плівки знаходяться оксиди заліза. Процес окиснення заліза супроводжується суттєвим збільшенням об'єму матеріалу[31]. Утворення оксидних фаз буде створювати додаткову розклинювальну дію на стінки утомної тріщини і цим самим сприяти пришвидшенню зношування за механізмом контактної втоми.

При обстеженні робочих поверхонь гвинта і гайки КГМ випуску-вбирання закрилків літака, що мав 10 тис. годин льотної експлуатації, виявлено пошкодження у вигляді язв, відбитків кульок, викришування металу, які було ідентифіковано як фретинг-корозія [32–36].

Пара «гвинт-гайка» виготовляється із сталі 30X2НВФА, термооброблюються на міцність  $\sigma_B = 1000\text{--}1200\text{МПа}$  та для забезпечення зносостійкості азотуються на глибину до 0,2 мкм. Місця розташування пошкоджень відповідають польотному положенню закрилків і проміжному положенню у яке закрилки встановлюються на стоянках під час виконання регламентних робіт. Очевидно, що в таких положеннях закрилків виникають найбільш сприятливі умови для контактної взаємодії спряжених поверхонь в режимі фретингу. Максимальна глибина виробки на таких ділянках досягає 0,7 мм, що суттєво перевищує глибину азотованого шару. Можна очікувати, що при довгостроковій дії вібраційних навантажень аналогічні за характером пошкодження можуть також утворюватися на робочих поверхнях деталей інших КГМ, зокрема КГМ опор шасі.

Отже, результати аналізу свідчать, що рівень поверхневої міцності і зносостійкості робочих поверхонь гвинтів КГМ, який досягається як зміцнювальним термічним обробленням, так і азотуванням недостатній. Очевидно, що і в першому і в другому випадках для підвищення зносостійкості робочих поверхонь гвинтів КГМ поряд із високою твердістю необхідно збільшувати опір матеріалу поверхневого шару корозійно-втомному руйнуванню. Азотовані шари на сталях, в цьому плані, із-за відносно малої товщини і підвищеної крихкості, в умовах високих контактних навантажень, не здатні забезпечити надійний захист поверхні деталі.

## **5. Результати дослідження зносостійкості комплексно обробленої сталі 30X2НВФА в умовах фретингу**

Одним із найбільш відповідних шляхів вирішення зазначеної проблеми є створення поверхневого робочого шару з макроретерогенною структурою дискретного типу. У такій структурі в певній закономірності чергуються зміцнені ділянки, здатні нести підвищені контактні навантаження, та не зміцнені ділянки з підвищеною релаксаційною здатністю[32–34]. Технологічно сформувати такий шар можна у спосіб, який включає попереднє азотування з наступною дискретною лазерною обробкою в режимі поверхневого гартування або комбінованих методів хіміко-термічної обробки [37–41].

На рис. 5а результатами випробувань на зношування в умовах фретингу представлено діаграму інтенсивності зношування зразків сталі 30X2НВФА з

суцільним азотованим шаром і азотованим шаром, підданим дискретній лазерній обробці.

Лазерну дискретну обробку здійснювали за точковою схемою [42] при наступних режимах: потужність випромінювання 1кВт, діаметр ділянки фокусування променю – 2,5 мм, крок зміщення центру ділянки фокусування променю у ряду і між рядами – 2,5 мм. За такого режиму температура нагріву поверхнього шару перевищувала температуру  $A_{c3}$  для сталі, але не досягала температури плавлення. Співвідношення площі, підданої дії лазерного випромінювання, до загальної площі зразка за прийнятої схеми і геометричних параметрів обробки складало 70 %.

Випробування на зношування проводилось за схемою контакту площина-куля в умовах, наближених до реальних умов роботи КГМ. Для цього використовувався спеціально розроблений утримувач, в якому жорстко кріпляться три кулі діаметром 6 мм, виконані із сталі ШХ-15. Утримувач із кулями виконує роль контрзразка, який приводиться у контакт з торцевою поверхнею зразка, утворюючи при цьому три точковий контакт. Умови випробування зазначені на рис. 5. Оскільки зносостійкість сталі після обробки азотування + лазерна обробка виявилася досить високою, для цього випадку було вирішено збільшити базу випробувань до мільйона циклів. Для порівняння результатів визначали інтенсивність зношування за загальновідомою формулою:

$$J = \frac{h}{2AN},$$

де  $J$  – інтенсивність зношування, безрозмірна величина;  $h$  – середнє лінійне зношування, мкм;  $A$  – амплітуда переміщення під час фретингу (переміщення зразка за один цикл дорівнює подвійній амплітуді);  $N$  – кількість циклів фретингу).

Результати випробувань свідчать, що як в умовах тертя без мастильного матеріалу, так і з мащенням консистентним мастилом Ера, зразки, оброблені за способом дискретної лазерної обробки азотованої поверхні, характеризуються помітно більшою зносостійкістю порівняно із азотуванням за стандартною технологією. Так, в умовах сухого тертя сталь 30Х2НВФА має в 2,1 рази вищу зносостійкість, а в умовах мащення консистентним мастилом Ера – в 4,5 рази.

На рис. 6 представлено топографію зразків азотованої сталі 30Х2НВФА (а) і сталі обробленої за схемою азотування + дискретна ЛО (б) після випробувань на фретинг без мащення. На зразках зміцнених азотуванням в зоні фретингу спостерігаються сколи і ознаки інтенсивного окислення з утворенням оксидних структур з характерним для оксидів заліза червоно-коричневим кольором. На поверхні зразків, підданої комбінованому зміцненню, сколи в зоні фретингу не спостерігаються.

Металографічним аналізом встановлено, що поверхнево зміцнений шар, який формується в результаті дискретної лазерної обробки попередньо азотованої сталі, складається із двох шарів (рис. 7). Зовнішній твердий нітридний шар від поверхні до глибини ~220 мкм із градієнтом мікротвердості від 1350 до 1180 HV<sub>0,2</sub>. Під ним знаходиться перший перехідний шарна глибині 220-420 мкм від

поверхні з градієнтом мікротвердості 1180-400 HV<sub>0,2</sub>. Другий перехідний шар розташований на глибинах 420-600 мкм з перепадом твердості від 400 до 360 HV<sub>0,2</sub> і має форму стовбчастих включень нітридної фази, втілених у відносно м'яку сталеву основу.

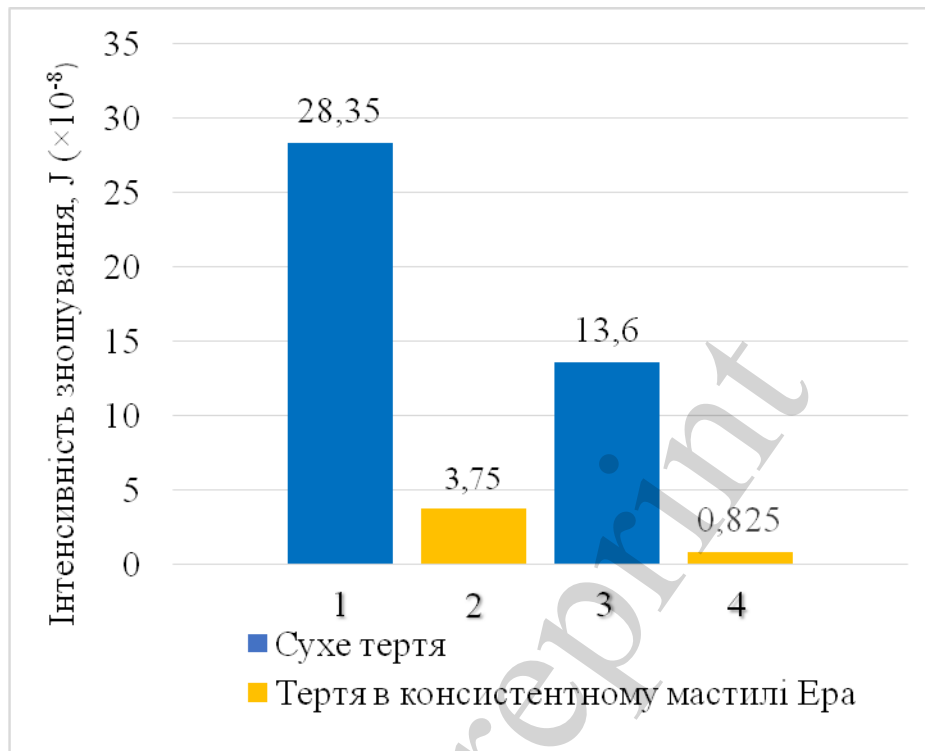


Рис. 5. Інтенсивність зношування в умовах фретингу. 1; 2 – сталь 30Х2НВФА + азотування; 3; 4 – сталь 30Х2НВФА+ азотування + дискретна лазерна обробка. Умови навантаження:  $A=200$  мкм;  $P_n=980$  Н;  $v=30$  Гц. База випробувань: 1, 2, 3 –  $N=3 \times 10^5$  циклів, 4 –  $N=1 \times 10^7$  циклів

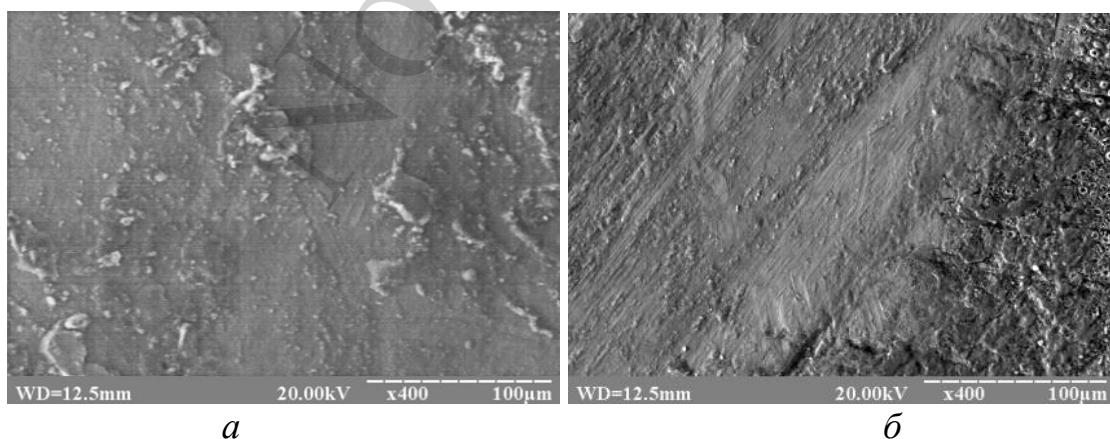


Рис. 6. Топографія поверхні зразків після випробування на зношування в умовах фретинг-корозії за схемою контакту площина-куля: *а* – сталь 30Х2НВФА азотування; *б* – сталь 2ХНВФА азотована + дискретна ЛО. Умови випробувань:  $A=200$ ;  $P_n=980$ Н;  $V=30$ Гц. База випробування  $N=3 \cdot 10^5$  цикл

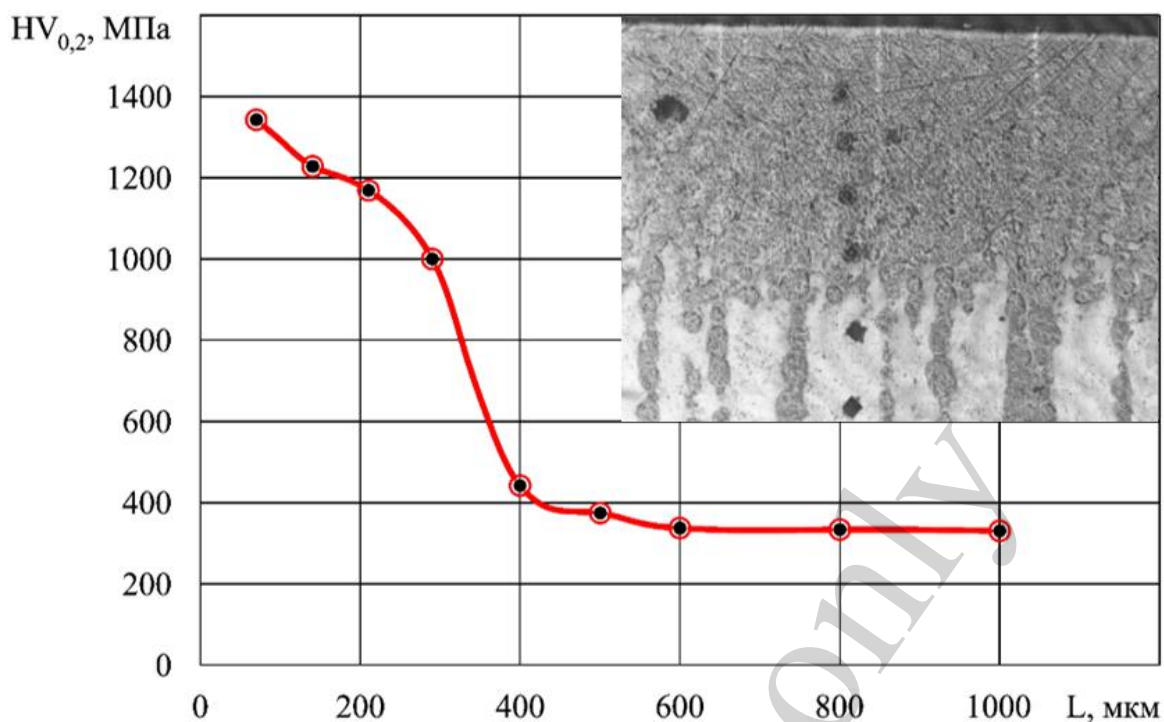


Рис. 7. Мікроструктура та розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі 30X2HВФА після комбінованої обробки азотування + імпульсна лазерна обробка

#### **6. Обговорення результатів дослідження підвищення зносостійкості важконавантажених деталей трибomeханічних систем методом комбінованого лазерно-хіміко-термічного оброблення**

Як свідчать результати проведеного аналізу, пошкодження робочих поверхонь таких важко навантажених деталей, як гвинти КГМ випуску і вбирання закритків та КГМ підіймачів стійок шасі літаків, пов'язано з розвитком процесів контактної втоми і фретинг-корозії. За умовами фрикційно-контактної взаємодії елементів трибосистеми такі види поверхневого руйнування є близькими. Рівень поверхневої міцності і зносостійкості робочих поверхонь гвинтів, що досягається передбаченими на сьогодні в технології їх виготовлення як зміцненням термічним обробленням, так і термодифузійним азотуванням, недостатній. Так, навіть азотування в умовах високих контактних навантажень не забезпечує надійний захист поверхні сталі 30X2HВФА від зношування. Найбільш вірогідною причиною цього є мала товщина зміцненого шару, підвищена крихкість адгезійного шару, високий градієнт механічних властивостей вглиб від поверхні.

Було виявлено можливість уникнення недоліків «класичного» азотування та суттєвого підвищення зносостійкості сталевих деталей застосуванням комплексної технології азотування + дискретне точкове лазерне оброблення. Як видно з рис. 5, при терті без мастильного матеріалу і з мащенням консистентним мастилом Ера, зразки сталі 30X2HВФА піддані азотуванню та дискретному лазерному обробленню в режимі гартування характеризуються відповідно в 2,1 і в 4,5 рази більшою зносостійкістю порівняно з азотуванням за стандартною технологією.

Комбіновані технології з використанням високоенергетичного лазерного випромінювання дали змогу в останні роки створити нові ефективні методи оброблення поверхні. Такі методи за рахунок зміни будови і структурно-напруженого стану поверхневих шарів здатні суттєво змінювати їх властивості.

Згідно даних, наведених в праці [35], імпульсна лазерна обробка, як і інші високоенергетичні імпульсно-деформаційні методи поверхневої обробки металів, призводить до різкого розмноження дислокацій, пришвидшення дифузійних процесів в поверхневих шарах, перерозподілу атомів легувальних елементів і домішок в матриці, подрібненню структури матеріалу. При цьому відбувається підвищення твердості поверхневого шару, ударної в'язкості, корозійної стійкості, зносостійкості. Крім того, за прийнятих технологічних режимів лазерної обробки попередньо азотованої поверхні сталі, як встановлено виконаними вище дослідженнями, утворюється специфічна двошарова структура покриття (рис. 7). Верхній твердий нітридний шар забезпечує підвищений опір зношуванню. Гетерогенна дискретна структура нижнього шару складається із твердих стовбчастих включень нітридної фази і пластичних ділянок матеріалу матриці. Така структура буде сприяти перерозподілу і релаксації напружень від дії контактних навантажень, уповільнювати розвиток процесів тріщиноутворення, підвищенню несучої здатності поверхні [33, 34]. Очевидно, що подібні структури поверхнево-зміцненого шару порівняно із структурою отриманою звичайним азотуванням здатні забезпечити більш високу контактну міцність і зносостійкість в умовах високих локальних контактних навантажень.

У праці [43] механічно-імпульсна обробка дозволяє покращити трибологічні властивості сталі 30X2HВФА лише на 15%. Також пропонується заміна сталі 30X2HВФА на ВИС-170 (РФ) для виготовлення підйомника. Однак навіть у цьому випадку зносостійкість пари вдвічі перевищує зносостійкість матеріалу, який використовується сьогодні. На відміну від роботи [32], де по результатах досліджень зносостійкості гвинтового підйомника літака Ан-124 зі сталі 30X2HВФА було рекомендовано лише вчасно відновлювати мастильний шар, запропонована в даному дослідженні технологія поверхневої обробки дозволяє отримати кращі результати без заміни матеріалу (2,1 рази для сухого фретингу і 4,5 рази при змащуванні мастилом Ера).

Отже, розроблена і досліджена комбінована технологія підвищення зносостійкості перевершує відомі аналоги і не вимагає заміни матеріалу. Оскільки реальна пара тертя є контактом двох криволінійних поверхонь (куля в сферичному жолобі), а не куля-площина, як в даному дослідженні, то площа контакту при тому ж навантаженні буде більшою, а контактні напруження і інтенсивність зношування – меншими.

## 7. Висновки

1. Встановлено, що технологічні процеси зміцнення гвинтів термічним обробленням і термодифузійним азотуванням за стандартними технологіями не забезпечують достатньо високий рівень їх поверхневої міцності і зносостійкості в умовах високих локальних контактних навантажень.

2. Експериментально доведено, що ефективним способом підвищення контактної-втомної міцності і опору зношування при фретинг-корозії азотованих шарів на сталі є наступна їх дискретна лазерна обробка в режимі поверхневого гартування. Після такого комбінованого оброблення зносостійкість сталі зростає в 2,1 рази при терті без мащення і в 4,5 рази при терті з мащенням консистентним мастилом Ера по відношенню до азотування за стандартною технологією.

### Література

1. Tobała, D., Kania, B. (2018). Phase composition and stress state in the surface layers of burnished and gas nitrided Sverker 21 and Vanadis 6 tool steels. *Surface and Coatings Technology*, 353, 105–115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.055>
2. Dixit, T., Singh, I., Prasad, K. E. (2019). Room and high temperature dry sliding wear behavior of Boron modified as-cast Ti-6Al-4V alloys against hardened steel. *Wear*, 420-421, 207–214. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.10.021>
3. Fryska, S., Słowik, J., Baranowska, J. (2019). Structure and mechanical properties of chromium nitride/S-phase composite coatings deposited on 304 stainless steel. *Thin Solid Films*, 676, 144–150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.01.046>
4. Yasumaru, N., Sentoku, E., Miyazaki, K., Kiuchi, J. (2013). Femtosecond-laser-induced nanostructure formed on nitrided stainless steel. *Applied Surface Science*, 264, 611–615. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.076>
5. Kovacı, H., Seçer, Y. (2020). Improved tribological performance of AISI 316L stainless steel by a combined surface treatment: Surface texturing by selective laser melting and plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 400, 126178. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126178>
6. Pohrelyuk, I. M., Kindrachuk, M. V., Lavryst', S. M. (2016). Wear Resistance of VT22 Titanium Alloy After Nitriding Combined with Heat Treatment. *Materials Science*, 52 (1), 56–61. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9926-0>
7. Kindrachuk, M., Shevchenko, A., Kryzhanovskiy, A. (2016). Improvement of the quality of TiC-Co system plasma coating by laser treatment. *Aviation*, 20 (4), 155–159. doi: <https://doi.org/10.3846/16487788.2016.1227551>
8. Marchuk, V., Kindrachuk, M., Tisov, O., Kornienko, A., Radko, O., Kharchenko, V. (2019). Stress-strained state of textured surfaces with selectively indented regions. *Functional Materials*, 26 (4), 773–778. doi: <https://doi.org/10.15407/fm26.04.773>
9. Panashenko, V. M., Podchernyaeva, I. A., Dukhota, A. I., Panasyuk, A. D. (2012). Structural and phase transformations on spark-laser coatings under fretting corrosion in air. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 51 (1-2), 112–120. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-012-9405-6>
10. Fedirko, V. M., Pohrelyuk, I. M., Luk'yanenko, O. H., Lavryst', S. M., Kindrachuk, M. V., Dukhota, O. I. et. al. (2018). Thermodiffusion Saturation of the Surface of VT22 Titanium Alloy from a Controlled Oxygen–Nitrogen-Containing Atmosphere in the Stage of Aging. *Materials Science*, 53 (5), 691–701. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0125-z>

11. Pashechko, M. I., Shyrovkov, V. V., Duryahina, Z. A., Vasylyv, Kh. B. (2003). Structure and corrosion-mechanical properties of the surface layers of steels after laser alloying. *Materials Science*, 39, 108–117. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1026134714719>
12. Holubets, V. M., Pashechko, M. I., Dzedzic, K., Borc, J., Tisov, A. V. (2020). Frictional Strength of Electric Spark Coatings from Powder Wires under Friction without Lubrication. *Journal of Friction and Wear*, 41 (5), 443–446. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366620050128>
13. Dykha, A., Marchenko, D., Artyukh, V., Zubiekhina-Khariat, O., Kurepin, V. (2018). Study and development of the technology for hardening rope blocks by reeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (92)), 22–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126196>
14. Gorokh, G. G., Pashechko, M. I., Borc, J. T., Lozovenko, A. A., Kashko, I. A., Latos, A. I. (2018). Matrix coatings based on anodic alumina with carbon nanostructures in the pores. *Applied Surface Science*, 433, 829–835. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.117>
15. Pashechko, M. I., Dzedzic, K., Mendyk, E., Jozwik, J. (2017). Chemical and Phase Composition of the Friction Surfaces Fe–Mn–C–B–Si–Ni–Cr Hardfacing Coatings. *Journal of Tribology*, 140 (2). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4037953>
16. Ляшенко, Б. А., Соловых, Е. К., Мирненко, В. И., Рутковский, А. В., Черновол, М. И.; Харченко, В. В. (Ред.) (2010). Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости. К., 193.
17. Sorokatyi, R., Chernets, M., Dykha, A., Mikosyanchuk, O. (2019). Phenomenological Model of Accumulation of Fatigue Tribological Damage in the Surface Layer of Materials. *Mechanisms and Machine Science*, 3761–3769. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9\\_371](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_371)
18. Hryhorenko, G. M., Adeeva, L. I., Tunik, A. Yu., Karpets, M. V., Korzhyk, V. N., Kindrachuk, M. V., Tisov, O. V. (2020). Formation of Microstructure of Plasma-Arc Coatings Obtained Using Powder Wires with Steel Skin and B<sub>4</sub>C+(Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>+Al Filler. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 42 (9), 1265–1282. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.09.1265>
19. Schaaf, P., Illgner, C., Landry, F., Lieb, K.-P. (1998). Correlation of the microhardness with the nitrogen profiles and the phase composition in the surface of laser-nitrided steel. *Surface and Coatings Technology*, 100-101, 404–407. doi: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(97\)00658-0](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(97)00658-0)
20. Sim, A., Park, C., Kang, N., Kim, Y., Chun, E.-J. (2019). Effect of laser-assisted nitriding with a high-power diode laser on surface hardening of aluminum-containing martensitic steel. *Optics & Laser Technology*, 116, 305–314. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.040>
21. Copola, C. J., Avram, I., Terzzoli, M. C., Duhalde, S., Morales, C., Pérez, T. et. al. (2002). Influence of laser parameters on the nitriding of low carbon steel. *Applied Surface Science*, 197-198, 896–903. doi: [https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(02\)00452-x](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(02)00452-x)

22. Wu, G., Wang, R., Yang, J., Chen, X., Cao, S., Guo, W. et. al. (2011). Study of laser nitriding on the GCR15 steel surface. *Physics Procedia*, 18, 285–290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.096>
23. Maharjan, N., Zhou, W., Wu, N. (2020). Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125399. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125399>
24. Fastow, M., Bamberger, M. (1988). Laser nitriding of AISI 4340 steel. *Scripta Metallurgica*, 22(2), 183–186. doi: [https://doi.org/10.1016/s0036-9748\(88\)80330-2](https://doi.org/10.1016/s0036-9748(88)80330-2)
25. Boes, J., Röttger, A., Becker, L., Theisen, W. (2019). Processing of gas-nitrided AISI 316L steel powder by laser powder bed fusion – Microstructure and properties. *Additive Manufacturing*, 30, 100836. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100836>
26. Karamis, M. B., Yilbas, B. S. (1991). Laser melting of plasma-nitrided steel samples. *Surface and Coatings Technology*, 45 (1-3), 399–402. doi: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(91\)90248-u](https://doi.org/10.1016/0257-8972(91)90248-u)
27. Szymkiewicz, K., Morgiel, J., Maj, Ł., Pomorska, M., Tarnowski, M., Tkachuk, O. et. al. (2020). Effect of nitriding conditions of Ti6Al7Nb on microstructure of TiN surface layer. *Journal of Alloys and Compounds*, 845, 156320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156320>
28. Костецкий, Б. И. (1970). Трение, смазка и износ в машинах. К.: Техника, 396.
29. Chattopadhyay, A., Kumar, K. C. H., Sarma, V. S., Murty, B. S., Bhattacharjee, D. (2010). Prediction of carbon segregation on the surface of continuously annealed hot-rolled LCAK steel. *Surface and Coatings Technology*, 205 (7), 2051–2054. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.098>
30. Mishchuk, O. A., Telemko, O. V., Dziuba, V. I., Koval, L. I., Pekhnyo, V. I. (2014). Influence of sulfur free bis-helate of molybdenum on creation of friction steel surface gradient structure. *Problems of Friction and Wear*, 4 (65), 4–18. doi: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(65\).8612](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(65).8612)
31. Бенар, Ж. (1967). Окисление металлов. Т. 1. Теоретические основы. М.: Металлургия, 503.
32. Kralya, V. O., Molyar, O. H., Trofimov, V. A., Khimko, A. M. (2010). Defects of steel units of the high-lift devices of aircraft wings caused by fretting corrosion. *Materials Science*, 46 (1), 108–114. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-010-9270-8>
33. Kindrachuk, M. V., Dushek, Y. Y., Luchka, M. V., Gladchenko, A. N. (1995). Evolution of the structure and properties of eutectic coatings during friction. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 34 (5-6), 321–326. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00560139>
34. Kindrachuk, M. V., Dushek, Y. Y., Luchka, M. V. (1995). Local nature of the stress-strain state of a composite material subjected to frictional forces. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 33 (9-10), 496–500. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00559536>



35. Jiang, M., Liu, C., Chen, Z., Wang, P., Liao, H., Zhao, D. et. al. (2021). Enhanced strength-ductility synergy of selective laser melted reduced activation ferritic/martensitic steel via heterogeneous microstructure modification. *Materials Science and Engineering: A*, 801, 140424. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140424>
36. Hassanin, A. E., Troiano, M., Scherillo, F., Silvestri, A. T., Contaldi, V., Solimene, R. et. al. (2020). Rotation-assisted Abrasive Fluidised Bed Machining of AlSi10Mg parts made through Selective Laser Melting Technology. *Procedia Manufacturing*, 47, 1043–1049. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.113>
37. Dukhota, O. I., Pohrelyuk, I. M., Molyar, O. H., Pichuhin, A. T., Luk'yanenko, O. H. (2012). Effect of Low-Temperature Oxidation and Oxynitriding on the Fretting Corrosion of VT22 Titanium Alloy. *Materials Science*, 48 (2), 213–218. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9494-x>
38. Pohrelyuk, I. M., Padgurskas, J., Tkachuk, O. V., Luk'yanenko, A. G., Trush, V. S., Lavrys, S. M. (2020). Influence of Oxynitriding on Antifriction Properties of Ti–6Al–4V Titanium Alloy. *Journal of Friction and Wear*, 41 (4), 333–337. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366620040108>
39. Pohrelyuk, I. M., Tkachuk, O. V., Proskurnyak, R. V., Boiko, N. M., Kluchivska, O. Y., Stoika, R. S., Ozga, P. (2020). Cytocompatibility Evaluation of Ti-6Al-4V Alloy After Gas Oxynitriding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29 (12), 7785–7792. doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05265-z>
40. Takesue, S., Kikuchi, S., Misaka, Y., Morita, T., Komotori, J. (2020). Rapid nitriding mechanism of titanium alloy by gas blow induction heating. *Surface and Coatings Technology*, 399, 126160. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126160>
41. Burdovitsin, V. A., Golosov, D. A., Oks, E. M., Tyunkov, A. V., Yushkov, Y. G., Zolotukhin, D. B., Zavadsky, S. M. (2019). Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum. *Surface and Coatings Technology*, 358, 726–731. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.081>
42. Кіндрачук, В. М., Кіндрачук, М. В., Корбут, Є. В., Духота, О. І., Тісов, О. В., Шевченко, О. Л., Головка, Л. Ф. (2009). Пат. № 45549 UA. Спосіб дискретної обробки азотованих сталевих виробів. № u200906959; заявл. 03.07.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21. URL: <https://uapatents.com/3-45549-sposib-diskretno-obrobki-azotovanikh-stalevikh-virobiv.html>
43. Khimko, A., Kralya, V., Yakobchuk, A., Kostuchik, V., Sidorenko, A. (2011). Units wearability of aircraft wing lift devices. *Problems of Friction and Wear*, 55, 112–117. doi: <https://doi.org/10.18372/0370-2197.55.3249>