

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(95).16556

М. В. КІНДРАЧУК¹, О. І. ДУХОТА¹, В. В. ХАРЧЕНКО¹, Н. М. СТЕБЕЛЕЦЬКА²,
А. Л. ГЛОВИН²

¹Національний авіаційний університет, Україна

²ВП НУБіП України “Бережанський агротехнічний інститут”

КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

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 інтенсивність взаємодії матеріалу з киснем – його концентрація сягає 41,4 % ат. Виявлено навуглюювання поверхні тертя, особливо значне на поверхні пітингового пошкодження, глибина якого сягає 0,7 мм. 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_{0,2}. 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. Вдосконалено метод дослідження фретингу в умовах кульового контакту (куля-площина). Випробуваннями підтверджено, що зносостійкість комплексно обробленої поверхні на 25 % вища в умовах сухого тертя, і вдвічі – в умовах мащення консистентним мастилом «Ера» при порівнянні з азотованою за загальноприйнятою технологією сталлю 30X2HВФА. Крім того, відсутнє крихке руйнування поверхні, значно знижується взаємодія з киснем.

Ключові слова: азотована сталь, комплексна обробка, лазерна обробка, підвищення зносостійкості

Вступ. За загальної тенденції до зростання робочих навантажень та вимог до економічної ефективності використання машин, питання підвищення їх надійності і довговічності набувають виключно важливого значення. У вирішенні цієї фундаментальної загальнотехнічної проблеми одне із ключових місць належить забезпеченню високого рівня контактної міцності і зносостійкості деталей трибомеханічних систем. Велика кількість в конструкції машин і механізмів важконавантажених вузлів і з'єднань, деталі яких піддаються фрикційно-контактному руйнуванню та зношуванню, висувають проблему трибологічного забезпечення їх надійності в ряд першочергових завдань. Разом з цим, як свідчать результати аналізу, існуючі на сьогодні в практиці машинобудуванні технологічні методи поверхневого зміцнення деталей в багатьох випадках не задовольняють все більш зростаючим вимогам до усього комплексу експлуатаційних властивостей елементів трибомеханічних систем. Усе це, а також складність прогнозування процесів зношування потребує розробки та впровадження більш ефективних технологій інженерії поверхні. Створення нових високоефективних методів інженерії поверхні і матеріалів триботехнічного призначення та подальше їх практичне застосування

для підвищення довговічності деталей трибомеханічних систем буде сприяти підвищенню конкурентоспроможності продукції машинобудування, зменшенню витрат матеріальних і трудових ресурсів на їх виробництво, технічне обслуговування та ремонт. В цьому плані особливо актуальними є дослідження спрямовані на подальше підвищення контактної міцності і зносостійкості деталей трибомеханічних систем авіаційної техніки [1].

В останній час у розвитку технологій поверхневого зміцнення деталей найбільш прогресивним напрямом, що дозволяє різко підвищити експлуатаційні властивості поверхонь тертя, є розроблення і застосування багатоопераційних, так названих, дуплексних методів. Ці методи ґрунтуються на послідовному або одночасному використанні для створення зносостійких поверхневих шарів двох або більшої кількості технологічних методів. Серед дуплексних технологій трибологічного спрямування найбільш інтенсивно розвиваються методи електроконтактного термомеханічного зміцнення, які поєднують оброблення лазерним випромінюванням з наступним термодифузійним насиченням поверхні деталі різними елементами, електроіскрове легування з подальшим лазерним оплавленням чи термодифузійним насиченням, оброблення концентрованими потоками енергії нанесених на поверхню деталей термодифузійних, електролітичних та газотермічних покриттів. Застосування комбінованих методів дає можливість створювати поверхневі шари з самим різним фізико-механічними властивостями і багаторазового підвищити контактну міцність і зносостійкість деталей [2-11].

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 потібно боротися. Нові перспективи відкриваються за використання двох чи більше методів одночасно, так звані комбіновані, чи комплексні технології. У цьому випадку, одим 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 покриття. Однак, і вони мають недолік – мала товщина і високий градієнт твердості між зміцненим і необробленим матеріалами. Для зменшення цього ефекту використовують різні прийоми, наприклад – розріджену концентрацію насичувального елемента. Це збільшує товщину покриття, але зменшує поверхневу твердість.

Для сталей, найбільше зміцнення, твердість і зносостійкість досягається шляхом азотування. Огляд досліджень [12-21] 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 [12]. 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 [13]. Відмічається зростання поверхневої твердості на 40 % порівняно з необробленим матеріалом, що значно менше порівняно з попередньою роботою [12]. Зміцнювальний ефект досягнуто утворенням нітридів алюмінію, який є в складі даної сталі. Автори [14] 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 J/cm² призводить до зростання кількості аустеніту. За подальшого збільшення інтенсивності випромінювання кількість аустеніту зменшується. Також, досліджувалося лазерне азотування в середовищі амонію [15]. 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 [16]. Так, аргон є інертним, і слабо впливає на додаткову твердість: ефект зміцнення досягається власне гартуванням поверхні, тоді як 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 підйомних гвинтових механізмів. Цікава технологія обробки азотованої поверхні представлена в [17]. Оброблення 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 type 304. 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 оплавлення; перегартування поверхні і утворення сітки поверхневих тріщин [15].

Азотування сталі в режимі обробки лазером з оплавленням поверхні досліджено в роботі [18]. 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 досліджено авторами [19]. 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 [20] свідчить про можливість отримання зміцнювального ефекту за рахунок подрібнення мікроструктури шляхом надшвидкого охолодження розплаву [21]. 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 точки. Такий результат є неприйнятним. Отже, і технології обробки лазером з оплавленням для гвинтових підйомних механізмів теж не можна застосувати.

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

Мета та задачі дослідження. Мета роботи – на прикладі кульково-гвинтової пари кульково-гвинтових механізмів літаків виконати аналіз причин виникнення експлуатаційних пошкоджень деталей у важконавантаженому фрекційному контакті та дослідити ефективність підвищення їх контактної міцності і зносостійкості комплексним методом оброблення функціональних поверхонь, що поєднує термодифузійне азотування з наступною дискретною лазерною обробкою.

Результати дослідження та їх аналіз. У конструкціях сучасних повітряних суден одним із найбільш навантажених і відповідальних вузлів є кульково-гвинтові пари підймальних 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. Як відомо, у нормальних режимах експлуатації за умов виключення контактних і теплових переважень, порушення встановленого режиму мащення, потрапляння в зону тертя абразиву, вологи та деяких інших негативних факторів впливу, 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». В поперечному перерізі пітингових пошкоджень металографічно виявляються тріщини, які розвиваються як в глибину основного металу, так і в напрямку до поверхні. Форма і розміри пітингових пошкоджень відповідає класичним уявленням руйнування металів від контактної втоми.

Основною причиною розвитку втомного руйнування в умовах тертя кочення є циклічні напруження розтягу-стиску та зсувні напруження, що виникають при багаторазовому повторному перекочуванні з проковзуванням тіла кочення на спряженій поверхні, а також залишкові напруження 1-го роду, що утворюються в результаті пластичного деформування приповерхневих шарів металу [22]. 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 або високими контактними напруженнями, що могли виникнути в результаті перевищення розрахункових контактних навантажень.

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.

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 графітізованих поверхневих плівок раніш виявлялось [23; 24]. 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. Враховуючи той факт, що процес окиснення заліза супроводжується суттєвим збільшенням об'єму матеріалу [25], 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 [26-28].

Пара «гвинт-гайка» виготовляється із сталі 30Х2НВФА, термооброблюються на міцність $\sigma_B = 1000 \dots 1200$ 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 дільницях 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.

Таким чином, результати поданого аналізу свідчать про те, що рівень поверхневої міцності і зносостійкості робочих поверхонь гвинтів КГМ, який досягається як зміцнювальним термічним обробленням, так і азотуванням недостатньо ефективний для запобігання втомно-контактному руйнуванню і зношуванню в умовах тертя кочення і фретинг-корозії. 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.

Одним із найбільш відповідних шляхів вирішення зазначеної проблеми є створення поверхневого робочого шару з макрогетерогенною структурою дискретного типу, у якому в певній закономірності чергуються зміцнені ділянки, здатні нести підвищені контактні навантаження, та не зміцнені ділянки з підвищеною релаксаційною здатністю [26]. Технологічно сформувати такий шар можна у спосіб, який включає попереднє азотування з наступною дискретною лазерною обробкою в режимі поверхневого гартування [29].

На рис. 5 за результатами випробувань на зношування в умовах фретинг-корозії представлено діаграму максимальної усередненої глибини зношування зразків сталі 30X2HВФА з суцільним азотованим шаром і азотованим шаром, підданим дискретній лазерній обробці.

Азотування проводилось згідно технологічним режимам, прийнятим для зазначеної марки сталі. Лазерну дискретну обробку здійснювали за точковою схемою при наступних режимах: потужність випромінювання 1кВт, діаметр ділянки фокусування променя – 2,5 мм, крок зміщення центру ділянки фокусування променя у ряду і між рядами – 2,5 мм. За такого режиму температура нагріву поверхневого 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. 1.

Результати випробувань показують, що як в умовах тертя без мастильного матеріалу та і з мащенням консистентним мастилом Ера зразки оброблені за способом дискретної лазерної обробки азотованої поверхні сталі, характеризуються помітно більшою зносостійкістю, порівняно із звичайним азотуванням за стандартною технологією.

На рис. 2 представлено оптичні (а; б) та електронні (в; г) знімки поверхні зразків сталі 30X2HВФА підданої азотуванню (а; в) і комбінованому поверхневому зміцненню азотування + дискретна ЛО після випробувань на фретинг-корозійне зношування 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, підданій комбінованому зміцненню, сколи в зоні фретингу не спостерігаються.

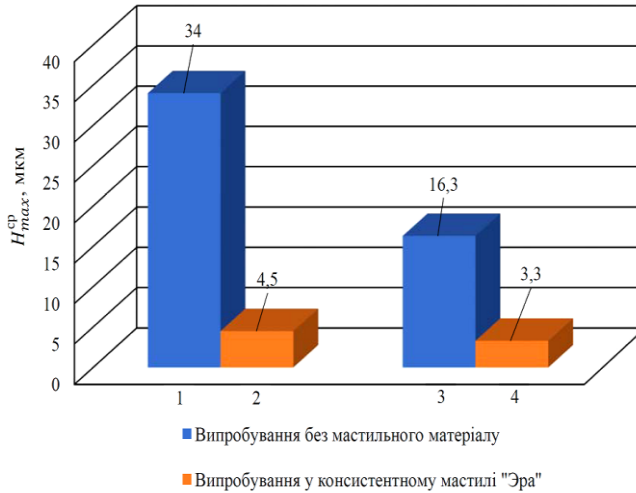


Рис. 1. Діаграма максимальної усередненої глибини зношування зразків у точковому контакті при випробуванні на зношування в умовах фретинг корозії. 1; 2 – сталь 30X2HВФА + азотування; 3; 4 – сталь 30X2HВФА+ азотування + дискретна лазерна обробка. Умови віброконтактного навантаження: $A = 200$ мкм; $P_H = 980$ Н; $\nu = 30$ Гц. База випробувань: 1, 2, 3 – $N = 3 \cdot 10^5$ циклів; 4 – $N = 1 \cdot 10^7$ циклів

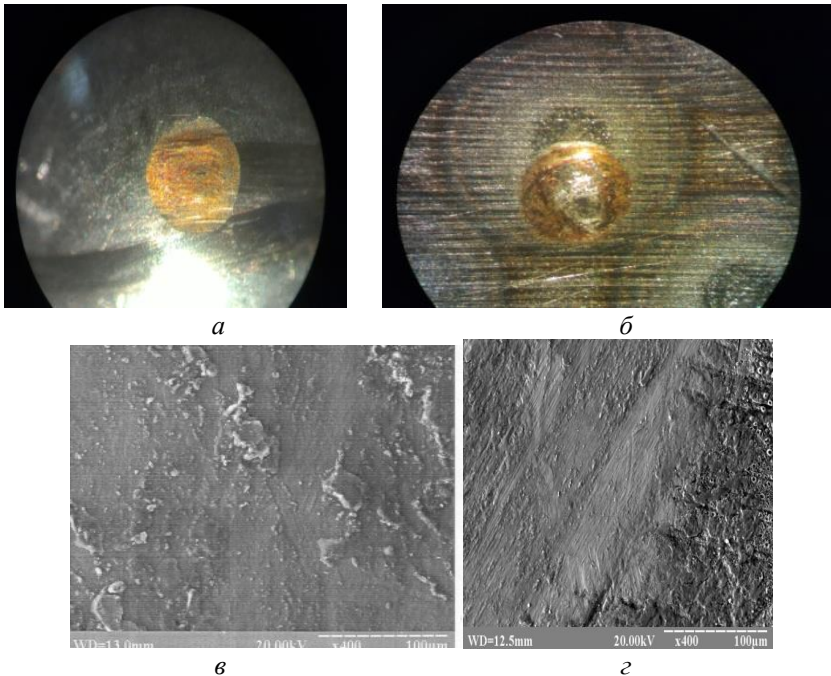


Рис. 2. Топографія поверхні зразків після випробування на зношування в умовах фретинг-корозії за схемою контакту площина-куля: а; в – сталь 30X2HВФА азотування; б; г-сталь 2ХНВФА азотована + дискретна ЛО. Умови випробувань: $A = 200$; $P_H=980$ Н; $V = 30$ Гц. База випробування $N=3 \cdot 10^5$ цикл; а; б – оптичне зображення ($\times 16$); в; г – електронномікроскопічне зображення

Металографічним аналізом встановлено, що поверхнево зміцнений шар, який формується в результаті дискретної лазерної обробки попередньо азотованої сталі, складається із двох шарів (рис. 3): зовнішнього твердого нітридного шару, товщиною 200...250мкм і нижнього комбінованого шару у складі стовбчастих включень нітридної фази, втілених у відносно м'яку сталеву основу. Очевидно, що така структура поверхнево зміцненого шару порівняно із структурою, отриманою звичайним азотуванням, здатна забезпечити більш високу зносостійкість в умовах високих локальних контактних навантажень.

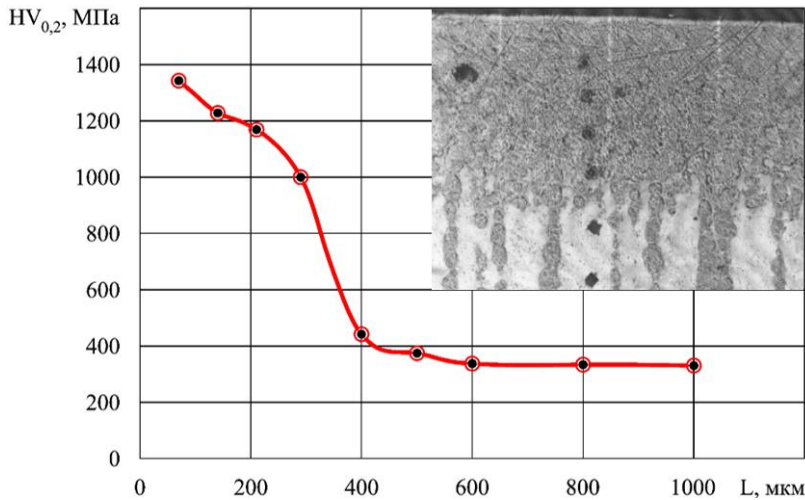


Рис. 3. Мікроструктура поверхневого шару (а) і розподіл мікротвердості (б) в поверхневому шарі сталі 30X2HBFА після комбінованої обробки азотування + імпульсна лазерна обробка

Висновки. Виконано аналіз причин виникнення пошкоджень робочих поверхонь гвинтів КГМ. Показано, 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. 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. За однакових умов віброконтактного навантаження зносостійкість азотованої сталі 30X2HBFА при терті без мащення зросла в 2 рази, а з мащенням консистентним мастилом «Ера» в 1,4 рази по відношенню до азотування за стандартною технологією.

Список літератури

1. M. Kindrachuk, A. Volchenko, D. Volchenko, O. Tisov, A. Kornienko, (2019) Stress-strained state of textured surfaces with selectively indented regions. *Funct. Mater*, 26, 3, 629-634.
2. V.M. Panashenko, I.A. Podchernyaeva, A.I. Dukhota, A.D.Panasyuk (2012) Structural and phase transformations on spark-laser coatings under fretting corrosion in air *Powder Metal. Metal Ceram.*, 51, 1-2, 112-120.
3. Fedirko, V.M., Pohrelyuk, I.M., Luk'yanenko, O.H., Lavrys', S.M., Kindrachuk, M.V., Dukhota, O.I., Tisov, O.V., Zahrebel'nyi, V.V. (2018) Thermodiffusion Saturation of the Surface of VT22 Titanium Alloy from a Controlled Oxygen–Nitrogen-Containing Atmosphere in the Stage of Aging. *Mater. Sci.*, 53, 5, 691-701.
4. Pashechko M.I., Shyrovkov V.V., Duryahina Z.A., Vasyliv Kh.B. (2003) Structure and

corrosion-mechanical properties of the surface layers of steels after laser alloying. *Mater. Sci.*, 39, 1, 108-117.

5. T. Cherepova, G. Dmitrieva, O. Tisov, O. Dukhota, M. Kindrachuk (2019). Research on the Properties of Co-TiC and Ni-TiC Hip-Sintered Alloys, *Acta Mechanica et Automatica*. 13, 1, 57-67.

6. Dykha, A., Marchenko, D., Artyukh, V., Zubiexhina-Khailiat, 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.

7. G.G. Gorokh, M.I. Pashechko, J.T. Borc, I.A. Kashko, A.I. Latos. (2018) Matrix coatings based on anodic alumina with carbon nanostructures in the pores. *Appl. Surf. Sci.*, 433, 829

8. M.I. Pashechko, K. Dziedzic, E. Mendyk, J. Jozwik, (2018) Chemical and Phase Composition of the Friction Surfaces Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr Hardfacing Coatings. *J. Tribol.*, -140, 2, 021302

9. Б.А.Ляшенко, Е.К.Соловых, В.И.Мирненко (2010) Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости. К.: Ин – т пробл. прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 193.

10. О.В. Диха, Р.В. Сорокатиий, С.Ф. Пасонський, М.О. Диха (2016) Дискретне зміщення та зносостійкість циліндричних трибосистем ковзання. Хмельницький.-ХНУ, 197.

11. G. M. Hryhorenko, L. I. Adeeva, A. Yu. Tunik, M. V. Karpets, V. N. Korzhyk, M. V. Kindrachuk, and O. V. Tisov (2020) Formation of Microstructure of Plasma-Arc Coatings Obtained Using Powder Wires with Steel Skin and B44C+(Cr,Fe)77C33+Al Filler, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, 9, 1265—1282 (in Ukrainian).

12. P. Schaaf, C. Illgner, F. Landry, K.-P. Lieb. (1998). Correlation of the microhardness with the nitrogen profiles and the phase composition in the surface of laser-nitrided steel *Surf. Coat. Tech.*, 100-101, 4044407

13. Sim, C. Park, N. Kang, Y. Kim, E-J. Chun, (2019), Effect of laser-assisted nitriding with a high-power diode laser on surface hardening of aluminum-containing martensitic steel, *Optics and Laser Technology*, 116, 305–314

14. C.J. Copola, I. Avram, M.C. Terzzoli, S. Duhalde, C. Morales, T. Pe´rez, F. Audebert, Ph. Delaporte, M. Sentis (2002) Influence of laser parameters on the nitriding of low carbon steel. *Appl. Surf. Sci.*, 197–198, 896–903

15. G. Wu, R. Wang, J. Yang, X. Chen, S. Cao S, W. Guo, K. Shang, B. Wei, X. Wang, L. Wang. (2011). Study of laser nitriding on the GCR15 steel surface. *Physics Procedia* 18, 285–290

16. N. Maharjan, W. Zhou, N. W. (2020). Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere. *Surf. Coat. Tech.*, 3856 125399.

17. N. Yasumaru, E. Sentoku, K. Miyazaki, J. Kiuchi (2013) Femtosecond-laser-induced nanostructure formed on nitrided stainless steel. *Appl. Surf. Sci.*, 264, 1 611-615

18. M. Fastow, M. Bamberger, (1988). Laser nitriding of AISI 4340 steel *Scripta Metallurgica*, 01, 22, 185-186.

19. J. Boes, A. Röttger, L. Becker, W. Theisen. (2019) Processing of gas-nitrided AISI 316L steel powder by laser powder bed fusion – Microstructure and properties. *Additive Manufacturing*, 30, 100836

20. M. B. Karamis and B. S. Yilbas. (1991). Laser melting of plasma-nitrided steel samples. *Surf. Coat. Tech.*, 45 399 402

21. M.V. Kindrachuk, Yu.Ya. Dushek, M.V. Luchka (1994). The local character of the stress-strained state of a composite loaded by friction forces. *Poroshkovaya Metallurgiya*, 9-10, 56-61.

22. Костецкий Б. И. (1970). Трение, смазка и износ в машинах. К.: Техніка, 394.

23. A. Chattopadhyay, K.C. Hari Kumar, V. Subramanya Sarma, B.S.Murty, D.Bhattacharjee. (2010) Prediction of carbon segregation on the surface of continuously annealed hot-rolled LCAK steel. *Surf. Coat. Tech.*, 205, 7, 2051-2054.

24. О. О. Міщук, О. В. Телемко, В. І. Дзюба Л. І. Коваль, В. І. Пехньо. (2014). Вплив вільних від сірки БІС-хелатів молібдену на утворення градієнтної структури сталевोї

поверхні тертя, Проблеми тертя та зношування, 4 (65), 4-18.

25. Ж. Бенар. (1968). Окисление металов. Т.1. Теоретические основы. Перевод с франц. М.: «Металлургия», 499.

26. V.O. Kralya, O.H. Molyar, V.A. Trofimov, A.M. Khimko (2010). Defects of steel units of the high-lift devices of aircraft wings caused by fretting corrosion, Mater. Sci., 46, 1, 108-114.

27. M. Jiang C. Liu, Z. Chen, P. Wang, H. Liao, D. Zhao, Z. Liu, X. Wang, M. Xu, C. Lao (2021) Enhanced strength-ductility synergy of selective laser melted reduced activation ferritic / martensitic steel via heterogeneous microstructure modification, Materials Science and Engineering: A, 801, 13, 140424

28. El Hassanin, M. Troiano, F. Scherillo, A. T. Silvestri, V. Contaldi, R. Solimene, F. Scala, A. Squillace, P. Salatino. (2020) Rotation-assisted Abrasive Fluidised Bed Machining of AlSi10Mg parts made through Selective Laser Melting Technology. Procedia Manufacturing, 47, 1043-1049

29. 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, Mater. Sci., 48, 2, 213-218.

Стаття надійшла до редакції 05.06.2022.

Кіндрачук Мирослав Васильович — член-кореспондент НАН України, докт. техн. наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел/факс: +38 044 406 77 73, E-mail: nau12@ukr.net.

Духота Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден Національно авіаційного університету, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел/факс: +38 044 406 77 73, E-mail: nau12@ukr.net.

Харченко Володимир Володимирович – молодший науковий співробітник, завідувач лабораторії кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, +38(044)4067773, E-mail: nau12@ukr.net.

Стебелецька Наталія Миронівна – канд. техн. наук, доцент кафедри загальної інженерної підготовки ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут» Тернопільська область, м. Бережани, вул. Академічна, 20, 47501, E-mail: kafedra.zd.bati@gmail.com.

Гловин Андрій Леонідович – старший викладач кафедри загальної інженерної підготовки, ВП НУБіПУ «Бережанський агротехнічний інститут», вул. Академічна, 20, м. Бережани, Україна, 47501, тел. 0974766893.

M. V. KINDRACHUK, O. I. DUKHOTA, V. V. KHARCHENKO, N. M. STEBELETSKA,
A. L. GLOVIN

COMBINED METHOD OF INCREASING WEAR RESISTANCE DETAILS OF TRIBOMECHANICAL SYSTEMS

The review of modern combined technologies of nitriding and laser treatment of steel surfaces is carried out. The mechanism of damage to the steel 30X2HBΦA ball-screw lifting mechanism of the flaps of the transport aircraft, which develops due to insufficient surface hardness of the material after the conventional heat treatment, is determined. Auger spectral analysis revealed a high intensity of interaction of the material with oxygen - its concentration reaches 41.4% at. Carburization of the friction surface, especially significant on the surface of the pitting damage, the depth of which reaches 0.7 mm, was revealed. A complex technology of surface hardening of nitriding + laser discrete hardening is offered. The radiation power was 1 kW, the diameter of the focus spot was 2.5 mm and the step between the centers of the focus spots was 2.5 mm. The total area of laser treatment was 70%. The steel temperature exceeded A_{c3} and corresponded to the tempering temperature range. The depth of the nitrided layer increases to 400 μm , the maximum surface hardness is 1350-1380 HV_{0.2}. The formation of a continuous nitrided layer with a thickness of 200-250 μm and a transition zone consisting of columnar iron nitrides, which are produced in the matrix material, are observed. As a result, the sharp gradient of mechanical properties disappears. The method of fretting research in the conditions of ball contact (ball-plane) is improved. Tests have confirmed that the wear resistance of the complex treated surface is 25% higher in dry friction, and twice - in the conditions of lubrication with grease "Era" in comparison with nitrided steel according to conventional technology 30X2HBΦA. In addition, there is no brittle destruction of the surface, significantly reduces the interaction with oxygen.

Keywords: nitrided steel, complex processing, laser processing, increase of wear-resistance

References

1. M. Kindrachuk, A. Volchenko, D. Volchenko, O. Tisov, A. Komienko, (2019) Stress-strained state of textured surfaces with selectively indented regions. *Funct. Mater.*, 26, 3, 629-634
2. V.M. Panashenko, I.A. Podchernyaeva, A.I. Dukhota, A.D. Panasyuk (2012) Structural and phase transformations on spark-laser coatings under fretting corrosion in air *Powder Metal. Metal Ceram.*, 51, 1-2, 112-120
3. Fedirko, V.M., Pohrelyuk, I.M., Luk'yanenko, O.H., Lavrys', S.M., Kindrachuk, M.V., Dukhota, O.I., Tisov, O.V., Zahrebel'nyi, V.V. (2018) Thermodiffusion Saturation of the Surface of VT22 Titanium Alloy from a Controlled Oxygen-Nitrogen-Containing Atmosphere in the Stage of Aging. *Mater. Sci.*, 53, 5, 691-701
4. 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. *Mater. Sci.*, 39, 1, 108-117.
5. T. Cherepova, G. Dmitrieva, O. Tisov, O. Dukhota, M. Kindrachuk (2019). Research on the Properties of Co-TiC and Ni-TiC Hip-Sintered Alloys, *Acta Mechanica et Automatica.* 13, 1, 57-67.
6. Dykha, A., Marchenko, D., Artyukh, V., Zubiexhina-Khaiat, 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.
7. G.G. Gorokh, M.I. Pashechko, J.T. Borc, I.A. Kashko, A.I. Latos. (2018) Matrix coatings based on anodic alumina with carbon nanostructures in the pores. *Appl. Surf. Sci.*, 433, 829
8. M.I. Pashechko, K. Dziedzic, E. Mendyk, J. Jozwik, (2018) Chemical and Phase Composition of the Friction Surfaces Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr Hardfacing Coatings. *J. Tribol.*, -140, 2, 021302
9. B.A. Lyashenko, E.K. Solov'x, V.I. Mirnenko. (2010) Optimizaciya tehnologii naneseniya pokryt'ij po kriteriyam prochnosti i iznosostojkosti. - K.: In - t probl. prochnosti im. G.S. Pisarenko NAN Ukrainy, 193.

10. O.V. Dykha, R.V. Sorokatyi, S.F. Pasonskyi, M.O. Dykha (2016) Dyskretne zmishchennia ta znosostiikist tsylindrychnykh trybosystem kovzannia. Khmelnytskyi.-KhNU, 197.
11. G. M. Hryhorenko, L. I. Adeeva, A. Yu. Tunik, M. V. Karpets, V. N. Korzhyk, M. V. Kindrachuk, and O. V. Tisov (2020) Formation of Microstructure of Plasma-Arc Coatings Obtained Using Powder Wires with Steel Skin and B44C+(Cr,Fe)77C33+Al Filler, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, 9, 1265—1282 (in Ukrainian).
12. P. Schaaf, C. Illgner, F. Landry, K.-P. Lieb. (1998). Correlation of the microhardness with the nitrogen profiles and the phase composition in the surface of laser-nitrided steel *Surf. Coat. Tech.*, 100-101, 4044407
13. Sim, C. Park, N. Kang, Y. Kim, E-J. Chun, (2019), Effect of laser-assisted nitriding with a high-power diode laser on surface hardening of aluminum-containing martensitic steel, *Optics and Laser Technology*, 116, 305–314
14. C.J. Copola, I. Avram, M.C. Terzzoli, S. Duhalde, C. Morales, T. Pe´rez, F. Audebert, Ph. Delaporte, M. Sentis (2002) Influence of laser parameters on the nitriding of low carbon steel. *Appl. Surf. Sci.*, 197–198, 896–903
15. G. Wu, R. Wang, J. Yang, X. Chen, S. Cao S, W. Guo, K. Shang, B. Wei, X. Wang, L. Wang. (2011). Study of laser nitriding on the GCR15 steel surface. *Physics Procedia* 18, 285–290
16. N. Maharjan, W. Zhou, N. W. (2020). Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere. *Surf. Coat. Tech.*, 3856 125399.
17. N. Yasumaru, E. Sentoku, K. Miyazaki, J. Kiuchi (2013) Femtosecond-laser-induced nanostructure formed on nitrided stainless steel. *Appl. Surf. Sci.*, 264, 1 611-615
18. M. Fastow, M. Bamberger, (1988). Laser nitriding of AISI 4340 steel *Scripta Metallurgica*, 01, 22, 185-186.
19. J. Boes, A. Röttger, L. Becker, W. Theisen. (2019) Processing of gas-nitrided AISI 316L steel powder by laser powder bed fusion – Microstructure and properties. *Additive Manufacturing*, 30, 100836
20. M. B. Karamis and B. S. Yilbas. (1991). Laser melting of plasma-nitrided steel samples. *Surf. Coat. Tech.*, 45 399 402
21. M.V. Kindrachuk, Yu.Ya.Dushek, M.V. Luchka (1994). The local character of the stress-strained state of a composite loaded by friction forces. *Poroshkovaya Metallurgiya*, 9-10, 56-61.
22. Kosteczki B. I. (1970). *Trenie, smazka i iznos v mashinax*. K.: *Texnika*, 394
23. A. Chattopadhyay, K.C. Hari Kumar, V. Subramanya Sarma, B.S.Murty, D.Bhattacharjee. (2010) Prediction of carbon segregation on the surface of continuously annealed hot-rolled LCAK steel. *Surf. Coat. Tech.*, 205, 7, 2051-2054.
24. O. O. Mishchuk, O. V. Telemko, V. I. Dziuba L. I. Koval, V. I. Pekhno. (2014) Vplyv vilnykh vid sirky BIS-khelativ molibdenu na utvorennia hradiientnoi struktury stalevoi poverkhni tertia, *Problemy tertia ta znoshuvannia*, 4 (65), 4-18.
25. Zh. Benar. (1968). *Okislenie metalov. T.1. Teoreticheskie osnovy`*. Perevod s francz. M.: «*Metallurgiya*», 499
26. V.O. Kralya, O.H. Molyar, V.A. Trofimov, A.M. Khimko (2010). Defects of steel units of the high-lift devices of aircraft wings caused by fretting corrosion, *Mater. Sci.*, 46, 1, 108-114.
27. M. Jiang C. Liu, Z. Chen, P. Wang, H. Liao, D. Zhao, Z. Liu, X. Wang, M. Xu, C. Lao (2021) Enhanced strength-ductility synergy of selective laser melted reduced activation ferritic / martensitic steel via heterogeneous microstructure modification, *Materials Science and Engineering: A*, 801, 13, 140424
28. El Hassanin, M. Troiano, F. Scherillo, A. T. Silvestri, V. Contaldi, R. Solimene, F. Scala, A. Squillace, P. Salatino. (2020) Rotation-assisted Abrasive Fluidised Bed Machining of AISi10Mg parts made through Selective Laser Melting Technology. *Procedia Manufacturing*, 47, 1043-1049
29. 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, *Mater. Sci.*, 48, 2, 213-218.