

Цибаньов Г.В.,*
Марчук В.Є.,**
Калініченко В.І.,*
Радько О.В.**

*Інститут проблем міцності
 ім. Г.С. Писаренко НАН України,
 **Національний авіаційний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ДИСКРЕТНИХ ПОВЕРХОНЬ В УМОВАХ ТРИБОКОНТАКТУ

Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково-практичними задачами

Проблема підвищення надійності і довговічності трибосполучень сучасної техніки, зокрема авіаційної, нерозривно пов'язана з підвищенням вимог до властивостей матеріалів трибоконтактів, їх фізико-механічних і триботехнічних характеристик. Деталі авіаційної техніки працюють у широкому діапазоні статичних та динамічних навантажень, швидкостей тертя, температур, за різних умов мащення, терміни служби та ресурси яких значною мірою визначаються якістю і заданими властивостями захисних поверхневих шарів.

В багатьох випадках традиційні матеріали і технології вичерпали свої можливості щодо покращення властивостей поверхневих шарів. Одним із перспективних рішень, які можуть вирішити існуючі проблеми, є застосування дискретних поверхонь у вигляді мікрозаглибин (лунок). Технологія формування окремих дискретних ділянок таких поверхонь пов'язана з високими швидкостями ударного ідентування (на одиницю об'єму зміщеного матеріалу), пластичного стискання кромки лунок і виникненням смуг локалізованого зміщення матеріалу по внутрішніх сторонах лунок. Всі ці процеси призводять до виникнення внутрішніх залишкових напружень розтягу у дискретних ділянках поверхні, величина яких має неоднозначну розподіл і залежать від текстури поверхні, геометричних параметрів лунок, що в свою чергу буде визначати фізико-механічні властивості і зносостійкість трибосполучень [1].

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем

Основним напрямком зменшення залишкових напружень розтягу дискретної поверхні є видалення напливів, які формуються при створенні лунок, а також усунення сітки мікротріщин, як результат дії індентора, по внутрішніх сторонах лунок. Для цього поверхневий шар піддають шліфуванню на глибину виступу напливу з наступним нанесенням тонкого поверхневого шару покриття із заданими властивостями, які дозволяють заліковувати дефекти, що виникли після формування лунки, та забезпечити необхідну довговічність дискретних ділянок.

Сьогодні широко застосовують в різних галузях промисловості метод іонно-плазмового термоциклічного азотування (ПТА), який дозволяє формувати задані поверхневі шари залежно від умов роботи деталей і інструменту. Висока зносостійкість азотованих поверхонь забезпечується за рахунок формування нітридних шарів, які володіють високою твердістю, створенням стискуючих напружень і підвищеною теплостійкістю покриття. Встановлено [2], що в іонно-азотованих шарах виникають залишкові напруження стиску від 400 до 950 МПа, тоді як у шарах після газового азотування – лише до 470 МПа. Рівень і розподіл напружень залежать від параметрів процесу ПТА.

Ще на початку 90-х років минулого століття світовий парк налічував більш 1200 установок іонного азотування, а саме: Китай – 400, Європа (включаючи СРСР) – 400, Японія – 300, США – 70, інші країни – більше 50-ти [3]. Така велика увага у економічно розвинених країнах світу до методу ПТА пов'язується з наступними основними перевагами, у порівнянні з широко використовуваними способами хіміко-термічної обробки сталевих деталей, таких, як цементація, нітроцементация, ціанування і газове азотування в печах: вища поверхнева твердість азотованих деталей; відсутність деформації деталей після обробки; підвищення границі витривалості і збільшення зносостійкості оброблених деталей; відсутність перетворень завдяки нижчій температурі обробки; можливість обробки глухих і кризних отворів, якими є дискретні ділянки; збереження твердості азотованого шару після нагріву до 600 - 650 °С; можливість отримання шарів заданого складу; відсутність забруднення навколишнього середовища; зниження собівартості обробки у декілька разів [4, 5].

Переваги методу ПТА проявляються і в істотному скороченні основних витрат виробництва. Так, наприклад, у порівнянні з газовим азотуванням в печах, ПТА забезпечує: скорочення тривалості обробки в 2 - 5 разів; скорочення витрат робочих газів в 20-100 разів; скорочення витрат електроенергії 1,5 - 3 рази; втрачається необхідність проводити фінішну шліфовку; поліпшення санітарно-гігієнічних умов виробництва; повна відповідність технології всім сучасним вимогам з охорони навколишнього середовища. Крім того, застосування ПТА дозволяє заощадити основні фонди підприємств (устаткування і виробничі площі), знизити верстатні і транспортні витрати [5].

Механізм зношування дискретних поверхонь залежить від багатьох факторів, є саморегулюючим і сьогодні найменш дослідженим. Процеси тертя та зношування на таких поверхнях протікають на фактичній площині контакту між дискретними ділянками. Дискретні ділянки на поверхні тертя забезпечують відновлення мастильного шару між контактуючими поверхнями у разі її пошкодження. Крім того, вони виконують функції «мікрокапканів» для абразивних часток як в умовах тертя з мастильним

матеріалом, так і без нього. Результатом дії цих процесів є руйнування і зношування дискретних ділянок, що, в свою чергу, потребує заходів підвищення зносостійкості поверхонь дискретних ділянок за рахунок їх зміцнення сучасними методами, одним із яких є метод ПТА [6, 7]. Вплив форми, розмірів, профілю, розташування лунок, зміцнених методом ПТА, на фізико-механічні і триботехнічні властивості в умовах граничного тертя вивчено недостатньо. Це пояснюється тим, що існуючі способи обробки не можуть забезпечити можливість варіювання формою і розташуванням мікрозаглибин. Крім того, широке застосування методу ПТА для зміцнення дискретних ділянок стримується недостатнім вивченням закономірностей впливу структурно - фазового й хімічного складу азотованих шарів на фізико-механічні і триботехнічні властивості дискретних покриттів.

Мета дослідження

Вивчення напружено-деформованого стану, процесів зношування дискретних покриттів, зміцнених методом ПТА, в умовах граничного тертя та дослідження впливу поверхневої концентрації азоту в іонно-азотованих шарах дискретних ділянок на сталі 30ХГСА на їх структуру, фізико-механічні та триботехнічні властивості.

Методика експериментальних досліджень

Дослідження триботехнічних характеристик дискретних поверхонь проводили відповідно до стандарту [8], який встановлює метод дослідження матеріалів при терті з обмеженою подачею мастильного матеріалу. В якості матеріалу зразка використовувалась сталь 45 загартована, контрзразка – сталь 30ХГСА загартована. Лунки формували на робочій поверхні контрзразка за допомогою спеціального пристосування [9]. Дискретні покриття додатково піддавалось зміцненню методом ПТА [10].

Для випробувань дискретних поверхонь в умовах граничного тертя використовували машину тертя М–22М. Контакт пари тертя відбувався за схемою “диск–колодка”. В якості мастильного середовища застосовували індустріальне мастило И–20А відповідно до ГОСТ 20799–75. Для забезпечення режиму граничного тертя застосовували мастильний пристрій відповідно до рекомендацій ГОСТ 26614–85.

Фазовий склад азотованих шарів визначали за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН–4–13С із фокусуванням по Бреґу–Брентано у Fe–характеристичному випромінюванні. Дифракційні максимуми реєструвались у дискретному режимі з кроком $0,1^\circ$, час експозиції у точці – 2 с. Фотографування зображень структур проводилося за допомогою металографічного мікроскопу Neophot та скануючого електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЕММА-101А при напрузі прискорення 30 кВ. Визначення хімічного складу проведено за допомогою систем енерго-дисперсійного аналізу для важких елементів та хвильового рентгенівського мікроаналізу для легких елементів.

Мікротвердість вимірювалася за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М, кут між протилежними гранями алмазної пірамідки – 136° , навантаження – 0,98 Н, час витримування під навантаженням – 20 с, крок вимірювання по товщині зразка – 30 - 40 мкм. Визначали середнє значення мікротвердості за результатами п'яти вимірювань.

Чисельне моделювання напружено-деформованого стану дискретних покриттів здійснювали методом скінченних елементів, який реалізований у скінченно-елементному комплексі MSC Visual Nastran for Windows. Суть методики полягає у розв'язуванні задачі лінійної пружності та наступного визначення напружено-деформованого стану дискретної ділянки. Для спрощення розрахунку розглядали частину моделі, яку розбивали на гексагональні скінченні елементи. Розмір скінченних елементів 75... 140 мкм. Для моделі без лунок кількість вузлів – 44590, елементів – 39936, для моделі з лунками – 49966 і 46176 відповідно.

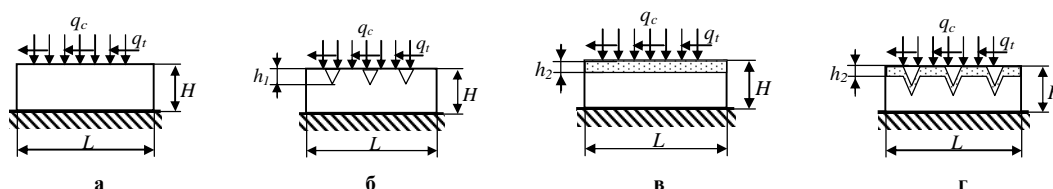


Рис. 1 – Схематичне прикладення навантаження до моделей:
а – 30ХГСАзаа; б – 30ХГСА+Л; в – 30ХГСА + А; г – 30ХГСА + Л + А
(q_c – розподілене навантаження стиску, q_t – дотичне навантаження,

L – ширина ділянки моделі, H – висота ділянки моделі; h_1 – глибина лунки; h_2 – товщина покриття)

До моделей прикладались розподілене навантаження стиску ($q_c = 1000 \text{ Н/м}^2$) на поверхні фрикційного контакту, та дотичне навантаження ($q_t = 100 \text{ Н/м}^2$) (рис. 1). Прийняті позначення на рис. 1:

заг – загартовка, L – наявність лунок на поверхні, A – поверхня матеріалу після ПТА, $H = 2$ мм, $L = 8$ мм, $h_1 = 150$ мкм, $h_2 = 300$ мкм, відстань між лунками – 2 мм.

Властивості матеріалу основи і азотованого шару наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Властивості матеріалів

Матеріал	Початкова температура $T_0, ^\circ\text{C}$	Модуль пружності $E, \text{МПа}$	Коефіцієнт Пуасона	Густина матеріалу $\rho, \text{кг/м}^3$
Сталь 30ХГСА	20	$2,15 \times 10^5$	0,26	7850
Азотована поверхня	20	$4,4 \times 10^5$	0,25	7850

Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

Дослідження триботехнічних характеристик дискретних поверхонь показали, що найбільшою зносостійкістю і найменшим коефіцієнтом тертя володіють зразки з дискретними покриттями як без (30ХГСА + L), так і додатково зміцнених методом ПТА (30ХГСА + L + A , рис. 2, а). Вони перевищують за зносостійкістю зразки зі сталей 45 у 3,1 - 5,3 рази і 30ХГСА загартовані (30ХГСА заг) 1,9 - 3,25 рази, сталі 30ХГСА, поверхневий шар якої зміцнений методом ПТА (30ХГСА + A) у 1,3 - 2,3 рази.

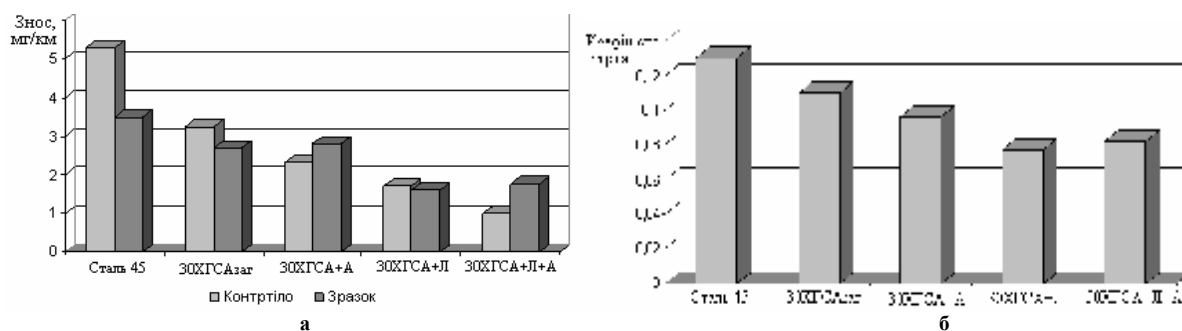


Рис. 2 – Триботехнічні характеристики дискретних покриттів в умовах граничного тертя (шлях – 2000 м, швидкість ковзання 0,625 м/с, питоме навантаження 10,0 МПа, середовище – індустріальне масло И-20А):
а – знос; б – коефіцієнт тертя

Фрактографічний аналіз дискретного покриття 30ХГСА + L + A показав, що поверхня тертя гладка з відсутністю пошкоджень і руйнувань поверхневого шару (рис. 3, а, в). Висока зносостійкість дискретного покриття 30ХГСА + L + A в цілому, так і окремих дискретних ділянок обумовлена високою захисною дією поверхневих азотованих шарів. Рентгенофазовий аналіз структури азотованих шарів виявив наявність у них двох зон: основної нітридної зони, що складається з нітриду основного металу і легуючих елементів, і зони внутрішньої азотування (рис. 3, г).

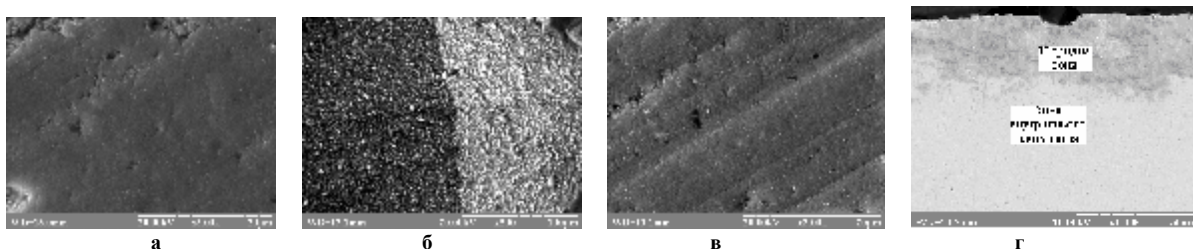


Рис. 3 – Мікрофотографія поверхні тертя дискретного покриття (30ХГСА + L + A) в умовах граничного тертя:
а – поверхня тертя перед лункою; б – дно лунки;
в – поверхня тертя за лункою; г – контрастний знімок поперечного розрізу зразка

За структурою перша зона ультрадрібнозерниста і включає монофазний гранецентрований нітрид Fe_4N – γ' -фаза, яка має чисто нітридний характер через погану розчинність у цій фазі вуглецю. Нітридна зона забезпечує не тільки високі захисні властивості дискретних ділянок, але і усуває різного роду

поверхневі дефекти, які виникали під час формування дискретних ділянок (рис. 3, б). Внутрішня зона складається з α -Fe(N) фази, яка представляє собою твердий розчин (об'ємноцентрований азотистий ферит). Поверхні тертя довкола лунки практично не відрізняються (рис. 3, а, в).

Аналіз структури азотованих шарів дозволив виявити також наявність на поверхні азотованого покриття карбонітридних фаз $\text{Fe}_{2-3}(\text{N,C})$ і $\text{Fe}_3(\text{N,C})$, а також невеликої кількості твердого розчину α -Fe(NC), які забезпечують високі значення мікротвердості азотованих шарів. Утворення карбонітридних фаз пояснюється особливістю технологічного процесу ПТА при додаванні до складу насичуючої суміші вуглецю у вигляді пропану C_3H_8 (табл. 2). Кількість карбонітридних фаз зменшується у глибину азотованого покриття.

Дослідження мікротвердості зміцнених поверхневих шарів дискретного покриття виявили зростання її значень до 10750 МПа на поверхні та поступове зменшення до 3600 МПа у глибину матриці матеріалу. Висока твердість поверхневих азотованих шарів контртіл 30ХГСА + А і 30ХГСА + Л + А призводить до підвищеного зношування зразків (рис. 2, а), порівняно з іншими трибосполученнями.

Таблиця 2

Результати пошарового рентгенофазового аналізу азотованого дискретного покриття

Глибина шару від поверхні зразка у глибину, мкм	Кількість азоту, % мас.	Фазовий склад шару
10	7,04	$\text{Fe}_{2-3}(\text{N,C})$, $\text{Fe}_3(\text{N,C})$, α -Fe(NC), Fe_4N
40	3,98	α -Fe(N), Fe_{2-3}N , Fe_4N
70	0,60	α -Fe(N), Fe_2N
100	0,42	α -Fe(N)
130	0,01	α -Fe(N)

Умови роботи трибосполучення впливають на напружено-деформований стан поверхневого шару трибоконтакту. Для виявлення впливу зазначених факторів було побудовано скінченно-елементну модель, яка відтворює напружено-деформований стан зразка під дією зовнішнього навантаження. Прикладення зусиль та закріплення скінченно-елементної моделі відповідає схемі зображеній на рис. 1. Основа моделі закріплена жорстко, а на поверхні діє результуюче навантаження від дотичної та нормально прикладеного розподіленого навантаження. Для відтворення однакового рівня навантаження усіх моделей, поверхневі вузли кожної з них були асоційовані із поверхнею, побудованою за чотирима точками, до якої прикладались навантаження $q_t = 100 \text{ Н/м}^2$, $q_c = 1000 \text{ Н/м}^2$. Як видно з рис. 4, прикладення більш значного нормального напруження у порівнянні з дотичним приводить до незначного нахилу результуючого навантаження до поверхні елемента, який розглядається.

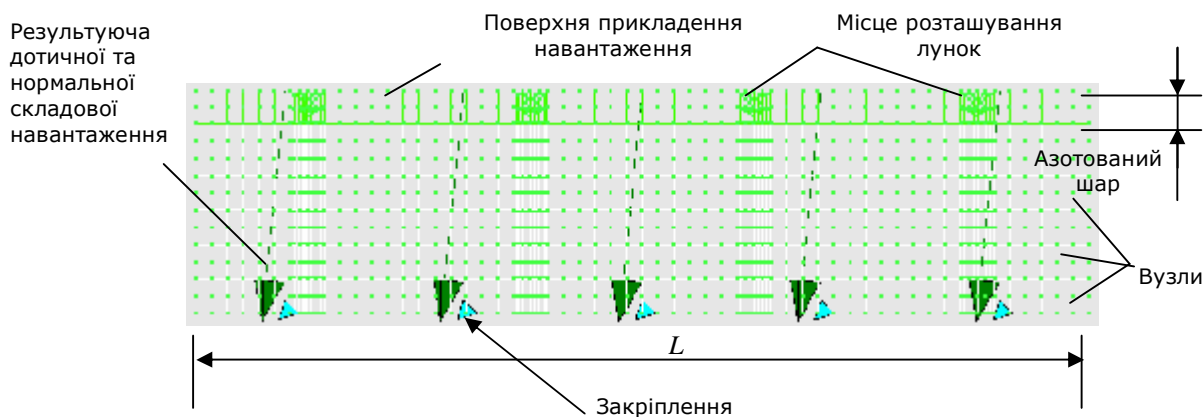


Рис. 4 – Закріплений елемент для розрахунку напруженого стану під дією зовнішнього навантаження

Після розрахунку отримали розподіл еквівалентних напружень по об'єму моделі і продубльовані напруження у вигляді ізоповерхонь - поверхонь з однаковим рівнем напружень (рис. 5). Аналіз отриманих моделей показав, що розподіл еквівалентних напружень в них має неоднозначний характер. У вихідній моделі (30ХГСА) по об'єму зразка деформаційні процеси проходять рівномірно. При нанесенні лунки (30ХГСА + Л) рівномірність суттєво порушується. Лунки, що є концентраторами напружень, створюють кратероподібні вершини, які є перешкодою деформаційним процесам. Наведені результати розрахунку дають загальну картину напруженого стану елемента у заданих умовах навантаження і

закріплення, яка свідчить про незначний вплив наявності лунок на напруження в елементі. Більш значний вплив на напружений стан справляє азотування поверхні: наявність поверхневого шару з фізико-механічними властивостями, які відрізняються від основи в бік більш високих характеристик опору деформуванню, призводить до перерозподілу напружень з більшим їх зосередженням у азотованому шарі.

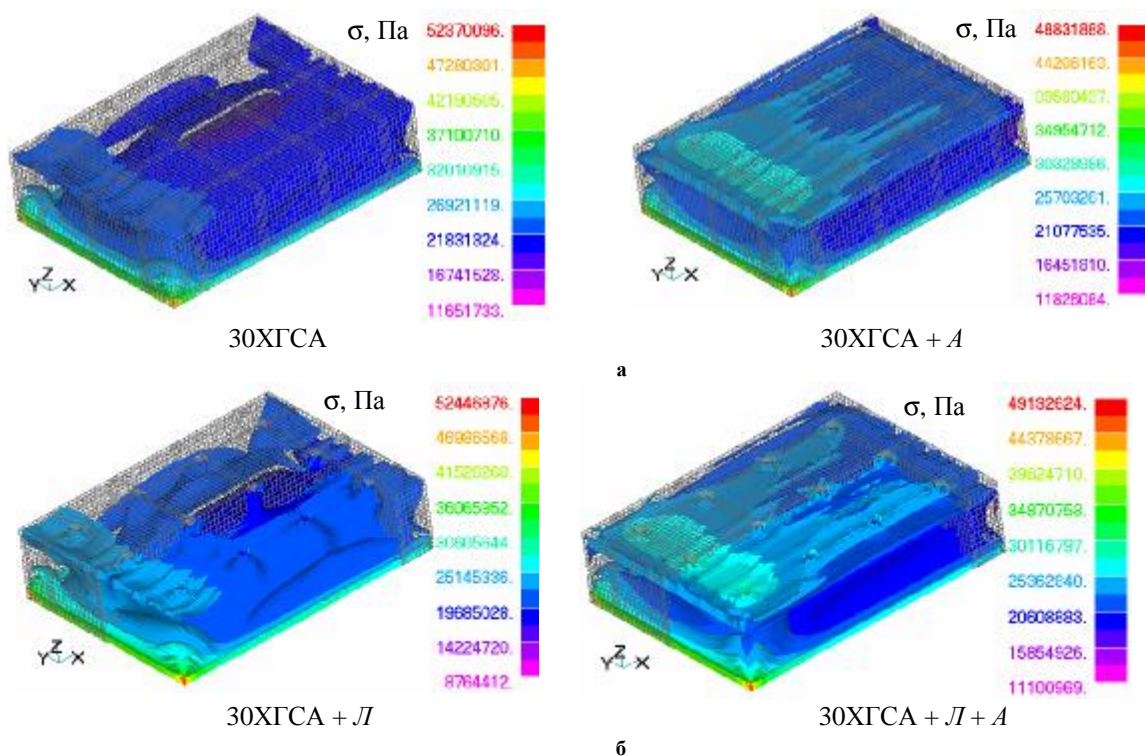


Рис. 5 – Моделі розподілу еквівалентних напружень (а) і еквівалентних напружень у вигляді ізоповерхонь (б) при інтенсивності контактного навантаження $q_c = 1000 \text{ Па/м}^2$ $q_t = 100 \text{ Па/м}^2$

На рис. 6 наведено результати розрахунку елемента, конкретизовані для його поверхні по довжині поблизу лунок. Проведений аналіз розрахованих відносних еквівалентних напружень дозволив встановити, що, як і було відзначено вище, їх найменший рівень в поверхневих шарах спостерігається у вихідного зразка та такого ж зразка з лунками. Про наявність лунок на поверхні тертя свідчить незначне зниження напруження в місцях їх розташування за рахунок перерозподілу напружень (на рис. 6 помітно у вигляді незначних провалів на графіках для зразків з лунками). При цьому, криві розподілу напружень для азотованих поверхонь лежать вище від не азотованих, що пов'язано з прийняттям на себе більшої частки навантаження азотованим шаром у відповідності з більш високими характеристиками міцності. Незначне підвищення і падіння відносних еквівалентних напружень для всіх розрахованих випадків на ділянці $L \approx (0 \dots 0,003) \text{ м}$ пов'язано з умовами закріплення елемента та напрямком поверхневого навантаження, хоч більша частина поверхні ($L \approx 0,003 \dots 0,008 \text{ м}$) навантажена рівномірно.

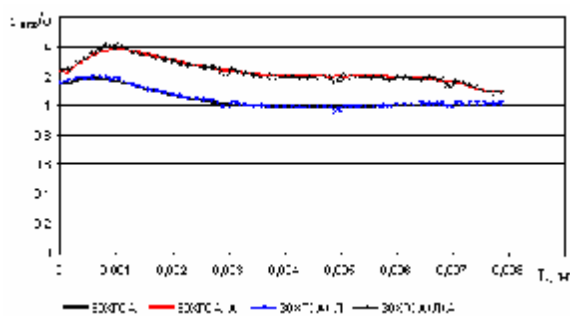


Рис. 6 – Графік розподілу відносних еквівалентних напружень в поверхневому шарі елемента по його довжині (s – максимальні напруження вихідного елемента)

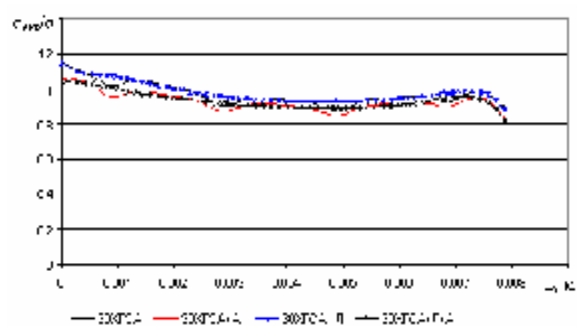


Рис. 7 – Графік розподілу відносних еквівалентних напружень по довжині елемента в шарах деталі на глибині, що виходить за межі азотованого шару

Результати, подібні до приведених на рис. 6, продемонстровані на рис. 7 для шару матеріалу на глибині від поверхні, яка перевищує товщину азотованого шару (положення шару відзначено на верхніх рисунках для елементів без лунок і з лунками). Характер графіків відображає картину, подібну до розподілу у поверхневому шарі елемента з тою різницею, що напруження в елементах з азотованим шаром і без нього майже вирівнюються, а величина напружень на ділянці їх рівномірного розподілу знижується на $\sim (8 \dots 24) \%$.

Як видно з графіків, наявність лунок не суттєво впливає на розподіл напружень як на поверхні так і у внутрішньому шарі деталі. Більший вплив на розподіл напружень має азотування, в поверхневих шарах їх рівень на 18,3 % вищий (рис. 5, 7). Зміцнення поверхневого шару методом ПТА як вихідної поверхні, так і дискретної приводить до збільшення рівня розподілу еквівалентних напружень на 20 - 30 % (рис. 5). Але оскільки границя міцності азотованого шару більша за границю міцності основного матеріалу, то вищий напружений стан в азотованому матеріалі не зменшує характеристик міцності деталі. Наявність лунок майже не впливає на напружений стан поверхневого шару, однак на віддалі від поверхні під лунками зменшуються напруження на 40 %, що робить розвантаженим основний матеріал (рис. 6).

Розглядаючи напружений стан по глибині (товщині) елемента, видно (рис. 8), що між азотованою поверхнею та основним матеріалом є досить значний перепад напружень, приблизно 21 - 28 %. Як видно з графіку, азотований шар розвантажує основний матеріал, який має меншу границю міцності, саме таким чином підвищуючи загальний ресурс усієї деталі (конструкції).

Експериментальні випробування на зносостійкість показали досить високу стійкість азотованих зразків із лунками без відшарування та когезійного розтріскування поверхневих шарів, тому можна стверджувати, що перепад напружень, між основним матеріалом та азотованим шаром не зменшує характеристик міцності деталі в умовах контакту і тертя. Високу зносостійкість самого азотованого шару та стійкість проти розтріскування інтерфейсного шару, в якому зазвичай проходить когезійне розшарування основи і покриття, очевидно, можна пояснити тим, що азотована модифікація поверхні не являє собою покриття основи іншим матеріалом з різко відмінними від неї властивостями. Як показано в табл. 2, спостерігається повільний перехід структурного складу азотованого шару з великим вмістом карбонітридних з'єднань безпосередньо на поверхні з поступовим їх зменшенням по глибині, що створює плавне зниження характеристик опору деформуванню і відсутність високих градієнтів зміни властивостей. Про це також свідчать результати заміру твердості у різних підповерхневих шарах, наведені вище. Слід також відзначити, що результати розрахунку розподілу еквівалентних напружень по глибині елемента (рис. 8) одержані з допущенням, що механічні властивості азотованого шару однакові по всій його товщині і відповідають їх значенням на поверхні. У зв'язку з їх зниженням по глибині, пов'язаним зі зменшенням об'єму і складу карбонітридних з'єднань, припускається, що напруження від дії сил контакту і тертя у поверхневому азотованому шарі реально змінюються більш плавно, ніж це приведено на графіку (рис. 8).

У цьому повідомленні, як було сказано вище, розглянуто лише загальну картину розподілу напружень по елементу для визначення зон, в яких може наступити граничний стан в результаті спільної дії зусиль від контакту і тертя. У зв'язку з цим в розрахунковій скінченно-елементній моделі прийнята відносно груба сітка елементів, розмір яких порівнюваний з розмірами лунок і тому визначення локального напруженого стану поблизу вершини і стінок лунки за такою моделлю буде помилковим і тому не виконувалось. Однак, необхідно відзначити, що у попередніх дослідженнях [11, 12], експериментально було встановлено значне покращення опору руйнуванню поверхні з лунками після іонного азотування при втомі і фретинг-втомі за рахунок заліковування дефектів поверхонь лунок та ініціювання

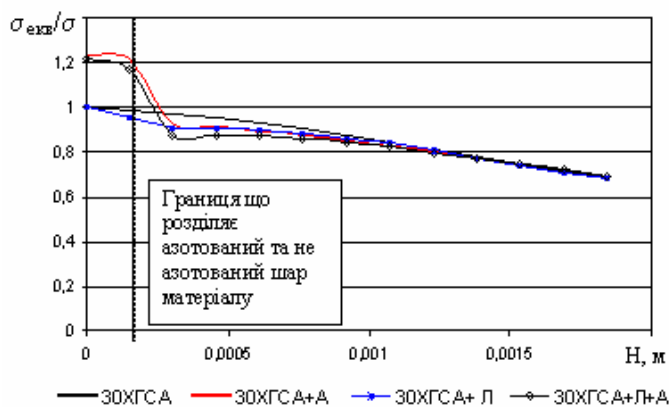


Рис. 8 – Графік розподілу відносних еквівалентних напружень по глибині деталі вздовж осі Y (0 відповідає поверхні зразка)

стискаючих залишкових напружень. Тому можна вважати, що граничний стан розглядуваного елемента від дії контакту і тертя може наступити за критерієм допустимого граничного зносу поверхні або недопустимих переміщень чи напружень від контакту.

Азотування поверхні не впливає на рівень дотичних напружень дискретного покриття. Воно призводить тільки до перерозподілу напружень на поверхні зміцнених дискретних ділянок і розвантаженню основи матеріалу. Тобто все навантаження від дотичних напружень сприймає азотоване дискретне покриття (рис. 8, в). На азотованому зразку відносні дотичні напруження сприймаються всією суцільною поверхнею азотованого покриття і передаються на весь об'єм основою матеріалу у глибину (рис. 8, а).

Висновки

1. Аналіз триботехнічних характеристик дискретних покриттів показав, що найбільшою зносостійкістю володіють поверхні з нанесеною сіткою лункок, додатково зміцнені іонним азотуванням, які перевищують за зносостійкістю зразки зі сталі 45 без модифікації поверхні у 3,1 - 5,3 рази, сталі 30ХГСА (30ХГСА за2) 1,9 - 3,25 рази, сталі 30ХГСА, поверхневий шар якої зміцнений методом ПТА (30ХГСА + А) у 1,3 - 2,3 рази.

2. Наявність азотованого поверхневого шару в умовах контакту і тертя ковзання приводить до покращення стану поверхні сталі, включаючи поверхні лункок, перерозподілу напружень від дії цих факторів за рахунок більш високих механічних характеристик поверхневого шару і повільним їх зниженням по глибині, що призводить до пропорційної зміни властивостей і напруженості матеріалу з дискретною поверхнею, підвищуючи опір зношуванню і руйнуванню.

3. Лунки дискретної поверхні відіграють свою роль у підвищенні зносостійкості поверхні, що пов'язано зі зміною умов контактування та зношування трибоспряження з дискретною поверхнею. Іонне азотування цієї поверхні приводить до значного підвищення її твердості та незначного підвищення коефіцієнта тертя. На кінцевому результаті – значному підвищенні зносостійкості (висновок 1) – даються взнаки позитивні фактори від двох модифікацій поверхні: зниження коефіцієнта тертя, підвищення твердості поверхні та наявність на ній залишкових стискаючих напружень.

4. Граничний стан трибосполучення, одна з поверхонь якого дискретно текстурована лунками і додатково модифікована методом ПТА, визначається допустимими граничним зносом поверхні або переміщень чи напружень від контакту, які можуть бути визначені за скінченно-елементною моделлю, подібною до розглянутої у цьому повідомленні.

Література

1. Ляшенко Б.А., Марчук В.Є., Калініченко В.І., Градиський Ю.О. Дискретні покриття для підвищення зносостійкості деталей машин і механізмів // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків: Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 94. – С. 324-335.
2. Радько О.В. Формування триботехнічних властивостей сталевих деталей авіаційної техніки імпульсним газотермоциклічним іонним азотуванням : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» / Радько О.В. – К., 2008. – 20 с.
3. Georges J. TC Plasma Nitriding. 12th IFHTSE Melbourne 2000, Australia / Georges J. // Heat Treatment of Metals. – 2001. – № 2. – Р. 33-37.
4. Пастух И.М. Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем разряде: состояние и перспективы / И.М. Пастух // Проблемы трибологии. – 2004. – № 3. – С. 42-55.
5. Ляшенко Б.А. О достоинствах технологии вакуумного азотирования / Б.А. Ляшенко, А.В.Рутковский // Оборудование и инструмент. – 2005. – № 12. – С. 20-21.
6. Марчук В.Є. Механізм зношування дискретних поверхонь в умовах абразивного зношування // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во нац. авіац. ун-ту “НАУ-друк”, 2010. – Вип. 52. – С. 112-119.
7. Марчук В.Є., Духота О.І., Градиський Ю.О., Єнін О.М. Фретингостійкість дискретних поверхонь в умовах граничного тертя // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків: Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 100. – С. 147-152.
8. Материалы антифрикционные порошковые. Метод определения триботехнических характеристик : ГОСТ 26614-85. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 9 с.
9. Пат. 13762 Україна, МПК (06) F01L 1/20, F01L 1/46. Пристрій для утворення на плоскій поверхні тертя рельєфу заглибин, що утримують мастильні матеріали / Марчук В.Є., Шульга І.Ф., Шульга О.І., Плюсін О.Є.; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № u200509981; заявл. 24.10.2005; опубл. 17.04.2006, Бюл. №4.
10. Пат. 44643 Україна, F01L 1/20 C23C 8/02. Спосіб отримання рельєфних зносостійких азотованих шарів сталевих деталей / Марчук В.Є., Шульга І.Ф., Ляшенко Б.А., Цибаньов Г.В., Рутковський А.В., Калініченко В.В.; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u200904236; заявл. 29.04.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. №19.
11. Цыбанев Г.В., Марчук В.Е., Герасимчук О.Н. Фреттинг-усталость поверхностей с дискретными покрытиями // Проблемы трибологии. – 2009. – № 1. – С. 97-104.
12. Цыбанев Г.В., Марчук В.Е., Калиниченко В.И. Управление свойствами поверхностей трения при приработке дискретных покрытий в условиях фреттинга // Проблемы трибологии. – 2011. – № 1. – С. 52-57.

Надійшла 05.09.2011