

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Марчук Володимир Єфремович



УДК 621.891

НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ
РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ З ТЕКСТУРОВАНОЮ ЛУНКОВОЮ
СТРУКТУРОЮ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Ляшенко Борис Артемович,
Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка
НАН України, завідувач лабораторії зміцнення
поверхні елементів конструкцій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Диха Олександр Володимирович,
Хмельницький національний університет,
завідувач кафедри зносостійкості і надійності машин;

доктор технічних наук, професор
Івченко Леонід Йосипович,
Запорізький національний технічний університет,
директор машинобудівного інституту;

доктор технічних наук, професор
Копилов Вячеслав Іванович,
Національний технічний університет
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», професор кафедри
інженерії поверхні.

Захист відбудеться “ 26 ” січня 2017 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 у Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус 11, ауд. 11.220.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус 8.

Автореферат розісланий “ 2 ” грудня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., с.н.с.



О. Ю. Корчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблеми тертя та зношування деталей вузлів і механізмів техніки спеціального призначення (ТСП) в екстремальних умовах експлуатації належать до числа найбільш складних проблем та є сукупністю багатьох часткових проблем створення умов для забезпечення максимального використання їх потенційних можливостей.

Постійне ускладнення ТСП при одночасному розширенні масштабів її застосування висуває все більш високі вимоги до надійності конструкційних елементів, фізико-механічних та триботехнічних властивостей поверхонь деталей трибосистем, де зароджуються і розвиваються одночасно різноманітні процеси і види тертя і зношування. Це зумовлено важкими умовами експлуатаційного навантаження, які характеризуються одночасною дією високих статичних і динамічних навантажень, обмеженою подачею мастильного матеріалу, наявністю абразивного і температурного впливу та інших факторів. В наслідок цього до 90 % обсягу відмов спричиняють процеси тертя та зношування.

Недостатня зносостійкість поверхневого шару вузлів і механізмів веде до втрати працездатності техніки та її простоювання, до значного завантаження виробничих потужностей ремонтних підприємств і підприємств по виробництву запасних частин. Витрати на ремонт і технічне обслуговування техніки, як правило, з часом зростають пропорційно зменшенню вартості виробу. Найбільш ефективним способом підвищення зносостійкості деталей і вузлів тертя – ще на стадії проектування моделювати і закладати для їх виготовлення прогресивні, прикладні розробки і технології.

Важливим напрямком вирішення даних проблем є науково-обґрунтований пошук і розвиток методів зміцнення та модифікації поверхонь тертя, серед яких найбільшу ефективність і економічну доцільність показали технології інженерії поверхні. За останні десятиліття інженерія поверхні набуває все більш вагоме значення у більшості галузей сучасного машинобудування. Її інноваційний характер розвитку охоплює комплекс наукових напрямків різних наук і знань, об'єднує методи цілеспрямованої зміни фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів матеріалів шляхом модифікування, нанесення плівок, покриттів, захисних шарів різними методами та їх комбінаціями.

Однією з таких інноваційних комбінованих технологій є дискретне зміцнення поверхневого шару, суть якого полягає в заміні традиційного суцільного шару поверхні на переривисту мозаїчно-дискретну структуру. Дискретні поверхні дозволяють забезпечити необхідну надійність трибосполучень в екстремальних умовах експлуатації, де суцільні захисні покриття втрачають свою працездатність.

На підставі аналізу існуючих методів створення дискретних поверхонь, які застосовуються як в нашій країні, так і за кордоном, вимог до геометричних розмірів дискретних ділянок та фізико-механічних параметрів поверхневих шарів деталей трибосистем ТСП встановлено, що існує об'єктивна потреба у використанні дискретних поверхонь з макродискретними (поглибленими) ділянками. Найбільш перспективною, малозатратною і в той же час маловивченою сьогодні є технологія

створення текстурованих лункових поверхонь (ТЛП) з поглибленими дискретними ділянками механічним способом. Однак широкому впровадженню даного методу у практику машинобудування заважають відсутність системних досліджень процесу формування зносостійких ТЛП для конструкційних матеріалів, з яких виготовлені деталі і вузли ТСП, недостатня вивченість закономірностей їх зношування при різних видах тертя та зношування, напружено-деформованого стану (НДС), фізико-механічних властивостей шарів, відсутність даних вибору оптимальної текстури ТЛП за критеріями максимальної зносостійкості. Крім того, існуючі на цей час підходи до застосування даної технології використовують лише окремі її потенційні можливості. Отримання таких даних надасть можливість науково обґрунтувати вибір найбільш ефективної конструкції ТЛП з оптимальними конструктивно-технологічними і експлуатаційними параметрами за умов отримання високих триботехнічних характеристик для різних видів тертя та зношування, що в сукупності дозволить реалізувати ідею багатофункціонального призначення ТЛП з підвищеними фізико-механічними і триботехнічними властивостями на сталевих деталях вузлів тертя ТСП.

Отже, вирішення проблеми підвищення зносостійкості деталей ТСП потребує подолання існуючого протиріччя між наявною потребою оновлення парку ТСП, обмеження фінансового ресурсу і виробничих потужностей промислових підприємств машинобудівної галузі України та відсутністю науково-методологічного апарату аналізу і синтезу процесу модифікації поверхневого шару деталей трибосполучень ТСП, що працюють в екстремальних умовах експлуатації за обмеженою подачею мастильного матеріалу при різних видах тертя та зношування. Це протиріччя породжує актуальну наукову проблему, яка полягає у створенні і практичному використанні нових високоефективних ресурсозберігаючих технологій управління функціональними властивостями деталей ТСП за рахунок направленої створення зносостійких поверхневих шарів і управління їх властивостями в екстремальних умовах експлуатації при обмеженій подачі мастильного матеріалу при різних видах тертя та зношування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Вибраний напрямок досліджень тісно пов'язаний з основними науковими напрямами та проблемами фундаментальних досліджень у галузі технічних наук на період 2009–2013 рр., затвердженою Постановою Національної академії наук України № 55 від 25.02.2009 р., та створення прогресивних прикладних розробок і технологій відповідно до Концепції розвитку НАН України на 2014–2023 рр. Дисертаційна робота виконувалася згідно з планами наукової та науково-технічної діяльності Національної академії оборони України в межах науково-дослідної роботи «Шляхи відновлення важконавантажених деталей авіаційної техніки військового призначення» № 13413/2 і отримала диплом I ступеня серед колективів – переможців конкурсу у Збройних Силах України за перше місце у номінації «Матеріалознавство». Автором розроблено методологічні основи формування зносостійких лункових поверхонь з дискретно-орієнтованою структурою на поверхнях тертя, проведено комплекс експериментальних досліджень, а також розроблені практичні рекомендації для впровадження їх результатів з метою

підвищення зносостійкості важконавантажених деталей авіаційної техніки (акт реалізації, вх. № 554 від 13.02.2006 р.).

Дисертаційні дослідження проводилися в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України у відділі міцності елементів конструкцій з функціональними покриттями у рамках науково-дослідної роботи № 1.3.4.761 «Розробка критеріїв оптимізації поверхневого зміцнення деталей машин та інструменту, конструктивних схем суцільних та дискретних покриттів, методів керування технологічними процесами» (номер держреєстрації 0107U000627). Автором розроблено і реалізовано принцип формування рельєфних поверхонь, проаналізовано їх напружено-деформований стан для оптимізації параметрів технологічного процесу їх формування (акт реалізації від 19.01.2011 р.).

Також дисертаційні дослідження проводилися у відділі утоми та термоуми матеріалів у рамках науково-дослідної роботи № 1.3.4.710 «Дослідження критеріїв граничного стану матеріалів при циклічному навантаженні з урахуванням впливу поверхні та контактної взаємодії» (номер держреєстрації РК0106U000710) в інтересах спільної діяльності з Інститутом проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України. Автором розроблено принцип отримання рельєфних зносостійких азотованих шарів сталевих деталей, як один із способів підвищення циклічної довговічності сталей в умовах фретингу, який реалізований у розробленому комплексі технологічно-експериментальних методів дослідження фретинг-уми та умов формування поверхні тертя з метою забезпечення оптимальних технологічних процесів формування ТЛП із мінімальними затратами часу та засобів при їх реалізації (акт реалізації від 24.12.2010 р.).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей ТСП з текстурованою лунковою структурою шляхом встановлення закономірностей впливу оптимальної геометрії дискретних ділянок та її напружено-деформованого стану на процеси тертя і зношування в екстремальних умовах експлуатації.

Для вирішення поставленої мети в роботі були сформульовані наступні основні наукові і прикладні завдання:

1. Розробити концептуальний підхід створення зносостійких ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, зміцнених методом іонно-плазмового термоциклічного азотування (ІПТА).

2. Встановити закономірності виникнення технологічних залишкових напружень в процесі формування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками (ДД). Дослідити вплив іонного азотування, структурно-фазового складу та фізико-механічних властивостей поверхневого шару на рівень напружено-деформованого стану як окремої дискретної ділянки, так і дискретної поверхні в цілому.

3. Встановити закономірності зношування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, зміцнених методом ІПТА, в умовах абразивного зношування при терті не жорстко закріпленими абразивними частками. Дослідити вплив зернистості абразивних часток на зносостійкість ТЛП. Методом математичного моделювання визначити оптимальну текстуру ТЛП для заданих умов експлуатаційного навантаження.

4. На основі комплексних досліджень встановити закономірності зношування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, зміцнених методом ІПТА, в умовах граничного мащення при фретинг-зношуванні. Побудувати модель зношування та сформувані системні уявлення про закономірності і процеси, які відбуваються у тонких поверхневих шарах ТЛП. Методом математичного статистичного аналізу розкрити зв'язок конструктивно-технологічних параметрів ТЛП з триботехнічними характеристиками для різних умов експлуатаційного навантаження. Розкрити механізм впливу напружено-деформованого стану і температури в поверхневому шарі ТЛП на триботехнічні характеристики.

5. Дослідити та встановити границю витривалості сталевих деталей з ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, зміцнених методом ІПТА, в умовах фретинг-утоми, визначити закономірності впливу фретингу і циклічного навантаження на довговічність вузлів тертя.

6. Встановити закономірності зношування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, зміцнених методом ІПТА, при терті ковзання в умовах обмеженої подачі мастильного матеріалу. Розкрити механізм мастильної дії ТЛП у напрямку регенерації граничної мастильної плівки. Встановити закономірності впливу напруженості магнітного поля на механізм вилучення продуктів зношування з поверхні тертя в дискретні ділянки. Методом регресивного аналізу встановити оптимальну текстуру ТЛП при обмеженій подачі мастильного матеріалу.

7. Розробити алгоритм підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя з ТЛП з поглибленими дискретними ділянками та запропонувати для практичного використання розроблені наукові положення на виробничих підприємствах машинобудівної галузі України.

Об'єкт дослідження – процеси тертя та зношування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, зміцнені методом ІПТА, які працюють в екстремальних умовах експлуатації при обмеженій подачі мастильного матеріалу при різних видах тертя та зношування, дії абразивного матеріалу.

Предмет дослідження – закономірності тертя та зношування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, зміцнених методом ІПТА, в залежності від конструктивно-технологічних і експлуатаційних параметрів при різних видах тертя і зношування в екстремальних умовах експлуатації.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є комплексний підхід до наукових досліджень, який забезпечив всебічне і глибоке вивчення та аналіз процесів, які відбуваються на поверхні тертя ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, дозволив оптимізувати технологію їх формування з метою отримання найкращих триботехнічних характеристик. Комплекс досліджень включав в себе метод багатофакторного планування експерименту і математичної обробки статистичних даних, що дозволяє представити процес у вигляді функціональної залежності вхідних і вихідних параметрів; метод найменших квадратів – для обробки отриманих результатів; рентгеноструктурні методи – для визначення кристалографічної текстури у поверхневому шарі деталей і структурно-фазових змін; методи растрової електронної мікроскопії та рентгенівського аналізу – для дослідження особливостей мікроструктури поверхневого шару, вмісту та розподілу

легуючих елементів у дискретній поверхні, фрактографічних досліджень зруйнованих поверхонь та зломів; методи інженерної механіки – для дослідження залишкових напружень у дискретній поверхні, їх мікротвердості, триботехнічних характеристик в умовах абразивного зношування і зношування при фретингу, фретинг-утомі, тертя ковзання; метод скінченно-елементного аналізу – для оцінки напружено-деформованого стану та визначення граничних напружень деталей з ТЛП в умовах дії статичних та циклічних навантажень.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено концептуальний підхід щодо створення зносостійких ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, який на відміну від існуючих базуються на дослідженні НДС як окремої дискретної ділянки, так і дискретної поверхні в цілому, та математичному моделюванні закономірностей їх формування.

2. Розкрито механізм зношування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками в умовах абразивного зношування при терті нежорстко закріпленими абразивними частинками, який на відміну від існуючого базується на нейтралізації розміцнюючої дії дискретних ділянок іонним азотуванням, що дозволяє збільшити зносостійкість в 1,5–3,6 рази.

3. Встановлено закономірність зношування ТЛП в умовах фретинг-зношування при обмеженій подачі мастильного матеріалу в зону трибоконтакту, яка на відміну від існуючої враховує конструктивно-технологічні параметри дискретної ділянки та можливість видалення із зони трибоконтакту продуктів зношування, запобігаючи їх дії як абразивного матеріалу. Це надає можливість керувати процесами припрацювання при виборі оптимальної текстури ТЛП, в період припрацювання зменшити коефіцієнт тертя на 57–62 %, зменшити період припрацювання на 10–20 % та збільшити зносостійкість в період після припрацювання у 1,8–2,44 рази.

4. Сформовані системні уявлення про закономірності і процеси впливу магнітного поля на механізм вилучення продуктів зношування, які на відміну від існуючих враховують дію внутрішнього магнітного поля кромки дискретних ділянок. Встановлено, що ефект притягування продуктів зношування до дискретних ділянок ТЛП є результатом збільшення на 10–26 % напруженості магнітного поля кромки дискретних ділянок у порівнянні з напруженістю магнітного поля у міжлунковому просторі.

5. Доведено, що завдяки впливу внутрішнього магнітного поля кромки дискретних ділянок, в умовах трибоконтакту з ТЛП, на регенерацію граничних мастильних плівок витрачається менше енергії за рахунок збільшення кількості діамантних молекул мастильного матеріалу, що підтверджується зростанням тангенса кута діелектричних втрат в 1,8 рази.

6. Побудовані математичні моделі технологічного процесу формування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками при різних видах тертя та зношування, які на відміну від існуючих враховують розміри, розташування і глибину дискретних ділянок для оцінки триботехнічних характеристик для різних умов експлуатаційного навантаження, що дозволяє керувати властивостями поверхневого шару.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає у тому, що автором одержано нові наукові положення та науково обґрунтовані результати, які є науково-методологічною основою розробки комбінованого технологічного процесу підвищення зносостійкості деталей і вузлів тертя ТСП в екстремальних умовах експлуатації, та дозволяють на етапах їх створення (розробки й виробництва) здійснити вибір раціональних за складом та властивостями ТЛП з поглибленими дискретними ділянками для підвищення зносостійкості конструктивних елементів в умовах експлуатаційного навантаження.

Розроблено та захищено деклараційними патентами України і впроваджено в практику експериментальних випробувань пристрій для формування ТЛП (пат. № 13762, опубл. 17.04.2006, бюл. № 4), спосіб отримання рельєфних зносостійких текстурованих лункових азотованих шарів сталевих деталей (пат. № 44643, опубл. 12.10.2009, бюл. № 19) і спосіб покращення триботехнічних властивостей пар тертя (пат. 81367, опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12).

Розроблено комбінований технологічний процес формування ТЛП для підвищення довговічності допоміжних накладок корінних листів та опорних сухарів ресор автомобільної техніки, що дозволило збільшити ресурс ресор в 1,7 рази (акт реалізації, вих. № 693 від 04.12.2009). Ефективність запропонованих рішень підтверджується деклараційним патентом України № 13763, опубл. 17.04.2006, бюл. № 4. Технологію формування ТЛП, зміцнених методом ППТА, на конструктивних елементах деталей використано при виробництві та модернізації силових рухомих з'єднань гелікоптерів Мі-171, Мі-8МТВ-1, Мі-8Т, а саме болтових з'єднаннях шасі і підвісних паливних баків. Економічний ефект від впровадження технології забезпечується за рахунок підвищення ресурсу конструктивних елементів гелікоптерів та зниження собівартості ремонту (акт реалізації від 30.09.2011). Застосування ТЛП дозволило підвищити зносостійкість поверхонь тертя деталей і вузлів авіаційної техніки більш ніж на 50 % (акт реалізації, вх. № 554 від 13.02.2006).

Зміцнення робочої поверхні поршневого пальця ТЛП показали покращення працездатності пари тертя «поршневий палець – втулка шатуна» енергоагрегата ЭА-10 бронетанкової техніки за рахунок зменшення схильності до схоплювання (акт реалізації від 20.10.2015). Річний економічний ефект від впровадження у виробничий процес метода формування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками становив 44937 грн. при використанні одного пристрою.

Запропоновано алгоритм підвищення триботехнічних характеристик деталей ТСП ТЛП, який базується на оптимізації комбінованого технологічного процесу та практичних рекомендаціях щодо зміцнення поверхневого шару іонним азотуванням.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові й теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Без співавторів опубліковано наукові праці – [1, 7, 10–12, 16, 25, 27, 31, 33]. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: встановлено механізм зношування електроіскрових покриттів в умовах абразивного зношування та показана перспективність їх застосування для відновлення зношених деталей ТСП [2]; встановлено закономірності зношування ТЛП в умовах гідроабразивного

зношування від одночасного впливу конструктивних, технологічних і експлуатаційних параметрів [3]; експериментально визначено зниження границі витривалості сталі 30ХГСА за наявності фретингу та розкриті їх причини, розроблено та протестовано методику досліджень фретинг-утоми консольних зразків у контакті з П-подібними фретинг-накладками за їх навантаження у резонансному режимі на електродинамічному вібростенді [4]; наведено короткий огляд методів підвищення захисних властивостей конструкційних матеріалів, що працюють в умовах фретинг-втоми. Проаналізовані результати випробувань на втому і фретинг-утому зразків із сталі 30ХГСА з різними видами дискретних поверхонь [5]; виявлені закономірності впливу глибини дискретної ділянки на НДС ТЛП, що дозволяють оцінити умови зменшення напруженості сторін лунок підбором її текстури та обґрунтувати концептуальний підхід створення ТЛП з поглибленими дискретними ділянками з високими триботехнічними властивостями [6, 14]; встановлено механізм зношування ТЛП при терті нежорстко закріпленими абразивними частинками, який базується на нейтралізації розміцнюючої дії дискретних ділянок іонним азотуванням [8]; визначено закономірності зношування ТЛП в умовах граничного мащення в залежності від конструктивних, технологічних і експлуатаційних параметрів [9]; встановлено закономірність зношування ТЛП в умовах фретинг-зношування при обмеженій подачі мастильного матеріалу в зону трибоконтакту, яка враховує конструктивно-технологічні параметри дискретної ділянки та можливість видалення із зони трибоконтакту продуктів зношування, запобігаючи їх дії як абразивного матеріалу, що дозволило в період припрацювання зменшити коефіцієнт тертя на 57–62 % [13]; експериментально обґрунтовано використання рельєфної поверхні у вигляді сітки лунок на поверхні контакту, зміцненої ППТА, для підвищення характеристик опору зношуванню і втомі в умовах фретингу [15, 23]; досліджено структуру і фазовий склад поверхневого шару ТЛП, зміцнених методом ППТА, мікротвердість поверхневих шарів та їх вплив на триботехнічні характеристики в умовах граничного тертя при терті ковзанні [17]; досліджено рух вихрових потоків рідини у дискретних ділянках трибосполучень, встановлено, що вихрові структури виконують роль «вихрових підшипників», які запобігають руйнуванню поверхонь в місцях контакту в екстремальних умовах експлуатації [18]; встановлено закономірності зношування ТЛП при терті ковзанні з обмеженою подачею мастильного матеріалу. Проаналізовано напружений стан в зоні трибоконтакту, виявлено зниження залишкових напружень в місцях розташування лунок за рахунок їх перерозподілу на поверхні тертя [19]; експериментально досліджено вплив середовища при формуванні електроіскрових покриттів на триботехнічні характеристики в умовах фретингу. Встановлено закономірності зношування покриттів, досліджено їх фізико-механічні властивості [20]; запропоновано механізм мастильної дії дискретної ділянки при терті ковзання ТЛП в екстремальних умовах експлуатації, який пришвидшує процес регенерації граничної мастильної плівки, забезпечує високу швидкість змочування місць фактичного контакту трибосполучень та базується на гідродинамічних процесах [21]; сформовані системні уявлення про закономірності і процеси впливу напруженості магнітного поля на механізм вилучення продуктів зношування.

Встановлено і експериментально підтверджено, що ефект притягування продуктів зношування до дискретних ділянок ТЛП є результатом збільшення на 10–26 % напруженості магнітного поля кромek лунок у порівнянні з напруженістю магнітного поля у міжлунковому просторі [22, 60]; побудовані математичні моделі технологічного процесу формування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками в умовах фретингу, які враховують розміри, розташування і глибину дискретних ділянок для оцінки триботехнічних характеристик для різних умов експлуатаційного навантаження, що дозволяє отримати оптимальні технологічні параметри їх формування [24]; проаналізовано методи інженерії для підвищення зносостійкості деталей і вузлів машин і механізмів [26]; теоретично і експериментально обґрунтовано концептуальний підхід щодо створення ТЛП з поглибленими дискретними ділянками на базі застосування системного підходу для вирішення проблем тертя та зношування машин та механізмів [28]; проаналізовано зміну діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат при впливі магнітного поля і температури на мастильні матеріали. Доведено, що в умовах трибоконтaktu з ТЛП менше енергії необхідно витратити на відновлення вторинних структур, регенерацію зруйнованих граничних мастильних плівок на поверхні трибоконтaktu за рахунок збільшення взаємодії діамагнітних молекул вуглеводню з парамагнітними молекулами кисню, що підтверджується зростанням тангенса кута діелектричних втрат в 1,8 рази [29, 30]; проаналізовано взаємодію періодично текстурованих поверхонь з урахуванням фрикційного проковзування [32, 36]; проаналізовано процеси у дискретних ділянках ТЛП контактуючих деталей при застосуванні комплексного підходу наукових досліджень процесів тертя та зношування за різними науково-технічними напрямками – математичної статистики, механіки контакту, фізики поверхонь, магнітних явищ, гідродинаміки [34, 35]; розроблено способи створення дискретних поверхонь, які базуються на формуванні рельєфу лунок як без, так і з подальшим їх зміцненням методом ІПТА [54, 55]; запропоновано спосіб підвищення зносостійкості допоміжних накладок корінних листів та опорних сухарів ресор автомобілів за рахунок утворення на них механічним способом рельєфу лунок на поверхні тертя з застосуванням додаткового пристрою мащення [56]; запропоновано способи обробки деталей методом електроіскрового легування для підвищення зносостійкості деталей і вузлів тертя [57, 58]; запропоновано новий спосіб обробки поверхонь деталей шліфувальним електродом-інструментом [59].

Апробація результатів дисертації. Загальні результати роботи доповідались на V, VI, VII, XI Міжнародних науково-технічних конференціях АВІА–2003, АВІА–2004, АВІА–2006, АВІА–2013 відповідно (м. Київ, 2003, 2005, 2013 р.р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Політика розвитку авіації в XXI столітті» (м. Київ, 2008 р.); науковій сесії, яка проведена науковою радою з проблеми «Механіка деформованого твердого тіла» при відділенні механіки в Національній академії наук України (м. Полтава, 2008 р.); VIII Міжнародній науково-методичній конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій АПК» (м. Харків, 2010 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського

виробництва» (м. Харків, 2010 р.); 10-му Ювілейному Міжнародному науково-технічному семінарі (м. Свалява, 2010 р.); Міжнародній науково-методичній конференції «Сучасні проблеми трибології» (м. Київ, 2010 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми динаміки та міцності у турбомашинобудуванні» (м. Київ, 2011 р.); X, XI Міжнародних науково-технічних семінарів «Сучасні проблеми виробництва і ремонту в промисловості і на транспорті» (м. Свалява, 2010, 2011 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Технічний прогрес в АПК» (м. Харків, 2011 р.); XI Міжнародній науково-методичній конференції «Інженерно-технічне забезпечення інноваційних технологій сервісу машин» (м. Харків, 2011 р.); Науково-технічному семінарі «Новітні триботехнології» при Раді трибологів Національного авіаційного університету (м. Київ, 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу» (м. Харків, 2015 р.); Міжнародних наукових сесіях «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин» (м. Харків, 2014, 2015 рр.).

Публікації. Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані в 60 наукових працях, у тому числі: 30 праць у фахових виданнях переліку МОН України; 6 наукових праць в іноземних спеціалізованих виданнях і виданнях України, які внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз даних; 17 матеріалів та тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах; 7 патентів України.

Структура і обсяг дисертації. Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 460 сторінок. Дисертація містить 225 ілюстрацій (із них тих, що займають повну сторінку – 67), 47 таблиць (із них тих, що займають повну сторінку – 13). Список використаних джерел із 663 найменувань займає 65 сторінок. Додаток містить 26 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 289 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито суть наукової проблеми й обґрунтовано актуальність її вирішення, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульована мета та завдання, намічені шляхи їх досягнення. Викладено основні положення, що виносяться на захист, показана наукова новизна та практична цінність дисертаційних досліджень і особистий внесок дисертанта у вирішення проблеми, приведено відомості про апробацію та реалізацію й повноту їх викладення в публікаціях.

У першому розділі наведені результати аналізу вітчизняних і закордонних джерел, пов'язаних із дослідженням загальної проблеми підвищення зносостійкості деталей і вузлів ТСП, у тому числі з її рішенням на основі використання технологічних процесів, проведене обґрунтування актуальності та визначені основні напрямки досліджень.

На основі аналізу технічного стану та умов експлуатації ТСП зроблено висновок, що терміни їх служби та ресурси значною мірою залежать від

довговічності деталей трибосполучень, адже близько 80–90 % відмов техніки відбувається в результаті контактній взаємодії під час експлуатації, 30–40% передумов до дострокового знімання виробів з експлуатації зумовлено недостатньою міцністю поверхні деталей та їх низькою зносостійкістю, якому сприяють високі експлуатаційні навантаження.

Статистичні дані показують, що велике розмаїття конструктивних елементів вузлів тертя, робочого середовища, умов навантаження разом з широким сполученням різновидів тертьових деталей, характеру ушкоджень рухомих з'єднань деталей і вузлів створюють різні умови протікання різних трибологічних процесів і видів тертя та зношування, основними з яких є зношування при фретингу, фретинг-утома, абразивне зношування, граничне тертя та ін. З усіх відбракованих деталей ТСП найбільшу кількість складають вироби зі сталей різних марок, серед яких найбільший відсоток браку (30 %) припадає на деталі із конструкційних сталей 30ХГСА, 40ХН, 15Х), причому близько 50 % з них відновленню не підлягають.

Сьогодні вирішення проблеми підвищення зносостійкості деталей і вузлів ТСП, все тісніше пов'язується з розвитком технологій інженерії поверхні (Surface Engineering). Інноваційний характер розвитку інженерії поверхні охоплює комплекс наукових напрямків різних наук і знань, об'єднує методи цілеспрямованої зміни фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів матеріалів шляхом деформування, модифікування, нанесення плівок, покриттів, захисних шарів різними методами та їх комбінаціями.

Тенденція розвитку дискретних поверхонь характеризується тим, що суцільні захисні структури, що формуються на поверхні деталей, не завжди дозволяють забезпечити високу зносостійкість трибосполучень при різних видах тертя та зношування. Тому в роботі проведено аналіз наукових джерел, який пов'язаний з технологічними процесами формування дискретних (текстурованих) поверхонь, дослідження їх структури, складу й властивостей. Відмічено, що дискретні поверхні за своїми фізико-механічними і триботехнічними властивостями відповідають основним вимогам щодо захисних структур для рухомих з'єднань силових елементів сталевих деталей ТСП.

Проблему підвищення зносостійкості поверхневого шару деталей і вузлів ТСП текстурованими поверхнями із заданими властивостями в екстремальних умовах експлуатації і розробку технологічного процесу їх оптимального зміцнення можна ефективно вирішити тільки при комплексному використанні наукових знань матеріалознавства, фізичних процесів перетворення структури та аналізу впливу цих процесів на триботехнічні характеристики.

Таким чином, основною причиною, яка перешкоджає вирішенню задач докорінного удосконалення зміцнення деталей і вузлів ТСП на базі застосування текстурованих поверхонь є те, що, не зважаючи на накопичений досвід, загальну позитивну оцінку та доцільність застосування у виробництві машинобудівної галузі, технологія створення текстурованих поверхонь і зокрема ТЛП має ряд невирішених проблем, недостатня вивченість яких ускладнює розробку науково-обґрунтованих принципів їх реалізації. Крім того, уявлення про одночасне підвищення триботехнічних характеристик в різних умовах експлуатаційних навантажень є ще

значною мірою гіпотетичним і суперечливим. Ґрунтовних наукових розробок у галузі методології підвищення зносостійкості деталей і вузлів ТСП на основі ТЛП не проводилось, а наявність існуючих не відповідає їх умовам експлуатації та не супроводжується теоретичним аналізом і узагальненням. Емпіричні результати, що здатні бути основою для створення методології системного дослідження, розрізнені явища й процеси, які суттєво впливають на їх триботехнічні характеристики, недостатньою мірою вивчені, описані та оцінені. Унаслідок відсутності загальної інформаційної бази наявні експериментальні відомості не складаються у закінчену систему наукового знання, а їх обсяг і зміст не дозволяють створити й розробити методи керування властивістю поверхневих шарів ТЛП. Більшість відомостей отримані емпіричним шляхом і впроваджувались у практику після вдалих поодиноких дослідів, а не систематично проведеними науковими дослідженнями. Це обумовлює необхідність цілеспрямованого продовження досліджень з метою встановлення поряд із раніше відомими нових наукових фактів, їх систематизації, узагальнення і на цій підставі створення нового принципу формування ТЛП, що дозволить змінювати їх будову й властивості у необхідному напрямку та створювати із заздалегідь заданими триботехнічними характеристиками для різних умов експлуатаційного навантаження конструктивних елементів ТСП.

Перспективним для підвищення зносостійкості деталей і вузлів ТСП є розробка комбінації технологій поверхнево-пластичного деформування та іонного азотування. Такий комплексний підхід дозволяє нейтралізувати розміцнюючу дію ТЛП, як концентратора напружень, що знижує міцність основи. Розробка комбінованого технологічного процесу дозволить повернути міцність ТЛП до вихідного положення та надати їй властивостей багатофункціональності.

Виходячи з результатів проблемного аналізу, визначена мета роботи і напрямки вирішення поставленої наукової проблеми.

У другому розділі описана загальна методологія досліджень, проведених в роботі, що базується на застосуванні системного підходу для вирішення наукової проблеми, і передбачає аналіз системного оточення й формування множини стратегій вибору, функціонально-морфологічний аналіз і розробку системи показників якості, а також математичні описи й моделювання технологічного процесу з метою синтезу розрахункових варіантів і створення механізму вибору кращого з них.

Науково-методологічною основою підвищення зносостійкості деталей і вузлів ТСП на основі ТЛП є системність та комплексний характер наукових досліджень, який включає технології, експеримент, моделювання, розрахунки, визначення НДС, механічних та триботехнічних характеристик для різних умов тертя і зношування, що дозволяє логічно упорядкувати складні процеси дослідження на спільній методологічній інформаційній базі системного підходу. В основі системного підходу лежать відомі принципи цілеспрямованості, моделювання, фізичності, що визначає основні процедури проведення системних досліджень: декомпозицію, змістовний аналіз, формалізований опис, моделювання, дослідження, вибір оптимального варіанту.

Проведення досліджень на основі системного підходу становить собою ієрархічну структуру методологічних рівнів. На рівні проблемного аналізу з'ясовується сутність проблемної ситуації та актуальність проблеми, визначається мета дослідження та основні задачі її вирішення. На концептуальному рівні дослідження аналізується системне оточення, виділяється й обґрунтовується вибір технологічного процесу. На операційному рівні дослідження проводиться функціонально-морфологічний аналіз, визначаються фізико-механічні і триботехнічні показники, здійснюється вибір кращих режимів для системного дослідження технологічного процесу на детальному рівні і розробку його математичних моделей. На детальному рівні дослідження здійснюється вибір оптимальних проектних рішень, обґрунтування й оцінка оптимальних параметрів технологічного процесу, які дозволять вирішити наукову проблему.

Для визначення оптимальних параметрів технологічного процесу формування ТЛП використано метод багатофакторного планування експерименту та математичної обробки статистичних даних, який дозволяє представити технологічний процес у вигляді функціональної залежності вхідних та вихідних параметрів. Тобто технологію формування ТЛП розглянуто як спосіб управління властивостями поверхневого шару. При проведенні комплексних досліджень, що пов'язані з експериментальним визначенням основних триботехнічних характеристик сталевих деталей з ТЛП, задачу оптимізації технологічного процесу їх формування розглянуто як багатопараметричну з врахуванням конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів. Об'єктивна та повна оцінка умов роботи деталей вузлів і механізмів при різних видах тертя та зношування дозволяє в якості критеріїв оптимізації технологічного процесу формування ТЛП вибрати: технологічні залишкові напруження (Y_1), знос ТЛП в умовах абразивного зношування (Y_2); зношування ТЛП в умовах фретингу (Y_3); інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, температура трибоконтакту ТЛП при терті ковзанні в умовах обмеженої подачі мастильного матеріалу відповідно (Y_4 , Y_5 , Y_6). При виборі керованих факторів використано методи експертної оцінки на основі яких було визначено групу факторів, що впливають на величину критеріїв оптимізації, та рівні їх варіювання. Аналіз результатів експерименту й розрахунок моделей проводився з використанням пакету прикладних програм (ППП) «ПРІАМ».

Визначення залишкових напружень у ТЛП здійснювалось на основі експериментально-розрахункового методу гнучкого зразка, який полягає у тому, що під дією залишкових напружень у ТЛП, довга, вузька і тонка пластинка, на якій воно сформовано, деформується у вигляді дуги кола. Прогин або радіус кривизни деформованого зразка дозволяє розрахувати залишкові напруження згідно плану експерименту.

Для розрахунку НДС дискретних ділянок і ТЛП в цілому, розподілу температурних полів у трибосполученнях ТЛП, які виникають під час роботи вузлів тертя, використано програмний комплекс MSC.Nastran (S/N: 1414576-b7e7e6549c912cfc36a5).

Формування ТЛП з заданою текстурою здійснювалось на поверхні зразків шляхом пластичної деформації матеріалу при динамічній дії індентора за

допомогою спеціального пристрою (рис. 1), який дозволяє регулювати глибину дискретних ділянок (лунок) – X_3 , а також відстань у рядку – X_2 і відстань між рядами дискретних ділянок – X_1 (рис. 2). Глибину лунок вимірювали вертикальним оптиметром ОВО-1.

Для зміцнення поверхневого шару ТЛП використано метод ПТА. Нанесення азотованого шару на зразки здійснювалося на установці ВПА-1 за наступними режимами: тривалість процесу – 140–190 хв; тиск реакційного газу – 100–115 Па; склад реакційної суміші – 90 % N_2 + 5 % C_3H_8 + 5 % Ar ; температура у вакуумній камері – 570–600 °С.

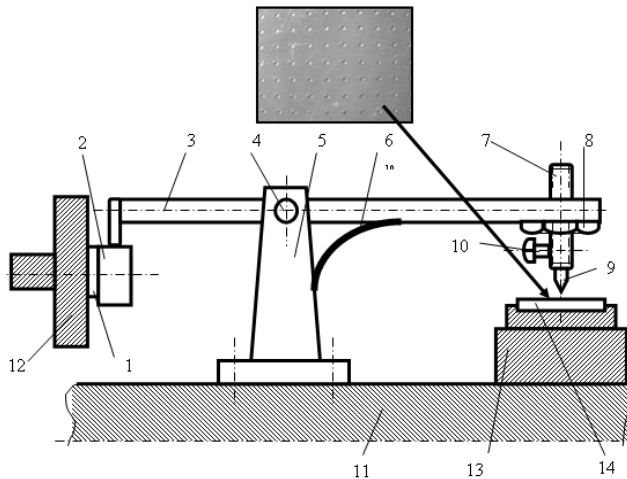


Рис. 1. Пристрій для утворення лунок: 1 – приводний вал; 2 – кулачок; 3 – коромисло; 4 – вісь коромисла; 5 – стояк осі коромисла; 6 – пружина; 7 – регулювальний гвинт; 8 – контргайка регулювального гвинта; 9 – бойок; 10 – механізм кріплення бойка; 11 – основа; 12 – патрон; 13 – механізм переміщення; 14 – деталь (зразок)

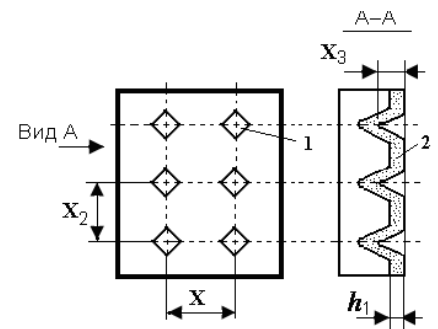


Рис. 2. Загальна схема ТЛП, зміцненої ПТА:
1 – лунка; 2 – покриття;
 h_1 – товщина покриття

Нанесення покриттів на робочі ділянки зразків методом електроіскрового легування проводилось на установці «Елітрон-22», в якості аноду використовували сплав на основі ВК8. На робочих поверхнях зразків було сформовано дискретні структури шляхом нанесення електроіскрового покриття ВК8+М, суть якого полягає у тому, що перед формуванням покриття поверхню деталі змащують мастилом нафтового походження, яке служить оточуючим поверхню деталі середовищем.

В якості матеріалу, на якому формували дискретні поверхні, використовували конструкційну сталь 30ХГСА. Після нанесення дискретних ділянок зразки з конструкційної сталі 30ХГСА пришлифовували з наступною термічною обробкою: загартування - нагрів до 810 °С і охолодження в оливі та відпуск при температурі 520 °С протягом однієї години. Форма і розміри зразків виконувалися згідно визначених стандартів, в залежності від типу установки і виду тертя та зношування. Шорсткість робочих поверхонь доводилась до $R_a=0,32-0,63$ і контролювалася профілограф-профілометром моделі 296 з цифровим відліком і індуктивним перетворювачем (ТУ 2-034-4-83), який дозволяє вимірювати параметр шорсткості R_a згідно ГОСТ 2789-73. Мікротвердість визначали мікротвердоміром ПМТ-3М, час витримування під навантаженням – 20 с, крок вимірювання по товщині зразка –

30–40 мкм. Визначали середнє значення мікротвердості за результатами п'яти вимірювань

Випробування в умовах абразивного зношування здійснювали на випробувальній установці у відповідності з ГОСТ 23.208–79. Зразки з розмірами 30×30 мм і товщиною 4,0 мм зношувались за допомогою вільного абразиву, який подавався через гумовий ролик на поверхню тертя. В якості абразиву використовувався кварцовий пісок (SiO₂) зернистістю від 50 до 315 мкм. Перед випробуванням абразив просушували (вологість не перевищувала 0,16 %). Експеримент проводили при навантаженні 14,7–44,1 Н.

Дослідження триботехнічних характеристик зразків в умовах зношування при фретингу проводили на установці МФК–1, в основу якої покладено торцеве тертя контактуючих зразків, виконаних у вигляді втулки (рухомий зразок) і циліндра (нерухомий зразок). Площа контакту дорівнювала 0,5 см². Відповідно до методики досліджували залежність зношування і коефіцієнта тертя зразків в умовах фретингу від амплітуди і питомого навантаження. Випробування проводились при граничному мащенні в середовищі мастила ЦИАТИМ–201.

Експериментальне визначення характеристик опору втомі та фретинг-втомі проводили на установці ВЛЗ (на базі електродинамічного вібростенду; сертифікаційний № UA6.001.Н.313) в режимі резонансних коливань за нормальних лабораторних умов. Плоскі консольні зразки корсетного типу випробували за умов симетричного поперечного згину. За критерій руйнування зразка приймали падіння власної частоти коливань на 1 %, порівняно з початковим резонансним значенням, що відповідало зародженню в «небезпечному» перерізі зразка поверхневої напівеліптичної макротріщини глибиною до 0,1 мм. Частота резонансних коливань зразків при випробуваннях на втому складала ~ 130 Гц, на фретинг-втому ~ 75 Гц.

Для визначення фактичного напруження при дослідженні зразків з ТЛП в умовах фретинг-утоми була виведена формула, яка враховувала їх руйнування в різних місцях по довжині l_i

$$\sigma_a = \sigma_a^T \frac{h_i \cdot b_T \cdot l_i}{h_T \cdot b_i \cdot l_T},$$

де σ_a^T – амплітуда напружень у найменшому перерізі зразка, на якому було виконано тарування; h_T, b_T, l_T – товщина, ширина та відстань від вільного кінця протарованого зразка, відповідно; h_i, b_i, l_i – розміри перерізу і відстань до нього в місці руйнування i -го зразка.

Формула була виведена за умов, що розмах коливань $2\lambda = \text{const}$ для різних зразків, а саме протарованого та i -го, і еквівалентна розмаху 2λ сила навантаження на вільному кінці постійна по довжині i -го зразка (рис. 3).

Дослідження триботехнічних характеристик зразків при терті ковзанні в умовах граничного змащення проводили відповідно до ГОСТ 26614–85, який встановлює метод дослідження матеріалів при терті ковзанні з обмеженою подачею мастильного матеріалу. В якості матеріалу зразка використовували сталь 45 і контрзразка сталь 30ХГСА загартовані. В якості мастильного середовища застосовували індустріальне мастило И–20А відповідно до ГОСТ 20799–75. Для забезпечення режиму

граничного змащення застосовували мастильний пристрій відповідно до рекомендацій ГОСТ 26614–85. Величину зношування зразків визначали як різницю у вазі до і після випробувань на аналітичних терезах АДВ–200 з точністю до 0,0001 г. Для цього після випробувань зразки промивали, використовуючи рідини у послідовності бензин (ГОСТ 443–76), ацетон (ГОСТ 2603–79), спирт етиловий (ГОСТ 18300–72) та сушили на повітрі.

Мікроструктурні дослідження виконувалися з використанням методів растрової електронної мікроскопії і рентгенівського мікроаналізу. Дослідження проводилися на електронному мікроскопі мікроаналізаторі “CamScan–4DV”. Визначення хімічного складу поверхні зразків проводилося на основі методики кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу ZAF–4/FLS за допомогою дисперсного енергетичного спектрометра LZ–5 з обробкою отриманих результатів, включаючи кількісний аналіз системою “Link–860”. Рентгеноструктурний аналіз проводили на дифрактометрі «Дрон–4–13С» у залізному характеристичному випромінюванні. Дифракційні максимуми реєструвались у дискретному режимі з кроком $0,1^\circ$, час експозиції у точці – 2 с.

У третьому розділі встановлені закономірності виникнення залишкових напружень у ТЛП і окремих дискретних ділянках з застосуванням комплексного підходу, який базується на розрахунково-експериментальному, математичному методах і методі скінченно-елементного аналізу. На основі проведених досліджень обґрунтовано вибір оптимальних конструктивно-технологічних параметрів ТЛП за умов мінімізації її НДС та запропоновано шляхи зменшення залишкових напружень.

Залишкові напруження визначались за формулою

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{16EH^2 f}{3a^2 h},$$

де E – модуль пружності першого роду (МПа); a – довжина зразка, м; f – прогин зразка, м; H , h – товщина основи зразка і глибина дискретної ділянки, відповідно, м.

Аналіз результатів розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень показав, що у поверхневому шарі ТЛП виникають залишкові напруження розтягу. Рівень залишкових напружень носить нерівномірний характер і залежить від фізико-механічних властивостей поверхневого шару, технологічних параметрів, а також від сформованої текстури дискретної поверхні: відстані між рядками X_1 , відстані у рядку X_2 і глибини дискретної ділянки X_3 .

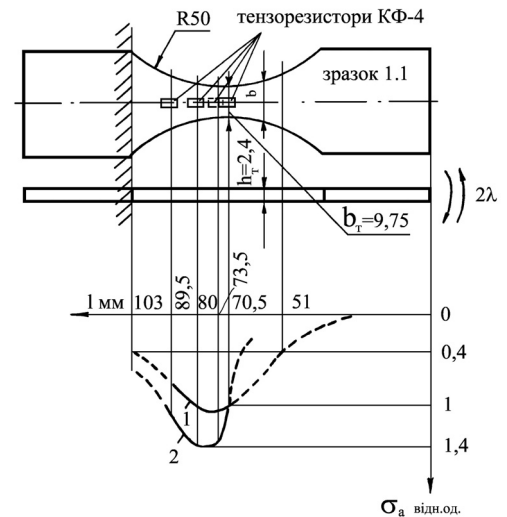


Рис. 3. Креслення зразка, схема його навантаження та епюри амплітуд напружень: 1 – випробування на втому; 2 – випробування на фретинг-втому (з закріпленням на зразку динамометричним кільцем)

Розроблена і проаналізована модель процесу формування окремої дискретної ділянки, відповідно до якої на початковому етапі при впровадженні індентора 2 здійснюється деформація поверхневого шару деталі 1 під дією навантаження P , яке залежить від вибраної частоти коливання ударного пристрою і твердості поверхневого шару матеріалу (рис. 4). Переважаючими на цьому етапі є залишкові

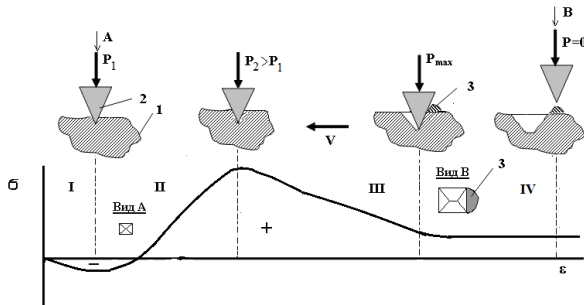


Рис. 4. Модель процесу формування лунки: 1 – деталь; 2 – індентор; 3 – наплив

напруження стиску, які при збільшенні пластичної деформації індентором призводить до зміни знаку напружень і формуванням максимальних залишкових напружень розтягу. Подальше проникнення і одночасне тангенціальне зміщення індентора, яке залежить від швидкості V руху деталі 1, призводить до деформації передньої кромки дискретної ділянки з одночасним виникненням дефектів у вигляді полос локалізованого зміщення матеріалу по краях

внутрішніх сторін дискретної ділянки і напливу 3 – витиснутої частини деформованого матеріалу і зменшення залишкових напружень розтягу.

Побудовано математичну модель залежності технологічних залишкових напружень ТЛП від конструктивно-технологічних факторів

$$Y_1 = 203,095 + 38,941 x_2^2 - 56,1202 x_3 - 53,3123 x_2 - 48,2674 x_2^2 x_3 - 54,2912 x_2^3 - 84,6669 x_2^3 x_3^2 - 19,9228 x_1 - 29,6173 x_1^2 x_3^2 - 13,7754 x_1 x_2^2.$$

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити оптимальні параметри (відстань між рядками (X_1) – $2,05 \times 10^{-3}$ м, відстань у рядку (X_2) – $2,02 \times 10^{-3}$ м і глибина дискретної ділянки (X_3) – $1,51 \times 10^{-3}$ м) ТЛП, при яких технологічні залишкові напруження розтягу мають найменші значення ($Y_1 = 62,68$ МПа).

Для більш детального дослідження технологічних залишкових напружень у дискретних ділянках було побудовано скінченно-елементні моделі відповідно до кількості зразків із заданими розмірами дискретних ділянок та їх розташуванням. Умови навантаження та закріплення зразків відповідали експериментальним умовам. Розбіжність експериментальних та розрахункових даних склав $\approx 4\%$. Аналіз отриманих моделей дозволив встановити, що більша глибина дискретної ділянки є меншим концентратором напружень для основного матеріалу і їх рівень залежить від значень параметрів X_1 , X_2 , X_3 . Виявлено, що зменшення глибини дискретної ділянки з $1,5 \times 10^{-3}$ м до $0,5 \times 10^{-3}$ м і зменшення відстані між дискретними ділянками з $2,0 \times 10^{-3}$ м до $1,0 \times 10^{-3}$ м призводить до зростання НДС в 3 рази.

Пошаровий аналіз внутрішніх сторін дискретних ділянок дозволив встановити, що при значенні параметру $X_3 = 0,5 \times 10^{-3}$ м формуються максимальні залишкові напруження і вони майже однакові в I і II сторонах дискретної ділянки (рис. 5). Збільшення параметру X_3 до $1,0 \times 10^{-3}$ м зменшує рівень напружень в 1,8 рази на внутрішній поверхні II. На поверхні I вони навпаки збільшуються в 1,1 рази. Це пояснюється тим, що при створенні дискретної ділянки поверхня I піддається більшому пластичному деформуванню зі сторони індентора. При подальшому збільшенні

параметру X_3 до $1,5 \times 10^{-3}$ м ситуація змінюється навпаки. Рівень залишкових напружень внутрішньої поверхні *II* не змінюється, а поверхні *I* зменшується в 1,2–1,5 разів.

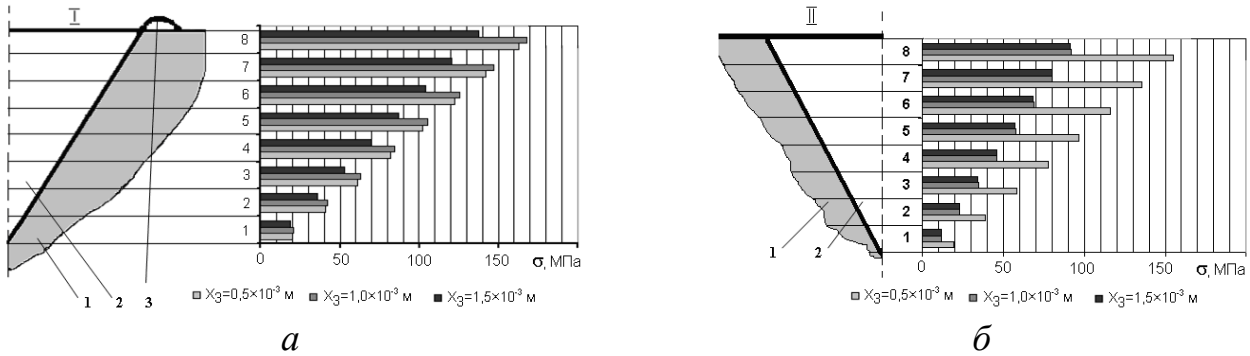


Рис. 5. Пошаровий розподіл залишкових напружень по глибині дискретної ділянки ($X_1 = 2,0 \times 10^{-3}$ м, $X_2 = 2,0 \times 10^{-3}$ м, *I* – основа; 2 – дискретна ділянка; 3 – наплив):

a – внутрішня сторона *I* дискретної ділянки; *б* – внутрішня сторона *II* дискретної ділянки

Найбільшої зміни піддані напруження у 5–8 шарах, у порівнянні з іншими шарами. Високі значення параметрів X_3 ініціюють розвиток смуг локалізованого зміщення матеріалу по краях внутрішніх сторін дискретної ділянки і виникнення сітки мікротріщин (рис. 6, *a*).

Різний рівень залишкових напружень при формуванні дискретних ділянок різного розміру пов'язаний як з проявом масштабного чинника, так і з відомим фактом залежності рівня залишкових напружень від ступеня пластичної деформації матеріалу. Для кожного матеріалу існує певний рівень пластичної деформації, при якому ініціюються максимальні для даних умов навантаження залишкові напруження. Подальша деформація призводить до їх зниження, а можливі порушення суцільності матеріалу ведуть до ще більшого їх зниження, зважаючи на реалізацію одного із способів релаксації залишкових напружень – утворенню розриву атомних зв'язків.

Зміцнення поверхневого шару методом ПТА дозволило усунути залишкові напруження розтягу, а також забезпечити заліковування дефектів на внутрішніх сторонах дискретних ділянок, які виникали в ході технологічного процесу їх формування (рис. 6, *б*), за рахунок збільшення концентрації зв'язаного азоту і його проникнення на більшу глибину у дискретні ділянки.

Дослідженнями мікротвердості поверхневих азотованих шарів ТЛП виявлено зростання її значень до 9500 МПа на поверхні та поступове зменшення до 3600 МПа по глибині зразка. Температура азотування і тиск реакційного газу вибирались за умов забезпечення максимальних значень мікротвердості поверхневих шарів (520–550 °С та 190–210 Па відповідно).

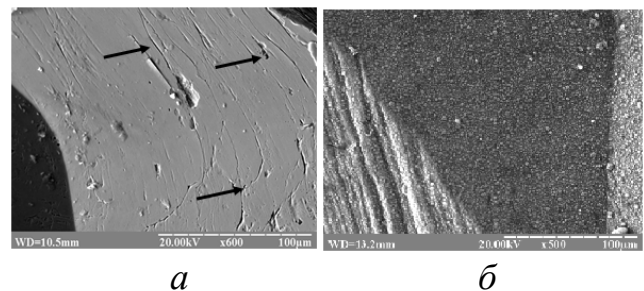


Рис. 6. Поверхня внутрішніх сторін дискретної ділянки: *a* – дефекти у вигляді сітки мікротріщин; *б* – відсутність дефектів після іонного азотування

Рентгеноструктурний аналіз азотованих шарів виявив наявність у них двох зон: нітридної (карбонітридної) та зони внутрішнього азотування. Нітридна (карбонітридна) зона складається з $\text{Fe}_{2,3}(\text{N,C})$, $\text{Fe}_3(\text{N,C})$, $\alpha\text{-Fe}(\text{NC})$, Fe_4N і має глибину 10–15 мкм з максимальною концентрацією азоту більш 7 % мас, зона внутрішнього азотування складається з твердого розчину $\alpha\text{-Fe}(\text{N})$. Загальна глибина дифузійного шару лежить в межах 150–200 мкм. Концентрація вуглецю на поверхні складає близько 1,8 % ат. й зменшується до мінімальних значень на глибину 30 мкм. Наявність вуглецю в цій зоні пояснює утворення карбонітридної ϵ -фази у нітридній зоні за рахунок інтенсивної дифузії вуглецю від основи до поверхні. Збільшення глибини азотованого шару зменшує кількість карбонітридної ϵ -фази і створення γ' -фази.

У четвертому розділі встановлено закономірності зношування ТЛП в умовах абразивного зношування при терті не жорстко закріпленими абразивними частинками, досліджено вплив конструктивно-технологічних і експлуатаційних параметрів на їх зносостійкість, виявлено фізичну природу руйнування поверхневих шарів.

Показано, що підвищення зносостійкості трибосистеми з ТЛП в умовах абразивного зношування досягається проектуванням конструктивно-технологічних параметрів дискретних ділянок з урахуванням розміру абразивних частинок, зміцненням поверхневого шару ТЛП методом ПТА, що дозволяє збільшити зносостійкість в 1,5–3,6 рази (рис. 7).

Розкрито механізм зношування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками в умовах абразивного зношування. Доведено, що визначальним при руйнуванні поверхневих шарів трибоконтакту і внутрішніх шарів ДД є пластичне деформування. Виникнення продуктів зношування є наслідком накопичення пошкоджень, пов'язаних з багатократним пластичним передеформуванням відтисненого матеріалу абразивними частинками (рис. 8). Встановлено, що найбільшому зношуванню піддається дальня поверхня ДД по відношенню до напрямку руху абразивних частинок. Протидія руйнуванню абразивними частинками дальньої поверхні буде визначати зносостійкість окремих ДД і дискретної поверхні в цілому.

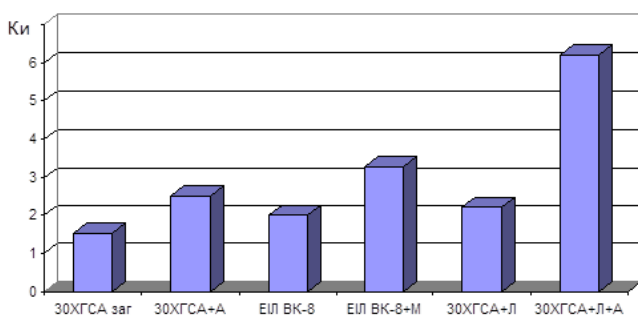


Рис. 7. Величина відносної зносостійкості дискретних поверхонь в умовах абразивного зношування (шлях – 50 м, зернистість абразиву 50–70 мкм, навантаження 44,1 Н): 1 – 30ХГСА; 2 – 30ХГСА+А; 3 – 30ХГСА+Л; 4 – 30ХГСА+Л+А; 5 – ЕП ВК8; 6 – ЕП ВК8+М (А – азотована, Л – лунки)

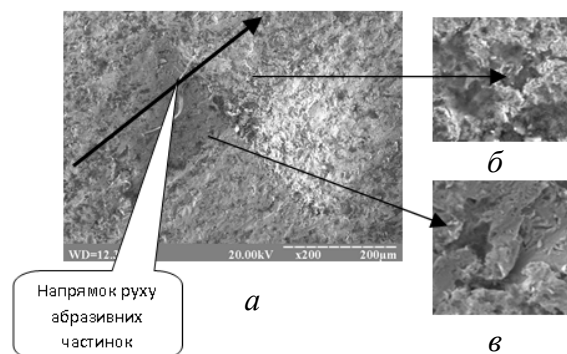


Рис. 8. Поверхня тертя ТЛП після абразивного зношування (відстань між рядками $X_2 = 1,5 \times 10^{-3}$ м, відстань у рядку $X_3 = 2,9 \times 10^{-3}$ м, глибина дискретної ділянки $X_4 = 1,2 \times 10^{-3}$ м): а – загальний вигляд дискретної ділянки; б, в – канавки і заглибини на внутрішній поверхні дискретної ділянки

Встановлено, що зі збільшенням відношення розміру абразивних частинок до глибини дискретної ділянки відносна зносостійкість ТЛП збільшується (рис. 9) за рахунок зменшення кількості локальних контактів абразивних частинок більшої зернистості з поверхнею, у порівнянні з меншою зернистістю, зменшення кількості контактних напружень і руйнувань в місцях трибоконтакту, а також вилученням абразивних частинок у ДД. Поверхня тертя у міжлунковому просторі і внутрішніх поверхонь дискретних ділянок характеризуються наявністю більших за розміром ділянок пластично-деформованого металу, сформованих під впливом великих розмірів абразивних частинок.

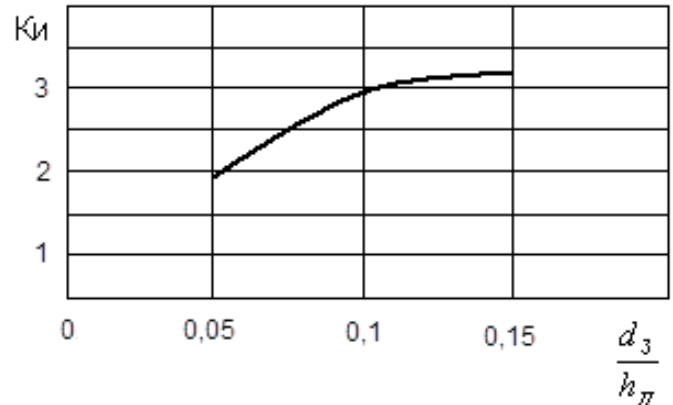


Рис. 9. Залежність відносної зносостійкості ТЛП від відношення розміру зерна абразиву до глибини дискретної ділянки ($X_2=1,9 \times 10^{-3}$ м, $X_3=2,3 \times 10^{-3}$ м, $X_4=1,4 \times 10^{-3}$ м)

При досягненні $d_3/h_{л}=0,1$

тенденція зростання зносостійкості уповільнюється і при $d_3/h_{л} \geq 0,13$ на зносостійкість ТЛП практично не впливає. Це пояснюється тим, що зменшення кількості абразивних частинок, які потрапляють у зону контакту, компенсується збільшенням їх радіусу. Незмінність площі контакту сприяє зберіганню напруженого стану на одному рівні, що стабілізує зношування.

Найбільша зносостійкість досягається при додатковому зміцненні ТЛП методом ПТА (30ХГСА+Л+А) завдяки насиченню поверхневого шару поверхні тертя і поверхневого шару внутрішніх сторін дискретних ділянок азотом у вигляді нітридних і карбонітридних шарів, які протидіють активному руйнуванню поверхні абразивними частками. Крім того, нейтралізація розміцнюючої дії дискретних ділянок іонним азотуванням, висока твердість поверхневого шару її внутрішніх сторін протидіє руйнівним процесам абразивними частками всередині дискретних ділянок при їх вилученні з поверхні тертя. Встановлено, що структура нітридної фази забезпечує заліковуванню дефектів ТЛП, виключає пороутворення та отримання у шарі крихкого нітриду Fe_2N , створюючи, таким чином, оптимальні структурні передумови підвищення зносостійкості. В сукупності всі ці процеси позитивно впливають на триботехнічні властивості трибосполучень, що і визначає високу зносостійкість ТЛП.

Побудовано математичну модель, яка описує залежність критерію оптимізації – знос в умовах абразивного зношування від конструкційно-технологічних та експлуатаційних параметрів

$$Y_2 = 0,00774782 - 0,00891149 x_5^2 + 0,00643125 x_5^3 - 0,00238317 x_1^2 x_3 + 0,00258027 x_1^2 x_3^2 + 0,00333019 x_2^2 x_5^3 + 0,000608442 x_4$$

За результатами багатопараметричної оптимізації ТЛП встановлено оптимальні параметри $X_2=2,25 \times 10^{-3}$ м, $X_3=2,58733 \times 10^{-3}$ м, $X_4=1,6212 \times 10^{-3}$ м, $X_5=270,1232$ мкм, за якими зношування ТЛП у вищезазначених умовах мають мінімальні значення.

У п'ятому розділі визначено закономірності зношування ТЛП в умовах фретингу, побудовано фізичні, математичні моделі, здійснено моделювання температурно-силового навантаження методом скінченно-елементного аналізу, досліджено процеси керування властивостями ТЛП в умовах припрацювання. Досліджено границю витривалості деталей з ТЛП в умовах фретинг-утоми, визначено вплив фретингу та циклічного навантаження на довговічність деталей з ТЛП.

Експериментальними дослідженнями встановлено високу зносостійкість деталей з ТЛП в умовах зношування при фретингу, яка перевищує вихідну поверхню (без

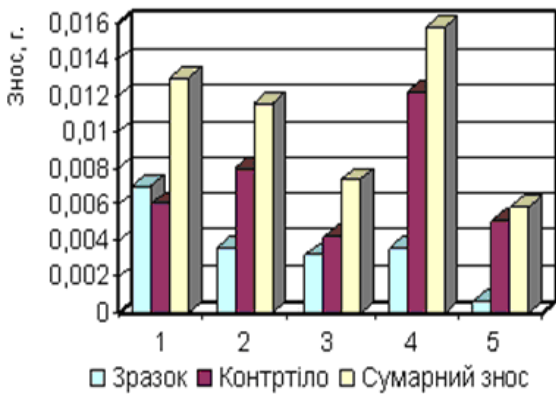


Рис. 10. Діаграма зносостійкості сталі 30XGSA в умовах фретинг-зношування (середовище ЦИАТИМ-201, $P = 20\text{МПа}$, $A = 175\text{ мкм}$, контртіло – сталь 45 заг.): 1 – без покриття; 2 – ЕП ВК8; 3 – 30XGSA+Л; 4 – 30XGSA+A; 5 – 30XGSA+Л+A

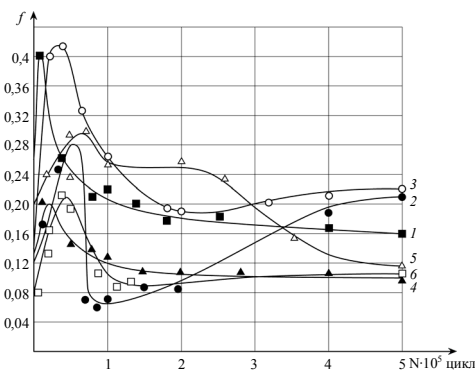


Рис. 11. Залежність коефіцієнта тертя від кількості циклів фретингу в умовах без мащення (1, 3) і з мащенням (2, 4, 5, 6): 1, 2 – електроіскрове покриття ВК8; 3, 4 – електроіскрове покриття ВК8+М; 5 – покриття, нанесене ПТА (30XGSA+A); 6 – ТЛП, зміцнена методом ПТА (30XGSA+Л+A)

лунок) у 1,8–2,44 рази (рис. 10). Найбільша зносостійкість досягається при випробуванні ТЛП, зміцненої ПТА (30XGSA+Л+A). Висока зносостійкість дискретних поверхонь обумовлена тим, що дискретні ділянки представляють собою резервуари для попадання продуктів зношування, що забезпечує стимулювання трибохімічних процесів за рахунок постійного їх видалення з поверхні тертя, та резервуари для утримування мастильного матеріалу, яке використовується для регенерації граничної мастильної плівки у випадках мастильного голодування контактуючих поверхонь. Це забезпечує збільшення тривалості латентного періоду, на протязі якого шар мастильного матеріалу стабільно зберігає захисні властивості.

Ефективність захисної дії граничної мастильної плівки підтверджується найменшим коефіцієнтом тертя в період припрацювання і стабільністю періоду після припрацювання (рис. 11). Встановлено, що застосування ТЛП дозволяє керувати процесами припрацювання в умовах фретингу за рахунок вибору оптимальної текстури ТЛП, що приводить до зменшення коефіцієнта тертя на 57–62 %, зменшення періоду припрацювання на 10–20 %, у порівнянні з вихідною поверхнею, і стабільно низьким коефіцієнтом тертя в період після припрацювання. Для ТЛП, зміцненої іонним азотуванням (30XGSA+Л+A), тривалість періоду припрацювання зменшується в середньому на 38 %. Це можна пояснити тим, що в період припрацювання в результаті процесів пружно-пластичної деформації поверхневого шару здійснюється руйнування граничних мастильних плівок в місцях фактичного

контакту у міжлунковому просторі, схоплювання ювенільних поверхонь тертя, створення первинних продуктів зношування та їх видалення у ДД, запобігаючи виникненню недопустимих процесів пошкодження поверхневого шару. В період після припрацювання у підповерхневих шарах накопичуються втомні мікроруйнування, на контактних ювенільних поверхнях адсорбується кисень і утворюються оксидні плівки. Об'єм продуктів зношування поступово збільшується, але за рахунок можливості їх видалення із зони контакту не виникають великі локальні тиски, запобігаючи дії продуктів зношування як абразивний матеріал (рис. 12, *a*).

В процесі тертя глибина дискретної ділянки поступово зменшується, що призводить до втрачання її здатності виконувати функції видалення продуктів зношування з поверхні тертя. У цей період поверхневий шар матеріалу, який тривалий час піддавався циклічним деформаціям, стає настільки знеміцненим, що втрачає стійкість, і починається його прогресуюче відділення, що проявляється у зростанні швидкості зносу. Високі швидкості зношування можуть призвести до різкого зростання температури, поступового зникнення дискретної ділянки, на їх місці створення поверхні, яка складається зі спечених продуктів зношування у вигляді мікровиступів (рис. 12, *б*). Тобто можна припустити, що за правилом Шарпі ТЛП перетворюються з твердої матриці і м'якої дискретної ділянки у тверду дискретну ділянку і м'яку матрицю.

Моделювання температурно-силового навантаження методом скінченно-елементного аналізу в умовах фретингу дозволило встановити картину розподілу НДС і температури ТЛП. Найбільші напруження виникають у міжлунковому просторі. За рахунок відсутності високих залишкових напружень даний тип модифікації поверхні у вигляді лунок має переваги, у порівнянні з покриттями, для яких характерні різні коефіцієнти температурного розширення матеріалу основи і покриття. Це підтверджується дослідженнями розподілу температури на

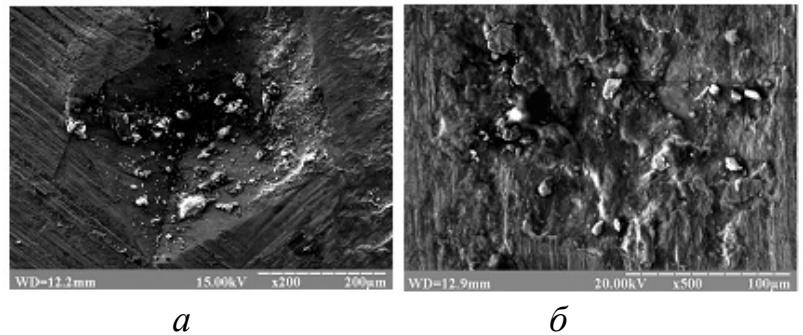


Рис. 12. Поверхня тертя окремої дискретної ділянки: *a* – загальний вигляд; *б* – поверхня дискретної ділянки після зношування

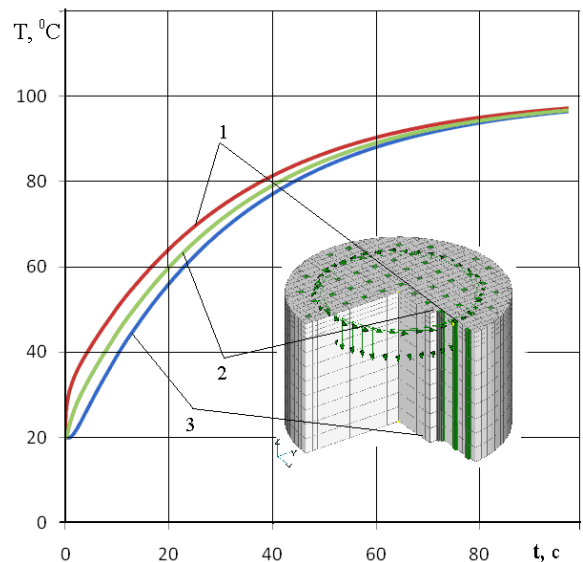


Рис. 13. Розподіл температури на дискретній поверхні зразка залежно від часу: 1 – зміна температури на поверхні між лунками; 2 – зміна температури в лунці; 3 – зміна температури у основи зразка

поверхні трибоконтакту. Відсутність істотного перепаду температур у міжлунковому просторі, у дискретній ділянці і основи матеріалу на поверхні призводить до зменшення термічних напружень (рис. 13).

За результатами експериментальних досліджень побудовано математичну модель в кодованих значеннях, що описує залежність зносу (Y_3) ТЛП від конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів

$$Y_3 = 0,00524817 - 0,0015448x_3 + 0,00172928x_5 + 0,00101434x_4x_5 + 0,000970422x_4 + 0,000572524x_1x_3^2 + 0,000105732x_1^2x_2.$$

За результатами багатопараметричної оптимізації ТЛП встановлено оптимальні параметри, за якими знос має найменше значення (0,0022 г.) у визначених умовах (відстань між рядками – $1,49 \times 10^{-3}$ м, відстань у рядку (шаг) – $2,92 \times 10^{-3}$ м, глибина дискретної ділянки – $1,48 \times 10^{-3}$ м, $P = 9,92$ МПа, $A = 100,6$ мкм).

Експериментальними дослідженнями встановлено, що формування ТЛП знижує границю витривалості зразків зі сталі 30ХГСА в умовах фретинг-утоми в 1,17 рази

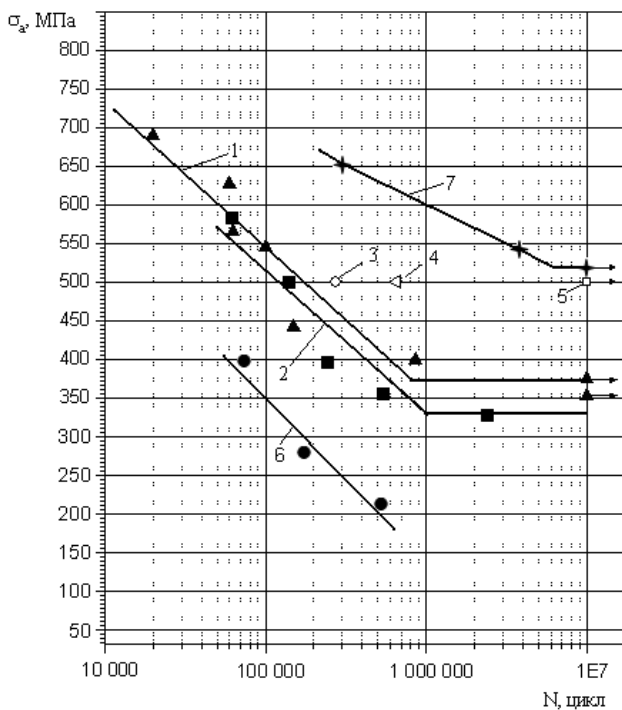


Рис. 14. Результати випробувань на фретинг-утому зразків зі сталі 30ХГСА: 1 – гладкі зразки; 2 – ТЛП; 3, 4, 5 – гладкі зразки (номінальний контактний тиск 56, 70 і 14 МПа відповідно); 6 – електроіскрове покриття ВК8+М; 7 – ТЛП, зміцнених методом ПТА

випробуваннях на фретинг-утому трьох зразків цієї партії жоден з них не зруйнувався від фретингу. Тобто, руйнування проходило від «чистої» утоми в зоні дії максимальних напружень по лінії розташування дискретних ділянок (рис. 16, а). При цьому у перерізі зразків на лінії контакту з контртілом напруження були ~ на 20 % меншими. Незважаючи на це, ці напруження істотно вище, ніж напруження, при яких відбувалося руйнування від фретинг-утоми й утоми зразків

(рис. 14). Фрактографічними дослідженнями поверхонь зламів зразків з ТЛП виявлено, що в умовах фретингу зародження втомних тріщин відбувається в одному, двох чи трьох осередках на поверхні небезпечного перерізу і не зв'язано з розташуванням дискретних ділянок. Тільки в одному випадку тріщини утоми ініціювалися на контурах дискретних ділянок, тому що в цьому випадку край опори контртіла збігся з лінією розміщення дискретних ділянок (рис. 15). Це свідчить також про те, що НДС у зоні фретингу визначає довговічність сталі при фретинг-утомі, а концентрація напружень і залишкові напруження в дискретних ділянках не впливають на граничний стан матеріалу в даних умовах.

Встановлено, що обробка ТЛП ПТА істотно підвищує характеристики опору утомі досліджуваного матеріалу в умовах фретингу. Границя витривалості підвищується ~ у 1,4 рази. При

з дискретними ділянками. Тому передбачувана крива фретинг-утоми зразків з іонним азотуванням дискретних ділянок близька до кривої «чистої» утоми і характеристики опору фретинг-утоми істотно вище, ніж у зразків з ТЛП і у вихідних зразках.

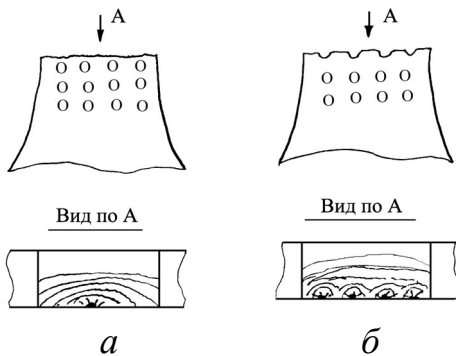


Рис. 15. Схематичне представлення поверхні і зламу зразків з ТЛП, зруйнованих від фретинг-утоми:
а – руйнування поза лунками;
б – руйнування по лунках

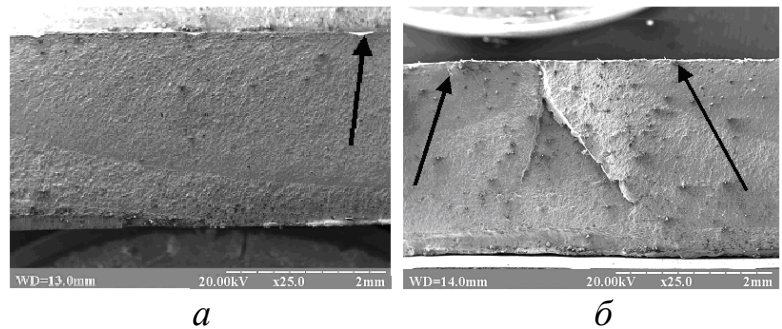


Рис. 16. Фрактографія зразків з ТЛП з наступним іонним азотуванням (*а*) і електроіскровим покриттям ВК8+М (*б*), зруйнованих від фретинг-утоми (стрілкою зазначене осередок зародження утомленої тріщини)

Доведено, що електроіскрове покриття ВК8+М в аналогічних умовах різко погіршує характеристики опору утомі сталі 30ХГСА, як в умовах «чистої» утоми, так і в умовах фретингу, у порівнянні як з вихідним матеріалом, так і з ТЛП. Фрактографічні дослідження встановили два осередки зародження утомної тріщини, що обумовлено наявністю ушкодження вихідного матеріалу в місцях електроіскрового проникнення сплаву ВК8+М у сталь 30ХГСА (рис. 16, *б*). Ці ушкодження знижують вихідні утомні характеристики сталі і значно погіршують опір утомі при додатковому впливі на них зусиль від контакту і тертя в зоні фретингу.

У шостому розділі встановлені закономірності зношування ТЛП при терті ковзання в умовах граничного мащення. Сформовані системні уявлення про закономірності і процеси впливу магнітного поля на механізм вилучення продуктів зношування, запропоновано механізм подачі мастильного матеріалу для регенерації граничної мастильної плівки, побудовані математичні моделі, які дозволили визначити оптимальну текстуру ТЛП.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що найбільшою зносостійкістю і найменшим коефіцієнтом тертя володіють зразки з ТЛП як без (30ХГСА+Л), так і додатково зміцнених методом ПТА (30ХГСА+Л+А) (рис. 17). Процес тертя та зношування ТЛП полягає у деформуванні тонких поверхневих шарів контактуючих мікронерівностей у міжлунковому просторі, яке супроводжується руйнуванням граничної мастильної плівки і вторинних структур за рахунок багаторазового навантаження, створенням і розвитком мікротріщин, їх об'єднанням і виникненням мікропор з розмірами 0,5–2,0 мкм. Продукти

зношування, які виникають у процесі тертя та зношування будуть видалятися у дискретні ділянки.

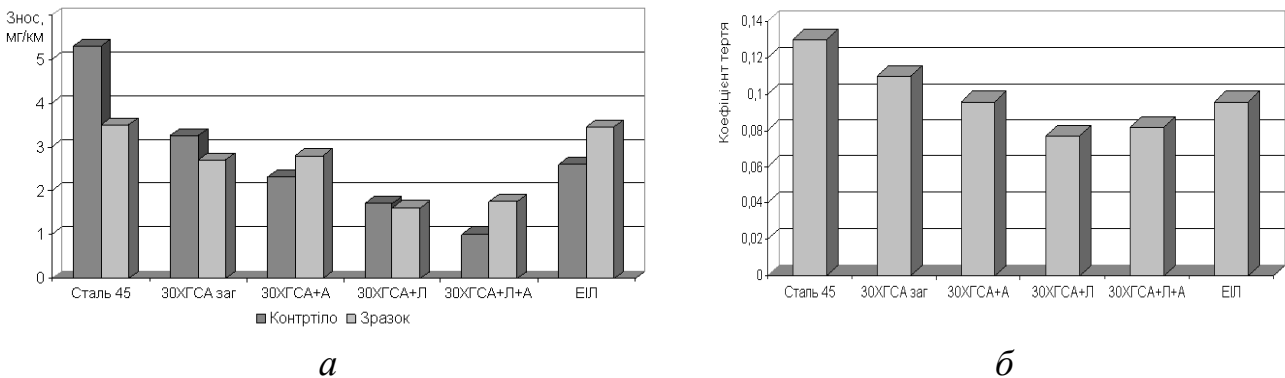


Рис. 17. Триботехнічні характеристики ТЛП при терті ковзанні в умовах граничного мащення (шлях – 2000 м, швидкість ковзання 0,625 м/с, питоме навантаження 10,0 МПа, середовище – індустріальне масло И–20А, матеріал зразка – сталь 45 загартована):
a – знос; *б* – коефіцієнт тертя

Доведено, що висока зносостійкість ТЛП, зміцненої методом ПТА (30ХГСА+Л+А), в цілому, так і окремих дискретних ділянок обумовлена високою захисною дією поверхневих азотованих шарів та їх високою твердістю, що посилює ефект гальмування виникнення дефектів у поверхневих шарах трибоконтакту. Це призводить до зменшення інтенсивності утворення продуктів зношування у поверхневому шарі ТЛП, а відповідно і до підвищення її зносостійкості. Крім того, висока твердість азотованого шару призводить до підвищеного зношування поверхневого шару зразка і до зростання коефіцієнта тертя трибосполучення.

Сформовані системні уявлення про закономірності і процеси впливу магнітного поля на механізм вилучення продуктів зношування, які на відміну від існуючих враховують дію внутрішнього магнітного поля кромки дискретних ділянок. Експериментальними дослідженнями встановлено, що ефект притягування продуктів зношування до дискретних ділянок ТЛП є результатом збільшення на 10–26 % напруженості магнітного поля кромки дискретних ділянок у порівнянні з напруженістю магнітного поля у міжлунковому просторі.

У результаті силової взаємодії між магнітним полем частинки продуктів зношування і магнітним полем кромки дискретних ділянок, яке набагато перевищує магнітне поле продуктів зношування і шорсткості поверхні тертя, утворюється неоднорідне результуюче поле, що призводить до виникнення пондеромоторної сили, яка діє на частинку і спрямовує її в бік більшої індукції магнітного поля кромки дискретних ділянок (рис. 18). Пондеромоторна сила F_{Π} змушує продукти зношування концентруватися у більшій кількості біля передньої кромки, у порівнянні з задньою. Це пояснюється дією результуючої сили R на потік мастильного матеріалу, яка обмежує концентрацію продуктів зношування біля задньої кромки дискретної ділянки, переміщуючи частину їх до передньої кромки і у її середину. В результаті більшому зношуванню піддаються вершини передньої

кромки дискретної ділянки, у порівнянні з задньою, що підтверджується фрактографічними дослідженнями поверхні тертя ТЛП.

Крім того, результуюча сила R , що складається із сил поверхневого натягнення рідини F_n і інерційної F_i , забезпечує високу швидкість розтікання мастильного матеріалу на ділянках фактичного трибоконтакту у міжлунковому просторі, пришвидшує процес регенерації граничної мастильної плівки, яка визначається часом адсорбційного заповнення розривів її ділянок. В сукупності ці процеси призводить до зменшення коефіцієнта тертя, роблять тертя при граничному мащенні ТЛП більш стійким.

Дослідженнями доведено, що в умовах трибоконтакту з ТЛП при поглинанні енергії магнітного поля мастильним матеріалом, менше енергії необхідно витратити на регенерацію граничних мастильних плівок на поверхні трибоконтакту за рахунок збільшення кількості діаманітних молекул мастильного матеріалу, що підтверджується зростанням тангенса кута діелектричних втрат в 1,8 рази (рис. 19). Це пов'язано з формуванням іон-радикальних комплексів і комплексів з переносом заряду, що сприяє збільшенню релаксаційних втрат за рахунок збільшення числа дипольних молекул і слабо зв'язаних іонів. Це можна пояснити тим, що при підвищенні температури молекули мастильного матеріалу набувають теплову енергію (W_T) і отримують можливість орієнтуватися в магнітному полі, яке створюється кромками дискретних ділянок ($W_{кр}$). Це призводить до появи дипольно-орієнтаційної поляризації молекул мастильного матеріалу завдяки тому, що $W_{кр} > W_T$.

У разі виходу за межі магнітного поля, в процесі тертя молекули мастильного матеріалу зберігають енергію свого магнітного поля. Як відомо, період релаксації енергії протона водню, після зняття магнітного поля, становить близько

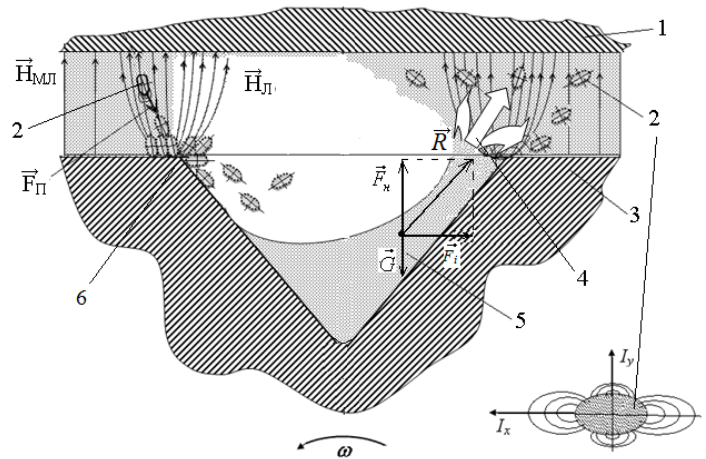


Рис. 18. Фізична модель впливу магнітного поля на механізм вилучення продуктів зношування в дискретну ділянку: 1 – зразок; 2 – частинка продуктів зношування; 3 – контрзразок; 4 – потік мастильного матеріалу під впливом результуючої сили; 5 – мастильний матеріал; 6 – передня кромка; I_x і I_y – горизонтальна і вертикальна складова намагніченості; H_D – екіпотенціальні поля рівного потенціалу кромки дискретної ділянки; H_{ML} – екіпотенціальні поля рівного потенціалу міжлункового простору

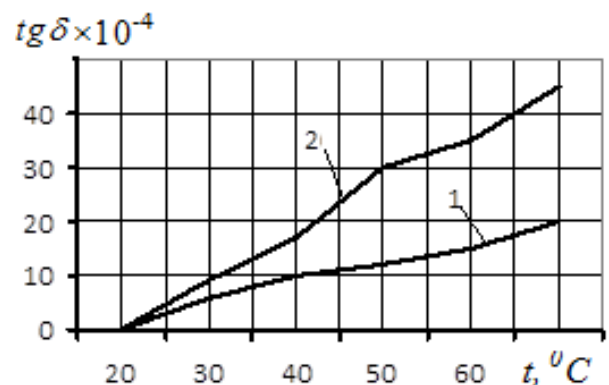


Рис. 19. Залежність тангенса кута діелектричних втрат $tg \delta$ мінеральної оливи від температури і магнітного поля: 1 – $tg \delta$; 2 – $tg \delta$ після впливу магнітного поля

10^3 – 10^4 сек., а у електрона - сота частка секунди (енергія віддається решітці). Протон, за рахунок надтонкої взаємодії, передає енергію електрону, швидкість його обертання навколо атома водню зростає, збільшуючи індукцію магнітного поля. Це призводить до того, що процеси регенерації граничної плівки у міжлунковому просторі відбуватимуться при менших витратах енергії.

Методом скінченно-елементного аналізу встановлено, що наявність дискретних ділянок на поверхні тертя як без, так і зміцнених методом ПТА призводять до зниження напружень в місцях їх розташування за рахунок їх перерозподілу по поверхні тертя, сприйняттям азотованим шаром на себе більшої частки навантаження (рис. 20). По глибині (товщині) елемента напружений стан між азотованою поверхнею та основним матеріалом є досить значним, перепад напружень складає приблизно 21–28 % (рис. 21).

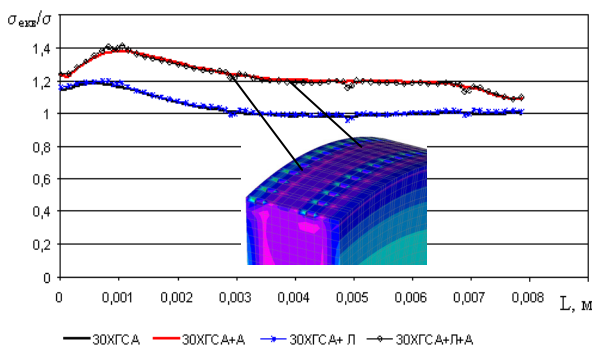


Рис. 20. Розподіл відносних еквівалентних напружень в поверхневому шарі елемента по його довжині

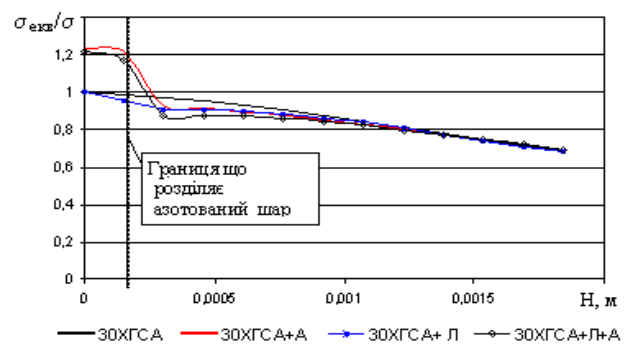


Рис. 21. Розподіл відносних еквівалентних напружень по глибині деталі вздовж осі Y (0 відповідає поверхні зразка)

Азотований шар розвантажує основний матеріал, який має меншу границю міцності, саме таким чином підвищуючи загальний ресурс усієї деталі (конструкції). Високу зносостійкість азотованого шару та стійкість проти його розтріскування, в якому зазвичай проходить когезійне відшарування покриття від основи, можна пояснити тим, що азотована поверхня не являє собою покриття з різко відмінними від неї властивостями. Спостерігається повільний перехід структурного складу азотованого шару з великим вмістом нідрідних і карбонітридних фаз безпосередньо на поверхні з поступовим їх зменшенням по глибині, що створює плавне зниження характеристик опору деформуванню і відсутність високих градієнтів зміни властивостей, про що свідчать результати заміру твердості у підповерхневих шарах.

Побудовано математичні моделі в кодованих значеннях, що описують залежність інтенсивність зношування (Y_4), коефіцієнт тертя (Y_5), температура трибоконтакту (Y_6) від конструктивно-технологічних та експлуатаційних параметрів

$$Y_4 = 1,44967 - 0,48044 x_2^3 x_3^3 - 0,3651 x_2^3 + 0,73227 x_1^2 x_3^2 x_4^2 - 0,717502 x_4^2 x_5^3 - 0,357329 x_1^3 x_2 - 0,2131 x_5^2 + 0,481778 x_1^3 x_2 x_5^2 - 0,102353 x_5;$$

$$Y_5 = 0,082851 + 0,020018 x_3^2 x_4^2 - 0,00270417 x_4 + 0,0166081 x_1^3 x_2 + 0,0117003 x_1^2 + 0,00481896 x_3^3 x_4^3 + 0,0228896 x_4^2 x_5^3 + 0,0124881 x_2^2 x_3 + 0,00424125 x_2^2 + 0,00212521 x_3^3;$$

$$Y_6 = 45,5552 + 13,8623 x_1^3 x_2^2 + 11,6702 x_2^3 x_3^3 - 14,9803 x_1^3 x_2^3 x_5 + 2,86996 x_1^2 x_2^3 +$$

$$3,36354 x_2^2 x_4^3 - 10,3417 x_2 x_4^2 x_5^3.$$

За результатами багатокритеріальної оптимізації ТЛП встановлено оптимальні параметри, за якими критерії оптимізації мають значення ($Y_4 = 1,2345$ мг/км, $Y_5 = 0,0655$, $Y_6 = 38,234^{\circ}\text{C}$) у визначених умовах (відстань між рядками $2,02 \times 10^{-3}$ м, відстань у рядку $1,52 \times 10^{-3}$ м, глибина дискретної ділянки $0,49 \times 10^{-3}$ м, швидкість 1,95 м/с, навантаження 5,134 МПа).

У сьомому розділі проведено теоретичне обґрунтування й узагальнення наукових досліджень, а також техніко-економічний аналіз промислового використання технологічного процесу формування ТЛП. При цьому підкреслено, що матеріали наукових досліджень дозволяють на етапах створення (розробки та виробництва) ТСП здійснювати аналіз і вибір раціональних за складом і будовою ТЛП з високими триботехнічними характеристиками конструктивних елементів в інтересах успішного вирішення загальної проблеми підвищення зносостійкості деталей і вузлів тертя.

Достовірність результатів підтверджується коректністю використання математичного апарату й задовільним збігом розрахункових та експериментальних даних, використанням сучасних фізико-хімічних методів аналізу та деклараційними патентами. Відхилення отриманих в результаті перевірконого експерименту від розрахованих за математичними моделями склали 2–7 %, що свідчить про достовірність отриманих результатів досліджень. Встановлено підвищення ресурсу сталевих деталей рухомих з'єднань ТСП з ТЛП у 2,5–4,1 рази, у порівнянні зі сталлю 30ХГСА.

На підставі узагальнення результатів дисертаційних досліджень розроблено алгоритм підвищення триботехнічних характеристик деталей ТСП ТЛП, який базується на оптимізації комбінованого технологічного процесу та практичних рекомендаціях щодо зміцнення поверхневого шару іонним азотуванням. Визначено економічний ефект від впровадження технологічного процесу формування ТЛП при створенні (розробки та виробництві) ТСП, який склав 44937 грн. річної економії при використанні одного пристрою.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено науково-методологічні основи підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей з текстурованою лунковою структурою в екстремальних умовах експлуатації, що дозволило розвинути теорію та методологію системного аналізу й синтезу комплексу властивостей конструкційних сталей з дискретними поверхнями. Це дозволило вирішити актуальну прикладну проблему, що має важливе значення для галузі машинобудування, а саме, створенні і практичному використанні нових високоефективних ресурсозберігаючих технологій управління функціональними властивостями деталей ТСП за рахунок направлено створення зносостійких поверхневих шарів і управління їх властивостями в екстремальних умовах експлуатації при обмеженій подачі мастильного матеріалу при різних видах тертя та зношування.

На основі отриманих наукових та практичних результатів роботи зроблені наступні висновки:

1. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено концептуальний підхід щодо створення зносостійких ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, який на відміну від існуючих базується на дослідженні НДС як окремої дискретної ділянки, так і дискретної поверхні в цілому, та математичному моделюванні закономірностей їх формування.

2. Встановлені закономірності впливу глибини дискретної ділянки на НДС ТЛП дозволяють оцінити умови зменшення напруженості сторін дискретних ділянок підбором її текстури. Методом скінченно-елементного аналізу доведено, що більша глибина дискретної ділянки є меншим концентратором напружень для основного матеріалу і їх рівень залежить від значень конструктивно-технологічних параметрів ТЛП. Виявлено, що зменшення глибини дискретної ділянки і зменшення відстані між дискретними ділянками призводить до зростання НДС у 3 рази. Найбільший НДС виникає при глибині дискретної ділянки $0,5 \times 10^{-3}$ м, а найменший – $1,5 \times 10^{-3}$ м.

3. Зміцнення поверхневого шару методом ПТА дозволило усунути залишкові напруження розтягу, а також забезпечити залякування дефектів на внутрішніх сторонах дискретних ділянок, які виникали в ході технологічного процесу їх формування, за рахунок збільшення концентрації зв'язаного азоту і його проникнення на більшу глибину у дискретні ділянки. Встановлено зростання мікротвердості поверхневих азотованих шарів ТЛП до 9500 МПа на поверхні та поступове його зменшення до 3600 МПа по глибині зразка. Побудовані математичні моделі технологічного процесу формування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, які дозволили зменшити технологічні залишкові напруження до 63 МПа при значеннях параметрів оптимізації: $X_1 = 2,05 \times 10^{-3}$ м, $X_2 = 2,02 \times 10^{-3}$ м, $X_3 = 1,5 \times 10^{-3}$ м.

4. Підвищення зносостійкості трибосистеми з ТЛП в умовах абразивного зношування при терті нежорстко закріпленими абразивними частинками досягається проектуванням конструктивно-технологічних параметрів дискретних ділянок з урахуванням розміру абразивних частинок, зміцненням поверхневого шару ТЛП методом ПТА, що дозволяє збільшити зносостійкість в 1,5–3,6 рази. Розкрито механізм зношування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками, який на відміну від існуючого базується на нейтралізації розміцнюючої дії дискретних ділянок іонним азотуванням.

5. Встановлено, що зі збільшенням відношення розміру абразивних частинок до глибини дискретної ділянки відносна зносостійкість ТЛП зростає за рахунок зменшення кількості локальних контактів абразивних частинок більшої зернистості з поверхнею, у порівнянні з меншою зернистістю, зменшення кількості контактних напружень і руйнувань в місцях трибоконтракту, а також вилученням абразивних частинок у ДД. Побудовані математичні моделі, які описують залежності зношування ТЛП від конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів в умовах абразивного зношування. Встановлені оптимальні конструктивні, технологічні і експлуатаційні параметри, за якими зношування ТЛП у вищезазначених умовах мають найменші значення ($Y_2 = 0,0048$ г.).

6. Встановлено закономірність зношування ТЛП в умовах фретинг-зношування при обмеженій подачі мастильного матеріалу в зону трибоконтакту, яка на відміну від існуючої враховує конструктивно-технологічні параметри дискретної ділянки та можливість видалення із зони трибоконтакту продуктів зношування, запобігаючи їх дії як абразивного матеріалу. Це надає можливість керувати процесами припрацювання при виборі оптимальної текстури ТЛП, в період припрацювання зменшити коефіцієнта тертя на 57–62 %, зменшити період припрацювання на 10–20 % та збільшити зносостійкість в період після припрацювання у 1,8–2,44 рази.

7. Моделювання температурного і силового навантаження дозволили встановити картину розподілу НДС і температури поверхневого шару ТЛП в умовах фретинг-зношування. За рахунок відсутності високих напружень в поверхневому шарі даний тип модифікації поверхні у вигляді лунок має значні переваги, у порівнянні з захисними покриттями, для яких характерні різні коефіцієнти температурного розширення матеріалу основи і покриття. Це підтверджується дослідженнями розподілу температури на поверхні в залежності від заданого часового інтервалу. Відсутність істотного перепаду температур у міжлунковому просторі, у дискретній ділянці, і основи матеріалу на поверхні, який зі зростанням температури у зоні трибоконтакту зменшується з 10 % до 2 % призводить до виникнення незначних термічних напружень.

8. Встановлено вплив стану поверхні дискретної ділянки на характеристики фретинг-утоми та ефективного використання технології метода ШТА, що дозволило збільшити границю витривалості конструкційних матеріалів у 1,4 рази за рахунок нейтралізації дії лунок, як концентраторів напружень. При випробуваннях на фретинг-утому трьох зразків цієї партії жоден з них не зруйнувався від фретингу. Тобто, руйнування проходило від «чистої» утоми в зоні дії максимальних напружень по лінії розташування лунок. При цьому у перерізі на лінії контакту з контртілом напруження були ~ на 20 % меншими. Незважаючи на це, ці напруження істотно вищі, ніж напруження, при яких відбувалося руйнування від фретинг-утоми й утоми зразків з лунками. Тому передбачувана крива фретинг-утоми зразків з іонним азотуванням лунок близька до кривої «чистої» утоми і характеристики опору фретинг-утомі істотно вище, ніж у зразків з ТЛП й у вихідних зразках.

9. Експериментальними дослідженнями встановлено, що найбільшою зносостійкістю і найменшим коефіцієнтом тертя в умовах граничного мащення при терті ковзанні володіють зразки з текстурованими лунковими поверхнями як без, так і додатково зміцнених методом ШТА, які перевищують по зносостійкості зразки зі сталей 45 у 3,1–5,3 рази і 30ХГСА загартовані у 1,9–3,25 рази, сталі 30ХГСА, поверхневий шар якої зміцнений методом ШТА, у 1,3–2,3 рази.

10. Сформовані системні уявлення про закономірності і процеси впливу магнітного поля на механізм вилучення продуктів зношування, які на відміну від існуючих враховують дію внутрішнього магнітного поля кромки дискретних ділянок. Встановлено, що ефект притягування продуктів зношування до дискретних ділянок ТЛП є результатом збільшення на 10–26 % напруженості магнітного поля кромки дискретних ділянок у порівнянні з напруженістю магнітного поля у міжлунковому просторі.

11. Запропоновано механізм мастильної дії дискретної ділянки при терті ковзання ТЛП в екстремальних умовах експлуатації, який пришвидшує процес регенерації граничної мастильної плівки, забезпечує високу швидкість змочування місць фактичного контакту трибосполучень та базується на гідродинамічних процесах.

12. Встановлено закономірності впливу напруженості магнітного поля на мастильний матеріал в процесі тертя та зношування ТЛП, при якому відбувається поглинання енергії магнітного поля, створюються сприятливі умови для переходу молекул у збуджений стан, утворюючи при цьому міжмолекулярні асоціати і комплекси. Доведено, що завдяки впливу внутрішнього магнітного поля кромки дискретних ділянок, в умовах трибоконтракту з ТЛП, на регенерацію граничних мастильних плівок витрачається менше енергії за рахунок збільшення кількості діамантних молекул мастильного матеріалу, що підтверджується зростанням тангенса кута діелектричних втрат в 1,8 рази.

13. Побудовані математичні моделі технологічного процесу формування ТЛП з поглибленими дискретними ділянками при різних видах тертя та зношування, які на відміну від існуючих враховують розміри, розташування і глибину дискретних ділянок для оцінки триботехнічних характеристик для різних умов експлуатаційного навантаження, що дозволяє керувати властивостями поверхневого шару.

14. Впровадження технологічного процесу формування ТЛП дозволяє з науковою обґрунтованістю та високою техніко-економічною ефективністю вирішувати наукову проблему підвищення зносостійкості деталей і вузлів ТСП. Встановлено підвищення ресурсу сталевих деталей ТСП з ТЛП у 2,5–4,1 рази, у порівнянні зі сталлю 30ХГСА. Доведено, що використання технологічного процесу формування ТЛП на деталі і вузли тертя ТСП дозволяє отримати 44937 грн. річної економії при використанні одного пристрою.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У фахових виданнях:

1. Марчук В. Є. Відновлення зношених деталей авіаційної техніки захисними покриттями [Текст] / В. Є. Марчук // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2006. – Вип. 45. – С. 141–150.

2. Підвищення надійності шасі літальних апаратів нанесенням дискретних структур на поверхні зношених деталей [Текст] / А. П. Кудрін, В. Є. Марчук, В. Ф. Лабунець, В. В. Жигінас // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2006. – Вип. 46. – С. 149–159.

3. Лабунець В. Ф. Вплив геометрії поверхні сталі 30ХГСА на зносостійкість в умовах гідроабразивного зношування [Текст] / В. Ф. Лабунець, В. Є. Марчук, В. В. Жигінас // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2007. – Вип. 47. – С. 49–57.

4. Фретинг-втома деталей авіаційної техніки [Текст] / Г. В. Цибаньов, В. Є. Марчук, О. М. Герасимчук, В. В. Жигінас // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2008. – Вип. 49. – Том 2. – С. 176–190.

5. Цыбанев Г. В. Фреттинг-усталость поверхностей с дискретными покрытиями [Текст] / Г. В. Цыбанев, В. Е. Марчук, О. Н. Герасимчук // Проблемы трибологии. – 2009. – № 1. – С. 97–104.

6. Марчук В. Є. Вплив конструктивно-технологічних параметрів на характеристики локального напружено-деформованого стану в елементах дискретної поверхні [Текст] / В. Є. Марчук, Б. А. Ляшенко, В. І. Калініченко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : Вид-во нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – Вип. 51. – С. 5–13.

7. Марчук В. Є. Механізм зношування дискретних поверхонь в умовах абразивного зношування [Текст] / В. Є. Марчук // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : Вид-во нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2010. – Вип. 52. – С. 112–119.

8. Дискретні покриття для підвищення зносостійкості деталей машин і механізмів [Текст] / Б. А. Ляшенко, В. Є. Марчук, В. І. Калініченко, Ю. О. Градиський // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків : Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 94. – С. 324–335.

9. Фреттингостійкість дискретних поверхонь в умовах граничного тертя [Текст] / В. Є. Марчук, О. І. Духота, Ю. О. Градиський, О. М. Єнін // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків : Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 100. – С. 147–152.

10. Марчук В. Є. Зносостійкість дискретних поверхонь в умовах фреттинг-зношування [Текст] / В. Є. Марчук // Вісник НАУ. – К. : Вид-во нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2010. – Вип. 2 (43). – С. 40–45.

11. Марчук В. Є. Вплив зернистості абразиву на зносостійкість дискретних поверхонь [Текст] / В. Є. Марчук // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2010. – Вип. 53. – С. 139–146.

12. Марчук В. Є. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану дискретних покриттів [Текст] / В. Є. Марчук // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2010. – Вип. 54. – С. 47–51.

13. Цыбанев Г. В. Управление свойствами поверхностей трения при приработке дискретных покрытий в условиях фреттинга [Текст] / Г. В. Цыбанев, В. Е. Марчук, В. И. Калиниченко // Проблемы трибологии. – 2011. – № 1. – С. 52–57.

14. Застосування САЕ-систем для дослідження конфігурації дискретних покриттів [Текст] / В. Є. Марчук, Б. А. Ляшенко, В. І. Калініченко, Ю. О. Градиський // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2010. – Вып. 48. – С. 140–145.

15. Підвищення надійності трибосполучень деталей авіаційної техніки модифікованими дискретними покриттями [Текст] / Г. В. Цыбаньев, В. Є. Марчук, В. І. Калініченко, Ю. О. Градиський // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2010. – Вып. 4 (64). – С. 126–132.

16. Марчук В. Є. Зносостійкість дискретних поверхонь в умовах гідроабразивного зношування [Текст] / В. Є. Марчук // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2011. – Вип. 55. – С. 182–188.

17. Дослідження зносостійкості луночних покриттів в умовах граничного тертя [Текст] / В. Є. Марчук, О. В. Радько, Б. А. Ляшенко, Ю. О. Градиський // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Вип. 107. / Механізація сільськогосподарського виробництва. – Х. : Харків: Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2011. – Т. 2. – С. 170–176.

18. Вихрові потоки рідини у дискретних ділянках трибосполучень [Текст] / Г. В. Цибаньов, В. Є. Марчук, Ю. П. Кураш, Ю. О. Градиський // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Вип. 109. / Проблеми технічної експлуатації машин. – Х. : «Апостроф», 2011. – С. 55–64.

19. Дослідження впливу іонного азотування на структуру і властивості дискретних поверхонь в умовах трибоконтакту [Текст] / Г. В. Цибаньов, В. Є. Марчук, В. І. Калініченко, О. В. Радько // Проблеми трибології. – 2011. – №4. – С. 33–39.

20. Марчук В. Є. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах фретинг-зношування [Текст] / В. Є. Марчук, О. І. Духота, Н. О. Науменко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2011. – Вип. 56. – С. 84–93.

21. Марчук В. Є. Зносостійкість текстурованих лункових поверхонь з дискретно-орієнтованою структурою в умовах граничного мащення [Текст] / В. Є. Марчук, О. І. Духота, В. І. Морозов // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2012. – Вип. 57. – С. 128–138.

22. Процеси тертя та зношування у трибосистемах з дискретно-орієнтованою структурою [Текст] . Повідомлення 1. Магнітні явища при терті поверхонь з дискретно-орієнтованою структурою / В. Є. Марчук, В. І. Морозов, О. І. Духота, І. В. Морозова // Проблеми трибології. – 2012. – № 4. – С. 53–57.

23. Фретинг-утома сталі 30ХГСА з дискретно-орієнтованою лунковою поверхнею [Текст] / Г. В. Цибаньов, В. Є. Марчук, О. І. Духота, Ю. О. Градиський // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2012. – Вып. 3 (71). – С. 124–127.

24. Марчук В. Є. Вплив параметрів дискретно-лункових поверхонь контакту на фретингостійкість конструкційної сталі в умовах граничного мащення [Текст] / В. Є. Марчук, А. П. Кудрін, О. І. Духота // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2012. – Вип. 58. – С. 58–64.

25. Marchuk V. E. Fretting-fatigue coatings of discrete-oriented structure [Text] / V. E. Marchuk // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Вип. 139. / Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва. – Х. : «ФОП», 2013. – С. 19–24.

26. Марчук В. Є. Захист поверхонь тертя дискретними поверхнями [Текст] / В. Є. Марчук, Б. А. Ляшенко, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – № 2 (61). – С. 80–87.

27. Marchuk V. E. Engineering methods development of contact surfaces tribological systems [Text] / V. E. Marchuk // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. –

Вип. 147. /«Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу» та «Транспортні технології». – Х. : ФООП Томенко Ю. І., 2014. – С. 106–110.

28. Марчук В. Є. Системність та комплексний характер наукових досліджень поверхонь дискретної структури [Текст] / В. Є. Марчук, Ю. О. Градиський // Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу. Транспортні технології : сб. наук. пр. / Харківський НТУСГ ім. Петра Василенка. – 2015. – Вып. 160. – С. 115–122.

29. Електрофізичний вплив на протонну систему вуглеводних рідин [Текст] / В. І. Морозов, В. Є. Марчук, І. В. Морозова, В. В. Фіненко, Ю. О. Градиський // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів / Харківський НТУСГ ім. Петра Василенка. – 2015. – № 3. – С. 206–215.

30. Електрофізичний вплив на властивості паливно-мастильних матеріалів [Текст] / В. І. Морозов, В. Є. Марчук, І. В. Морозова, В. В. Фіненко, В. І. Калініченко, Ю. О. Градиський // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів / Харківський НТУСГ ім. Петра Василенка. – 2016. – № 5. – С. 192–200.

У іноземних спеціалізованих виданнях і виданнях України, які внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз даних

31. Марчук В. Е. Дискретные покрытия деталей авиационной техники в условиях фреттинг-усталости [Текст] / В. Е. Марчук // Вестник военной академии республики Беларусь. – 2013. – № 4 (41). – С. 122–128.

32. Слободян Б. С. Моделирование контактной взаимодействия периодически текстурированных тел с учетом фрикционного проколования [Текст] / Б. С. Слободян, Б. А. Ляшенко, Н. І. Маланчук, В. Є. Марчук, Р. М. Мартиняк // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2014. – № 2 (57). – С. 88–96.

33. Марчук В. Е. Напряжено-деформованный стан текстурированных поверхностей трибологических систем [Текст] / В. Е. Марчук // Проблемы тертя та зношування. – 2014. – № 3 (64). – С. 89–93.

34. Kindrachuk M. The friction mechanism between surfaces with regular micro grooves under boundary lubrication [Текст] / M. Kindrachuk, O. Radionenko, A. Kryzhanovskiy, V. Marchuk // Aviation. – 2014. – Vol. 18(2). – P. 64–71. SCOPUS.

35. Marchuk V. System analysis of the properties of discrete and oriented structure surfaces [Текст] / V. Marchuk, M. Kindrachuk, A. Kryzhanovskiy // Aviation. – 2014. – Vol. 18(4). – P. 161–165. SCOPUS.

36. Slobodyan B. S. Local sliding of elastic bodies in the presence of gas in the intercontact gap [Text] / B. S. Slobodyan, N. I. Malanchuk, R. M. Martynyak, B.A. Lyashenko, V. E. Marchuk // Springer Science+Business Media New York. – 2014. – Vol. 50. – P. 261–268.

Матеріали та тези конференцій

37. Многофункциональные дискретные покрытия для восстановления изношенных деталей авиационной техники [Текст] / Б. А. Ляшенко, В. Ф. Лабунець, В. Є. Марчук, И. Б. Дерек // матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф. «АВІА–2003» (Київ, 23–25 квітня 2003 р.). – Т.ІІІ. Виробництво та експлуатація авіаційної техніки. – К. : НАУ, 2003. – С. 35.47–35.51.

38. Применение электроискровых покрытий для восстановления изношенных деталей авиационной техники [Текст] / А. П. Кудрин, В. Ф. Лабунец, В. Е. Марчук, В. В. Кравець, А. С. Вальков // матеріали VI Міжнар. наук.-техн. конф. «АВІА-2004» (Київ, 26-28 квітня 2004 р.). – Т. III. Виробництво та експлуатація авіаційної техніки. – К. : НАУ, 2004. – С. 36.13–36.16.

39. Марчук В. Є. Напружено-деформований стан дискретної поверхні [Текст] / В. Є. Марчук, В. В. Жигінас // матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф. «АВІА-2006» (Київ, 25–27 вересня 2006 р.). – К. : НАУ, 2006. – Т. 2. – С. 3.120–3.123.

40. Tsybanov G. V. Fretting-resistance of aircraft tribological assembly details in the conditions of alternating loads [Текст] / G. V. Tsybanov, V. E. Marchuk, V. V. Zhiginas // Aviation in the XXI-st century, Safety in aviation and space technology : of the third world congress, (Ukraine, Kyiv, 22–24 september 2008.). – 2008. – Vol. 1. – P. 14.14–14.17.

41. Фретингостійкість дискретних поверхонь в умовах граничного тертя [Текст] / В. Є. Марчук, О. І. Духота, Ю. О. Градиський, О. М. Єнін : матеріали Міжнар. наук.-метод. конф., (Харків, 13–14 травня 2010 р.). – 2010. – С. 147–152.

42. Дискретні покриття для відновлення деталей машин і механізмів [Текст] / Б. А. Ляшенко, В. Є. Марчук, В. І. Калініченко, Л. С. Капішон // матеріали 10-го Юбил. Междун. науч.-техн. семинара «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» (Свалява, 22–26 февраля 2010 г.). – Киев : АТМ Україна, 2010. – С. 156–158.

43. Дискретні покриття для підвищення зносостійкості деталей машин і механізмів [Текст] / Б. А. Ляшенко, В. Є. Марчук, В. І. Калініченко, Ю. О. Градиський // матеріали VIII Міжнар. наук.-метод. конф. «Технічне забезпечення інноваційних технологій АПК» (Харків, 17–19 березня 2010 р.). – 2010. – С. 324–335.

44. Ляшенко Б. А. Зносостійкість дискретних поверхонь в умовах фретингу [Текст] / Б. А. Ляшенко, В. Є. Марчук, В. В. Жигінас // матеріали Міжнар. наук.-метод. конф. «Сучасні проблеми трибології» (Київ, 19–21 травня 2010 р.). – К. : ІВЦ АЛКОН НАН України, 2010. – С. 148.

45. Випробування на зносостійкість луночних покриттів, зміцнених іонно-плазмовим термоциклічним азотуванням, в умовах гідроабразивного зношування [Текст] / Б. А. Ляшенко, В. Є. Марчук, В. І. Калініченко // матеріали 11-го Міжнар. наук.-техн. семінару «Сучасні проблеми виробництва і ремонту в промисловості і на транспорті» (Свалява, 21–25 февраля 2011 р.). – 2011. – С. – 170–172.

46. Вихрові потоки рідини у дискретних ділянках трибосполучень [Текст] / Г. В. Цибаньов, В. Є. Марчук, Ю. П. Кураш, Ю. О. Градиський // матеріали IX Міжнар. наук.-метод. конф. «Інженерно-технічне забезпечення інноваційних технологій сервісу машин» (Харків, 24–25 березня 2011 р.). – Х. : Харківський НТУСГ ім. Петра Василенка, 2011. – С. 55–64.

47. Дослідження зносостійкості луночних покриттів в умовах граничного тертя [Текст] / В. Є. Марчук, О. В. Радько, Б. А. Ляшенко, Ю. О. Градиський // матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. «Технічний прогрес в АПК» (Харків, 24–25 березня 2011 р.). – Х. : Харківський НТУСГ ім. Петра Василенка, 2011. – С. 170–176.

48. Дискретные покрытия в условиях фреттинг-усталости и фреттинг-изнашивания [Текст] / Г. В. Цыбанев, Б. А. Ляшенко, В. Е. Марчук // матеріали

IV Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми динаміки і міцності в турбомашиннобудуванні» (Київ, 31 травня-02 червня 2011 р.). – К. : Ін-т проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, 2011. – С. 257–258.

49. Марчук В. Є. Процеси зношування у трибосистемах з дискретно-текстурованою поверхнею [Текст] / В. Є. Марчук, Б. А. Ляшенко, О. І. Духота, В. І. Морозов, І. С. Будьоний // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА–2013» (Київ, 21–23 травня 2013 р.). – Т. 3. – К. : НАУ, 2013. – С. 15.45–15.48.

50. Marchuk V. E. Engineering methods development of contact surfaces tribological systems [Текст] / V. E. Marchuk // матеріали Міжнар. наук. сесії «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин» (Харків, 20–21 березня 2014 р.). – Х. : Харківський НТУСГ ім. Петра Василенка, 2014. – С. 106–110.

51. Марчук В. Є. Магнітні процеси дискретних ділянок трибосистеми в умовах граничного навантаження [Текст] / В. Є. Марчук, В. І. Морозов, І. В. Морозова // матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми хімотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів» (Київ, 6–10 жовтня 2014 р.). – К. : НАУ, 2014. – С. 99–104.

52. Марчук В. Є. Системність та комплексний характер наукових досліджень поверхонь дискретної структури [Текст] / В. Є. Марчук, Ю. О. Градиський // матеріали Міжнар. наук. сесії «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин» (Харків, 19–20 березня 2015 р.). – Х. : Харківський НТУСГ ім. Петра Василенка, 2015.– С. 115–122.

53. Електрофізичний вплив на протонну систему вуглеводних рідин [Текст] / В. І. Морозов, В. Є. Марчук, І. В. Морозова, В. В. Фіненко, Ю. О. Градиський // матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. «Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу» (Харків, 26–27 листопада 2015 р.).– Х. : Харківський НТУСГ ім. Петра Василенка, 2015.– С. 142–153.

Патенти

54. Пат. 13762 Україна, МПК (06) F01L 1/20, F01L 1/46. Пристрій для утворення на плоскій поверхні тертя рельєфу заглибин, що утримують мастильні матеріали / В. Є. Марчук, І. Ф. Шульга, О. І. Шульга, О. Є. Плюсін ; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № u200509981; заявл. 24.10.2005; опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4.

55. Пат. 44643 Україна, F01L 1/20 C23C 8/02. Спосіб отримання рельєфних зносостійких азотованих шарів сталевих деталей / В. Є. Марчук, І. Ф. Шульга, Б. А. Ляшенко, Г. В. Цибаньов, А. В. Рутковський, В. В. Калініченко ; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u200904236 ; заявл. 29.04.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. № 19.

56. Пат. 13763 Україна, МПК (2006) B23P 9/00. Спосіб підвищення зносостійкості допоміжних накладок корінних листів та опорних сухарів ресор автомобіля / В. Є. Марчук, І. Ф. Шульга, О. І. Шульга, В. Ф. Лабунець, В. В. Жигінас; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № u200509982; заявл. 24.10.2005 ; опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4.

57. Пат. 5681 Україна, 7 В23Н7/34, В23Н9/00, С23С12/00. Спосіб електроіскрової обробки поверхонь струмопровідних деталей графітовими електродами / В. Є. Марчук, І. Ф. Шульга, Б. А. Ляшенко, А. В. Рудковський, В. Ф. Лабунець, В. В. Кравець ; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № 20040806390 ; опубл. 15.03.2005. Бюл. № 3.

58. Пат. 5682 Україна, 7 С25D13/02, С25D13/12, С25D13/20, В23Н9/00, В23Н9/04, В23Н9/10. Спосіб електроерозійної легування поверхонь деталей із струмопровідного матеріалу / В. Є. Марчук, І. Ф. Шульга, Б. А. Ляшенко, А. В. Рудковський, В. Ф. Лабунець, В. В. Кравець ; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № 20040806392 ; опубл. 15.03.2005, Бюл. № 3.

59. Пат. 7750 Україна, В23Н1/00, В23Н7/04. Спосіб обробки деталей електродом-інструментом для шліфування / В. Є. Марчук, І. Ф. Шульга, Т. Ю. Куровська ; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № 20041008121; заявл. 07.10.2004; опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7.

60. Пат. 81367 Україна, С23F 4/00, В03С 1/005, В01J 19/12. Спосіб покращення триботехнічних властивостей пар тертя / В. Є. Марчук, В. І. Морозов, Б. А. Ляшенко, І. В. Морозова ; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u201300893; заявл. 25.01.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12.

АНОТАЦІЯ

Марчук В.Є. Науково-методологічні основи підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей з текстурованою лунковою структурою в екстремальних умовах експлуатації. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. – Національний авіаційний університет, м. Київ, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми створення і практичного використання нових високоефективних ресурсозберігаючих технологій управління функціональними властивостями деталей техніки спеціального призначення за рахунок направлено створення зносостійких поверхневих шарів і управління їх властивостями в екстремальних умовах експлуатації при обмеженій подачі мастильного матеріалу при різних видах тертя та зношування.

Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено концептуальний підхід щодо створення зносостійких текстурованих луночних поверхонь з поглибленими дискретними ділянками, який на відміну від існуючих базуються на дослідженні напружено-деформованого стану як окремої дискретної ділянки, так і дискретної поверхні в цілому, та математичному моделюванні закономірностей їх формування.

Представлено та описано результати експериментальних досліджень конструкційної сталі 30ХГСА з текстурованими луночними поверхнями і на їх основі розроблено теоретико-методологічні положення оптимального вибору властивостей дискретних поверхонь на підставі аналізу і синтезу комплексного дослідження зносостійкості деталей і вузлів тертя техніки спеціального призначення з метою підвищення їх зносостійкості і ресурсу. Встановлено закономірності зношування текстурованих луночних поверхонь при різних видах тертя та зношування від впливу конструктивних, технологічних та експлуатаційних

факторів. Розкрито цілісні уявлення про закономірності і процеси, які відбуваються у тонких поверхневих шарах дискретних ділянок.

Основні результати дисертаційної роботи знайшли промислове впровадження на етапах створення, виробництва та модернізації деталей та вузлів техніки спеціального призначення.

Ключові слова: комбінований технологічний процес, текстуровані лункові поверхні, напружено-деформований стан, зносостійкість, абразив, напруженість магнітного поля.

АННОТАЦІЯ

Марчук В. Е. Научно-методологические основы повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей с текстурованной луночной структурой в экстремальных условиях эксплуатации. – На правах рукописи.

Диссертация на получение ученой степени доктора технических наук за специальностью 05.02.04 – трение и износ в машинах. – Национальный авиационный университет, Киев, 2016.

Диссертация посвящена решению актуальной научной проблемы создания и практического использования новых высокоэффективных ресурсосберегающих технологий управления функциональными свойствами деталей техники специального назначения за счет направленного создания износостойких поверхностных слоев и управление их свойствами в экстремальных условиях эксплуатации при ограниченной подаче смазочного материала, протекании различных видов трения и износа.

Теоретически обосновано и экспериментально доказано концептуальный подход создания износостойких текстурированных луночных поверхностей с углубленными дискретными участками, который в отличие от существующих базируется на исследовании напряженно-деформируемого состояния как отдельного дискретного участка, так и дискретной поверхности в целом, математическом моделировании закономерностей их формирования.

Раскрыт механизм износа текстурированных луночных поверхностей с углубленными дискретными участками в условиях абразивного износа при трении нежестко закрепленными абразивными частицами, который в отличие от существующего базируется на нейтрализации разупрочняющего действия дискретных участков ионным азотированием, что позволяет увеличить износостойкость в 1,5–3,6 раза.

Установлена закономерность износа текстурированных луночных поверхностей в условиях фреттинг-износа при ограниченной подачи смазочного материала в зону трибоконтакта, которая в отличии от существующей учитывает конструктивно-технологические параметры дискретного участка и возможность удаления из зоны трибоконтакта продуктов изнашивания, предотвращая их действия как абразивного материала. Это дает возможность управлять процессами приработки при выборе оптимальной текстуры текстурированной луночной поверхности, в период

приработки уменьшить коэффициента трения на 57–62 %, уменьшить период приработки на 10–20 % и увеличить износостойкость в период после приработки в 1,8–2,44 раза.

Сформированы системные представления о закономерностях и процессах влияния магнитного поля на механизм изъятия продуктов изнашивания, которые в отличие от существующих учитывают действие внутреннего магнитного поля кромок дискретных участков. Установлено, что эффект притягивания продуктов износа в дискретные участки текстурированных луночных поверхностей является результатом увеличения на 10–26 % напряженности магнитного поля кромок дискретных участков, по сравнению с напряженностью магнитного поля между луночным пространством.

Предложен механизм подачи смазочного материала для регенерации граничной смазочной пленки при трении скольжения текстурированных луночных поверхностей в экстремальных условиях эксплуатации, основанный на гидродинамических процессах в дискретных участках. Доказано, что благодаря влиянию внутреннего магнитного поля кромок дискретных участков в условиях трибоконтакта с ТЛП на регенерацию граничных смазочных пленок тратится меньше энергии за счет увеличения количества диамагнитных молекул смазочного материала, что подтверждается ростом тангенса угла диэлектрических потерь в 1,8 раза.

Получены математические модели технологического процесса формирования текстурированных луночных поверхностей с углубленными дискретными участками при различных видах трения и изнашивания, которые в отличие от существующих учитывают размеры, расположение и глубину дискретных участков для оценки триботехнических характеристик для различных условий эксплуатационной нагрузки, что позволяет управлять свойствами поверхностного слоя.

Основные результаты диссертационной работы нашли промышленное внедрение при восстановлении конструктивных элементов техники специального назначения.

Ключевые слова: комбинированный технологический процесс, текстурированные луночные поверхности, напряженно-деформированное состояние, износостойкость, абразив, напряженность магнитного поля.

ABSTRACT

Marchuk V.E. Scientific and methodological basis for improving wear resistance of surfaces located on parts with textured dimple structures in extreme conditions. – Manuscript copyright.

Thesis for the degree of Doctor of Science (Engineering) in specialty 05.02.04 – Friction and Wear in Machines, National Aviation University, Kyiv, 2016.

The thesis considers the ways to solve relevant research problems of creating and solving practically apply new effective resource saving technologies intended to control functional properties of parts used in special purpose machines according to improving

wear resistance of surfaces located on parts with textured dimple structures in extreme conditions when a limited supply of lubricant takes place under the different types of friction and wear.

The author is theoretically and experimentally proved the efficiency of the conceptual approach to the creation of textured dimple surfaces with advanced discrete, which have high tribotechnical properties and are strengthened by the method of ion-plasma thermal cyclic nitriding, studying the stress-strain state of both a separate discrete area and a discrete surface in general and mathematical modeling is developed to determine the regularities that pertain to the formation of separate discrete areas and discrete surfaces.

The experimental results of structural steel (30KhGSA) with a textured dimple surface have been presented and described basis for the development of theoretical methods indicating how to optimally select discrete properties of surfaces for the analysis and synthesis while studying the wear resistance of parts and friction units in special purpose machines in order to improve their durability and endurance. The regularities concerning wear of textured dimple surfaces have been inquired under different types of friction and the influence of design, technological and operational factors. Also, the research results have led to the efficient comprehension of the regularities and processes in thin surface layers of discrete areas.

The outcome of the thesis has been implemented in development, manufacturing and upgrading of parts and units of special purpose machines.

Key words: combined manufacturing process, textured dimple surfaces, mode of deformation, wear resistance, abrasive, magnetic field strength.

Підп. до друку 29.11.2016. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 2,33. Обл.-вид. арк. 2,5.
Тираж 100 пр. Замовлення № 172-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002