

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

Циганов Володимир Васильович



УДК 621.891: 669.018.44

**Науково-методологічні засади формування зносостійких
поверхонь деталей при багатокомпонентній термоконтактній дії**

Спеціальність 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 Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор **Івченко Леонід Йосипович**, Запорізький національний технічний університет, директор машинобудівного інституту.

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

доктор технічних наук, професор **Войтов Віктор Анатольович**, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, завідувач кафедри транспортних технологій і логістики;

доктор технічних наук, професор **Аулін Віктор Васильович**, Кіровоградський національний технічний університет, професор кафедри експлуатації та ремонту машин.

Захист дисертації відбудеться “ 18 “ травня 2017р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.062.06 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, пр.-т Космонавта Комарова, 1, НАУ.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету.

Автореферат розісланий “ ___ “ _____ 2017р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
канд. техн. наук, с. н. с.



О.Ю. Корчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Конкурентоспроможність машин залежить від ряду чинників, серед яких одне з перших місць займає ресурс. Для сучасних машин і механізмів ресурс визначається довговічністю найбільш відповідальних деталей трибоз'єднань, термін служби яких багато в чому залежить від зносу контактуючих поверхонь.

Процеси тертя і зношування, а також руйнування поверхневих шарів трибоз'єднань визначаються динамічним характером навантажень в контактї, амплітудами взаємних переміщень, що створюють специфічні умови контактної взаємодії. При цьому велика частина трибоз'єднань різного функціонального призначення працює в умовах багатокomпонентного динамічного навантаження (удару з проковзуванням або удару з проковзуванням в двох взаємно перпендикулярних напрямках) під впливом як високих, так і мінусових (кліматичних) температур. Періодичний розрив контакту виникає досить часто у трибоз'єднаннях і при осцилюючому, і при однонаправленому проковзуванні.

Такий комплекс умов навантаження викликає складний напружений стан поверхневих шарів контактуючих пар, що супроводжується відповідним механізмом зношування. Цим пояснюються обмежені можливості використання загальних положень теорій тертя, а також більшості результатів експериментальних досліджень. Крім того, традиційні методи досліджень засновані на роздільному вивченні впливу одного або вкрай обмеженого числа чинників без урахування їхньої взаємодії, а також без урахування динаміки системи в цілому.

Тому для підвищення зносостійкості деталей, які експлуатуються при багатокomпонентній термоконтактній дії, виникає нагальна потреба у визначенні кінематичних та динамічних особливостей навантаження трибовузлів з урахуванням їх еволюції в процесі експлуатації, можливим впливом високих і мінусових температур та розгляду зміни стану поверхневого шару, зносостійкості і відповідного механізму зношування трибоз'єднань.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з основними науковими напрямами та проблемами фундаментальних досліджень у галузі технічних наук на 2014-2018 рр. затвердженими Постановою НАН України № 179 від 20.12.2013 р., та створенням прогресивних прикладних розробок і технологій відповідно до Концепції розвитку НАН України на 2014–2023 рр. Дослідження виконані в межах наступних науково-дослідних робіт МОН України: ДБ 04123 2002-2004р. «Вплив умов тримірного навантаження на довговічність деталей трибоз'єднань», ДБ 03226 2006-2007р. "Принципи формування поверхневого шару деталей трибоз'єднань ГТУ за умов тримірного навантаження під час

експлуатації та виготовлення", ДБ 01311 2011-2012р. «Зменшення зношення елементів складнонавантажених трибосистем методами, які охоплюють триботехнічне матеріалознавство та триботехнологію», ДБ 01313 2013-2014р. «Основи підвищення зносостійкості трибоз'єднань за рахунок оптимізації характеру складного термомеханічного навантаження» та робіт за господарчими договорами з підприємствами ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес» (м. Запоріжжя), «Салют» (м. Москва) та іншими, де здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета і завдання досліджень.

Мета: розроблення науково-практичних основ підвищення довговічності трибоз'єднань, що експлуатуються за умов багатокomпонентного динамічного контактного навантаження і різних експлуатаційних температур.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні основні *задачі*:

1. Провести аналіз особливостей роботи і зношування трибологічних вузлів, які експлуатуються в умовах, що досліджуються.

2. Розробити методологію досліджень зносостійкості деталей трибоз'єднань, які працюють в умовах багатокomпонентного динамічного термоконтактного навантаження та створити експериментальне обладнання для визначення трибохарактеристик матеріалів.

3. Теоретично обґрунтувати принципи моделювання еквівалентного реальному стану фізичних моделей та мінімізації зносу.

4. Визначити основні закономірності зміни мікрогеометричних характеристик робочих поверхонь, особливостей контакту та трибологічних параметрів матеріалів в умовах, що досліджуються, розкрити фізичну картину процесів зношування з урахуванням наноструктурних змін поверхневого шару.

5. Розробити моделі формування і руйнування поверхневого шару деталей трибоз'єднань при багатокomпонентному динамічному навантаженні, високих і мінусових експлуатаційних температурах.

6. Обґрунтувати конструкторсько-технологічні напрямки підвищення зносостійкості трибоз'єднань в умовах контактування, що розглядаються.

7. Розробити, дослідити і рекомендувати до практичного застосування отримані наукові положення на машинобудівних підприємствах.

Об'єкт дослідження – процеси контактної взаємодії та зношування трибоз'єднань за різних умов кінематики руху, динаміки навантаження та експлуатаційних температур.

Предмет дослідження – закономірності тертя і зношування, фізичні явища в контакті трибоз'єднань та наноструктурні властивості поверхневого шару за різних умов контактного навантаження, прогноуюча модель формування і руйнування поверхневого шару деталей трибоз'єднань.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є

застосування сучасних методів на теоретичному та емпіричному рівнях досліджень які передбачають: моделювання процесів контактної взаємодії в трибоз'єднаннях за допомогою фізичних моделей з урахуванням принципів моделювання; вивчення закономірностей зношування матеріалів деталей пар тертя як при роздільному, так і комплексному впливі навантажувальних параметрів за допомогою створеного спеціального устаткування; встановлення закономірностей зміни якості поверхневого шару матеріалів у зоні контакту. Після випробування зразків за різних умов кінематики та динаміки навантаження та температури під час тертя з використанням комплексу спеціального експериментального устаткування визначали величину зносу методами профілографування, сканування, а також статистичними методами. Якість контактуючих поверхонь оцінювали по мікрогеометричним показникам (аналіз шорсткості, 2D і 3D моделі поверхні) та стану поверхневого шару. Для оцінки зміни структурного та енергетичного стану поверхневого шару поверхонь в роботі використовувався трибоспектральний метод (аналіз трибограм та результатів статистичної обробки значень сили тертя індентора під час сканування поверхневого шару) і метод аналізу електронної будови поверхневого шару металів на основі зміни роботи виходу вільних електронів. Інші триботехнічні характеристики (сила тертя проковзування, сила тертя спокою, коефіцієнт тертя проковзування) визначали на модернізованому трибометрі.

Наукова новизна отриманих результатів. Полягає в обґрунтуванні і подальшому розвитку наукового напрямку – структурної організації процесів контактної взаємодії при багатоконпонентному термомеханічному навантаженні і їх еволюції при переході від квазістатичного тертя до динамічних процесів, які включають удар з подальшим проковзуванням в двох взаємно перпендикулярних напрямках. При цьому отримані наступні наукові результати:

1. Теоретично узагальнено та встановлено ступінь впливу основних параметрів багатоконпонентного динамічного навантаження на закономірності тертя і зношування. Показано, що багатоконпонентність динамічного навантаження ускладнює процеси контактної взаємодії які не визначаються загальними теоретичними основами трибології та неоднозначно впливають на зносостійкість трибоз'єднань. Так, наявність поперечних проковзувань при терті з трикомпонентним навантаженням (удар і проковзування у взаємно перпендикулярних напрямках) порівняно зі зносом при двокомпонентному навантаженні (удар і поздовжнє проковзування) підвищує інтенсивність зношування конструкційних сталей та евтектичних жароміцних сплавів до 2,5 разів за рахунок зміни міцності та розмірів фрагментів поверхневого шару.

2. Запропонована концепція підвищення зносостійкості трибосистем, яка на відміну від існуючої полягає в реалізації триботехнічного принципу

мінімізації зношування матеріалів на основі використання реологічного явища структурно-енергетичної адаптації матеріалів, що супроводжується деформацією первинної структури при терті з різними видами динамічного навантаження та температури середовища. При цьому створюються такі умови контактування при яких формується поверхневий шар з неоднорідним за міцністю та величиною фрагментів структурним станом в межах статистично визначної базової довжини, що дозволяє, використовуючи методи інженерії поверхні, підвищити зносостійкість трибоз'єднань з багатокомпонентним навантаженням до 30%.

3. Удосконалено модель структурної організації і руйнування поверхні при терті з багатокомпонентним динамічним навантаженням як цілісної картини динамічної системи тертя, яка на відміну від існуючих дозволила обґрунтувати та урахувати динаміку умов навантаження, структурного та енергетичного стану поверхневих шарів, мікрогеометрії поверхні, деструкційних явищ.

4. Розкрито і обґрунтовано механізм зношування трибоз'єднань при підвищенні складності навантаження, специфічними особливостями якого є: підвищення однорідності поверхневого шару (рівноміцності та розміру фрагментів) в межах статистично визначної базової довжини; зниження міцності; зменшення величини рівноважної шорсткості поверхні у поздовжньому та поперечному напрямках від 1,3 до 10 разів; збільшення інтенсивності екзоелектронної емісії поверхні зі зниженням величини і розкиду роботи виходу електрона до 10%.

5. Отримали подальший розвиток принципи моделювання еквівалентних станів трибологічних пар, які експлуатуються в особливих умовах навантаження, включаючи трибологічні, кінематичні, навантажувальні, металофізичні та фізико-механічні критерії в напрямку урахування специфіки багатокомпонентного навантаження.

6. Розроблено методологію прискореної оцінки зносостійкості поступальних площинних пар IV класу з періодичним ударним розривом контакту (типу «напрямна-ланцюг») і трибоз'єднань «деталь-ріжучий інструмент» з урахуванням умов багатокомпонентного навантаження, що включає методи і спеціальні експериментальні установки для прискорених випробувань трибоз'єднань та дозволяє зменшити час випробувань від 7 до 20 разів.

7. Вперше розроблені моделі зношування трибоз'єднань з наявністю у зоні контакту вільних макрорадикалів і змашувально-охолоджувальної рідини (ЗОР). Запропоновані науково обґрунтовані методи інженерії поверхні для керування зносостійкістю трибоз'єднань при багатокомпонентній термоконтактній дії шляхом введення в зону контакту вільних макрорадикалів, створення поверхневого шару з різноорієнтованими кристалітами, градієнтним шаруватим покриттям. На підставі

трибодіагностики впливу вільних макрорадикалів на процеси обробки гранульованим абразивним матеріалом розвинута методологія підвищення ефективності фінішної абразивної обробки.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані у результаті теоретичних і експериментальних досліджень нові наукові положення є науково-методологічною базою для цілеспрямованого розроблення зносостійких матеріалів і технологій, застосування котрих істотно підвищує ресурс виробів. Практична цінність визначається обсягом розроблених і впроваджених у виробництво конструктивно-технологічних рішень.

1. Розроблено методи і експериментальні установки для прискорених випробувань трибоз'єднань в умовах багатоконпонентного динамічного навантаження замість тривалих еквівалентних випробувань, які дозволяють підвищити достовірність випробувань і знизити їх тривалість. Показана ефективність їх застосування при оцінці зносостійкості поступальних площинних пар IV класу з періодичним ударним розривом контакту (типу «напрямна-ланцюг») і трибоз'єднань «деталь-ріжучий інструмент». Розроблені інструменти стрижневого і дискового типів для прискорених випробувань на зносостійкість ріжучих ланок пильного ланцюга, що дозволяє до двадцяти разів знизити час випробувань.

2. Розроблено методи визначення зносостійкості трибоз'єднань на основі оцінки стану поверхневого шару деталей після тертя із застосуванням трибоспектрального методу і по зміні величини роботи виходу електрона.

3. Розроблено рекомендації підвищення зносостійкості трибоз'єднань, що базуються на створенні відповідних характеристик поверхневого шару і зміні параметрів навантаження матеріалу. Представлені методологічні принципи інженерії поверхні підвищеної зносостійкості для трибоз'єднань багатоконпонентного контактного навантаження.

4. Розроблено пристрій, який дозволяє зменшити до 20% вібрації і підвищити зносостійкість ріжучого інструменту за рахунок використання спеціальних демпфіруючих пластин.

5. Удосконалено гранульований абразивний матеріал, методи його отримання шляхом регулювання умовами псевдоживої радикальної полімеризації (концепція контрольованих процесів) і застосування при фінішній обробці. За рахунок зміни умов обробки і наявності вільних макрорадикалів в зоні контакту інструменту і заготовки можливе керування однорідністю структурного стану обробленого поверхневого шару і його зносостійкістю.

6. Результати дослідження впроваджені на ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес» (м. Запоріжжя), АО «Мотор-Січ» (м. Запоріжжя), КО «Запорізький завод високовольтної апаратури» (м. Запоріжжя). На основі використання розроблених технологічних рекомендацій отримання зносостійкого ультра дисперсного наноструктурного поверхневого шару деталей трибоз'єднань в

залежності від умов контактування та виготовлення, відмічено підвищення зносостійкості трибоз'єднань у промислових умовах підприємств до 30%. Річний економічний ефект від впровадження результатів роботи на підприємстві складає біля 140 тис. грн. Результати дисертаційної роботи використано у навчальному процесі на кафедрі «Металорізальні верстати та інструмент» Запорізького національного технічного університету у курсі «Трибологія», «Теорія різання», «Абразивний інструмент та інструмент з надтвердих матеріалів», при виконанні магістерських робіт.

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 – [2, 12, 13, 21, 23, 38–41, 56, 57]. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: розробка програм і методик досліджень [5, 8, 15, 17, 20], експериментального устаткування [5, 8, 17, 19, 28], практичного використання результатів досліджень захищених патентами [6, 15, 19, 27, 28, 30, 31], безпосередня участь в експериментальних дослідженнях [8, 22, 25 – 28]; аналіз і узагальнення результатів [3, 4, 6, 8, 10, 11, 14 – 16, 18, 22, 24 – 26, 28 - 31], виробничі випробування і впровадження [7, 9, 19], а також розділи 2, 4 – 6 монографії [1].

Матеріали кандидатської дисертації автора "Трибодіагностика якості поверхні нержавіючих сталей при фінішній абразивній обробці" за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах та 05.03.01 – процеси механічної і фізико-хімічної обробки, верстати та інструмент не використовувалися при написанні цієї докторської дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідались і були обговорені на Міжнародних, Всеукраїнських і Вузівських конференціях, а саме: Міжнародній науково-технічній конференції «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (Запоріжжя, 2007, 2008), Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми трибології» (Київ, 2010), Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» (Кременчуг, 2010), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Прикладні аспекти механіки та матеріалознавства в новітніх технологіях» (Кременчуг, 2011), Міжнародній науково-практичній конференції «Ольвійський форум – 2011» (Ялта, 2011), Medzinarodneno vedeckeho workshopu nekonvencne technologie 2011 (Zilina, 2011), Міжнародній науково-технічній конференції «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь, 2011), Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології життєвого циклу

авіаційних двигунів та енергетичних установок» (Запоріжжя-Алушта, 2011, 2012, 2013), Міжнародній науково-практичній конференції «IV Українсько-Польські наукові Діалоги» (Яремче, 2011), Міжнародній науково-практичній конференції «Трибологические основы повышения ресурса машин» (Москва, 2012), Міжнародній науковій онлайн конференції «Математическое и компьютерное моделирование в биологии и химии. Перспективы развития» (Казань 2012), Міжнародній науково-практичній конференції «Ольвійський форум-2012: стратегії України в геополітичному просторі» (Севастополь, 2012), Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Миколаїв, 2012), Другій технічній конференції українського відділення міжнародного відділення з просування матеріалів і технологій (SAMPE) «Технологічна модернізація авіабудівного виробництва – ключ до успіху на ринках авіаційної техніки» (Київ, 2012), Міжнародній науково-практичній конференції «Ольвійський форум-2013: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі» (Ялта, 2013), 3-ій технічній конференції українського відділення міжнародного товариства SAMPE «Активізація науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт – шлях до скорочення термінів створення нової конкурентоспроможної техніки та зменшенню супутніх витрат» (Київ, 2013), Четвертій технічній конференції українського відділення міжнародного товариства з просування матеріалів та технологій (SAMPE) «Технологічний розвиток аерокосмічної галузі – одна з основних передумов відновлення обсягів виробництва в машинобудуванні» (Київ, 2014), III Міжнародній науково-технічній конференції «Машины и пластическая деформация металлов» (Запоріжжя, 2015), П'ятій технічній конференції українського відділення міжнародного товариства з просування матеріалів та технологій (SAMPE) «Українські високі технології як основа міжнародних коопераційних машинобудівних проєктів» (Київ, 2015), Шостій технічній конференції українського відділення міжнародного товариства з просування матеріалів та технологій (SAMPE) «Управління авіаційним виробництвом в перехідний період» (Київ, 2016), на щорічних науково-практичних конференціях за результатами наукової діяльності «Гиждень науки» Запорізького національного технічного університету.

Доповідь по дисертації в повному обсязі була представлена на X міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів та енергетичних установок» (Запоріжжя-Алушта, 2013).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано на чотирьох мовах (українській, російській, англійській і французькій) в 59 друкованих працях (з них 9 одноосібних), зокрема монографій – 1, статей – 30 (6 у зарубіжних виданнях), патентів України – 18, а також у 10 тезах конференцій.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається з вступу, шести

розділів, загальних висновків, списку використаної літератури з 205 найменувань і 4 додатки. Загальний обсяг дисертації включає 401 сторінок друкарського тексту; з них 76 рисунків по тексту, 24 рисунка на окремих сторінках, 36 таблиць, 4 додатки на 54 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** визначена актуальність проблеми, яка вирішена в дисертації, сформульована мета, основні завдання, наукова новизна, практичне застосування, об'єкт і предмет дослідження, основні положення, що автор вносить на захист.

У **першому розділі** роботи проведено аналіз стану досліджень в області зношування вузлів тертя та дано загальну характеристику трибоз'єднань, які зношуються при багатокомпонентному динамічному навантаженні. Показано, що згідно з запропонованою класифікацією трибосистем за видами багатокомпонентного термомеханічного навантаження розглянуті вузли можливо поділити на такі, що працюють в умовах осцилюючого (реверсного) і однонаправленого проковзування. При цьому осцилююче проковзування може відбуватися з малою амплітудою 0,025...50 мкм (фретинг) та високо амплітудне – більше 50 мкм. Постійне багатокомпонентне проковзування відбувається у трибоз'єднаннях «деталь-ріжучий інструмент» та у поступальних площинних парах IV класу з періодичним ударним розривом контакту (типу «напрямна-ланцюг»). Велика частина деталей трибоз'єднань різних машин і механізмів (газотурбінні установки), в процесі експлуатації перебувають в умовах трикомпонентного динамічного навантаження (удар і проковзування в двох взаємно перпендикулярних напрямках), у зв'язку з функціональними взаємними переміщеннями у різних напрямках, наявністю вібрацій або їх комбінаціями.

Оскільки в літературних джерелах зносостійкість трибоз'єднань, які працюють в умовах фретингу, розглянуто достатньо широко, в цій роботі вони не досліджувались. Аналіз публікацій показав, що майже відсутні відомості в області дослідження процесів контактної взаємодії та зношування матеріалів за багатокомпонентними термомеханічними умовами навантаження з високо амплітудним реверсним проковзуванням та постійним проковзуванням.

З аналізу літературних джерел витікає ґрунтовність досліджень впливу зовнішніх параметрів навантаження на зносостійкість матеріалів. Питанням впливу динамічних режимів роботи на процеси тертя і зношування, на довговічність деталей машин присвячені роботи А.Я. Аляб'єва, С.В. Венцеля, М.Л. Голега, В.А. Гришка, В.В. Запорожця, Л.Й. Івценка, В.Е. Канарчука, М.В. Кіндрачука, В.Н. Лозовського, В.Д. Євдокімова, С.В. Серенсена, Е.А. Чудакова, В.В. Шевелі, Д.М. Годфрі,

Р. Уотерхауза, И. Холлідея й ін. Проте виконані дослідження не дають відповіді на багато питань практики конструювання, експлуатації і відновлення трибовузлів, оскільки мають відношення, в основному, до конструкційних сталей і сплавів, що експлуатуються в умовах нормальних температур без урахування складності навантаження.

Зносостійкість матеріалів при підвищених температурах досліджувалася А.П. Семеновим, Ю.Г. Ткаченком, В.В. Шевелею, Л.Й. Івченко, А.В. Карасьовим, Л.А. Чатиняном, И.Г. Носовським, И.В. Петерсоном, Дж. Гласготом, Г. Вудом, М. Оверсом та ін. Водночас, у роботах цих авторів у більшій мірі досліджуються процеси тертя та зношування в умовах однонаправленого тертя ковзання, або реверсивного тертя (без розриву контакту), окрім робіт Л.Й. Івченко, і майже не враховується динамічний характер контактного навантаження, який прикладається нормально до поверхні тертя, та має можливість одночасного проковзування у різних напрямках. Між тим, розрив контакту, який призводить до появи значних ударних навантажень, та проковзування у різних напрямках вносять свої корективи у процеси тертя та зношування.

Крім того, неоднозначний вплив мінусових температур на фізико-механічні характеристики металів супроводжується відмінністю зносостійкості в трибоз'єднаннях, отриманих різними авторами, що призводить до суперечливої думки про вплив мінусових температур на зносостійкість. Зокрема, про збільшення зносу при мінусових температурах вказує І.В. Крагельський, В.В. Алісіна, А. Сафонов, Л. Сафонов, про зниження зносу – Д.Е. Буторін, С.Н. Філоненко, П.Т. Слободяник, В.І. Кулеба, І.М. Любарський, про можливе збільшення або зниження зносу залежно від температури і матеріалу – Е.А. Памфілов, С.С. Грядунов, А.В. Макаров, Т.Е. Куренях, Г.Ф.Тарасов, А.І. Горбуля, про незначний вплив мінусових температур на зносостійкість – Ю.Н. Дроздов, І.Г. Павлов, В.Н. Пучків, Г.Н.Преснякова, І.М.Любарський, В.Ф. Удовенко, Е.І. Марьяхіна, С.С. Черняк.

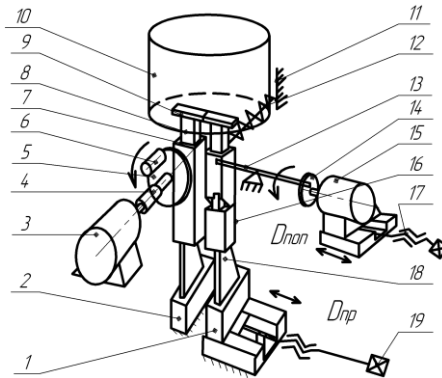
Автори досліджень в цілому формулюють однакові висновки: неможливість охопити процеси в умовах складного навантаження, в рамках єдиної теорії, що обумовлює провідну роль експерименту в подібних дослідженнях. Нехтування складністю комплексів чинників навантаження призводить до спотворення результатів досліджень і створення картини процесу зношування, яке мало відповідає реальному процесу.

Дослідження впливу чинників навантаження на зносостійкість трибоз'єднань не можуть вважатися повними, якщо не враховуються структурні зміни поверхневого шару. У більшій частині досліджень довговічності трибоз'єднань при багатокомпонентному динамічному навантаженні цьому питанню приділяється недостатньо уваги.

На підставі проведеного аналізу сформульовано основні напрямки

досліджень і розробок, спрямованих на досягнення мети роботи.

Другий розділ присвячено питанням методичного обґрунтування досліджень з урахуванням специфіки навантаження, що полягає в особливостях динамічного навантаження, у кінематиці руху (проковзуванні, ударі із наступним проковзуванням, ударі з проковзуванням в двох взаємно перпендикулярних напрямках), у впливі температури навколишнього середовища. Розроблений комплекс експериментального устаткування включає установки, які дозволяють моделювати кінематику переміщень, тепловий і напружений стан реального трибовузла, дають можливість досліджувати кінетику пошкоджуваності поверхневого шару, проводити апробацію конструкторсько-технологічних засобів підвищення зносостійкості деталей, які працюють за умов багатокomпонентного термомеханічного навантаження, а також здійснювати експрес-метод оцінки працездатності матеріалів і покриттів: установка із закрученими тримачами; установка з неврівноваженою масою (рис.1); установка для дослідження зносу зразка при складному трикомпонентному навантаженні з двома контактними парами; установка для дослідження зносу зразка при ударному навантаженні з двома контактними парами.



1 - права стійка; 2 - ліва стійка; 3 - електродвигун поздовжньої амплітуди і енергії удару; 4 - гнучкий вал; 5 - диск; 6 - неврівноважена маса; 7 - державка лівого зразка; 8 - база зразка; 9 - зразки; 10 - камера вузла завдання температури; 11 - упорна поверхня; 12 - пружина; 13 - вузол тонкого регулювання амплітуди поперечного проковзування; 14 - ексцентрик; 15 - електродвигун вузла завдання поперечного проковзування; 16 - державка правого зразка; 17, 19 - передача гвинт-гайка; 18 - пакети плоских пружин.

Рис. 1 – Схема установки з неврівноваженою масою

При випробуваннях здійснювали контроль параметрів, які визначають

протікання процесів руйнування поверхневого шару (сила тертя, навантаження в контакт, частота й амплітуда коливань, число циклів навантаження, температура середовища). У процесі досліджень оцінювали величину об'єму зношеного матеріалу із використанням методів профілографування (профілограф моделі 201 і моделі 170311) та сканування на приладі MDX 20.

Матеріалами для досліджень були використані сплави та сталі: ХТН-61, ХН77ТЮР (ЭИ437Б), 60С2А, ВТ20, ВТ3-1, 40Х. Контакт здійснювався за формою площина – площина на установці рис. 1, матеріали зразків однойменні. У разі потреби забезпечення мінусової кліматичної температури контакту зразків, (при запуску і зупинці двигуна в зимовий період часу, в умовах Крайньої Півночі, зльоті і посадці з висотних аеродромів і майданчиків, польоту на висоті 10000 м температура навколишнього повітря досягає до мінус 50°...60°С), випробування на зношування проводили в теплоізольованій камері, куди нагнітали пари рідкого азоту. Умови проведення випробувань: амплітуда поперечних проковзувань 0...0,3 мм; амплітуда поздовжніх проковзувань 0,1 мм; частота поперечних проковзувань 30 Гц; частота поздовжніх проковзувань 66 Гц; нормальне навантаження 20...80 Н, час випробувань до 4 годин.

Вплив вільних макрорадикалів на зносостійкість трибоз'єднань визначався проведенням порівняльної оцінки зміни інтенсивності зношування для зразків сталі 40Х в умовах трикомпонентного навантаження з подаванням в зону контакту розчину поліметилметакрилату (ПММА) в ацетоні (1 гр порошку ПММА на 200 мл ацетону) на установці рис. 1. Випробування проводили в режимі граничного і напіврідинного тертя. Оцінку сили тертя проковзувань і сили тертя спокою при умовах використання розчину здійснювали на модернізованому трибометрі мод. ТММ 32А з можливістю визначення електроопору контакту і виведенням показників на персональний комп'ютер.

Керування працездатністю трибоз'єднань неможливе без застосування комплексу сучасних методів оцінки мікрогеометрії поверхні і стану поверхневого шару зразків після випробувань. Для оцінки зміни стану поверхневого шару в роботі використовувався трибоспектральний метод і метод аналізу електронної будови поверхневого шару металів на основі зміни роботи виходу вільних електронів. Вони дозволяють оцінити зміну формування в поверхневому шарі кристалітів з різними міцностними і деформаційними властивостями, структурний і енергетичний стан поверхні, ступінь пластичної деформації.

Оцінку поверхневого шару зразків трибоспектральним методом (методом ідентифікації структурного стану поверхневого шару статистичними характеристиками при скануванні діамантовим індентором, розробленим В.В. Запорожцем) проводили на установці НАУ «Мікрон-

гамма» (розроблений В.В. Запорожцем, С.Р.Ігнатовичем, І.М. Закієвим) в процесі безперервного вдвлювання і сканування індентором.

Режими сканування: величина навантаження на індентор – 0,1 Н; швидкість вантаження – 0,01 Н/с; швидкість сканування – 40 мкм/с. Аналіз значень опору локальних мікрооб'ємів при скануванні проводили на основі розрахунків за програмою статистичної обробки STATISTICA 10.

Оцінка поверхневого шару зразків методом аналізу електронної будови поверхневого шару металів основана на тому, що унаслідок неоднорідного стану металеві поверхні виникає відповідний рельєф електростатичного бар'єру, обумовлений розбіжністю роботи виходу електрона для різних ділянок поверхні. Порівнюючи початковий енергетичний рельєф (до випробувань на зносостійкість) з рельєфом після випробувань можна визначити ділянки поверхні, які зазнали різний ступінь пластичної деформації. Зміна енергетичного стану поверхневого шару матеріалів, які взаємодіють в процесі тертя, здійснюється на основі аналізу розподілу величини роботи виходу електронів (РВЕ) по поверхні, яку визначали на спеціальному пристрої розробленому в ЗНТУ.

Вимірювання контактної різниці потенціалів в роботі виконували при атмосферному тиску. Частота коливань електроду-еталону із золота складала 500 Гц, діаметр 1,4 мм. Розподіл роботи виходу електрона визначали скануванням з кроком 0,2 мм по одній лінії в центрі робочої поверхні зразків з точністю до 5 еВ.

Мікрогеометрію і топографію поверхні зразків визначали на безконтактному 3D профілографі "Мікрон-альфа" (НАУ) за методикою НАУ та на профілометрі-профілографі моделі 201 і моделі 170311.

Дослідження зносостійкості поступальних площинних пар IV класу з періодичним ударним розривом контакту (типу «напрямна-ланцюг») та коливального руху ланцюга здійснювали на вимірному стенді. Моделювання зони контакту трибоз'єднання типу «напрямна-ланцюг» виконували на установці рис. 1.

У третьому розділі досліджуються процеси зношування при термодинамічних режимах навантаження. Визначено шлях тертя в трибоз'єднанні при трикомпонентному динамічному навантаженні, коли діють коливання у взаємно перпендикулярних напрямках:

$$L = C_1 C_2 C_3 \left(t - \frac{2l_0}{A_z f_z} \right) \sqrt{(A_x f_x)^2 + \left(\frac{f_y^2 A_y}{f_x} \right)^2}, \quad (1)$$

де C_1 - коефіцієнт фази гармоніки вібраційних зміщень; C_2 - коефіцієнт фізико-механічних властивостей контактуючих матеріалів (пружні і пластичні властивості); C_3 - коефіцієнт відновлення нормального і тангенціального імпульсів при ударі; A_x, A_y, A_z - амплітуда коливань по осі x ,

y, z , мм; f_x, f_y, f_z - частота коливань по осі x, y, z , хв^{-1} ; t - час роботи трибоз'єднання, хв .

Розглянуто контактну задачу механіки руйнування трибоз'єднань, які експлуатуються в умовах багатокомпонентного термомеханічного навантаження. Рішення контактної задачі механіки руйнування можливо у рамках трибофатики на підставі моделі урахування взаємного впливу процесів механічного (об'ємного) руйнування і фрикційної втоми. Під дією багатократних імпульсних навантажень початкова структура матеріалу, що деформується, істотно змінюється. При багатократному навантаженні виникають втомні мікротріщини на поверхні і розташовуються в активній площині ковзання, в яких діє максимальне напруження зсуву (рис. 2).

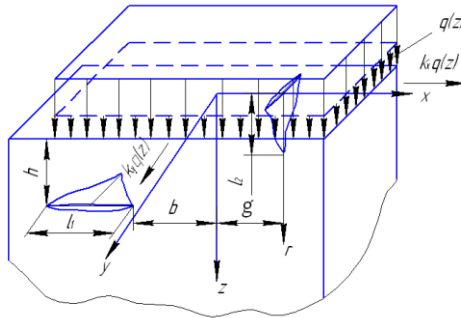


Рис. 2 – Схема розташування горизонтальної і вертикальної тріщин при терті з трикомпонентним динамічним навантаженням

Поверхня навантажена нормальною змінною напругою $q(z)$ при дії ударного навантаження і тангенціальною напругою τ_x і τ_y при зворотно поступальному проковзуванні в двох взаємно перпендикулярних напрямках контрзразка. Враховуючи вірогідність істотного впливу швидкості переміщення на величину коефіцієнта тертя, ділянка контакту між двома тілами визначається умовами:

$$\begin{cases} \tau_{xy} = -q(z) \sqrt{k_x^2 + k_y^2} + (E'_m / \pi^2) \rho & , \\ \sigma_z = -q(z) \end{cases} \quad (2)$$

де k_x і k_y – коефіцієнти тертя по осі x і y ; E' – зведений модуль пружності; ρ – кутовий коефіцієнт виступу.

Коефіцієнти інтенсивності напруження для горизонтальної тріщини

$$\begin{cases} K_I(-b-l_1) = \lim_{x \rightarrow (-b-l_1)} \sqrt{2[x - (-b-l_1)]} \sigma_z(x, h) \\ K_{II}(-b-l_1) = \lim_{x \rightarrow (-b-l_1)} \sqrt{2[x - (-b-l_1)]} \tau_{xy}(x, h) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} K_I(-b) = \lim_{x \rightarrow (-b)} \sqrt{2[x - (-b)]} \sigma_z(x, h) \\ K_{II}(-b) = \lim_{x \rightarrow (-b)} \sqrt{2[x - (-b)]} \tau_{xy}(x, h) \end{cases},$$

для вертикальної

$$\begin{cases} K_I(l_2) = \lim_{z \rightarrow l_2} \sqrt{2(z - l_2)} \sigma_x(g, z) \\ K_{II}(l_2) = \lim_{z \rightarrow l_2} \sqrt{2(z - l_2)} \tau_{xy}(g, z) \end{cases}. \quad (4)$$

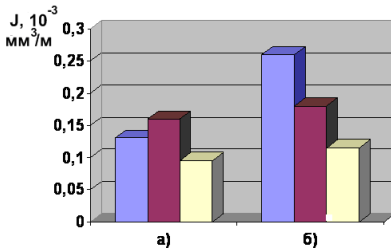
За допомогою апарату сингулярних інтегральних рівнянь можливе вирішення задачі про пружну і граничну рівновагу плоских пластин, ослаблених системою довільно орієнтованих прямолінійних тріщин поздовжнього зсуву, тобто визначення напружено-деформованого стану поверхонь при терті.

Як випливає з результатів досліджень, незалежно від фізико-хімічних властивостей розглянутих сталей і сплавів збільшення складності динамічного навантаження в контакті трибоз'єднання призводить до зниження зносостійкості металів. Додавання ударного навантаження до тертя в умовах проковзування (двокомпонентне навантаження) супроводжується підвищенням інтенсивності зношування зразків з титанового сплаву BT20 в 2,2 рази, сплаву ХН77ТЮР – в 1,2 рази, сталі 40Х – в 1,1 рази (рис. 3). Додавання до двокомпонентного навантаження додаткового проковзування в напрямі перпендикулярному до первинного проковзування (трикомпонентне навантаження), супроводжується ще більшим збільшенням інтенсивності зношування. Для вказаних металів відмічено збільшення інтенсивності зношування в 1,3 – 1,4 рази. (рис. 4); для сплаву ХТН61 і сталі 60С2А – відповідно в 2,5 і 1,7 рази.

З підвищенням амплітуди поперечних проковзувань зростає об'ємна інтенсивність зношування, яка визначалась як відношення об'єму зношеного матеріалу до шляху тертя (рис.5). Це указує на зміну умов тертя і стану поверхневого шару зразків. Причому, збільшення амплітуди поперечних проковзувань від певного граничного значення не призводить до зростання об'ємної інтенсивності зношування. Як випливає з представлених результатів, чим більш зносостійким в умовах дослідів є матеріал, тим менше величина граничного значення амплітуди поперечних проковзувань, тобто тим швидше матеріал «приспосовується» до зміни поперечних проковзувань при терті в умовах складного трикомпонентного навантаження.

Зносостійкість досліджених матеріалів за даних умов тертя і мінусових температур вища, ніж при позитивних температурах незалежно від виду навантаження. Вплив мінусової температури на інтенсивність зношування знижується при підвищенні зносостійкості матеріалу (рис.6).

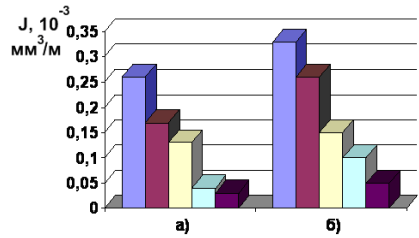
Ускладнення характеру навантаження зразків при терті призводить до збільшення зносу, як при плюсових, так і при мінусових температурах.



■ VT20 ■ 40X ■ XH77TIOP

а) – однокомпонентне (проковзування); б) – двокомпонентне (удар з подальшим проковзуванням)

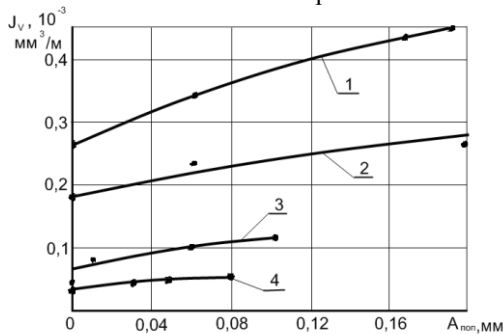
Рис. 3 – Діаграма зміни інтенсивності зношування різних сплавів при однокомпонентному і двокомпонентному навантаженні



■ VT20 ■ 40X ■ XH77TIOP ■ XTH61 ■ 60C2A

а) – двокомпонентне (удар з подальшим проковзуванням); б) – трикомпонентне (удар і проковзування в двох взаємно перпендикулярних напрямках)

Рис. 4 – Діаграма зміни інтенсивності зношування різних сплавів при двокомпонентному і трикомпонентному навантаженні

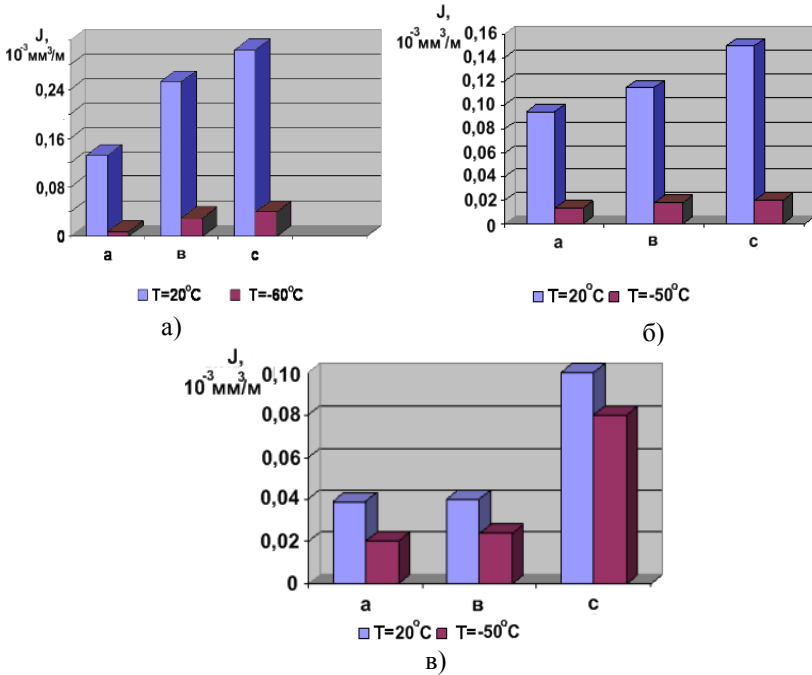


1 - сплав VT20; 2 – сталь 40X, 3 – сплав XTH-61; 4 - сталь 60C2A

Рис.5 – Залежність інтенсивності зношування від амплітуди поперечних проковзувань при зношуванні зразків різних матеріалів

Так, для сплаву VT20 (рис. 6 а) тертя з однокомпонентним навантаженням при температурі -60°C порівняно з тертям при $T = 20^{\circ}\text{C}$ характеризується зниженням інтенсивності зношування в 16 разів, з двокомпонентним і трикомпонентним навантаженням – відповідно в 8,5 і 7,6 рази. Як було відмічено, сплави XH77TIOP і XTH-61 більш зносостійкі

незалежно від виду навантаження в даних умовах тертя. Підвищення зносостійкості цих сплавів при мінусових температурах (-50°C) відбувається відповідно при однокомпонентному навантаженні в 6,3 і 1,95 разів, при двокомпонентному навантаженні – в 6,3 і 1,6 рази і при трикомпонентному навантаженні – в 7,5 і 1,25 разів (рис.6 б, 6 в).



а – однокомпонентне (проковзування); б – двокомпонентне (удар з подальшим проковзуванням); в – трикомпонентне (удар і проковзування в двох взаємно перпендикулярних напрямках)
 Рис. 6 – Діаграма зміни інтенсивності зношування сплаву: а) – VT20; б) – ХН77ГЮР; в) – ХТН-61 при різних видах навантаження з мінусовими температурами

Зокрема, навантаження зразків поперечними проковзуваннями з амплітудою до 0,05 мм (трикомпонентне навантаження) призводить до збільшення об'ємної інтенсивності зношування сплаву ХН77ГЮР в 1,3 рази при позитивній і мінусовій температурі в порівнянні з об'ємною інтенсивністю зношування при двокомпонентному навантаженні. Для сплавів ХТН-61 і VT20 ці зміни складають відповідно в 2,5 разів і в 1,2 рази при плюсовій температурі, в 3,2 рази і в 1,3 рази – при мінусовій температурі.

Оцінка і аналіз зносу поступальних площинних пар IV класу з періодичним ударним розривом контакту (типу «напрямна-ланцюг») та трибоз'єднань «деталь-ріжучий інструмент» підтверджує наявність складного трикомпонентного навантаження в контактній зоні.

Четвертий розділ містить результати досліджень структурного стану та якості поверхневого шару деталей після контактування в умовах багатокомпонентного термомеханічного навантаження.

Дослідження, проведені на приладі "Мікрон-гамма", указують на те, що зносостійкість деталей трибоз'єднань значною мірою залежить від стану поверхневого шару контактуючих деталей. Як свідчать показники зносу (рис. 5) і аналіз отриманих трибограм (рис. 7), трикомпонентне навантаження і підвищення амплітуди поперечних коливань призводять до вирівнювання міцносних і деформаційних властивостей поверхневого шару, що супроводжується зменшенням розкиду сили тертя при скануванні відповідних зразків. Підвищений знос відбувається у деталей з рівномірним зниженою міцністю поверхневим шаром. Цьому сприяє підвищення складності навантаження в трибоз'єднанні.

Найбільш наглядно відмічене положення можна спостерігати по зміні показників поверхневого шару зразків сталі 60C2A (рис. 7 а). Двокомпонентне навантаження в процесі випробувань (трибограма 3), на відміну від трикомпонентного (трибограми 1 і 2), призводить до утворення поверхневого шару, що має фрагменти різної величини із збільшеним розкидом міцності. Такий стан поверхневого шару супроводжується збільшенням і різкими змінами сили тертя індентора при скануванні зразків і зменшенням зносу. Дисперсія сили тертя складає 0,082. При цьому динамічний коефіцієнт, який відображає кінетику процесу є структурно чутливим і змінюється від $5,6 \cdot 10^{-3}$ до 4,3984 згідно рівнянню 6-го ступеню залежності сили тертя від часу отриманого за інтерполяцією Лагранжа:

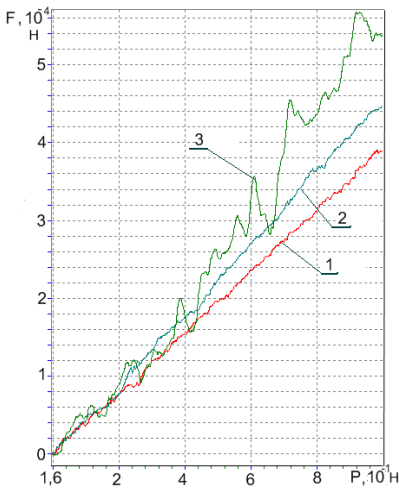
$$F = 0,0056t^6 - 0,1033t^5 + 0,7362t^4 - 2,5507t^3 + 4,3984t^2 - 2,3943t + 0,6162. \quad (5)$$

Подібний поверхневий шар можна охарактеризувати як великофрагментний. Поперечні проковзування призводять до отримання дрібнофрагментного поверхневого шару (трибограми 1 і 2). Причому, підвищення амплітуди поперечних проковзувань призводить до зниження міцності, підвищення рівномірності і однорідності поверхневого шару, що супроводжується зниженням величини і розкиду сили тертя індентора. Дисперсія сили тертя складає відповідно $2,9 \cdot 10^{-3}$ та $3,5 \cdot 10^{-3}$, динамічний коефіцієнт перебуває в межах $0,5 \cdot 10^{-3} \dots 0,5394$ та $4,1 \cdot 10^{-3} \dots 2,329$ (рівняння 6, 7). При цьому знижується зносостійкість.

$$F = -0,0005t^6 + 0,0044t^5 + 0,01t^4 - 0,191t^3 + 0,5394t^2 + 0,3351t + 0,0053. \quad (6)$$

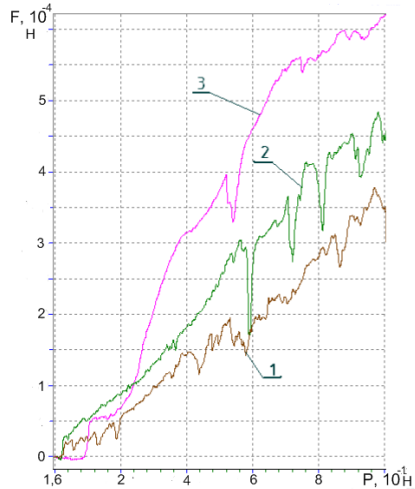
$$F = -0,0041t^6 + 0,0711t^5 - 0,4698t^4 + 1,4685t^3 - 2,2134t^2 + 2,329t - 0,4167. \quad (7)$$

Отримані результати узгоджуються з даними зміни роботи виходу електрона (РВЕ) з поверхні зразків. В процесі деформації тертям відбувається структурна еволюція поверхні металів, яка відображається в зміні розподілу РВЕ по поверхні. Як випливає з рис. 8, стан поверхневого шару зразків із сплаву 60С2А до тертя приблизно однаковий і визначається РВЕ близько 4 еВ. В результаті тертя з різною амплітудою поперечних проковзувань стан поверхневого шару зразків змінився. Тертя з двокомпонентним навантаженням ($A_{\text{поп}} = 0$) призводить до отримання поверхневого шару з підвищеним за величиною і великим розкидом РВЕ (від 4,0 до 4,1 еВ). Наявність і підвищення амплітуди поперечних проковзувань призводить до зменшення величини і розкиду РВЕ (біля 3,98 еВ) .



а)

1 - амплітуда поперечних проковзувань 0,08 мм; 2 - амплітуда поперечних проковзувань 0,06 мм; 3 - амплітуда поперечних проковзувань 0 мм



б)

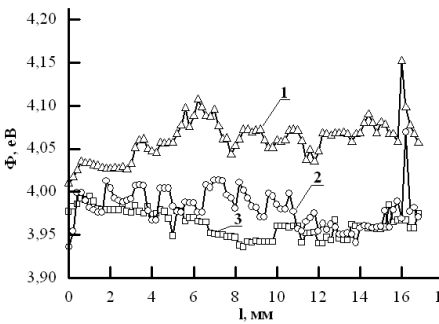
1 - амплітуда поперечних проковзувань 0,05 мм; 2 - амплітуда поперечних проковзувань 0,01 мм; 3 - амплітуда поперечних проковзувань 0 мм

Рис. 7 - Трибограми при скануванні зразків із: а) – сталі 60С2А; б) – сплаву ХТН-61 після випробувань з різними амплітудами поперечних проковзувань (Р – навантаження на індентор).

Збільшення амплітуди поперечних проковзувань призводить до зменшення дисперсії РВЕ уздовж поверхні зразків із сплаву ХТН-61 (рис.9).

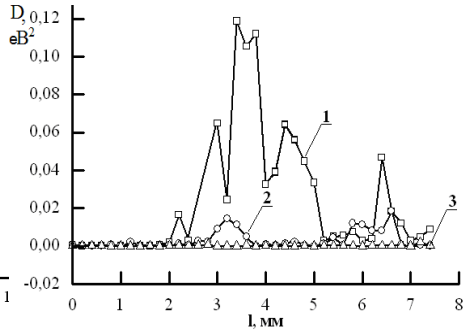
Зменшення розкиду в значеннях РВЕ указує на підвищення при цьому однорідності структури поверхневого шару.

Поверхня зносу зразків, отриманих в процесі тертя з двокомпонентним і трикомпонентним навантаженням, суттєво відрізняється і по параметрах рівноважної шорсткості. З підвищенням амплітуди поперечних проковзувань від 0 до 0,2 мм, шорсткість поверхні знижується в поперечному напрямі в 1,3 - 10 разів; у подовжньому - в 1,3 - 2 рази для всіх досліджених матеріалів (60С2А, ХТН-61, ВТ20). Наявність і збільшення амплітуди поперечних проковзувань супроводжується підвищенням однотонності мікрогеометрії поверхні, що вказує на отримання більш однорідного рівномірного



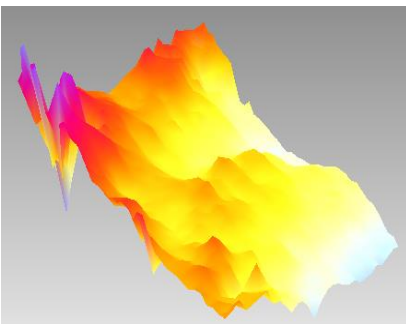
1 - $A_{\text{поп}}=0$ мм; 2 - $A_{\text{поп}}=0,06$ мм; 3 - $A_{\text{поп}}=0,20$ мм

Рис. 8 - Розподіл РВЕ уздовж поверхні зразків із сталі 60С2А після зносу з різною амплітудою поперечних проковзувань.

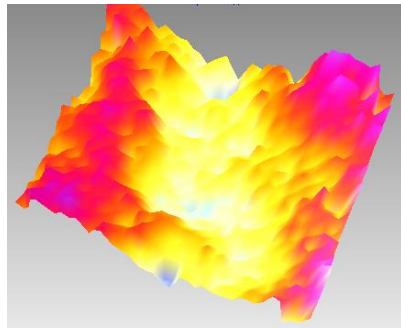


1 - $A_{\text{поп}}=0$ мм; 2 - $A_{\text{поп}}=0,05$ мм; 3 - $A_{\text{поп}}=0,1$ мм

Рис.9 - Дисперсія РВЕ уздовж поверхні зразків із сплаву ХТН-61 після зносу з різною амплітудою поперечних проковзувань.



а)

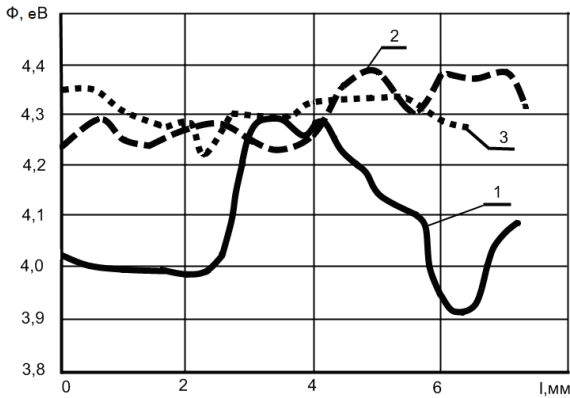


б)

Рис. 10 – 3D моделі зношених поверхонь сплаву ХТН-61 при двокомпонентному – а) і трикомпонентному – б) навантаженні

поверхневого шару зразків. Поперечні проковзування при трикомпонентному навантаженні призводять до утворення поверхні меншої шорсткості без явних поздовжніх рисок, які наглядно можна побачити на 3D моделях поверхонь. Як приклад на рис. 10 представлені 3D моделі зношених поверхонь сплаву ХТН-61 при двокомпонентному і трикомпонентному навантаженні.

Висока температура при терті сплаву ХТН-61 призводить до зміни стану поверхневого шару – отриманням поверхні з великим значенням величини і зменшеним розкидом РВЕ (рис. 11). Підвищення зносу зразків при нормальних температурах характеризується зменшенням величини РВЕ (крива 1). Близькій величині зносостійкості сплаву ХТН-61 при температурах 500°C і 900°C відповідає близький енергетичний рельєф поверхні – криві 2 і 3.



1 – T = 20°C; 2 – T = 500°C; 3 – T = 900°C;

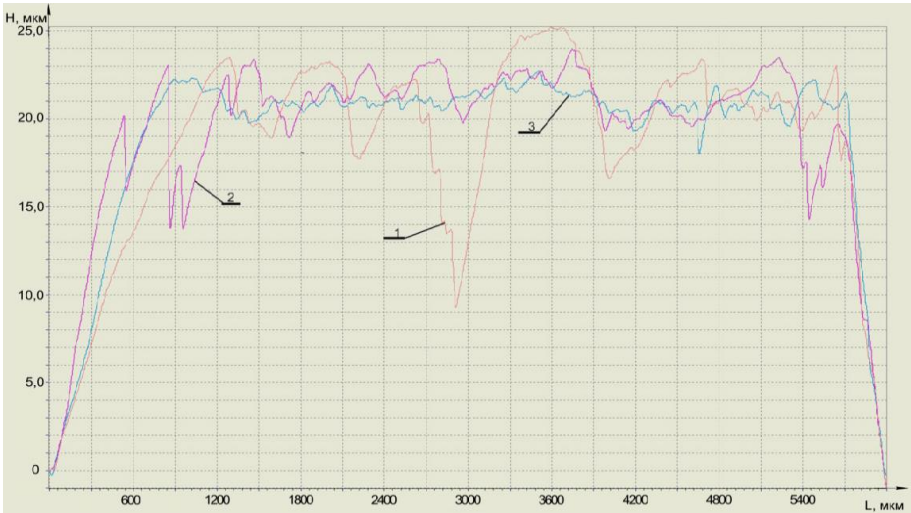
Рис. 11 – Розподіл роботи виходу електрона вздовж поверхні зразків із сплаву ХТН-61 після зношування з різними температурами

Стан поверхневого шару зразків після тертя з різними умовами динамічного навантаження при мінусових температурах узгоджується з експериментами за оцінкою співвідношення механічних властивостей, параметрів структури і зносостійкості за нормальних температур.

Найбільш наочно це можна бачити по зміні показників поверхневого шару зразків із сплаву ХТН-61. Як впливає з аналізу трибограм, отриманих при скануванні зразків із сплаву ХТН-61 після випробувань з температурами -50°C при різних видах навантаження, наведених на рис. 12, підвищення складності навантаження в трибоз'єднанні супроводжується зменшенням розкиду сили тертя при скануванні відповідних зразків і, як наслідок, підвищенням зносу. Найменший знос спостерігається при однокомпонентному навантаженні з утворенням найбільш нерівномірного поверхневого шару (трибограма 1). Трикомпонентне навантаження, яке

супроводжується найбільшою величиною зносу, призводить до вирівнювання міцностних і деформаційних властивостей, зменшення величини фрагментів і підвищення рівномірності поверхневого шару, що характеризується зменшенням розкиду сили тертя при скануванні (трибограма 3).

Дисперсія сили тертя при однокомпонентному, двокомпонентному та трикомпонентному навантаженні складає відповідно 2,5; 0,72 та 0,4. Відповідна зміна динамічного коефіцієнту з відображенням кінетики процесу відбувається згідно рівнянь 6-го ступеню залежності сили тертя від часу отриманого за інтерполяцією Лагранжа:



1 – однокомпонентне; 2 – двокомпонентне; 3 – трикомпонентне

Рис. 12 – Зміна заглиблення індентора по довжині сканування L зразків із сплаву ХТН-61 після випробувань з температурою -50°C при різних видах навантаження

$$F = -0,0001t^6 - 0,0022t^5 + 0,1175t^4 - 1,3646t^3 + 6,5638t^2 - 13,401t - 1,3734. \quad (8)$$

$$F = -0,0004t^6 + 0,0123t^5 - 0,1299t^4 + 0,5868t^3 - 0,8226t^2 - 1,2519t - 7,6108. \quad (9)$$

$$F = -0,0004t^6 + 0,0117t^5 - 0,1415t^4 + 0,878t^3 - 2,8888t^2 - 4,4981t - 12,855. \quad (10)$$

При цьому значення шорсткості поверхні в поперечному напрямі зразка вказують на підвищення однорідності мікрогеометрії поверхні при терті зі збільшенням складності динамічного навантаження. Так, тертя з однокомпонентним навантаженням супроводжується поперечною рівноважною шорсткістю з $R_z = 3,599$ мкм; $R_a = 1,702$ мкм, двокомпонентним

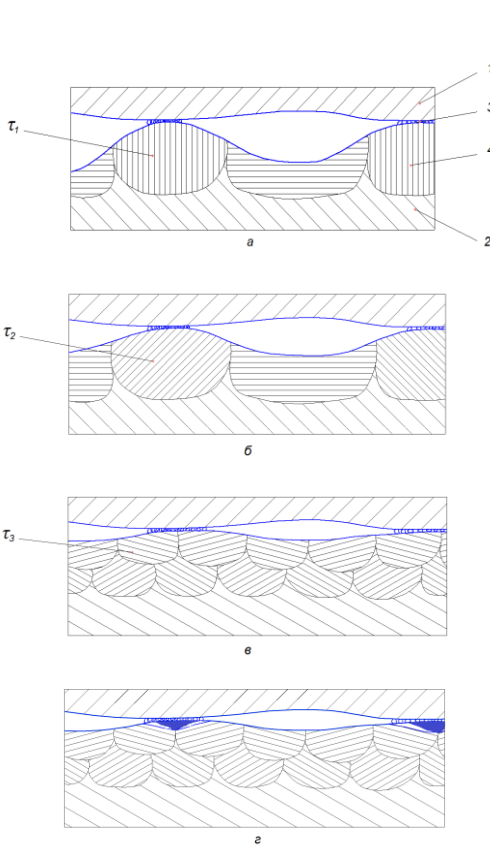
і трикомпонентним навантаженням – відповідно $R_z = 3,005$ мкм; $R_a = 1,125$ мкм і $R_z = 2,423$ мкм; $R_a = 1,039$ мкм.

П'ятий розділ присвячено визначенню природи руйнування деталей трибоз'єднань, а також запропонована модель зношування металів в умовах багатокомпонентного термомеханічного навантаження з урахуванням того, що матеріал пари тертя є складною системою, яка самоорганізовується за рахунок текстурування поверхневих об'ємів металу.

На підставі комплексного аналізу кінетики структурних змін і зношування поверхневого шару контактуючих поверхонь при терті, наведених в розділах 3 і 4, встановлено існування чотирьох основних стадій розвитку ушкоджень поверхні: руйнування оксидних плівок; зниження міцності фрагментів; зменшення розмірів фрагментів; втомне руйнування. Відповідна модель структурної організації і руйнування поверхневого шару при терті наведена на рис. 13. та представляється у вигляді випадково розташованих фрагментів (кристалітів), які мають певний рівень міцності площин ковзання τ , що відрізняються напрямом, умовно показаних різним напрямом штрихування ділянок. Припускається наявність трьох видів руйнування: більшою мірою окислювального на першій стадії контактування, фрагментного - на другій і третій стадіях і міжфрагментного на четвертій стадії. Продукти зношування, що утворюються при цьому, мають різну величину, але, як випливає з моделі руйнування, величина зносу визначається не розмірами часток руйнованого металу, а інтенсивністю їх видалення, обумовленою структурним станом поверхневого шару. Таким чином, підвищений знос може супроводжуватися зниженням рівноважної шорсткості контактуючих поверхонь.

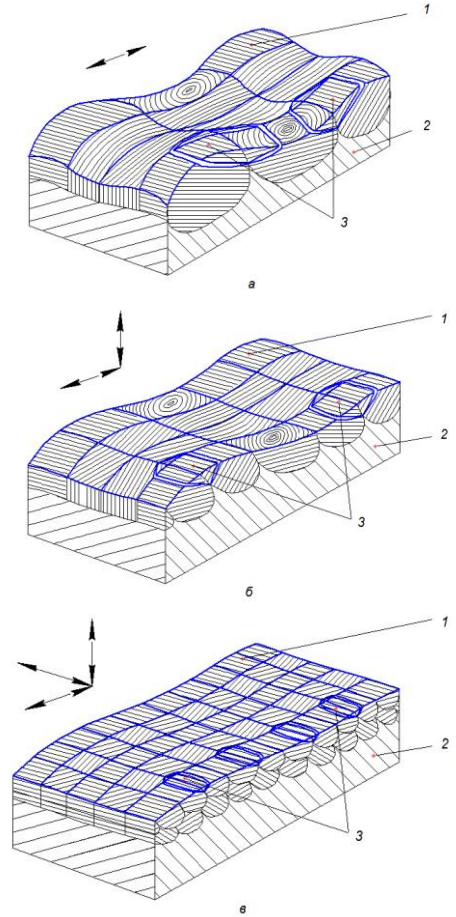
Модель руйнування поверхневого шару при терті з багатокомпонентним динамічним навантаженням представлена на рис. 14. Реверсне ковзання (однокомпонентне динамічне навантаження) спричиняє витягування фрагментів. Враховуючи формування при цьому порівняно великих за розміром фрагментів отримувани частки зносу чималі. Для їх відділення потрібно підвищену енергію, що супроводжується незначною швидкістю зносу (рис. 14 а). Отримувана рівноважна шорсткість значна і характеризується наявністю поздовжніх подряпин. Додавання до реверсного ковзання ударного навантаження (двокомпонентне навантаження) спричиняє зменшення величини фрагментів і їх міцності, підвищення рівномірності поверхневого шару, що сприяє зменшенню часток зносу і зниженню рівноважної шорсткості (рис. 14 б). Швидкість зносу при цьому зростає. Трикомпонентне навантаження характеризується диспергуванням фрагментів поверхневого шару, високою рівномірністю і однорідністю (рис. 14 в). Подрібнення фрагментації поверхневого шару, зниження міцності полегшує відділення часток зносу та призводять до високої швидкості зносу. При цьому формується однорідний рівномірний поверхневий шар з низькою

рівноважною шорсткістю, як в поздовжньому, так і в поперечному напрямках.



1 – спряжена поверхня; 2 -
основний шар; 3 - оксиди;
4 – фрагменти поверхневого шару

Рис. 13 - Модель структурної організації і руйнування поверхневого шару при терті: а) руйнування оксидних плівок; б) зниження міцності фрагментів; в) зменшення розмірів фрагментів; г) втомне руйнування.



1 – фрагменти поверхневого шару; 2 - основний шар; 3 – частки зносу

Рис. 14 - Модель руйнування поверхні при терті з багатокомпонентним динамічним навантаженням: а) однокомпонентне; б) двокомпонентне; в) трикомпонентне.

Перспективним напрямом регулювання зносостійкості трибоз'єднань, є введення в зону контакту вільних макрорадикалів. При цьому здійснюється застосування розглянутої в розділі 3 методики моделювання зародження, розвитку системи тріщин і процесів контактного руйнування поверхонь при терті. Запропоновано модель урахування взаємного впливу процесів механічного (об'ємного) руйнування і фрикційної втоми при наявності в зоні контакту вільних макрорадикалів, які активізують руйнування металу аналогічно низькомолекулярним поверхнево активним речовинам унаслідок утворення продуктів механічного руйнування молекулярних ланцюгів полімерів – вільних макрорадикалів.

Показано, що знос металорізального інструменту і формування поверхневого шару деталі при різанні відбувається при реалізації структурної адаптації в умовах багатокomпонентного навантаження. Запропоновано методику випробувань деталей трибоз'єднання «деталь-ріжучий інструмент» на основі установки представленою на рис. 1. Представлено можливість керування однорідністю структурного стану обробленого поверхневого шару і його зносостійкістю з використанням методу впливу вільних макрорадикалів на оброблену поверхню в результаті термомеханічної деструкції полімеру в зоні різання. У зв'язку з цим було удосконалено спеціальний абразивний матеріал у вигляді суцільних сферичних гранул, що містять абразивні зерна і зв'язувальний матеріал з термопластичного полімеру – поліакрилату. Розроблено способи виготовлення абразивного матеріалу, які дозволяють отримувати суцільні сферичні гранули покриті абразивними зернами з різними фізико-механічними властивостями полімерної зв'язки, рівнем деструкції і забезпеченням різної кількості вільних макрорадикалів в зоні контакту з оброблюваною поверхнею. Додаток спеціальних речовин-регуляторів при радикальній суспензійній полімеризації гранул з метилметакрилату дає можливість регулювати ступінь полімеризації (псевдожива радикальна полімеризація), величину, кількість отриманих молекул полімеру та ефективність трибологічної дії абразивного матеріалу на оброблюваний поверхневий шар внаслідок отримання необхідної кількості макрорадикалів при термомеханічної деструкції полімерної зв'язки.

У шостому розділі викладена розробка прикладних основ інженерії поверхні трибоз'єднань при багатокomпонентному навантаженні, що полягають в створенні зносостійкого поверхневого шару при виготовленні і експлуатації за рахунок урахування і керування розглянутими технологічними і експлуатаційними факторами. При цьому пропонуються наступні конструкторсько-технологічні рекомендації по підвищенню зносостійкості деталей машин і механізмів:

- конструкторські, направлені на зміну параметрів навантаження в трибоз'єднанні: зменшення нормального навантаження; виключення ударного навантаження; зменшення амплітуди поперечних проковзувань; зменшення амплітуди подовжніх проковзувань;

- технологічні, направлені на застосування умов контактування, які забезпечують формування поверхневого шару підвищеної зносостійкості: створення поверхневого шару з неоднорідним структурним станом; впровадження в зону контакту вільних макрорадикалів без подачі ЗОР; забезпечення в зоні контакту мінусових температур навколишнього середовища; забезпечення для жароміцних сплавів підвищених температур навколишнього середовища близько $0,4 \dots 0,5 T_{пл}$.

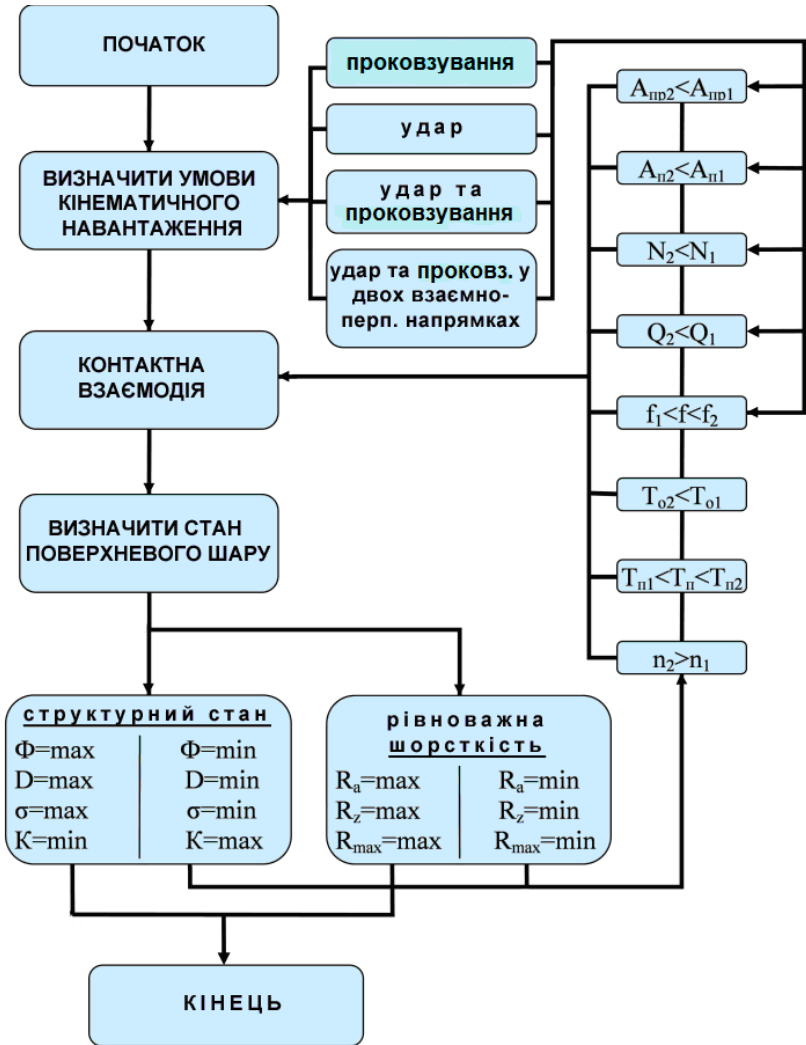
Розроблено алгоритм керування зносостійкістю трибоз'єднань (рис.15), що дозволяє формалізувати процедуру інтерпретації отриманих результатів величини зносу і стану поверхневого шару, порівняти отримані дані з еталонними (експериментальними або теоретичними), по результату порівняння обчислити логічні функції для оцінки зносостійкості і умов подальшої експлуатації трибоз'єднань.

На підставі результатів досліджень представлених в розділах 3 і 4 запропоновано способи визначення зносостійкості сталей і сплавів, які дозволяють за оцінкою одного з параметрів матеріалу і по отриманій раніше залежності цього параметра від зносостійкості еталонного матеріалу визначати зносостійкість. При цьому, як параметр матеріалу, виступає величина сили опору поверхневого шару, яка виникає при контактній деформації в процесі сканування індентором поверхні досліджуваного матеріалу та величина структурної однорідності поверхневого шару, яка визначається по зміні величини або розподілу РВЕ по поверхні деталей.

Аналіз зношування поступальних площинних пар IV класу з періодичним ударним розривом контакту (типу «напрямна-ланцюг»), етапів проектування, виготовлення і експлуатації пильних ланцюгів дозволили визначити основні чинники, що впливають на знос трибоз'єднання та розробити дві спеціальні конструкції інструменту – дискового і стрижневого типу для проведення прискорених випробувань на зносостійкість ріжучої ланки пильного ланцюга (час випробувань зменшується від 7 до 20 разів).

На основі аналізу зносу трибоз'єднань «деталь-ріжучий інструмент» розроблено пристрій для зменшення вібрацій ріжучого інструменту, що дозволяє знизити до 20% як амплітудну, так і частотну складову вібраційного процесу та стабілізувати нормальне навантаження в трибоз'єднанні за рахунок використання вібродемпфіруючих елементів.

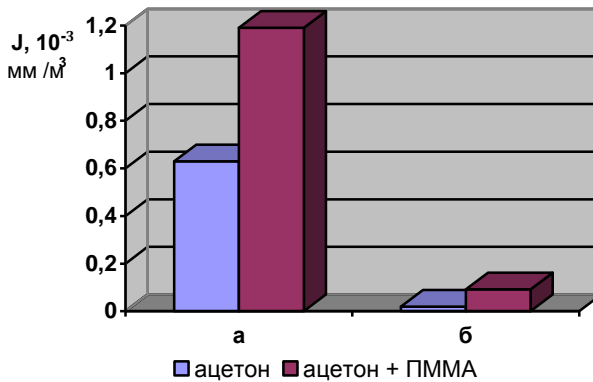
Показана можливість керування трибологічними властивостями зони контакту трибоз'єднань дією вільних макрорадикалів. Результати досліджень для зразків сталі 40X в умовах трикомпонентного навантаження на установці рис. 1 з введенням в зону контакту розчину ПММА в ацетоні вказують на суттєве збільшення інтенсивності зношування яка підвищується з зростанням кількості розчину (рис.16). При цьому збільшення інтенсивності зношування з введенням ПММА в зону контакту відбувається під час зниження майже в два рази як сили тертя проковзування, так і спокою.



$A_{пр}$ – амплітуда поздовжніх переміщень; $A_{п}$ – амплітуда поперечних переміщень; N – нормальне навантаження; Q – енергія удару; f – частота переміщень; T_o – мінусова температура; $T_{п}$ – підвищена температура; n – кількість вільних макрорадикалів (без ЗОР); Φ – робота виходу електрона по поверхні; D – дисперсія роботи виходу електрона по поверхні; σ – міцність; K – однорідність поверхневого шару.

Рис.15 – Алгоритм керування зносостійкістю трибоз’єднання

Аналіз стану поверхонь зразків після тертя з розчиненим ПММА вказує на формування однорідного великофрагментного поверхневого шару з



а – граничне тертя; б – напіврідинне тертя
Рис. 16 – Інтенсивність зношування зразків з подачею в зону контакту ацетону і розчину ацетону з ПММА

зниженням твердості до 50%, що є позитивним фактором для полегшення припрацювання поверхонь і зниження сил різання при технологічній обробці. Як вказують результати попередніх дослідів, отримання зносостійкого поверхневого шару можливе під час тертя з ПММА без наявності ЗОР.

Запропоновано метод фінішної обробки металів з використанням гранульованого абразивного матеріалу. За рахунок зміни умов обробки і регулювання кількістю вільних макрорадикалів в результаті термомеханічної деструкції полімеру під час різання в зоні контакту інструменту і заготовки можливе керування однорідністю структурного стану обробленого поверхневого шару і його зносостійкістю.

Розроблена концепція зносостійкого матеріалу у формі шаруватої композиційної структури. Запропонована і обґрунтована фізична модель будови зносостійкого матеріалу шаруватої структури з градієнтом властивостей по глибині поверхневого шару, що складається з трьох основних шарів різної текстури при поєднанні твердої і м'якої фази для надання покриттю властивостей пружнопластичності. Застосування рекомендованого градієнтно-шаруватого покриття дозволить протистояти дії навантаження у вигляді удару з проковзуванням в двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Рекомендовано використання різних методів інженерії поверхні (рис. 17), що дозволяють отримувати зносостійкий поверхневий шар деталей трибоз'єднань в умовах тертя з багатокомпонентним навантаженням.

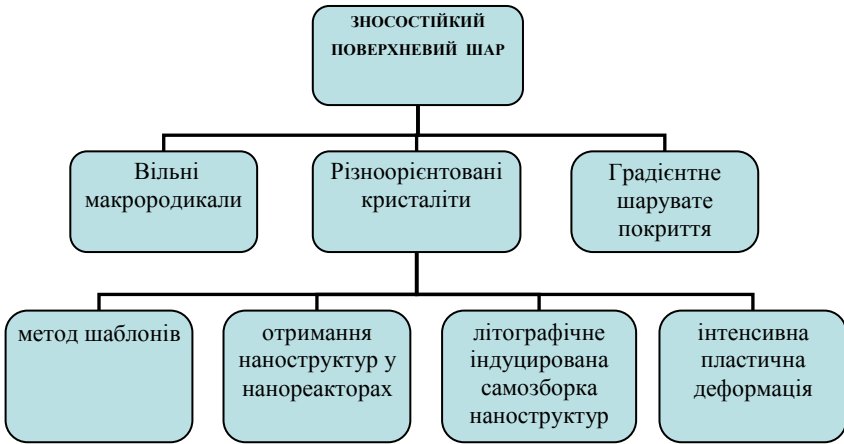


Рис. 17 – Рекомендовані методи інженерії поверхні трибоз'єднань багатокомпонентного навантаження

ВИСНОВКИ

1. Сформульовані основні конструкторські і технологічні положення підвищення довговічності трибоз'єднань при експлуатації в умовах багатокомпонентного динамічного контактного навантаження і різних експлуатаційних температур. Показано, що оцінка зносостійкості трибосистем повинна проводитись на основі використання принципів структурно-енергетичної адаптації матеріалів при терті з різними видами термомеханічного навантаження. Це дозволяє сформулювати триботехнічний принцип мінімізації зносу і зносостійкої здатності матеріалів, який полягає в створенні таких умов контакту, коли формується поверхневий шар з неоднорідним за міцністю та величиною фрагментів структурним станом підвищеної міцності в межах статистично визначної базової довжини.

2. Вперше виявлено і досліджено явище взаємозв'язку зносостійкості і структурного стану поверхні трибоз'єднань при багатокомпонентному термомеханічному навантаженні, яке полягає в тому, що підвищений знос відбувається у деталей з однорідним за величиною фрагментів рівномірним поверхневим шаром в межах статистично визначної базової довжини, який характеризується зниженням міцності, більш рівномірною мікрогеометрією поверхні, низькими значеннями величини і розкиду роботи виходу електрона по поверхні.

3. Сформована в процесі багатокомпонентного термомеханічного тертя дисперсна структура виконує функцію дисипативної структури в рамках синергетичного підходу, яка самоорганізується в умовах складного

динамічного контакту з отриманням оптимального по зносостійкості стану. При цьому пластично-деструкційний характер поведінки металу при терті повинен розглядатися як фізико-хімічний, тобто процес, який супроводжується комплексом структурних, фізичних і фізико-хімічних змін поверхневого шару металу, що деформується.

4. Отримали подальший розвиток принципи моделювання еквівалентних станів трибологічних пар, які експлуатуються в особливих умовах багатокомпонентного термомеханічного навантаження. Ці принципи включають трибологічні, кінематичні, навантажувальні, металофізичні і фізико-механічні критерії. На цій підставі розроблена модель зношування, яка враховує взаємний вплив факторів навантаження при їх сумісній дії і пояснює нерівномірність зносу деталей трибоз'єднань за рахунок різної однорідності поверхневого шару та його міцності.

5. Розроблені методики досліджень зносостійкості деталей трибоз'єднань при багатокомпонентному навантаженні дозволяють визначати:

- вплив на зношування факторів трикомпонентного навантаження при їх окремих і сумісній дії; створено відповідне устаткування для прискорених випробувань;

- знос ріжучого інструменту на основі дії закономірностей зношування трибоз'єднань при трикомпонентному навантаженні, за рахунок чого запропоновано метод підвищення зносостійкості ріжучого інструменту шляхом зменшення вібрацій до 20% з використанням вібродемпфіруючих матеріалів;

- знос поступальних площинних пар IV класу з періодичним ударним розривом контакту (типу «напрямна-ланцюг»), завдяки чому розроблено конструкції спеціальних інструментів для прискорених випробувань зносостійкості ріжучих ланок пильного ланцюга, які дозволяють зменшити час випробувань від 7 до 20 разів.

6. Проведеними дослідженнями зносостійкості встановлено:

- навантаження зразків поперечними проковзуваннями з амплітудою до 0,08 мм призводить до збільшення об'ємної інтенсивності зношування для сплаву ВТ 20 в 1,4 рази, 60С2А – 1,7 рази, ХТН-61 – 2,6 рази в порівнянні з об'ємною інтенсивністю зношування при двокомпонентному навантаженні, що обумовлено різними хіміко-фізичними властивостями поверхневих шарів сплавів та сталей зі зниженням міцності до 40%, підвищенням однорідності поверхневого шару (рівномірності і розміру фрагментів) в межах статистично визначної базової довжини до 6 разів;

- за досліджених умов зношування інтенсивність зношування титанового сплаву ВТ20 в 3,5 рази перевищує цей показник для марок ХТН-61 і 60С2А;

- збільшення амплітуди поперечних проковзувань від 0 до 0,1 мм в процесі

тертя з трикомпонентним навантаженням призводить до отримання поверхневого шару зразків сплаву ХТН -61 зі зниженням РВЕ з 4300 до 4000 еВ і зменшенням розкиду в значеннях РВЕ;

- дослідження зміни топографії поверхонь указують на те, що трикомпонентне навантаження призводить до зниження шорсткості поверхні в поперечному напрямі від 1,3 до 10 разів; у поздовжньому напрямі - від 1,3 до 2 разів для всіх досліджених матеріалів (60С2А, ХТН-61, ВТ20). При цьому однорідність топографії поверхонь підвищується;

- зносостійкість досліджуваних матеріалів за даних умов тертя і мінусових температур вища, ніж при нормальних температурах незалежно від складності навантаження.

7. Розроблено метод регулювання зносостійкості трибоз'єднань при багатокомпонентному динамічному навантаженні введенням в зону контакту вільних макрорадикалів і моделі зношування трибоз'єднань з наявністю в зоні контакту вільних макрорадикалів і ЗОР. Запропоновані науково обґрунтовані методи інженерії поверхні для управління зносостійкістю трибоз'єднань шляхом введення в зону контакту вільних макрорадикалів, створення поверхневого шару з різноорієнтованими кристалітами, градієнтним шаруватим покриттям.

8. Запропоновано концепцію зміни ефективності різання металів на основі оцінки зносостійкості трибосистеми «інструмент-деталь», принципів структурно-енергетичної адаптації матеріалів при терті в умовах багатокомпонентного навантаження на прикладі використання гранульованого абразивного матеріалу. Проведена трибодіагностика ролі вільних макрорадикалів в процесах обробки гранульованим абразивним матеріалом. Удосконалено спеціальний гранульований абразивний матеріал, який дозволяє здійснювати регульоване введення вільних макрорадикалів в зону контакту шліфувального інструменту і заготовки та одержувати оброблені поверхні з різними трибологічними властивостями поверхневого шару.

9. Запропоновано ефективні способи визначення зносостійкості деталей трибоз'єднань, які експлуатуються при багатокомпонентному динамічному навантаженні на основі оцінки наноструктурної однорідності поверхневого шару трибоспектральним методом і в результаті аналізу зміни величини або розподілу роботи виходу електрона по поверхні деталей.

10. Науково-теоретичні результати роботи по зменшенню напруженого стану поверхневих шарів конструкторськими методами (зменшення ударного і нормального навантаження, зменшення амплітуди поперечних і поздовжніх проковзувань) упроваджено у виробничих умовах, чим підтверджена ефективність наукових основ отримання зносостійкого ультрадисперсного поверхневого шару деталей трибоз'єднань залежно від особливостей багатокомпонентного термомеханічного навантаження. На основі

використання відповідних технологічних рекомендацій (створення поверхневого шару з неоднорідним структурним станом, забезпечення підвищеної рівноважної шорсткості поверхні і мінусових температур в зоні контакту) відмічено підвищення зносостійкості до 30% із забезпеченням соціального, технічного, організаційного і економічного ефекту.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Богуслаев, В.А. изнашивание материалов при многокомпонентном термомеханическом нагружении: моногр. [Текст] /В.А. Богуслаев, В.В. Цыганов, Л.И. Ивченко, А.Я. Качан – Запорожье: изд-во АО «Мотор Сич», – 2014. – 246с.; ил.

Статті у фахових виданнях:

2. Цыганов, В.В. Трибоспектральный анализ возможности использования шлифовальных лент при отделочной обработке нержавеющей сталей [Текст] /В.В. Цыганов //Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.– 1998. – №2. – С.93–95.

3. Ивченко, Л.И. Стан поверхневого шару деталей трибоз'єднань за різних схем контактування [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, С.В. Лоскутов, С.В. Сейдаметов //Проблеми тертя та зношування. – 2008. – Вип.49, т.1. – С.72-83.

4. Ивченко, Л.И. Зв'язок структурного стану поверхневого шару та зносостійкості деталей трибоз'єднань при тримірному навантаженні [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //«Вісник двигунобудування».–2008.–№2.– С.57-62.

5. Ивченко, Л.И. Ускоренные испытания сложнонагруженных деталей трибосопряжений [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, В.И. Черный //«Вісник двигунобудування». – 2009. – №1. – С.150–154.

6. Ивченко, Л.И. Влияние тривимірного навантаження на енергетичний стан поверхневого шару деталей ГТД [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, С.В. Лоскутов, С.В. Сейдаметов //«Вісник двигунобудування». –2009. –№1.– С.61–65.

7. Ивченко, Л.И. Повышение эффективности процесса резания металлов изменением условий нагружения в контакте инструмента и заготовки [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, П.В. Глушко //Оптимизация производственных процессов. – 2010.– №12. – С. 43–46.

8. Ивченко, Л.И. Моделирование трибопроцессов в зоне контакта инструмента и заготовки при обработке металлов резанием [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //Оптимизация производственных процессов. – 2010.– №12. – С. 62–65.

9. Сахнюк, Н.В. Влияние параметров качества поверхностного слоя на выносливость лопаток компрессоров ГТД нового поколения [Текст] /Н.В. Сахнюк, В.В. Цыганов //Вісник СевНТУ. Серія: Машинобудування та транспорт. – 2011. – Вип.117. – 2011. – С.153–156.

10. Ивщенко, Л. И. Интерпретация результатов изнашивания при сложном знакопеременном нагружении [Текст] /Л.И. Ивщенко, В.В. Цыганов //Проблеми тертя та зношування. – 2011. – Вип.56. – С.45–55.

11. Ивщенко, Л.И. Структурная самоорганизация деталей трибосопряжений в условиях сложного термодинамического нагружения [Текст] /Л.И. Ивщенко, В.В. Цыганов, М.В. Фролов //Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – 2012. – №3(59) – С.5–11.

12. Цыганов, В.В. Трибодиагностика эффективности обработки металлов резанием на примере использования гранульного абразивного материала [Текст] /В.В. Цыганов //Мир техники и технологий. – 2013. – №1(134). – С.40-45.

13. Цыганов, В.В. Пути повышения эффективности гранульного абразивного материала трибологическими методами [Текст] /В.В. Цыганов //Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – 2012. – №4(61). – С.77–85.

14. Ивщенко, Л.И. Контактная задача механики разрушения трибосопряжений при сложном термомеханическом нагружении [Текст] /Л.И. Ивщенко, В.В. Цыганов //Математичне моделювання. – 2013. – №2. – С.78-82.

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

15. Scientific basis of modern technology: experience and prospects. – Monograph: edited by Shalapko J. I. and Dobrzanski L. A [Text] /L.I. Ivshenko, V.V.Tsyganov, J.I.Shalapko // Processes of wear of tribojoints from heat-resistant alloy on cobaltbased at non-stationary thermo-mechanical contact. – Yaremche, 2011. – P. 346-354.

16. Ивщенко, Л.И. Особенности изнашивания трибосопряжений в условиях трехмерного нагружения [Текст]/Л.И. Ивщенко, В.В. Цыганов, И.М. Закиев //Трение и износ. – 2011.– Т.№32, №1.– С.500 – 509.

17. Ивщенко, Л.И. Моделирование износостойкости трибосопряжений при сложном динамическом нагружении [Текст] /Л.И. Ивщенко, В.В. Цыганов //Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – №7. – С.31–36.

18. Ivshenko, L.I. Features of the wear of tribolojoints under three-dimensional loading [Text] /L.I. Ivshenko, V.V. Tsyganov, I.M. Zakiev //Journal of friction and wear. – 2011. – Vol. №32, No1. – P.8–16.

19. Tsyganov V. Methods of experimental study of frictional processes in the couplings of guide-chain type [Text] /V. Tsyganov, L. Ivshenko, J. Shalapco //Technolog. – 2011. – P.166–170.

20. Ивченко, Л.И. Методология ускоренной оценки износостойкости режущего элемента пилы [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, В.С. Штанкевич, А.Н. Докутович //Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. – 2011.– Вип.№3, Ч.1. – С.57–61.

21. Цыганов, В.В. Трибодиагностика эффективности обработки металлов резанием на примере использования гранильного абразивного материала [Текст] /В.В. Цыганов //Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. – 2011.– Вип.№4, Ч.1.– С.63–66

22. Цыганов, В.В. Трибологическая оценка эффективности использования гранульного абразивного материала [Текст] /В.В. Цыганов, Н.В. Сахнюк, С.С. Видмич //Вісник КрНУ ім. М. Остроградського.– 2011.– Вип.№5, Ч.1.– С.82–85.

23. Цыганов, В.В. Влияние макрорадикалов на эффективность шлифования лентами из гранулированного абразивного материала [Текст] /В.В. Цыганов //«Вісник двигунобудування». – 2012. –№1– С.186-191.

24. Ивченко, Л.И. Изменение износостойкости трибосопряжений при сложном динамическом нагружении [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2012. – №8. – С.40–43.

25. Ивченко, Л.И. Износостойкость сплава ХТН-61 при отрицательных температурах и сложном динамическом нагружении [Текст]/Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, А.Я. Качан // Вестник двигателестроения. – 2013. – №1. – С.95–103.

26. Ivschenko, L.Y. Influence des conditions de chargement dynamique sur la resistance `a l'usure des tribocontacts [Text]/ L.Y. Ivschenko, V.V. Tsyganov, S. Adjerid // Materiaux & Techniques. – Volume 101. – 2013. – №4. – P. 403.1–403.7.

27. Ивченко, Л.И. Повышение износостойкости трибосопряжений ГТД при сложном термомеханическом нагружении изменением структурного состояния поверхностного слоя [Текст] / Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //Технологические системы. – 2013.– №2. – С.13-21.

28. Ивченко, Л.И. Особенности трибологических явлений в контакте сопряжений при наличии полимера и сложном многокомпонентном нагружении [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //Технологические системы. – 2013.– №4. – С.16-21.

29. Ивченко, Л.И. Структурная организация материалов сложнонагруженных трибосопряжений [Текст]/Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //Вестник двигателестроения. – 2014. – №1. – С.28–33.

30. Запорожец, В.В. Влияние полимерной составляющей СОЖ на состояние поверхностного слоя сложноконтактирующих деталей [Текст]/В.В. Запорожец, Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //Технологические системы.– 2015.– №1. –С.57-63.

31. Ивченко, Л.И. Методологические принципы инженерии

поверхности деталей ГТУ сложного контактного динамического нагружения [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //Технологические системы. – 2016. – №1. – С. 51-59.

Матеріали та тези конференцій

32. Івченко, Л.Й. Енергетичний стан поверхневого шару деталей трибоз'єднань в умовах тримірної навантаженні [Текст]/ Л.Й. Івченко, В.В. Цыганов, С.В. Лоскутов, С.В. Сейдометов //Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів: матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., 8-10 жовтня 2008р. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. – С.19-20.

33. Івченко, Л.И. Особенности износа трибосопряжений при сложном нагружении [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //Сучасні проблеми трибології: міжнар. наук.-техн. конф., 19-21 травня 2010р.: тези доп. – Київ: НАУ, 2010. – С. 138.

34. Івченко, Л.Й. Зношування трибоз'єднань при знакозмінному складному навантаженні [Текст]/ Л.Й. Івченко, В.В. Цыганов //Ольвійський форум – 2011: стратегії України в геополітичному просторі: міжнар. наук.-практ. конф., 8-12 червня 2011р., Ялта: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ, 2011. – Т.11, С. 23-24.

35. Ivshenko, L. Wear of tribojoints for non-stationary termomekhanicheskom contact [Text]/ L. Ivshenko, V. Tsyganov, J. Shalapko //IV Українсько-Польські наукові діалоги: міжнар. наук.-практ. конф., 11-14 жовтня 2011р., Яремче: тези доп. – Хмельницький: ХНУ, 2011. – С. 145-146.

36. Івченко, Л.И. Синергетические процессы в трибосопряжениях при сложном трибомеханическом нагружении [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //Ольвійський форум – 2012: стратегії України в геополітичному просторі: міжнар. наук.-практ. конф., 06-10 червня 2012р., Севастополь: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ, 2012. – Т.12, С.12-13.

37. Івченко, Л.И. Трибологические характеристики сплава ХТН-61 в условиях динамики нагружения и пониженных температур [Текст] /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, А.Я. Качан //Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: IX междунар. науч.-техн. конф., 24-29 сентября 2012г., Запорожье-Алушта: – Запорожье: Мотор Сич, 2012. – С. 39-40.

38. Цыганов, В.В. Методы повышения износостойкости трибосопряжений при сложном термомеханическом нагружении [Текст] /В.В. Цыганов //Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: IX междунар. науч.-техн. конф., 24-29 сентября 2012г., Запорожье-Алушта: – Запорожье: Мотор Сич, 2012. – С. 81-82.

39. Цыганов, В.В. Вплив умов термодинамічного контактування на

зносостійкість трибоз'єднань [Текст] /В.В. Циганов //Тиждень науки: тези доп. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 9–13 квітня 2012 р. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – Т.2, С.35-36.

40. Івщенко, Л.И. Структурная организация материалов сложнонагруженных трибосопряжений [Текст] /Л.И. Івщенко, В.В. Цыганов //Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: X междунар. науч.-техн. конф., 23-28 сентября 2013г., Запорожье-Алушта: – Запорожье: Мотор Сич, 2013. – С. 117-118.

41. Івщенко, Л.И. Повышение самоорганизации материалов трибосопряжений оптимизацией многофакторного динамического нагружения [Текст]/ Л.И. Івщенко, В.В. Циганов //Ольвійський форум – 2013: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі: міжнар. наук.-практ. конф., 5-9 червня 2013р., Ялта: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ, 2013. –Т.11, С.23-24.

Патенти

42. Пат. 15276 Україна: МПК (2006) G01N 3/56 Пристрій для дослідження тертя /Л.И. Івщенко, В.С. Замковий, В.О. Афонін, В. В. Циганов; заявл.03.01.2006; опубл. 15.06.06, Бюл. №6.–4с.

43. Пат. 35872 Україна: МПК (2006) B23B 27/00 Інструмент для прискорених випробувань різальних ланок пиляльного ланцюга на зносостійкість /Л.И. Івщенко, В.В. Циганов, В.І. Чорний, В.С. Штанкевич, А.М. Докутович; заявл.21.04.2008; опубл.10.10.2008, Бюл.№19.– 3с.

44. Пат. 31816 Україна: МПК (2006) B23C 5/00 Інструмент для прискорених випробувань різальних ланок пиляльного ланцюга на зносостійкість /Л.И. Івщенко, В.В. Циганов, В.І. Чорний, В.С. Штанкевич, А.М. Докутович; заявл.18.11.2007; опубл.25.04.2008, Бюл.№8.– 3с

45. Пат. 35682 Україна: МПК (2006) B23B 27/00, B23B 29/00 Пристрій для кріплення різального інструмента /Л.И. Івщенко, В.В. Циганов, П.В. Глушко, Г.Л. Дубров; заявл.07.02.2008; опубл.10.07.2008, Бюл.№13.– 2с

46. Пат. 39986 Україна: МПК (2006) G01N 3/56 Пристрій для дослідження тертя /Л.И. Івщенко, В.В. Циганов, В.І. Чорний; заявл. 28.08.2008; опубл.25.03.2009, Бюл.№6.– 3с.

47. Пат. 53587 Україна: МПК (2006) G01N 3/56 Пристрій для дослідження тертя /Л.И. Івщенко, В.В. Циганов; заявл. 19.04.2010; опубл.11.10.2010, Бюл.№19.– 2с.

48. Пат. 60755 Україна: МПК (2011.01) C08J 5/14, B24D 3/00 Спосіб виготовлення гранульованого абразивного матеріалу /В.В. Циганов; заявл. 15.12.2010; опубл.25.06.2011, Бюл.№12. –3с.

49. Пат. 60756 Україна: МПК (2011.01) B24D 3/00 Гранульований абразивний матеріал /В.В. Циганов; заявл. 15.12.2010; опубл.25.06.2011, Бюл.№12. –2с.

50. Пат. 62893 Україна: МПК (2011.01) B24B 1/00 Спосіб фінішної обробки /В.В. Циганов; заявл. 27.12.2010; опубл.26.09.2011, Бюл.№18. –2с.

51. Пат. 70445 Україна: МПК (2012.01) C08J 5/14, B24D 3/00 Спосіб виготовлення гранульованого абразивного матеріалу /Циганов В.В. –заявл. 05.12.2011; опубл. 11.06.2012, Бюл. №11. – 3с.

52 Пат. 70446 Україна: МПК (2006.01) G01N 3/58 Спосіб визначення зносостійкості сталей і сплавів /Л. Й. Івченко, В. В. Циганов; заявл. 05.12.2011; опубл. 11.06.2012, Бюл. №11. –3с.

53. Пат. 75194 Україна: МПК (2006.01) G01N 3/58 Спосіб визначення зносостійкості сталей і сплавів /Л.Й. Івченко, В.В. Циганов, С.В. Лоскутов; заявл. 28.04.2012; опубл. 26.11.2012, Бюл. №22. – 4с.

54. Пат. 79923 Україна: МПК (2006.01) G01N 3/56 Спосіб випробувань матеріалів на зносостійкість /Л.Й. Івченко, В.В. Циганов; заявл. 08.10.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. №9. – 4с

55. Пат. 94380 Україна: МПК (2006.01) G01N 3/56 Пристрій для дослідження тертя /Л.Й. Івченко, В.В. Циганов; О.І. Крестьяніков заявл. 02.06.2014; опубл.10.11.2014, Бюл.№21.– 3с.

56. Пат. 94381 Україна: МПК (2006.01) G01N 3/56 Пристрій для дослідження тертя /Л.Й. Івченко, В.В. Циганов; заявл. 02.06.2014; опубл.10.11.2014, Бюл.№21.– 3с.

57. Пат. 100689 Україна: МПК (2015.01) B01P 9/00 Спосіб створення зносостійких поверхонь пар тертя на сталених виробках /Л.Й. Івченко, В.В. Циганов; заявл. 05.01.2015; опубл.10.08.2015, Бюл.№15.– 3с.

58. Пат. 102196 Україна: МПК (2006.01) G01N 3/56 Спосіб безперервного виміру зносу зразків на машині тертя /Л.Й. Івченко, В.В. Циганов, О.І. Крестьяніков, А.В. Глушко, М.С. Комочкін; заявл. 20.03.2015; опубл.26.10.2015, Бюл.№20.– 4с.

59. Пат. 109250 Україна: МПК (2006.01) G01N 3/56 Пристрій для дослідження тертя /Л.Й. Івченко, О.І. Крестьяніков, В.В. Циганов, М.С. Комочкін, М.В. Фролов; заявл. 08.12.2015; опубл.25.08.2016, Бюл.№16.– 3с.

Анотації

Циганов В.В. Науково-методологічні засади формування зносостійких поверхонь деталей при багатокомпонентній термомоментній дії. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04. – тертя та зношування в машинах. – Національний авіаційний університет, м. Київ, 2017

Дисертація присвячена питанням підвищення довговічності трибоз'єднань, що експлуатуються в умовах багатокомпонентного динамічного контактного навантаження і різних температур. Досліджені

закономірності тертя і зношування, а також механізм зношування при багатокомпонентному контактному навантаженні, наноструктурні властивості поверхневого шару, модель формування і руйнування поверхневого шару деталей трибоз'єднань за різних умов контактного навантаження. Розроблено комплекс методик і експериментального устаткування, за допомогою яких встановлені загальні закономірності тертя і зношування. Запропоновані ефективні способи визначення зносостійкості деталей трибоз'єднань на основі оцінки структурної однорідності поверхневого шару за трибоспектральним методом та в результаті аналізу зміни величини або розподілу роботи виходу електрона по поверхні деталей. Запропонована концепція зносостійкості трибосистем і триботехнічний принцип мінімізації зношування матеріалів на основі використання явища структурно-енергетичної адаптації матеріалів при терті з різними видами навантаження та формуванням поверхневого шару з неоднорідним структурним станом. Розроблені моделі зношування з урахуванням багатокомпонентної динаміки навантаження, наявності ЗОР і вільних макрорадикалів в контакті трибоз'єднань та запропоновані науково обгрунтовані методи управління зносостійкістю трибоз'єднань введенням в зону контакту вільних макрорадикалів. Підвищена зносостійкість трибоз'єднань за рахунок використання розроблених технологічних рекомендацій отримання зносостійкого ультрадисперсного наноструктурного поверхневого шару деталей трибоз'єднань в залежності від умов контактування та виготовлення.

Ключові слова: тертя, знос, зносостійкість, поверхневий шар, моделювання, трибоз'єднання, багатокомпонентне термомеханічне навантаження.

Цыганов В.В. Научно-методологические принципы формирования износостойких поверхностей деталей при многокомпонентном термомеханическом воздействии. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.04. - трение и изнашивание в машинах. - Национальный авиационный университет, г. Киев, 2017

Диссертация посвящена вопросам повышения долговечности трибосопряжений, которые эксплуатируются в условиях многокомпонентного динамического контактного нагружения и различных температур. Исследованы закономерности трения и изнашивания, а также механизм изнашивания при многокомпонентном контактном нагружении, наноструктурные свойства поверхностного слоя, модель формирования и разрушения поверхностного слоя деталей трибосопряжений при различных условиях контактного нагружения. Разработан комплекс методик и экспериментального оборудования, с помощью которых установлены

общие закономерности трения и изнашивания.

Специфическими особенностями механизма изнашивания трибосопряжений при повышении сложности нагружения (наличии дополнительно к проскальзыванию ударной нагрузки, удар и проскальзывание во взаимно перпендикулярных направлениях) является: повышение однородности поверхностного слоя (равнопрочности и крупнофрагментности); снижение прочности полученной поверхности; уменьшение величины и повышение равномерности равновесной шероховатости поверхности; снижение величины и разброса работы выхода электрона по поверхности; увеличение интенсивности изнашивания. При этом интенсивность изнашивания повышается до 2,5 раз. Износостойкость исследуемых материалов при рассматриваемых условиях контактного взаимодействия и отрицательных температурах более высокая, чем при нормальных температурах независимо от вида нагружения.

Предложены эффективные способы определения износостойкости деталей трибосопряжений на основе оценки структурной однородности поверхностного слоя трибоспектральным методом и в результате анализа изменения величины или распределения работы выхода электрона по поверхности деталей. Предложена концепция износостойкости трибосистем и триботехнический принцип минимизации изнашивания материалов на основе использования явления структурно-энергетической адаптации материалов при трении с различными видами нагружения путем формирования поверхностного слоя с неоднородным структурным состоянием. Разработаны модели изнашивания с учетом многокомпонентного динамического нагружения, наличия СОЖ и свободных макрорадикалов в контакте трибосопряжений и предложены научно обоснованы методы управления износостойкостью трибосопряжений введением в зону контакта свободных макрорадикалов. Повышена износостойкость трибосопряжений за счет использования разработанных технологических рекомендаций получения износостойкого ультрадисперсного наноструктурного поверхностного слоя деталей трибосопряжений в зависимости от условий контактирования и изготовления до 30%.

Ключевые слова: трение, износ, износостойкость, поверхностный слой, моделирование, трибосопряжение, нагружение.

Tsyganov V.V. Scientifically-methodological principles of forming of wearproof surfaces of details at multicomponent thermomechanical influence.
- Manuscript.

Dissertation on the competition of graduate degree of doctor of engineering sciences on speciality 05.02.04. – friction and wear in machines. National aviation university, Kyiv, 2017

Dissertation is sanctified to the questions of increase of longevity of tribojoints, that is exploited in the conditions of multicomponent dynamic pin ladening and different temperatures. Conformities to law of friction and wear, and also mechanism of wear, are investigational at a multicomponent pin ladening, nanostructural properties of superficial layer, forecasting model of forming and destruction of superficial layer of details of tribojoints at the different terms of pin ladening. The complex of methodologies and experimental equipment is worked out, by means of that general conformities to law of friction and wear are set. Conception of wearproofness of tribojoints and tribologictechnician principle of minimization of wear of materials is offered. The models of wear are worked out taking into account a multicomponent dynamic ladening, presences lubricating coolant and free macroradicals in the contact of tribojoints and offered management methods are scientifically reasonable wearproofness by tribojoints introduction to the zone of contact of free macroradicals. The wearproofness of tribojoints is enhanceable due to the use of the worked out technological recommendations of receipt of wearproof to the ultra dispersible nanostructural superficial layer of details of tribologictechnician depending on the terms of contact and making.

Key words: friction, wear, wearproofness, superficial layer, design, tribojoints, ladening.