

ХАРЛАМОВ Ю. О.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

ORCID ID: 0000-0002-9136-8171

e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

ПОЛОНСЬКИЙ Л. Г.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4347-9088>

e-mail: pol@ztu.edu.ua

БАЛИЦЬКА Н. О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID ID: 0000-0003-1363-8110

e-mail: balytskanataliia@gmail.com

МЕЛЬНИК О. Л.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-7081-7513

e-mail: o.l.melnyk@ztu.edu.ua

НОЧВАЙ В. М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID ID: 0000-0003-3742-0837

e-mail: nochvajvm@ztu.edu.ua

КЛАСИФІКАЦІЯ З'ЄДНАНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЗА УМОВАМИ ЗНОШУВАННЯ

Процеси тертя і зношування в значній мірі залежать від конструктивного оформлення деталей вузлів тертя, обраних конструкційних матеріалів, технологій зміцнення, силових, кінематичних і температурних характеристик в контакті, а також від експлуатаційних умов. Запропоновано систему класифікації з'єднань деталей, що труться, яка включає 16 груп з'єднань, що відрізняються геометрією деталей, умовами їх контакту, відносного руху і зношування.

Ключові слова: з'єднання деталей, поверхня тертя, знос, умови зношування.

KHARLAMOV YURIY OL.

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

POLONSKY LEONID G., BALYTSKA NATALIYA OL., MELNYK OLEKSANDR L., NOCHVAI VOLODYMYR M.

Zhytomyr Polytechnic State University

CLASSIFICATION OF CONNECTIONS MACHINE PARTS BY WEAR CONDITIONS

The main reasons for the failure of machine parts are both breakdowns and wear. Parts that have failed are very diverse and are classified according to various characteristics: functional purpose, materials, workpieces types, weight and size, geometric features and other wear conditions. Machine parts are subject to various wear types (mechanical, thermomechanical, fatigue, corrosion, erosion, etc.). Wearing effects cause the formation of defects, and the operating conditions determine the various dominant wear types, which are typical of certain parts: changes in the surfaces size and shape; the appearance of scratches, burrs on the conjugate surfaces; the appearance of cracks, wear, crumple and chipping of work surfaces; wear and destruction of the thread, etc. The creation of effective friction units is associated with the provision of rational conditions for wear of the connected friction parts surfaces, taking into account a large number of different factors. These factors determine the choice of the parts materials to be joined; design of friction units; ensuring the rational loading of the friction pairs elements; appropriate protection of friction surfaces from the environment and other undesirable effects; ensuring a rational thermal regime by optimizing heat dissipation; geometric optimization of friction pairs, etc. All this led to a huge variety of friction units' designs, tribotechnical materials, means of their control, etc. Therefore, the topical issue is the systematization and generalization of theory and practice based on the classification of wear conditions of machine parts connections. In the known works systematization of production experience results and scientific researches on details wear is carried out on worn types out details and physical mechanisms of wear. This does not take into account the uneven parts wear and their surfaces due to uneven specific pressures distribution and relative sliding speeds, differences in lubrication conditions, different supply intensity to the friction zone of abrasives and aggressive substances, wear particles removal and other conditions in contact. A system for classifying friction joints is proposed, which includes 16 groups of connections that differ in the parts geometry, their contact conditions, relative motion and wear. The proposed classification of friction connections according to the wear conditions provides the possibility of a systematic approach to generalize the experience of creating effective friction units stimulates research and development of more rational friction units' designs, expands the transfer of innovative designs and technologies. It is also possible to exchange experience in the creation and application of perspective parts designs, friction units, ways to strengthen and restore them, taking into account similar wear conditions between different branches of mechanical engineering.

Keywords: connection of details, friction surface, wear, wear conditions.

Постановка проблеми

Основними причинами виходу з ладу деталей машин є як їх поломки, так і знос. Деталі, які відмовили, відрізняються великою різноманітністю і класифікуються за різними ознаками: за функціональним призначенням, матеріалами, видами використовуваних заготовок, масою і розмірами, геометричними ознаками та іншими умовами зношування. Номенклатура таких деталей дуже широка та охоплює як типові, так і оригінальні конструкції. Деталі в процесі експлуатації піддаються різним видам зношування (механічному, термомеханічному, втомному, корозійному, ерозійному та ін.). Зношувальні впливи викликають утворення дефектів, при цьому умови експлуатації визначають різні домінуючі види

зношування, типові для тих чи інших деталей: зміну розмірів і форми поверхонь; появу подряпин, рисок і задрів на спряжених поверхнях; появу тріщин; знос, змінання і викришування робочих поверхонь; знос і руйнування нарізні тощо [1].

Створення ефективних вузлів тертя пов'язане із забезпеченням раціональних умов зношування спряжених поверхонь тертя деталей з урахуванням великої кількості різноманітних факторів. Ці фактори обумовлюють вибір матеріалів з'єднаних деталей; конструктивне оформлення вузлів тертя; забезпечення раціонального навантаження елементів пар тертя; відповідний захист поверхонь тертя від дії навколишнього середовища та інших небажаних впливів; забезпечення раціонального теплового режиму за рахунок оптимізації тепловиділення і відведення тепла; геометричну оптимізацію пар тертя тощо. Все це зумовило величезне різноманіття конструкцій вузлів тертя, триботехнічних матеріалів, засобів їх контролю та ін. Тому актуальним є систематизація та узагальнення теорії і практики на основі класифікації умов зношування з'єднань деталей машин.

Аналіз останніх досліджень

При проектуванні нових і вдосконаленні існуючих конструкцій машин оцінка їх довговічності за зносом знаходить обмежене застосування. Методи фізичного і математичного моделювання процесів зношування розроблені, головним чином, для обмеженого ряду типових деталей та вузлів тертя. Більш широко застосовують експериментальне моделювання тертя і зношування. Тому удосконалення вузлів тертя вимагає великих витрат і проведення багатоступеневих НДДКР.

В останні роки велика увага приділяється створенню науково-методичних баз даних технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей відновлюваних деталей [2]. У відомих роботах систематизація результатів виробничого досвіду і наукових досліджень по зношуванню деталей обладнання виконується за типами зношених деталей і фізичним механізмам зношування. При цьому не враховується нерівномірність зношування деталей і їх поверхонь внаслідок нерівномірного розподілу питомих тисків і швидкостей відносного ковзання, відмінності умов змащування, різної інтенсивності надходження в зону тертя абразивів і агресивного середовища, організації видалення частинок зношування та інших умов контакту деталей. Це надмірно ускладнює створення і вдосконалення баз даних та їх практичне використання при технологічній підготовці відновлення деталей, впровадження нових ефективних технологій їх відновлення і зміцнення.

Процеси тертя і зношування значною мірою залежать від конструктивного оформлення вузлів і деталей, обраних конструкційних матеріалів і технології зміцнення, а також від експлуатаційних умов.

Знос деталей і їх з'єднань є геометричним критерієм втрати їх початкових показників і вихідним параметром, що впливає на надійність машин і механізмів. Актуальним напрямом розвитку технології ремонтного виробництва є створення інформаційних моделей, що сприяють розробці раціональних технологічних процесів відновлення деталей і забезпечення експлуатаційної технологічності конструкцій з урахуванням умов їх експлуатації, характеру відмов і закономірностей зносу. Трибологія як наука про тертя і зношування вивчає процеси, що протікають на локальних ділянках поверхонь на мікрорівні. На цьому рівні здійснюється моделювання трибологічних явищ для виявлення фізичних механізмів зношування для обмежених поєднань пар матеріалів і умов тертя [3]. Широке застосування знаходять стендові та експлуатаційні моделі деталей і вузлів тертя, а також розвиваються методи математичного моделювання. Проте в даний час відсутні достатньо надійні моделі навіть для розрахунку на знос типових деталей машин. Моделі процесів тертя і зношування відносяться до складних неоднорідних [4], що вимагає застосування методів, заснованих на врахуванні явищ механіки, хімії, теплофізики, матеріалознавства, фізики і хімії поверхні твердого тіла та інших наукових дисциплін. Крім врахування при моделюванні режимів роботи пар тертя, фізико-механічних властивостей матеріалів, конструктивних особливостей вузлів і деталей, та інших факторів, важливу роль відіграє мікро- і макрогеометрія поверхонь контакту. Для розвитку і вдосконалення методів розрахунку та оцінки зносу всіх основних видів деталей, що зношуються, необхідна систематизація основних видів вузлів і деталей. Відома класифікація типових з'єднань деталей машин з фіксованим напрямком відносного зближення і з самовстановлюваними при зношуванні деталями [3], проте вона не враховує всіх можливих з'єднань деталей.

Проектування оптимальних й вдосконалення існуючих конструкцій зношуваних деталей і вузлів, регламентування режимів їх експлуатації, прогнозування ресурсу і технічного стану в часі неможливе без проведення відповідних розрахунків. Різноманіття конструкцій і умов їх експлуатації вимагає класифікації деталей і вузлів тертя на типові групи і створення відповідних типових моделей розрахунку на знос.

Мета роботи – розробка системи класифікації з'єднань деталей машин за умовами зношування як основи для подальшої систематизації та узагальнення досвіду розробки і експлуатації вузлів тертя.

Виклад основного матеріалу

З'єднання поверхнево зміцнюваних і відновлюваних деталей за умовами зношування їх контактуючих поверхонь можна розділити на 16 груп (табл. 1). Кожна група може бути розділена на підгрупи за наявністю проміжних речовин в контактні взаємодіючих деталей:

- 1 – без проміжних речовин;
- 2 – твердий мастильний матеріал;
- 3 – рідкий або пластичний мастильний матеріал;
- 4 – абразивомістке середовище;
- 5 – агресивне середовище;

6 – спеціальні з’єднання, що працюють в умовах тертя у вакуумі, високих і низьких температур та ін.

Можлива також одночасна присутність в зоні контакту різних проміжних речовин. Особливу проблему являє забезпечення працездатності вузлів сухого тертя, що працюють без рідкого і пластичного мастила. Це зумовило створення твердих змащувальних і самозмащувальних матеріалів та покриттів. Для підвищення довговічності змащувальні покриття наносять на деталь, що має менший шлях тертя ковзання. Можливе створення конструкцій з безперервно поновлюваними покриттями із ротапринтним способом подачі твердого мастила.

Основними показниками якості поверхонь тертя є: макровідхилення розмірів і форми (відхилення від площинності, циліндричності та ін.); хвилястість; шорсткість; залишкові напруги; структура основного матеріалу деталі; структура поверхневого шару; текстура мікрорельєфу поверхні (напрямок слідів обробки, наявність спеціального маслоутримуючого рельєфу та ін.) [5]. Вихідні показники якості поверхні в процесі тертя змінюються [6]. Виняток становлять залишкові напруги і структура основного матеріалу, які можуть зберігатися до повного руйнування поверхонь тертя деталей. У більшості випадків вже в період припрацювання істотно змінюються шорсткість і структура поверхневого рельєфу. Хвилястість і структура поверхневих шарів деталі змінюються при сталому зношуванні, а геометрична форма поверхні тертя залишається в межах допустимих значень, прийнятих при виготовленні, практично до кінця служби вузла тертя, якщо оцінка його працездатності проводиться за параметрами точності. Схема змін вихідних показників якості поверхні тертя в процесі експлуатації вузла тертя представлена на рис. 1. Тут в якості вихідного параметра розглядається розмір поверхні тертя. Однак на практиці зустрічаються випадки, коли визначальну роль в забезпеченні працездатного стану поверхні тертя відіграють параметри шорсткості, текстури мікрорельєфу, форми зношеної поверхні тощо.

Приклади типових деталей машин з різними умовами зношування наведені в табл. 1.

Для з’єднань 1-ї і 2-ї груп характерні однакові умови зношування для точок поверхонь, розташованих на одній траєкторії. Інтенсивність, тривалість зношування та знос на окружності певного радіуса кожної з поверхонь будуть однаковими. Однак при наявності додаткових факторів, пов’язаних з конструктивними особливостями (організація тепловідводу подачі мастила, видалення частинок зносу із зони тертя та ін.), режимами експлуатації, зовнішніми впливами тощо, умови зношування можуть змінюватися і це потребує класифікації за ознаками нижніх рівнів. Методи інженерії поверхні дозволяють створювати на поверхнях тертя зміцнені шари зі змінними властивостями і товщиною [7]. Тому цілком доцільне створення методів розрахунку не на знос, а рекомендацій, що сприяють конструюванню деталей і вибору технологій зміцнення поверхонь для більш рівномірного зносу поверхонь тертя.

До групи 1 можуть бути віднесені: осьові підшипники ковзання; шестерінчасті насоси (торцеві поверхні шестерень і бічні стінки корпусу насоса); конічні гальма і фрикційні муфти; торцеві ущільнення та ін.

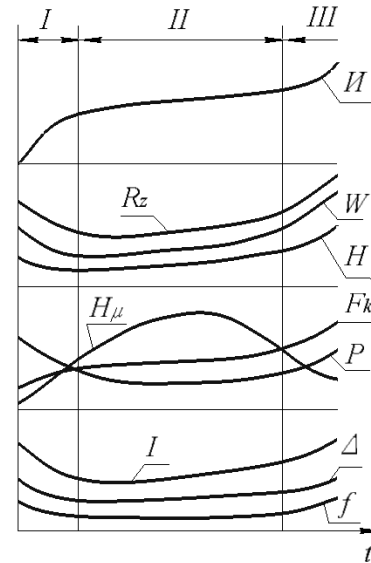


Рис. 1. Схема зміни початкових показників якості поверхні та вихідних параметрів триботехнічної системи (ТС) в процесі тертя в межах допустимих відхилень (I – ділянка припрацювання; II – ділянка нормального зношування; III – ділянка форсованого зношування); *I* – знос; *H* – точність розмірів і форми; *W* – хвилястість; *Rz* – шорсткість; *Fk* – фактична площа контакту; *p* – фактичний тиск; *H_μ* – мікротвердість; *Δ* – комплексний показник шорсткості; *f* – коефіцієнт тертя; *I* – інтенсивність зношування

Таблиця 1

Класифікація з’єднань деталей машин за умовами зношування

Група	Умови зношування	Приклади з’єднань деталей
1	2	3
1	Обертання з контактуванням 2-х деталей і проковзуванням (в контакт) в умовах дотику. Коефіцієнт взаємного перекриття $K_{ВЗ}=1$. Однакові умови зношування для кожного з тіл.	Конічні гальма, фрикційні муфти, торцеві ущільнення, осьові підшипники ковзання, шестерінчасті насоси (торцеві поверхні шестерень і бічні стінки корпусу насоса), осьові з’єднання робочих коліс лопатевих насосів, плоскі під’ятники.
2	Обертання з контактуванням 2-х деталей і проковзуванням (в контакт) в умовах самовстановлення. $K_{ВЗ}=1$. Однакові умови зношування для кожного з тіл.	Диски фрикційних муфт, пробкові крани, сферичні під’ятники, кульові крани, конусні крани.

Продовження табл. 1

1	2	3
3	Обертальний, поступальний або складний рух з контактуванням 2-х деталей і проковзуванням (в контакт) в умовах дотику. $K_{В3} < 1$. Постійні умови зношування для всіх точок, що лежать на даній траєкторії, для одного тіла.	Ходові гвинти-гайки, колодкові гальма з жорстким закріпленням колодки, шестерінчасті насоси (контакт головок зубів і корпусу насоса), контакт заготовок з інструментом при дорнуванні, штовхачі в напрямних втулках тощо.
4	Обертальний, поступальний або складний рух з контактуванням 2-х деталей і проковзуванням (в контакт) в умовах само встановлення. $K_{В3} < 1$. Постійні умови зношування для всіх точок одного тіла, що лежать на даній траєкторії.	Вали-підшипники ковзання; осьові опори ковзання з самовстановлюваними несучими поверхнями (колодками); колодкові гальма з самовстановленням колодок; кругові напрямні ковзання при ексцентричному навантаженні; відцентрові колодкові муфти; гальмівні диски; дискові гальма, циліндричні шарніри та ін.
5	Поступальний або зворотно-поступальний рух в нижчих кінематичних парах. Умови зношування не зберігаються постійними для всіх точок обох тіл. Умови дотику. $K_{В3} \ll 1$.	Штоки, плунжери, циліндричні поступальні напрямні ковзання, золотникові пари в гідророзподільниках, лінійні підшипники ковзання.
6	Поступальний або зворотно-поступальний рух в нижчих кінематичних парах. Умови зношування не зберігаються постійними для всіх точок обох тіл. Умови самоустановки. $K_{В3} \ll 1$.	Поступальні напрямні ковзання з плоскими початковими поверхнями, куліси-камені, пластини-корпуси і пластини-ротори в пластинчастих насосах і гідромоторах, пази напівмуфт і виступи проміжного диска хрестових муфт, пружинно-кулачкові запобіжні муфти.
7	Обертальний, поступальний або зворотно-поступальний рух у вищих кінематичних парах. Умови зношування не зберігаються постійними для всіх точок обох тіл. Умови дотику. $K_{В3} \ll 1$.	Зубчасті зачеплення, кулачки-штовхачі, шестерінчасті насоси (зуби шестерень).
8	Обертальний, поступальний або зворотно-поступальний рух у вищих кінематичних парах. Умови зношування не зберігаються постійними для всіх точок обох тіл. Умови самовстановлення, $K_{В3} \ll 1$.	Колеса-рейки, підшипники і напрямні кочення, обгінні фрикційні роликові муфти, фрикційні катки, кулькові гвинтові механізми.
9	Обертальний рух в умовах контакту зі всебічним стисненням. Умови дотику або самовстановлення.	Сальникові ущільнення з м'якою набивкою, манжетні ущільнення, еластичні втулки, кільця і пробки, сальникові ланцюги.
10	Зворотно-поступальний рух в умовах контакту зі всебічним стисненням. Умови дотику або самовстановлення.	Сальникові ущільнення з м'якою набивкою валів, манжетні ущільнення, еластичні втулки, кільця і пробки, поршневі кільця та гільзи циліндра, плунжери з ущільненнями, герметизатори устя штангового свердловинного насоса.
11	Рухомі з'єднання деталей, що контактують через тверде середовище.	Штампи холодної листової витяжки, гнуття, пресування труб, ротаційної витяжки листового металу, тонколистової прокатки.
12	З'єднання деталей з гарантованим натягом (пошкодження внаслідок фретинг-корозії). Нерухомі роз'ємні з'єднання. Малорухомі з'єднання деталей.	Посадки підшипників на вал або в корпус; з'єднання бронзового вінця черв'ячного колеса зі сталеву маточиною; поршневі пальці; з'єднання поверхонь валів з маточинами лопаток турбін, бандажів залізничних коліс; імперелів з валом в хімічному реакторі; клинові, заклепочні, штифтові та ін. з'єднання; шліцьові, шпонкові з'єднання; плаваючі опори.
13	Деталі, що працюють в умовах ударного зношування.	Робочі органи шоківих, валкових і конусних дробарок, кульові млини, породоруйнуючі інструменти, штампіві інструменти при холодній деформації.

Продовження табл. 1

1	2	3
14	Електричні контакти (розривні, ковзаючі й нерухомі). Одночасна дія механічних, теплових і електричних чинників призводить до істотної зміни властивостей контактуючих матеріалів та їх фрикційно-зносостійких характеристик.	Ковзаючі струмознімальні пристрої, контакти електричних машин (електрощітки, кільця та ін.); роз'ємні контакти, електроди машин контактного зварювання, формотворчі інструменти-електроди.
15	Поверхні контакту деталей, одна з яких – еластичний матеріал.	Ремінні і фрикційні передачі, запірні пристрої, полімерні і металополімерні опори ковзання.
16	Запірні і регулюючі пристрої, що працюють в режимі замикання і розмикання та призначені для перекриття потоків середовища.	Крани (кульові і конусні), у яких запірний або регулюючий елемент, що має форму тіла обертання або його частини, повертається навколо власної осі, довільно розташованої по відношенню до напрямку потоку робочого середовища. Клапани (вентилі), у яких запірні елементи (тарілчасті, золотникові або конічні) переміщуються паралельно осі потоку робочого середовища. Засувки, у яких запірний або регулюючий елемент переміщується перпендикулярно осі потоку робочого середовища. Клинові засувки з дводисковим або пружним клином. Дискові затвори, у яких запірний або регулюючий елемент має форму диска, що повертається навколо осі, перпендикулярної або розташованої під кутом до напрямку потоку робочого середовища.

Прикладом з'єднань групи 2 є: запірні прецизійні пояски деталей запірної арматури; кульові крани; диски фрикційних муфт; торцеві ущільнення; конусні крани та ін.

На рис. 2, а показана схема зміни зносу I за радіусом кругової площі контакту з'єднаних деталей групи 1. Конструкція таких вузлів забезпечує зближення деталей при зносі по осі обертання і сумарна величина зносу деталей 1 та 2 однакова при будь-яких значеннях радіуса $I = I_1 + I_2$. Однак через відмінності зносостійкості матеріалів з'єднуваних деталей, умов тепловідведення та ін. значення $I_1 \neq I_2$. Підбором більш раціонального варіанту поєднання матеріалів і технологій зміцнення деталей можна зменшити величину зносу окремих деталей I_1 та I_2 , а також сумарний знос I (криві $1'$ і $2'$). Вкрай нерівномірний розподіл зносу за круговими траєкторіями контакту можливий у деталей групи 2, а також при наявності великих зазорів в додаткових напрямних з'єднань групи 1.

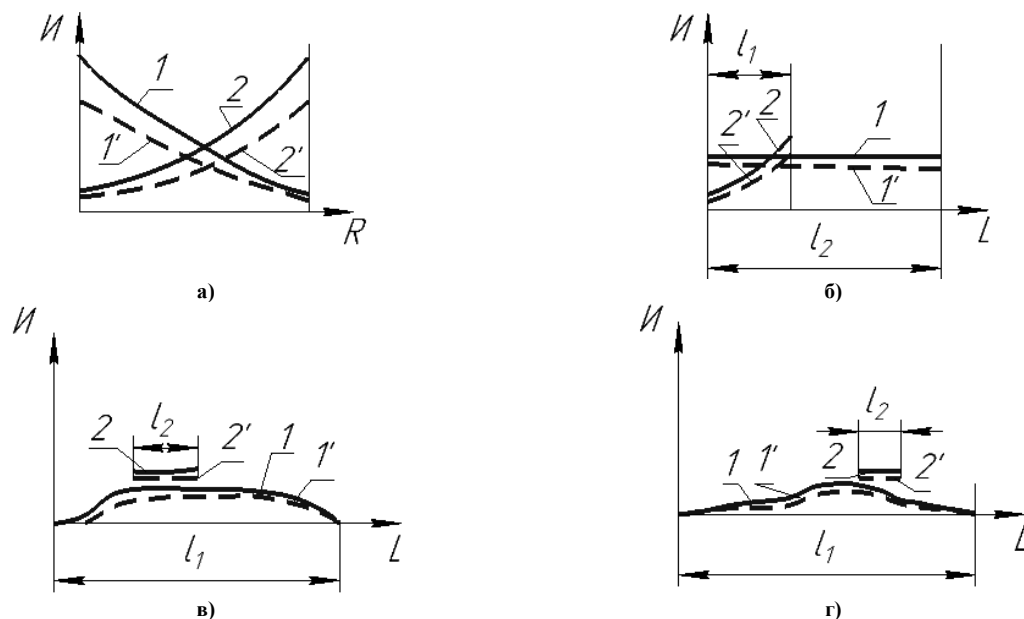


Рис. 2. Схема розподілу зносів поверхонь тертя для з'єднуваних деталей:
а) групи 1; б) групи 3; в) групи 4; г) групи 5

У з'єднань 3-ї і 4-ї груп умови зношування зберігаються тільки для однієї деталі. До з'єднань типу 3 можна віднести: колодкові гальма з жорстким закріпленням колодки; ходові гвинти-гайки; шестерінчасті насоси (контакт головок зубів і корпусу насоса) та ін. Рівномірний знос проявляється у одній із з'єднаних деталей, а для іншої він нерівномірний або навіть має локальний характер. Прикладами з'єднань типу 4 є: вали-підшипники ковзання; осьові опори ковзання з самовстановлюваними несучими поверхнями (колодками); колодкові гальма з самовстановленням колодок; кругові напрямні ковзання при ексцентричному навантаженні; відцентрові колодкові муфти; гальмівні диски; дискові гальма тощо. На рис. 2, б показана схема зміни зносу вздовж поверхонь контакту деталей групи 3. Знос рівномірний уздовж поверхні контакту тільки у деталі 1. Більш оптимальний вибір матеріалів і технологій зміцнення дозволяє знизити знос деталей (криві 1' і 2').

Змінні умови зношування для всіх точок контакту обох деталей характерні для з'єднань деталей з нижчими кінематичними парами (5-а група). Інтенсивність зношування на поверхнях тертя розподілена нерівномірно. До з'єднань групи 5 відносяться: золотникові пари в гідророзподільниках; поршневі кільця-гільзи циліндра; лінійні підшипники ковзання та ін. Прикладами з'єднань 6-ї групи є: пластинчасті насоси; поступальні напрямні ковзання; куліси-камені; пластини-корпуси і пластини-ротори в пластинчастих насосах і гідромоторах; пази напівмуфт і виступи проміжного диска хрестових муфт; пружинно-кулачкові запобіжні муфти та ін.

На рис. 2, г показана схема зміни зносу поверхонь контакту деталей групи 5 у напрямку відносного руху. Найбільш нерівномірний знос спостерігається у більш протяжній поверхні контакту у деталі 1. Нерівномірність зносу менше у спряженій деталі 2. У групі 6 нерівномірність зносу таких деталей різко збільшується. Підбором більш раціонального поєднання матеріалів і технологій зміцнення можна домогтися підвищення зносостійкості деталей цієї групи.

З'єднання деталей 7-ї і 8-ї груп (на відміну від 5-ї і 6-ї) є вищими кінематичними парами, в яких ідеальний контакт поверхонь тертя має місце при дотику по лінії або в точці. В цьому випадку також має місце висока ймовірність нерівномірного зносу поверхонь. Прикладами з'єднань групи 7 є: зубчасті зачеплення; кулачки-штовхачі; шестерінчасті насоси (зуби шестерень) та ін. До з'єднань групи 8 відносяться: колеса-рейки; підшипники і напрямні кочення; обгінні фрикційні роликові муфти; фрикційні катки; кулькові гвинти та ін.

З'єднання 9-ї і 10-ї груп відносяться до контактних ущільнень обертових деталей і штоків, плунжерів та інших деталей з поступальним або поступально-обертальним рухом. Їх дія ґрунтується на їх безпосередньому контакті з ущільнюваними поверхнями.

9-я група відповідає відносному обертальному руху деталей, що сполучаються в умовах контакту з всебічним радіальним підтисканням як в умовах дотику, так і самовстановлення. Для з'єднань 9-ї групи характерні однакові умови зношування для точок поверхонь, розташованих на одній траєкторії. Інтенсивність і тривалість зношування, а також знос на окружностях кожної з поверхонь будуть однаковими. До них відносяться сальникові ущільнювачі з м'якою набивкою, манжетні ущільнювачі, гумові кільця типу «О», фетрові кільця, еластичні втулки, кільця і пробки, жорсткі кільця [3]. Для більшості цих ущільнювачів щільність їх прилягання до ущільнюваної поверхні забезпечується за рахунок пружності матеріалу ущільнювача, а жорсткі кільця зазвичай вимагають додаткового притискання. Гумові кільця можуть бути використані при повільному обертанні. Найбільшого поширення для ущільнення валів отримали манжети. Манжета складається із сталевого каркасного кільця, що надає їй необхідну радіальну жорсткість і дозволяє щільно встановлювати манжету в корпус, та ущільнюючого коміра, що притискається до валу кільцевою пружиною. Перевага ущільнень з жорсткими кільцями – велика довговічність завдяки компенсації зносу розтисканням або переміщенням сегментів кільця. Кільця зазвичай складаються з сегментів, що стискаються кільцевою пружиною. Деталі жорстких ущільнювачів можуть бути виготовлені з матеріалів, що застосовуються для виготовлення підшипників ковзання.

Для правильної роботи контактної ущільнювачі необхідна відповідна підготовка вала. Низька шорсткість поверхні ($Ra=0,04...0,16$ мкм) не сприяє утриманню змащувальної речовини в нерівностях і ускладнює створення мікроеластогідродинамічної плівки, а висока шорсткість поверхні ($Ra>1,25$ мкм) викликає збільшення зносу та коефіцієнта тертя. У зв'язку з цим існує деяка оптимальна шорсткість ($Ra=0,16...0,63$ мкм). Іншим важливим для довговічності та ефективності ущільнення фактором є радіальне биття ущільнюваної поверхні. Для піддатливих манжетних ущільнень воно не повинно перевищувати 25 мкм. Неспіввісність установки манжети щодо вала не повинна перевищувати 0,25 мкм.

Сальникові ущільнення з м'яким набиванням широко застосовуються в якості ущільнювальних вузлів [8]. Твердість матеріалу ущільнюючого елемента (набивання) значно менша, ніж твердість контртіла. Як набивання застосовують або дискретні матеріали (порошки, гранули) або волокна. Протікання однакові як при обертанні деталей, так і при їх нерухомих стани. Ресурс роботи сальникового ущільнення залежить від багатьох факторів: чистоти обробки поверхні рухомої ущільнюваної деталі і точності виконання її циліндричної форми (відсутність овальності вала і конусності штока); матеріалу набивки; значення її коефіцієнта бокового тиску; швидкості руху ущільнюваної деталі; висоти набивання та інших умов. Наявність на поверхні рухомої ущільнюваної деталі рисок, подряпин та інших недоліків є причиною підвищеного зносу. Поверхні ущільнюваних деталей повинні бути оброблені з шорсткістю Ra не більше 0,2...0,4 мкм. Зношування набивання може бути втомним і абразивним. Втомний знос обумовлений

дискретністю контакту волокон сальникової набивки з ущільнюваною деталлю. При зовнішньому терті відбувається багаторазове деформування волокон набивання, яке призводить до руйнування і відділення окремих волокон матеріалу. Ступінь і частота деформування залежать від мікрогеометрії поверхні, яка треться, швидкості руху, питомого навантаження і температури.

10-а група з'єднань відноситься до зворотного-поступального руху деталей в умовах контакту зі всебічним стисненням, в умовах дотику або самовстановлення. Тут умови зношування зберігаються тільки для однієї деталі. До цієї групи з'єднань відносяться сальникові ущільнення з м'якою набивкою для штоків та ін., манжетні ущільнення, еластичні втулки, кільця і пробки, поршневі кільця-гільзи циліндра, плунжери з ущільненнями, золотникові клапани свердловинних штангових насосних установок тощо. При використанні кривошипно-шатунного механізму при обертанні кривошипа шток рухається зі змінною швидкістю: від нуля в крайніх (мертвих) положеннях до максимального значення V_{max} при положенні кривошипа під кутом, близьким до 90° . При розрахунку потужності, що втрачається на тертя в сальниковому набиванні, приймають середню швидкість руху штока $V_{cp}=0,5V_{max}$. Потужність, що втрачається на тертя штока об сальникове набивання:

$$N = q_z K_r L \pi d_0 f V_{cp}, \quad (1)$$

де q_z – питоме навантаження за поточним значенням по осі z ; K_r – коефіцієнт бокового тиску набивання; L – загальна (сумарна) довжина (висота) набивання; d_0 – початковий внутрішній діаметр; f – коефіцієнт тертя.

Шток рухається зворотно-поступально, тому при такому русі шар набивання, що контактує зі штоком, працює на втому. Протікання ущільнюючого середовища змінне і його величина залежить від напрямку руху штока: при русі в сторону натискної втулки (при зовнішньому її розміщенні) величина протікання буде більшою, ніж при русі в зворотному напрямку.

Шпинделі арматури мають і прямолінійний зворотно-поступальний, і обертальний, змінний за напрямком рух. Якщо переміщення шпинделя забезпечується обертанням аксіально нерухомої гайки, то шпиндель переміщується прямолінійно вгору або вниз залежно від напрямку обертання гайки. Якщо шпиндель обертається в нерухомій гайці, то його ущільнювана поверхня має складний рух: вертикальний прямолінійний і обертальний.

До 11-ї групи включені рухомі з'єднання деталей, що контактують через тверде середовище. Як приклади можна привести взаємодію інструментів з оброблюваними матеріалами при прокатці, штампуванні, притиранні (притир – абразивне середовище – деталь); конусні дробарки; цоккові дробарки; валкові дробарки тощо. Поверхні тертя також зношуються нерівномірно, навіть у елементів трибологічних систем, що працюють в парі.

У 12-у групу входять з'єднання деталей з гарантованим натягом, нерухомі роз'ємні з'єднання і малорухомі з'єднання деталей, поверхні яких піддаються фретинг-корозії. Таке зношування відбувається при малих взаємноколивальних рухах в межах пружних деформацій мікронерівностей поверхонь контакту. Як приклади таких з'єднань можна привести: посадки підшипників на вал або в корпус; з'єднання бронзового вінця черв'ячного колеса зі сталевією маточиною; поршневі пальці; з'єднання поверхонь валів з маточинами лопаток турбін, компресорів бандажів залізничних коліс; імперелерів з валами в хімічних реакторах і т.д.; клинові, заклепочні, штифтові та ін. з'єднання тощо.

До 13-ї групи з'єднань віднесені деталі, що працюють в умовах ударного зношування при періодичному зіткненні. Вивчення зношування при ударі як самостійного виду розпочато порівняно недавно [9]. Проблема підвищення зносостійкості обладнання і робочих органів, що працюють в умовах удару? існує в різних галузях промисловості:

- нафтова і гірська (роторне, турбінне, ударне, ударно-обертальне і ударно-канатне буріння шпурів свердловин, забивання і витягання обсадних труби анкерного кріплення, ударний і віброударний спосіб подрібнення порід і корисних копалин, очищення транспортних засобів, збагачення руд, вібронанавтаження тощо);
- машинобудування (клепка, штампування, запресовування і випресовування, обрубка, насічка та ін.; віброударне очищення деталей та вібротранспортування, випробування на удар і вібрацію);
- будівництво (руйнування бетону і цегляної кладки, насічка бетону, віброударне ущільнення бетону і сипучих матеріалів, розтин асфальтобетонних покриттів, розпушування мерзлого ґрунту, пробивання борозен, ніш, отворів, а також обробіток ґрунтів, обробка каменю в дорожньо-будівельних та інших роботах).

У 14-у групу включені електричні контакти, які можуть бути розривними, легкими і нерухомими. Одночасна дія механічних, теплових і електричних чинників призводить до істотної зміни властивостей контактуючих матеріалів та їх фрикційно-зносостійких характеристик. Електрокорозійне зношування відбувається при проходженні через контакт поверхонь тертя електричного струму. Особливу складність представляє робота ковзаючих контактів. Одночасна дія механічних, теплових і електричних чинників призводить до істотної зміни властивостей контактуючих матеріалів та їх фрикційно-зносостійких характеристик.

До 15-ї групи віднесені рухомі і нерухомі з'єднання деталей, що контактують через еластичне середовище. У разі якщо одним з контактуючих тіл є еластомір, що володіє здатністю до еластичної

деформації, додається додатковий (гістерезисний) компонент, який вносить вклад в процеси взаємодії поверхонь тіл, що труться. Для пар тертя, в яких одним із контактуючих тіл є еластомір, характерне еластогідродинамічне або в'язкопружне тертя. Як приклад можна привести герметизуючі, а також різні запірні пристрої. Наприклад, важливим завданням є забезпечення високого ступеня герметичності і надійності манжетних ущільнень валів при тиску рідин вище 1...5 МПа і швидкості ковзання більше 10 м/с, а для торцевих ущільнень – при питомому тиску більше 20 МПа і швидкості ковзання більше 40 м/с.

У 16-у групу входять запірні і регулюючі пристрої, що працюють в режимі замикання і розмикання та призначені для перекриття потоків середовища.

Висновки

Проектування ефективних типових і оригінальних вузлів тертя вимагає врахування комплексу специфічних вимог трибології і триботехніки, що враховують конструктивні особливості машин і механізмів, різноманітні режими роботи та умови їх експлуатації, параметри робочих середовищ, вимоги до надійності, технологічності конструкцій та ін.

Запропонована класифікація з'єднань тертьових деталей за умовами зношування забезпечує можливість системного підходу до узагальнення досвіду створення ефективних вузлів тертя, стимулює проведення досліджень і розробок більш раціональних конструкцій вузлів тертя, розширює можливості трансферу інноваційних конструкцій і технологій. Забезпечується також можливість обміну досвідом створення та застосування перспективних конструкцій деталей і вузлів тертя та способів їх зміцнення і відновлення з урахуванням подібних умов зношування між різними галузями машинобудування.

Література

1. Восстановление деталей машин : справочник / [Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Петров и др.]. – М. : Машиностроение, 2003. – 673 с.
2. Золотарев А. В. Научно-методическая база технологического обеспечения эксплуатационных свойств роликов установок непрерывной разливки стали при их ремонте / А. В. Золотарев // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 12. – С. 39–45.
3. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / [Э. Д. Браун, Н. А. Буше, И. А. Буяновский и др.] / под ред. А.В. Чичинадзе. – М. : Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.
4. Браун Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Браун Э. Д., Евдокимов Ю. А., Чичинадзе А. В. – М. : Машиностроение 1982. – 191 с.
5. Инженерия поверхности деталей / [под ред. А. Г. Сулова]. – М. : Машиностроение. 2008. – 320 с.
6. Хейфец М. Л. Технологическое управление наследованием эксплуатационных параметров качества деталей машин / М. Л. Хейфец, А. С. Васильев, А. И. Кондаков, Л. Танович // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2015. – № 3. – С. 10–22.
7. Лещинский Л. К. Слоистые наплавленные и упрочненные композиции / Лещинский Л. К., Самотугин С. С. – Мариуполь : Новый мир, 2005. – 392 с.
8. Продан В. Д. Сальниковые уплотнения с мягкой набивкой : учебное пособие / В. Д. Продан, Г. В. Божко. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 124 с.
9. Виноградов В. Н. Изнашивание при ударе / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, А. Ю. Албагачиев. – М. : Машиностроение, 1982. – 192 с.

References

1. Vosstanovlenie detalej mashin : spravochnik / [F. I. Panteleenko, V. P. Lyalyakin, V. P. Petrov i dr.]. – М. : Mashinostroenie, 2003. – 673 s.
2. Zolotarev A. V. Nauchno-metodicheskaya baza tehnologicheskogo obespecheniya ekspluatatsionnyh svoystv rolikov ustanovok nepreryvnoy razlivki stali pri ih remonte / A. V. Zolotarev // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem. – 2014. – № 12. – S. 39–45.
3. Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka) / [E. D. Braun, N. A. Bushe, I. A. Buyanovskij i dr.] / pod red. A.V. Chichinadze. – М. : Centr «Nauka i tehnika», 1995. – 778 s.
4. Braun E. D. Modelirovanie treniya i iznashivaniya v mashinah / Braun E. D., Evdokimov Yu. A., Chichinadze A. V. – М. : Mashinostroenie 1982. – 191 s.
5. Inzheneriya poverhnosti detalej / [pod red. A. G. Suslova]. – М. : Mashinostroenie. 2008. – 320 s.
6. Hejfec M. L. Tehnologicheskoe upravlenie nasledovaniem ekspluatatsionnyh parametrov kachestva detalej mashin / M. L. Hejfec, A. S. Vasilev, A. I. Kondakov, L. Tanovich // Izvestiya NAN Belarusi. Seriya fiziko-tehnicheskikh nauk. – 2015. – № 3. – S. 10–22.
7. Leshinskij L. K. Sloistye naplavlennye i uprochnennye kompozicii / Leshinskij L. K., Samotugin S. S. – Mariupol : Novyj mir, 2005. – 392 s.
8. Prodan V. D. Salnikovye uplotneniya s myagkoj nabivkoj : uchebnoe posobie / V. D. Prodan, G. V. Bozhko. – Tambov : Izd-vo FGBOU VO «TGTU», 2016. – 124 s.
9. Vinogradov V. N. Iznashivanie pri udare / V. N. Vinogradov, G. M. Sorokin, A. Yu. Albagachiev. – М. : Mashinostroenie, 1982. – 192 s.