



## Тематичний напрям № 1

### Технічна експлуатація та обслуговування сільськогосподарської техніки

УДК 621.879:621.891

#### ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ПАЛЬЦІВ СТІЛИ ЕКСКАВАТОРА A STUDY OF THE KINETICS OF ABRASIVE WEAR ON EXCAVATOR BOOM FINGERS

<sup>1</sup> Костянтин Борак, <sup>2</sup> Сергій Сидорчук-Шмідт

<sup>1</sup> Житомирський агротехнічний фаховий коледж, Житомир, Україна,

<sup>2</sup> Поліський національний університет, Житомир, Україна

Екскаватор належить до машин, у яких надійність робочого обладнання безпосередньо визначає продуктивність, безпеку та собівартість технологічного процесу. Стріла, рукоять і ківш формують кінематичний ланцюг, який постійно сприймає значні статичні та динамічні навантаження під час різання ґрунту, заповнення ковша, повороту платформи, вивантаження та зворотного ходу. Передача навантаження між окремими ланками відбувається через пальці та втулки шарнірних вузлів. Саме ці елементи концентрують контактні напруження, працюють у режимі обмежених поворотів і в багатьох випадках не мають стабільного гідродинамічного мастильного клина. У результаті поверхні пальця і втулки переходять у режим граничного або змішаного тертя, у якому ймовірність абразивного руйнування різко зростає.

Практика експлуатації землерийної техніки показує, що розвиток люфту у шарнірах стріли спочатку проявляється як незначне збільшення вільного ходу, періодичний стукіт при зміні напрямку навантаження та локальне витискання мастила із зазору. На ранній стадії ці ознаки часто ігноруються, оскільки машина ще зберігає працездатність. Проте саме на цьому етапі у вузлі починаються найбільш небезпечні процеси: руйнуються мікронерівності, утворюються перші борозни, частинки ґрунту й окислів затримуються у западинах, а контактні напруження розподіляються дедалі менш рівномірно. З часом знос перестає бути рівномірним по довжині втулки, що спричиняє перекіс пальця, зростання питомих тисків на крайках і прискорене вироблення отворів у вушках стріли. Ремонт у такому випадку вже не обмежується заміною пальця та втулки і переходить у дорожчі операції відновлення посадочних місць.

Проблема абразивного зношування пальців стріли є багатофакторною. На неї впливають тип ґрунту, вологість, гранулометричний склад домішок, режим копання, коректність технічного обслуговування, якість мастильного матеріалу, конструкція ущільнень, твердість і мікроструктура поверхневого шару, а також реальна геометрія контакту після припрацювання. Через таку сукупність чинників експлуатаційні спостереження без аналітичної моделі не дають змоги заздалегідь оцінити, коли саме вузол перейде від допустимого зносу до прискореної деградації. Тому для інженерної практики важливо не тільки констатувати факт зношування, а й описати його кінетику, тобто закон зміни зносу в часі або з напрацюванням.

Поняття «кінетика зношування» у випадку шарнірів екскаватора слід тлумачити як зміну лінійного або об'ємного зносу під дією накопиченої роботи тертя та змінних умов контакту. Якщо на стаціонарних лабораторних схемах абразивний процес часто вважають близьким до лінійного, то в реальному шарнірі зношування майже ніколи не є строго лінійним. На початковій стадії домінує припрацювання, коли частина матеріалу втрачається через зрізання мікроставупів. Після цього настає відносно стабільний період, у якому швидкість зношування близька до сталої. Надалі збільшення зазору, погіршення герметичності та накопичення продуктів зносу переводять вузол у прискорений режим, де залежність стає суттєво нелінійною. Саме опис такого переходу має особливе значення для обґрунтування міжремонтних інтервалів.

У сучасній літературі доведено, що до абразивного руйнування поверхонь у ґрунтовому середовищі та забруднених шарнірних системах найчастіше приводить дія мікрорізання, мікроплучення, багаторазового вдавлювання твердих зерен і повторного проходу тих самих частинок крізь контактну зону. Для землерийної техніки ці явища додатково ускладнюються тим, що джерелом абразиву є не лише зовнішній ґрунт, а й внутрішні продукти зносу самого вузла. Після потрапляння у мастильний шар вони можуть виконувати роль вторинного абразиву. Таким чином, вузол набуває властивостей самоприскорюваної трибосистеми, де кожне нове пошкодження створює умови для наступного. Це і зумовлює необхідність комплексного дослідження.

Палець стріли екскаватора є осьовим елементом шарніра ковзання, який забезпечує взаємне обертальне або коливальне переміщення двох ланок робочого обладнання. У більшості конструкцій він працює у парі з втулкою або безпосередньо з отвором у вушку, сприймаючи радіальні навантаження від зусиль копання, реакції гідроциліндрів і ваги робочого обладнання. Формально такий вузол можна розглядати як підшипник ковзання з малими кутами повороту. Однак на відміну від класичних гідродинамічних підшипників, у ньому не формується стабільний мастильний клин по всьому циклу руху. Через реверсивний характер переміщення, малі швидкості та високі питомі тиски вузол значну частину часу перебуває у змішаному або граничному режимі тертя, а отже є вразливим до абразивного впливу сторонніх частинок.

Відповідно до сучасних уявлень про триботехнічні системи шарнір стріли екскаватора треба описувати не як просту пару «палець - втулка», а як багатокомпонентну систему «палець - втулка - мастило - абразивні частинки - продукти зносу - зовнішнє середовище». У цій системі кожен елемент змінює умови контакту. Мастило зменшує прямий металевий контакт, але одночасно може переносити абразив по довжині вузла. Ущільнення повинні перешкоджати проникненню пилу, проте при збільшенні люфту їхня ефективність знижується. Продукти зносу, що утворюються внаслідок зрізання мікроставупів і відшарування оксидних плівок, змішуються з ґрунтовими домішками і підсилюють руйнування. Тому реальна інтенсивність зношування формується внаслідок взаємодії багатьох факторів одночасно.

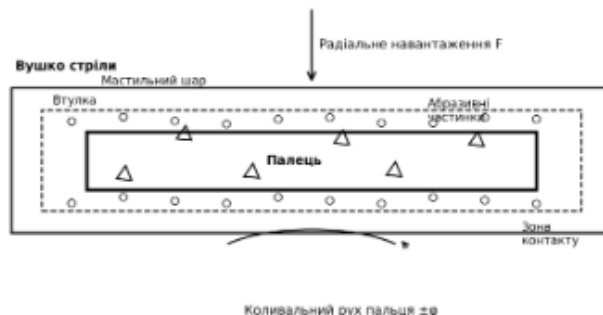


Рис. 1. Трибосистема шарніра стріли екскаватора: палець, втулка, мастильний шар і абразивні частинки.

Абразивне зношування у шарнірах стріли виникає переважно за трибологічною схемою тритільного контакту, коли тверді частинки знаходяться між поверхнями пальця і втулки. У найпростішому випадку частинка кварцу або іншого мінералу вдавлюється в м'якшу поверхню і діє

як різець, що прорізає борозну в твердшій парній поверхні. Якщо частинка не закріплена жорстко, вона може перекочуватися, дряпати, багаторазово вдавлюватися або ламатися на дрібніші фрагменти. Саме тому тритільна абразія часто призводить до складнішої картини пошкодження, ніж двотільна, де нерівності однієї поверхні безпосередньо ріжуть іншу. Для пальців екскаватора характерна саме нестала, нестационарна тритільна абразія, оскільки склад і концентрація частинок у зазорі безперервно змінюються.

Ґрунтове середовище як джерело абразиву має власні особливості. На відміну від стандартизованих абразивів лабораторних випробувань, реальний ґрунт характеризується широким розкидом розмірів, форми та міцності зерен, вмістом глинистої і органічної фази, змінною вологістю та рН. Гострокутні кварцові зерна зазвичай спричиняють інтенсивне мікрорізання, тоді як за наявності дрібнодисперсних глинистих частинок і води можливе утворення пастоподібної абразивної суспензії. В окремих випадках вода спочатку зменшує сухе тертя, але водночас полегшує проникнення забруднення в зазор і вимиває мастило з контактної зони. Хімічний склад середовища також не є нейтральним: окиснення поверхонь та взаємодія корозійних продуктів з механічним тертям здатні підсилювати сумарне руйнування.

Особливість шарнірів екскаватора полягає і в режимі навантаження. На відміну від рівномірно обертових валів, палець стріли зазнає чергування високих і відносно малих навантажень, короткочасних перевантажень при ударі ковша об перешкоду, імпульсних реакцій від гідроциліндрів і зміни напрямку дії сил у реверсивному циклі. Коли внаслідок зносу виникає навіть незначний люфт, ударна складова різко зростає. Це означає, що абразивне руйнування поєднується з контактною втомою, локальним наклепом, розуцільненням мастильного шару і можливим виштовхуванням забруднення до крайок втулки, де згодом формуються найглибші канавки. Отже, динаміка навантаження безпосередньо впливає на форму зношеної поверхні.

У літературі виділяють кілька основних мікромеханізмів абразивного зношування, які характерні і для пальців стріли. Перший механізм - мікрорізання, коли гостра частинка видаляє матеріал у вигляді мікростружки. Другий - мікроплування, коли матеріал переважно витісняється убік без повного відокремлення, але з багаторазовими проходами частинок така деформація переходить у втрату матеріалу. Третій механізм - втомне відшарування поверхневого шару після повторних циклів локальної пластичної деформації. Четвертий - окисно-абразивне зношування, коли спочатку утворюється відносно крихка окисна плівка, а потім вона руйнується і сама стає додатковим абразивом. У реальному шарнірі ці механізми майже ніколи не існують окремо; зазвичай один із них домінує, а решта супроводжують процес.

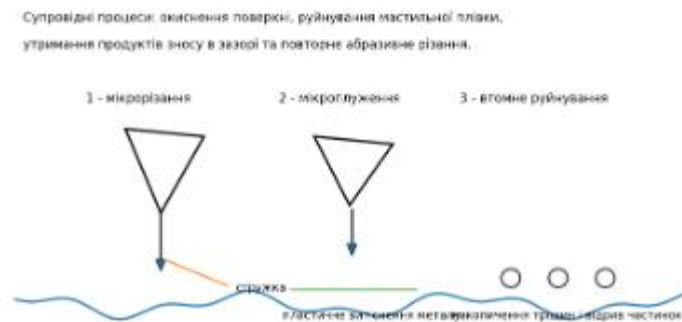


Рис. 2. Основні мікромеханізми абразивного руйнування поверхні пальця.

Матеріал пальця та втулки суттєво впливає на кінетику зношування. Підвищення твердості поверхневого шару за рахунок термообробки, цементації, індукційного гартування або наплавлення збільшує опір мікрорізанню. Однак надмірне збільшення твердості без забезпечення достатньої в'язкості може зробити поверхневий шар чутливим до тріщиноутворення і втомного викришування. Крім того, у парі тертя важливе не тільки абсолютне значення твердості, а й співвідношення твердості обох елементів, їхня схильність до захоплення, здатність утримувати мастило та стійкість

до корозійно-окисних явищ. З цієї причини для шарнірів екскаваторів часто застосовують поєднання зміцненого пальця і втулки з матеріалу, який має достатню несучу здатність та прийнятну спрацьовуваність.

Для інженера-експлуатаційника важливо, що абразивне зношування пальців не завжди розвивається симетрично. Якщо вісь пальця зміщена відносно осі втулки, одна крайка контактує інтенсивніше, ніж інша. Додаткове значення має розташування точок введення мастила: за невеликого напрямку подачі мастила не вимиває забруднення з найнебезпечніших зон, а навпаки переносить його вздовж навантаженої ділянки. Унаслідок цього навіть при однаковому загальному напрацюванні два на перший погляд однакові вузли можуть мати різну форму зносу. Саме просторовий, а не лише середній за об'ємом характер руйнування зумовлює необхідність аналізу розподілу контактного тиску по довжині втулки.

Діагностика такого зношування базується на кількох ознаках: збільшенні радіального люфту, появі овальності отворів, локальних канавок на пальці, нерівномірному поліруванні поверхні, зміні характеру шуму при реверсі руху, підвищеному витисканні забрудненого мастила та наявності металевих частинок у пробах мастильного матеріалу. Проте без математичної інтерпретації ці показники переважно відображають уже наявний стан, а не прогнозують майбутній. Тому одним із центральних завдань дослідження є перехід від якісного опису механізмів до кількісної оцінки глибини зношування у функції напрацювання.

Важливо також враховувати масштабний ефект. Для малих шарнірів відносна роль припрацювання часто вища, оскільки мікрогеометрія поверхні складає помітну частку від номінального зазору. Для масивних вузлів середнього і великого класу екскаваторів частка припрацювання у загальному ресурсі менша, проте різко зростає значення перекосу, деформації вушок і нерівномірного розподілу навантаження по довжині контакту. Таким чином, сама геометрія вузла і його масштаб змінюють співвідношення між окремими механізмами руйнування.

Окремої уваги потребує питання повторного використання продуктів зносу як абразиву. Якщо мастила не витискається із зазору назовні, а переміщується усередині вузла разом із металевими частинками, то процес зносу стає циклічним: зірваний матеріал не залишає систему, а продовжує руйнувати її надалі. Цей механізм особливо небезпечний у випадках, коли планове змазування виконується рідко або проводиться без попереднього очищення зовнішніх поверхонь шарніра. Саме тому в розрахунковій моделі коефіцієнт забруднення трактовано як інтегральний, а не суто концентраційний показник.

Вихідною передумовою моделювання є те, що елементарний приріст зносу за малий інтервал часу пропорційний роботі тертя, яка виконується в зоні контакту. Якщо виходити з класичних уявлень про абразивне руйнування, об'ємний знос можна подати як функцію нормальної сили, шляху ковзання і твердості поверхневого шару. Для квазістаціонарного режиму зручно використовувати рівняння типу Архарда, однак для шарніра стріли його потрібно адаптувати до коливального руху та до поступового погіршення геометрії контакту.

Для шарніра стріли екскаватора шлях ковзання за один повний цикл коливання можна наближено визначити як добуток радіуса пальця на подвійну амплітуду кута повороту і на число проходів за цикл. Звідси випливає, що сумарний шлях ковзання за весь час роботи прямо пропорційний частоті робочих циклів. Це пояснює, чому навіть за відносно невеликих кутів повороту вузол накопичує значний знос при тривалому напрацюванні.

Лінійне зношування пальця визначається відношенням об'ємної втрати матеріалу до ефективної площі контакту. У першому наближенні площа контакту може вважатися сталою, однак у реальності вона змінюється через перекося, пружні деформації та збільшення люфту. Тому в моделі прийнято, що частина впливу геометрії переноситься у змінний ефективний коефіцієнт зношування. Такий підхід простіший за повне контактне моделювання, але достатньо чутливий до стадії розвитку дефекту.

Ефективний коефіцієнт зношування подано у вигляді добутку базової величини та поправок на умови контакту: базовий рівень, абразивне забруднення, припрацювання і деградація геометрії. Коефіцієнт припрацювання зменшується з часом, оскільки після зрізання найвищих мікроставів

поверхня переходить у більш стабільний стан. Натомість геометричний коефіцієнт зростає зі збільшенням глибини зношування, відображаючи концентрацію тиску на локальних ділянках.

У даній роботі прийнято, що ефект припрацювання описується експоненційною функцією часу, а геометричне погіршення контакту - квадратичною функцією відношення поточного зносу до критичного. Таке математичне подання не є єдино можливим, але воно добре відтворює фізично очікувану послідовність стадій. На початку швидкість зношування відносно висока, потім настає майже лінійна ділянка, а після досягнення певної межі накопиченого вироблення процес починає прискорюватися.

Коефіцієнт абразивного забруднення інтегрально враховує концентрацію твердих частинок у мастилі, їхню твердість, форму та імовірність повторного проходу через контактну зону. Такий підхід дозволяє описувати різні експлуатаційні ситуації без надмірної деталізації гранулометричного складу. Фактично цей коефіцієнт відображає загальний санітарний стан вузла, який визначається ефективністю ущільнень, режимом змазування та рівнем зовнішнього запилення.

Диференціальне рівняння моделі записується для похідної глибини зношування за часом. У чисельному експерименті воно інтегрується крок за кроком, що дозволяє оновлювати коефіцієнт зношування після кожного інтервалу напрацювання. Завдяки цьому крива  $h(t)$  формується не як разове аналітичне вираження, а як результат еволюції системи, де поточний стан контакту впливає на подальший розвиток процесу.

Для базового варіанта прийнято такі параметри узагальненого шарніра: радіус пальця 35 мм, напівамплітуда коливання 0,18 рад, середня частота циклу 0,22 Гц, еквівалентне навантаження 32 кН, ефективна площа контакту 1100 мм<sup>2</sup>, базовий коефіцієнт зношування  $2,8 \cdot 10^{-7}$ , критична глибина вироблення 0,18 мм. Низькому, середньому і високому рівням забруднення відповідають коефіцієнти 1,0; 1,8 та 2,8. Ці параметри підібрано так, щоб вони відображали типову поведінку реального шарніра землерийної машини середнього класу.

Перевага запропонованої моделі полягає в тому, що всі її параметри мають інженерний зміст. Твердість можна пов'язати з матеріалом і термообробкою, коефіцієнт забруднення - зі станом ущільнень і чистотою мастила, а геометричний коефіцієнт - із накопиченим люфтом і перекосом вузла. Це робить модель зручною не лише для наукового аналізу, а й для експлуатаційного використання у вигляді спрощених розрахункових сценаріїв.

$$\begin{aligned}
 V &= k_{ef} \times F_n \times s / H_{ef} \\
 s(t) &= 4 \times R \times \varphi \times f \times t \\
 h(t) &= V(t) / A_{ef} \\
 k_{ef}(t) &= k_0 \times K_{забр} \times K_{np}(t) \times K_{geom}(t) \\
 K_{np}(t) &= 1 + a \times \exp(-t/\tau); \quad K_{geom}(t) = 1 + b \times (h/h_{кр}) \times 2 \\
 dh/dt &= [k_0 \times K_{забр} \times K_{np}(t) \times K_{geom}(t) \times F_n \times v_{екв}] / [H_{ef} \times A_{ef}]
 \end{aligned}$$

Наведені співвідношення формують базу чисельного алгоритму. На кожному кроці інтегрування визначається поточний приріст зносу, після чого оновлюється глибина вироблення, а разом з нею - геометричний коефіцієнт. Таким чином модель природним чином враховує накопичувальний характер дефекту.

На першому етапі було проаналізовано кінетику зношування за трьох рівнів абразивного забруднення при однаковому навантаженні та однаковій твердості пальця. Розрахункові криві показали, що протягом перших 100-150 год напрацювання відбувається стадія припрацювання, на якій швидкість зношування дещо вища за середню. Це пов'язано із зрізанням мікронерівностей, стабілізацією фактичної площі контакту та первинним формуванням доріжок тертя. Після цього процес переходить у квазістаціонарну фазу з майже лінійним зростанням глибини зношування. Однак за високого рівня забруднення межа між другою і третьою стадіями настає раніше, а криві набувають виразної опуклості вгору.

Для низького рівня забруднення прогнозована глибина зношування після 1200 год становить близько 0,066 мм. Для середнього рівня - приблизно 0,130 мм, а для високого - близько 0,258 мм.

Таким чином, збільшення інтегрального коефіцієнта забруднення від 1,0 до 2,8 призводить майже до чотирикратного підвищення кінцевого зносу, хоча сам коефіцієнт зростає менш ніж утричі. Цей результат є принципово важливим: зношування в даній моделі наростає нелінійно не лише через прямий вплив абразиву, а й через погіршення геометрії контакту, яке саме є наслідком попереднього зносу. Інакше кажучи, абразивне забруднення запускає ланцюговий процес самоприскорення.

Особливо показовим є порівняння моменту досягнення умовної критичної глибини 0,18 мм. Для низького сценарію вона взагалі не досягається у межах розглянутого напрацювання. Для середнього сценарію наближення до цієї межі відбувається наприкінці розрахункового інтервалу, а для високого - ще до завершення 1000 год. З практичної точки зору це означає, що різниця між «допустимо забрудненим» і «сильно забрудненим» вузлом не просто кількісна. Після переходу певної межі система починає працювати в іншому режимі, де будь-яке подальше експлуатаційне зволікання різко збільшує обсяг майбутнього ремонту.

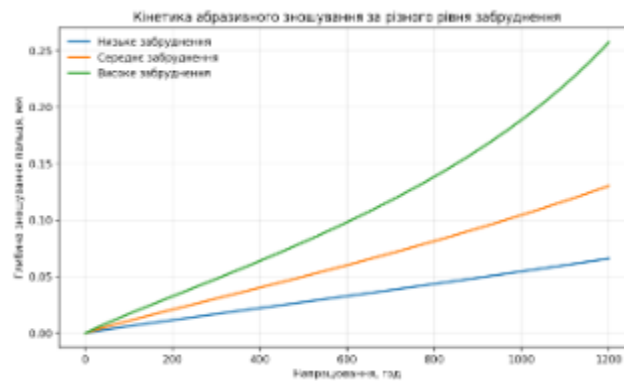


Рис. 4. Кінетика зношування пальця за різного рівня абразивного забруднення.

На другому етапі досліджено вплив еквівалентного радіального навантаження. Для напрацювання 1000 год і середнього рівня забруднення отримано, що зростання навантаження з 20 до 60 кН збільшує прогнозовану глибину зношування приблизно від 0,062 до 0,262 мм. За нижніх навантажень залежність близька до лінійної, що узгоджується з класичними уявленнями про абразивне зношування. Але зі збільшенням  $F_n$  кривина графіка зростає, оскільки в моделі додатково активується геометричний фактор прискорення. Іншими словами, високі навантаження не лише безпосередньо збільшують роботу тертя, а й швидше підводять вузол до стану, де контактний тиск концентрується на обмеженій ділянці поверхні.

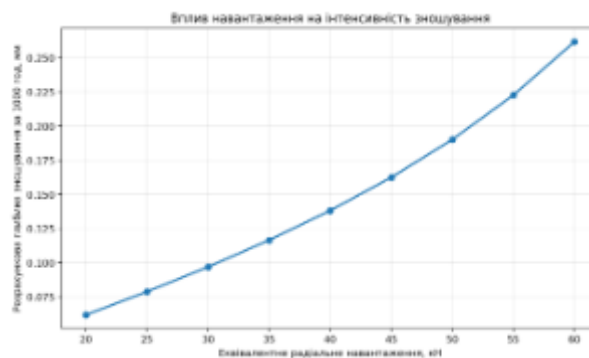


Рис. 5. Вплив еквівалентного навантаження на прогнозовану глибину зношування.

Цей висновок має важливе експлуатаційне значення. У реальних умовах навантаження на шарнір стріли суттєво залежить не тільки від маси ґрунту в ковші, а й від стилю роботи машиніста, типу ґрунту, спроб виривання каменів або кореневих включень, різких реверсів та роботи з перевантаженням. Якщо машина систематично виконує ударні або перевантажені цикли, то навіть за

належного мастила і задовільних ущільнень ресурс пальця скорочується помітно швидше, ніж це можна було б очікувати із середніх паспортних значень навантаження. Отже, режим експлуатації є фактором не менш важливим, ніж вибір матеріалу.

Окремо проаналізовано вплив твердості поверхневого шару пальця. Розрахунки показали, що при збільшенні твердості з 280 до 600 НВ прогнозована глибина зношування за 1000 год знижується від приблизно 0,123 до 0,052 мм. Характер залежності має обернений нелінійний вигляд: найбільший ефект дає підвищення твердості у нижньому та середньому інтервалі, тоді як подальше зростання твердості забезпечує вже менший відносний приріст зносостійкості. Такий результат відповідає фізичній природі процесу: при низькій твердості поверхня легко піддається мікрорізанню і вдавлюванню частинок, а після досягнення певного рівня опору подальше зношування більше визначається не твердістю як такою, а формою, кількістю та повторною циркуляцією абразиву.

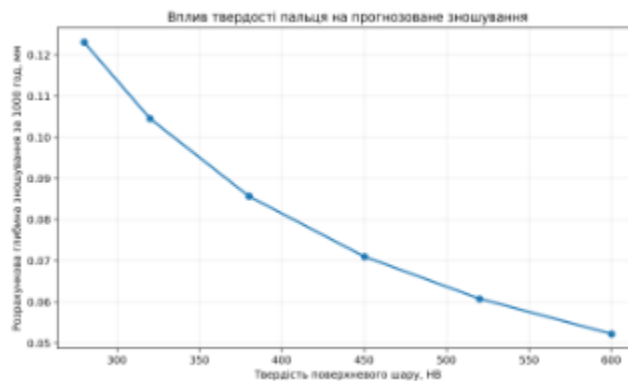


Рис. 6. Вплив твердості поверхневого шару пальця на зношування.

Звідси випливає важливий практичний висновок. Матеріалознавчі заходи, такі як індукційне гартування або використання сталі з підвищеною зносостійкістю, безумовно доцільні. Однак вони не можуть повністю компенсувати втрату герметичності вузла. Якщо у шарнір систематично потрапляє абразивна суміш, то навіть твердий палець буде зношуватися, а разом із ним зношуватиметься і втулка, що призведе до росту люфту. Тому підвищення твердості слід розглядати як складову комплексного рішення, а не як універсальний засіб усунення проблеми.

Розрахунок впливу масової концентрації твердих домішок у мастильному шарі також підтвердив високу чутливість вузла до чистоти контакту. За збільшення концентрації домішок від 0,2 до 1,2 % прогнозована глибина зношування за 1000 год збільшується приблизно від 0,072 до 0,189 мм. При цьому графік не є строго лінійним: на верхній ділянці він зростає швидше. Така поведінка свідчить про те, що надлишкове забруднення діє одразу у двох напрямках. Воно збільшує кількість ріжучих частинок між поверхнями і одночасно руйнує умови мастильної ізоляції, підсилюючи металевий контакт та утворення нових продуктів зносу.

Узагальнюючи результати моделювання, можна виокремити три ключові закономірності. По-перше, чистота мастильного шару та герметичність ущільнень впливають на ресурс не менше, ніж твердість матеріалу. По-друге, збільшення навантаження прискорює зношування більш ніж пропорційно тоді, коли вузол уже має певний накопичений люфт. По-третє, існує межа зносу, після якої процес переходить у прискорений режим через перерозподіл тиску і погіршення контакту. Саме ця третя закономірність є вирішальною при плануванні обслуговування: ремонт до досягнення критичної межі значно дешевший і технічно простіший, ніж відновлення вузла після переходу у фазу лавиноподібної деградації.