

24. Сидорчук-Шмідт С.Д. Поліський національний університет, м. Житомир, Україна.

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ОСЕЙ ШАРНІРІВ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ ЕКСКАВАТОРІВ

Виготовлення шарнірних осей (пальців) екскаваторів вимагає матеріалів з високою міцністю та твердістю. Провідні виробники (Caterpillar, Komatsu, Volvo, Hitachi, JCB) використовують леговані конструкційні сталі, здатні витримувати великі навантаження та зношування. Зазвичай це хромомолібденові сталі на кшталт AISI 4130 чи 4140 [1]. Ці сталі містять ~0,3–0,4% вуглецю та близько 1% Cr+Mo, що забезпечує хорошу загартовуваність та міцність. Як правило, після виготовлення пальці проходять індукційне гартування поверхні – утворюється тверда зовнішня оболонка (~58–63 HRC) при відносно в'язкій серцевині [1].

Багато стандартних пальців виготовлено зі сталі 42CrMo4 (аналог 4140) або 40X (аналог 5140), які після загартування мають твердість поверхні ~HRC 52–60. Запасні пальці для Hitachi мають твердість HRC 52–56 при глибині загартування ~3 мм і виготовлені зі сталі S45C (вуглецева сталь ~0,45% C). Caterpillar застосовує леговану сталь із загартованою серцевиною та хромованим покриттям для запобігання корозії. Посилені пальці Cat для з'єднань ковша можуть виготовлятися із сталі 4140 і гартуватися до ~65 HRC на поверхні.

Втулки шарнірів, в які вставляються пальці, також виготовляються з високоміцних матеріалів. Часто втулки роблять із сталі з цементацією або індукційним загартуванням внутрішньої поверхні. Один із підходів – використання м'якої сталі (наприклад, EN14A) з подальшим цементаційним гартуванням, що дає тверду зносостійку оболонку і дещо м'якший “тіло” втулки. Інший підхід – виготовлення втулок зі сталі 4140 чи подібних, з повним загартуванням. Компанія JCB повідомляє, що їхні фірмові пальці робочого обладнання виробляються з хромистої легової сталі, загартовані ззовні на глибину ~4 мм, із отфосфатованим покриттям для захисту від корозії [2]. Внутрішня серцевина таких пальців термічно покращена (відпущена) для ударної міцності. Втулки JCB виконані зі “м'якою” зовнішньою поверхнею (щоб легко запресовуватися і не пошкоджувати посадочні гнізда) та твердою внутрішньою робочою поверхнею, з внутрішніми канавками і спеціальним трибологічним покриттям для утримання мастила [2]. Таким чином досягається парність твердостей: тверда поверхня пальця працює по твердій внутрішній поверхні втулки, а м'якша частина втулки ззовні оберігає від ударів по конструкції машини.

В цілому для всіх зазначених виробників характерне використання загартованих пальців з легової сталі. Часто зустрічаються: сталь 40X/45 (~0,4–0,45% C) з індукційним гартуванням, сталь 38ХНЗМФА або 18ХГТ з цементацією для втулок, сталь 30ХНМА, 34CrNiMo (аналог 4340) тощо. Деякі

інженери рекомендують сталь 34CrNiMo6 (4340) з наскрізною твердістю ~45–50 HRC, яка має вищу ударну в'язкість ніж 4140 [3]. У виробників також практикується хромування пальців (тонкий шар твердого хрому) для підвищення корозійної стійкості та зниження тертя. Водночас, хром є крихким – при тривалих навантаженнях шар може стиратися або відшаровуватися. Відомо, що після зносу хромового покриття його тверді частки можуть діяти як абразив, прискорюючи спрацювання пальця. У виробників також практикується хромування пальців (тонкий шар твердого хрому) для підвищення корозійної стійкості та зниження тертя. Водночас, хром є крихким – при тривалих навантаженнях шар може стиратися або відшаровуватися. Відомо, що після зносу хромового покриття його тверді частки можуть діяти як абразив, прискорюючи спрацювання пальця. Тому якість і товщина хромування контролюються, а в деяких з'єднаннях замість хрому обирають інші покриття (фосфатування, наприклад, як у JCB).

Сучасні осі шарнірів екскаваторів – це вироби зі спеціальної легованої сталі, гартовані для твердості ≈55–60 HRC на поверхні. Усі п'ять зазначених виробників дотримуються цієї концепції, варіюючи хімічний склад сталі та технологію зміцнення. Caterpillar, Komatsu, Volvo, Hitachi пропонують оригінальні пальці з індукційним загартуванням (глибина кілька міліметрів) та іноді з хромовим покриттям. JCB робить наголос на комбінації тверда оболонка + поліпшена серцевина пальця та спеціальні антифрикційні покриття втулок. В результаті, заводські пальці мають високий ресурс за умови правильної експлуатації, про що свідчить їх здатність витримувати тисячі мото-годин роботи без критичного зносу.

Шарнірні з'єднання екскаватора працюють в умовах інтенсивного тертя під високими навантаженнями, тому знос є неминучим. Однак швидкість і характер зношування залежать від низки факторів. Головні причини зносу осей:

а) *Недостатнє змащення (адгезійний знос)*. Якщо між пальцем і втулкою немає належної змазки, метал труться майже напругу по металу. Це призводить до адгезійного зносу – мікрозадирів, виривання частинок металу з поверхні та утворення задирок. Неправильний вибір мастила або занадто рідкі інтервали змащування спричиняють утворення сухих ділянок. У таких умовах поверхні швидко нагріваються і “прихоплюються”, починається інтенсивне спрацювання. Як зазначають практики, ресурс пальців “цілковито залежить від умов роботи та частоти (і якості) змащування”. Іншими словами, навіть високоякісний палець швидко зношується без регулярного змащування.

б) *Абразивне забруднення*. Робота екскаватора часто відбувається у ґрунті, піску, глині – дрібні тверді частинки неминуче потрапляють у зазори шарнірів. Пісок і ґрунт діють як абразивна паста, що шліфує поверхні пальця і втулки. Особливо це стосується з'єднань ковша, які безпосередньо контактують з ґрунтом. Навіть за наявності мастила, частинки пилу змішуються з ним, утворюючи абразивний шлам. В результаті внутрішня поверхня втулки і сам палець рівномірно “виїдаються”, втрачаючи розмір. Тверді сторонні включення можуть залишати подряпини, вибивати канавки. Дослідження від Eurof відзначає, що пісок значно підвищує швидкість зносу шарнірів через абразивну дію. . Тому забруднення є однією з головних причин передчасного зносу.

в) *Попадання води і корозія*: Волога (дощ, миття техніки, робота у болотистих умовах) може вимивати мастило з шарніра і викликати корозію металу. Іржа на поверхні пальця чи втулки діє як абразив і прискорює спрацювання. До того ж, корозія створює шорсткість, яка руйнує мастильну плівку – виникає прямий контакт і адгезійний знос. Вода також може спричинити гідроекспансію глинистих забруднень, утворюючи щільну масу, що витісняє мастило. Таким чином, вологі умови без належного мастила ведуть до комбінації корозійно-абразивного зносу. Примітка: виробники мастил наголошують на використанні водостійких густих змазок, щоб запобігти вимиванню іржі та зберегти мастило у вузлі.

г) *Високі механічні навантаження і ударні режими*. Пальці працюють при значних контактних тисках. Наприклад, при копанні зубами ковша виникають великі зусилля, які через важільну систему концентруються на певних шарнірах. Перевантаження або різкі удари (удар ковшем об камінь, використання гідромолота) можуть перевищувати несучу здатність мастильного шару – відбувається пряме металеве контактування на мить. Такі циклічні перенавантаження викликають поверхневу втому матеріалу: на поверхнях пальця та втулки можуть зароджуватись дрібні тріщини, вибоїни (pitting). Дослідження показують, що процес зносу супроводжується місцевим підвищенням температури та проявами втомного і абразивного зношування на поверхнях тертя. З часом втомні тріщини призводять до викришування твердого шару, що прискорює спрацювання.

д) *Неправильне встановлення або деформація компонентів*. Якщо палець або втулка встановлені з перекосом, або посадочні отвори під втулку розбиті (овальні), навантаження розподіляються

нерівномірно. Це призводить до концентрованого зносу в одній зоні. Наприклад, при зносі втулки вона може почати провертатись у гнізді, розбиваючи отвір і викликаючи овальність. В такому разі новий палець не допоможе – спочатку треба відновити геометрію гнізда. Деформація стріли чи рукояті (від сильних ударів або аварій) також може спричинити незбіг осей шарнірів і, як наслідок, підвищений знос через перекис.

е) *Зношування мастильних матеріалів.* Навіть при регулярному мащенні, якщо використовується невідповідне мастило (наприклад, універсальне, що не витримує тисків) або якщо воно давно не оновлювалось, його властивості погіршуються. Мастило може забруднитись пилом, втратити консистенцію від перегріву. Як наслідок, захист від зносу слабшає. Сучасні екскаватори потребують високоякісних шприцевих мастил із протизносними присадками (MoS₂, PTFE тощо), стійких до води. Використання дешевих або невідповідних мастил призводить до швидшого спрацювання вузла, що потім проявляється як “люфт” і потреба заміни деталей.

Основні причини зносу – це поєднання трибологічних факторів (тертя при недостатньому змащенні), абразивно-корозійного впливу довкілля та надмірних механічних навантажень. Практичні спостереження підтверджують: бракує мастила + є бруд/пил – шарнір зношується надзвичайно швидко. Навпаки, ретельне змащування і захист від бруду здатні багаторазово продовжити ресурс пальців. У наступних розділах розглянемо, які саме вузли зношуються найчастіше та як умови роботи впливають на цей процес.

Не всі шарнірні осі екскаватора зношуються рівномірно – деякі вузли відчують набагато сильніші навантаження та абразивний вплив, тому їхній ресурс менший. Згідно з аналізом кінематики екскаватора і даними досліджень, найуразливішими до спрацювання є шарніри робочого органу на кінці стріли:

1) *Ковшові пальці та втулки.* З'єднання ковша з рукояттю (днищем) і ковша з тягами (так званий “Н-лінк” або коромисло) зношуються найшвидше. Ці вузли (позиції 8, 9, 10 на рис. 1) безпосередньо передають зусилля копання і постійно контактують із ґрунтом. При кожному заглибленні ковша саме ці шарніри отримують пікові навантаження та абразивний вплив піску/глини. Тому у практиці саме пальці ковша змінюють найчастіше. Наприклад, досвідчені механіки зазначають, що пальці ковша при належному догляді можуть служити 8000+ мотогодин, але в умовах недостатнього мащення спрацьовуються набагато раніше. Якщо з'явився помітний люфт ковша чи гучний стукіт – зазвичай винні саме зношені ковшові пальці і втулки [3].

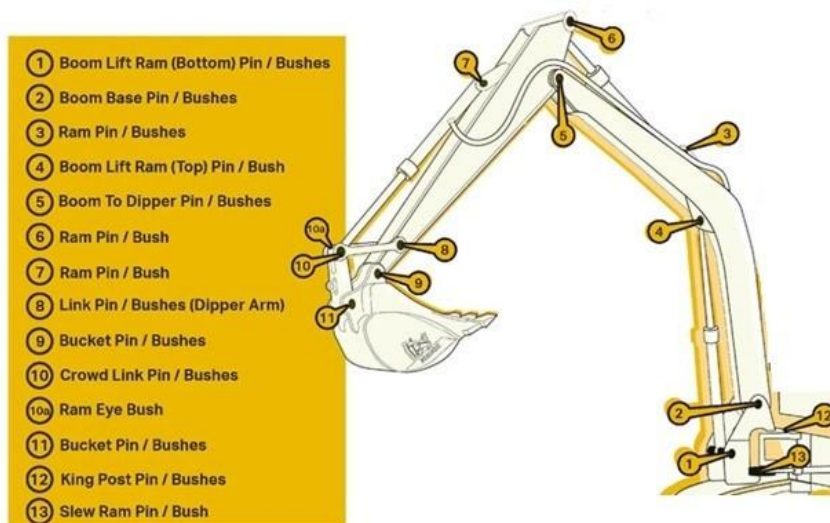


Рис. 1. Типові точки розташування пальців і втулок екскаватора.

2) *Шарнір рукоять-коромисло (ланка ковша).* Тяга ковша (Н-подібне коромисло) з'єднується з рукояттю через відповідний палець. Цей шарнір також входить до групи ковшового з'єднання і відчуває великі змінні навантаження при копанні та струшуванні ґрунту. У дослідженні зносостійкості вказано, що вузол з'єднання коромисла (важеля ковша) з рукояттю є одним з трьох найбільш схильних до інтенсивного спрацювання [3]. Фактично, це ланка, яка передає зусилля від гідроциліндра ковша на сам ківш – тому на ній сходяться і високе навантаження, і зазвичай менший розмір, ніж у основних осей стріли. В результаті пальці цього вузла часто доводиться наплавляти чи міняти разом із ковшовими.

3) *Шарнір стріла-рукоять (замок стріли).* З'єднання “стріла-рукоять” (діпроарм, позиція 5 на рис. 1) також піддається значним навантаженням, хоча і менш забруднене ґрунтом. Цей палець стику

стріли з рукояттю витримує навантаження від ваги всього ковша з ґрунтом і сил гідроциліндра рукояті. Він, як правило, більшого діаметра і краще захищений, але все ж входить до числа вузлів, де часто виявляється знос. Китайські дослідники відзначають проблему поломки або зносу саме пальця, що з'єднує велику і малу стрілу (стрілу з рукояттю), і рекомендують низку заходів для підвищення його довговічності [3]. Таким чином, шарнір “стріла-рукоять” – критичний з точки зору надійності, і його знос потрібно відстежувати.

4) *Кореневий шарнір стріли (основа стріли)*. Палець кріплення основи стріли до платформи (позиція 2 на рис. 1) зазнає великих статичних навантажень – на нього припадає вага всього робочого обладнання і передаються зусилля від стріли. Дослідження вказують, що шарнір основи стріли також є одним із трьох найбільш навантажених і схильних до пошкоджень місць [3]. Він менш динамічно працює (кут повороту менший), проте сила, що діє на нього, дуже велика. Зазвичай цей вузол має здвоєні втулки і потужне змащення, тому зношування там повільніше, ніж у ковшових пальцях. Але якщо стріла довго працювала без заміни втулок, ремонт цього гнізда дуже складний (потрібна розточка великого посадочного місця). Отже, хоч цей шарнір і служить довше, його вихід з ладу найкритичніший.

5) *Шарніри гідроциліндрів*. Пальці, якими кріпляться гідроциліндри (на стрілі, рукояті, ковші – позиції 1, 3, 4, 6, 7), працюють в умовах менших кутів повороту і зазвичай добре захищені пильовиками. Вони також менш схильні до абразиву (знаходяться вище від землі). Тому їх знос найчастіше менш інтенсивний. Однак на них впливають ударні навантаження при роботі гідроциліндрів (особливо циліндр ковша – позиція 7, та циліндр рукояті – позиція 3). З часом може з'явитися люфт у їх вушках. Як правило, ці пальці мають значний ресурс і змінюються рідше, ніж ковшові.

6) *Поворотний пристрій («царський палець платформи»)*. Хоча питання стосується робочого обладнання, варто згадати, що в екскаваторі є ще пальці ходової та поворотної платформи (наприклад, пальці кріплення башти до рами у колісних екскаваторах, пальці у поворотній осі). Вони проектуються з дуже великим запасом і зазвичай мають довгий ресурс. Пальці гусеничного ланцюга мають ущільнення і мастило, витримуючи тисячі годин. Тому їх знос менш актуальний у контексті 10-річного інтервалу для робочого обладнання. Основна увага – саме на шарнірах стріли, рукояті та ковша.

Характер зносу в уразливих вузлах: Зазвичай знос пальця проявляється у вигляді утворення еліпса (овальності) замість круглої форми. Причому часто знос односторонній – з того боку, куди спрямоване основне зусилля. Наприклад, палець ковша часто сточується з боку, що прилягає до напрямку копання. Практичний випадок: після заміни пальця та встановлення нових “пружинних” втулок (розрізних) один зварник зазначив, що за короткий час палець стерся на 5 мм вглиб саме зі сторони ковша, тоді як протилежна сторона майже не постраждала. Це сталося через неправильний матеріал пальця та відсутність змазки, але ілюструє типову ситуацію: палець зношується не по всій окружності, а переважно в напрямку навантаження. Таке одностороннє спрацювання призводить до появи “люфту” (зазору) і ударів при зміні напрямку руху. Втулки при цьому можуть зношуватися менше чи рівномірніше (бо охоплюють палець навколо), але теж стають овальними всередині.

Отже, найбільше піддаються зносу пальці ковша та прилеглих ланок, а також ключові шарніри стріли. Їх треба оглядати найчастіше і вчасно міняти або ремонтувати. Менш навантажені шарніри (циліндрові) мають довший «інтервал життя», але теж не вічні. Розуміння, які деталі “слабкі місця”, дозволяє планувати обслуговування до виникнення серйозних проблем.

Зношування пальців і втулок неминуче, але існують ефективні методи ремонту, що дозволяють відновити роботу вузлів без заміни всієї стріли чи ковша. Основні підходи до ремонту:

Заміна пальців і втулок на нові. Це найпростіший і поширений спосіб відновити шарнір. Виробники постачають змінні пальці та втулки як запасні частини. Якщо знос ще не зайшов надто далеко (немає пошкодження самого “вушка” стріли або рукояті), достатньо вибити старий палець, випресувати втулки і встановити нові. Нові деталі повертають заводський зазор і щільність посадки. Важливо вибирати пальці належної якості – наприклад, оригінальні або якісні аналогові, виготовлені з загартованої сталі. Дешеві м'які пальці швидко зношуються і можуть лише погіршити ситуацію. Заміна – гарний варіант при невеликому люфті та відсутності деформацій. Більшість планових ТО передбачає саме заміну найбільш зношених пальців (особливо ковшових) раз на декілька тисяч мотогодин, щоб не доводити до дорогого ремонту.

Використання ремонтних (ремонтних розмірів) деталей. Якщо втулка “розбила” гніздо або палець сильно зносився, іноді застосовують пальці збільшеного діаметра і втулки з ремонтним внутрішнім діаметром. Це дозволяє компенсувати помірну овальність отворів без зварювання.

Наприклад, якщо стандарт був 50 мм, можуть встановити палець Ø51 мм з відповідними втулками. Шайби і прокладки: ще один простий метод – встановити регулювальні шайби (shim) при боковому зносі. Спеціальні регулювальні шайби для пальців дозволяють прибрати осьовий люфт і хитання ковша, що зменшує “ударний” знос вузла. Втім, ці рішення скоріше тимчасові та не усувають знос поверхонь, але допомагають уникнути швидкого прогресування (затягують з’єднання, усуваючи бієння).

Наплавлення та мехобробка (відновлення геометрії зварюванням). Коли палець або отвір під втулку зношені за межі допусків, широко застосовується технологія зварювального відновлення. Відновлення пальця наплавленням: зношену поверхню пальця можна наростити зносостійким металом (наприклад, твердим наплавочним дротом з високим вмістом Mn, Cr) і потім проточити до номінального діаметра. Практика показує, що якісно відновлений таким методом палець може служити до 5 разів довше за оригінал (за рахунок твердості наплавленого шару). Зазвичай після наплавлення пальці шліфуються і при можливості піддаються термообробці (наприклад, індукційно гартуються, якщо наплавлений матеріал дозволяє). Відновлення отворів: якщо зношене саме гніздо втулки в стрілі/рукояті, роблять зварювання отвору по периметру (наварювання матеріалу) і подальшу розточку до номінального діаметра. Цей процес виконують спеціальними портативними розточними станками прямо на техніці. Фірми, що займаються ремонтом, зазначають: ремонт екскаватора часто включає *наплавку і розточку отворів* на місці, з наступним встановленням нових втулок. Це дозволяє відновити посадку навіть сильно “розбитого” шарніра. Розточку ведуть дуже точно, щоб досягти співвісності отворів у парі вушок.

Прецизійна розточка та гільзування. Альтернативою зварюванню може бути розточення отвору під ремонтну гільзу (втулку-вкладиш). Якщо, наприклад, стріла дуже товстостінна і знос незначний, можна просто розточити отвір до круглої форми більшого діаметра і вставити туди нестандартну втулку збільшеного зовнішнього діаметра. Проте частіше вигідніше наплавити і повернути штатний розмір – щоб використовувати стандартні запчастини надалі. В керівництвах зазначається, що єдиний правильний спосіб відремонтувати важіль із овальним отвором – наплавити його і заново розточити до потрібного розміру. Гільзування застосовують хіба що коли неможливе зварювання (наприклад, матеріал або конструкція не дозволяють).

Ремонт розрізними втулками (спліт-втулки). Існують ремонтні втулки пружинного типу – розрізні сталеві кільця, які вставляються в зношене гніздо і розпираються, беручи на себе знос. Їх використав у згаданому випадку механік, що ремонтував люфт ковша: встановив пружинні втулки без змащування. На жаль, без змазки вони не врятували палець. Проте у правильному застосуванні такі втулки можуть тимчасово відновити роботу шарніра без зварки. Зазвичай їх виконують із загартованої сталі, тому вони зносостійкі. Але потрібно забезпечити їх змащення (або самозмащувальний матеріал). Це швидкий ремонт, придатний для відновлення старої техніки “до продажу” або як проміжний захід.

Використання ремкомплектів з ущільненнями. Щоб уповільнити подальший знос після ремонту, встановлюють герметизуючі кільця (ущільнення) по краях втулок. Деякі сучасні комплекти пальців/втулок комплектуються сальниками, як у гусеничних ланцюгах, для утримання мастила і захисту від пилу. Якщо після відновлення отвір дозволяє, монтують гумові або поліуретанові ковпачки на торці пальця, які закривають щілини від бруду. Це продовжує життя відремонтованому вузлу.

Відпал та повторна термообробка пальців. Цікавий метод використовується в країнах, де практикують відновлення бувших у вжитку пальців: спочатку зношений і деформований палець відпускають (відпалюють) для пом’якшення, потім механічно обробляють (вирівнюють, проточують), і знову проводять термічне зміцнення. Дослідження в Гані показало, що місцеві майстерні анелюють бувші у вжитку пальці для спрощення механічної обробки, але це знижує їхню міцність, і повторне використання таких пальців без належного гартування призводить до передчасного виходу з ладу. Рішення – правильно підібраний режим загартування і відпуску перед повторним введенням в експлуатацію. Тобто, якщо є можливість, відновлений палець треба загартувати (наприклад, індукційно) до необхідної твердості, щоб він служив не гірше нового [4].

Комплексний ремонт спеціалізованими бригадами. На великих підприємствах або у дилерських центрах проводять капітальний ремонт екскаваторів, що включає повну заміну всіх пальців і втулок, розточку і наплавлення всіх критичних отворів. Це дорогий, але найрадикальніший спосіб повернути машині ресурс “як новій”.

Гроста заміна пальців і втулок порівняно недорога (ціну має сам палець/втулка, робота мінімальна). Натомість зварювально-розточні роботи дорожчі і потребують кваліфікації. Тому оптимально планувати заміну недорогих втулок і пальців заздалегідь, ніж доводити до необхідності

наплавляти раму. Як кажуть у галузі, “ремонт втулкового гнізда може коштувати десятки тисячі гривень, тоді як вчасна заміна втулок – сотні гривень”. Отже, існує широкий спектр методів відновлення: від елементарної заміни до складного зварювального відновлення. На практиці найчастіше комбінують підхід: розточка + нові втулки + нові пальці. Це повертає техніку до проектних характеристик. Якщо ж знос незначний – обходяться лише заміною пальця чи встановленням шайб. Грамотний ремонт продовжує життя дорогим компонентам (стрілі, рукояті), уникаючи їх заміни.

Умови, в яких експлуатується екскаватор, суттєво впливають на швидкість зношування шарнірів. Режими роботи та довкілля можуть як продовжити, так і скоротити ресурс пальців у рази. Розглянемо основні фактори умов експлуатації:

Тип ґрунту і абразивність середовища. Робота в піщаних або щебенистих ґрунтах прискорює знос через абразив. Дрібний кварцовий пісок надзвичайно абразивний – він потрапляє на пальці ковша та рукояті і діє як наждачний папір. Навпаки, вологий глинистий ґрунт може краще утримуватися в мастилі і трохи зменшувати тертя (але натомість викликає корозію). Кар’єрні роботи на породі (камінні, рудні) створюють багато пилу з твердих частинок, що також пришвидшує зношування. Якщо ж екскаватор працює в більш чистих умовах (наприклад, на сипучих добривах, вугіллі, тощо), характер абразиву інший – вугілля м’якіше за кварц, а отже й знос буде дещо меншим. Важливо: наявність хороших ущільнень і регулярне прокачування мастила допомагає виштовхувати абразив з шарніру, але повністю уникнути його дії в тяжких умовах неможливо.

Вологість, вода, бруд. Як згадано, вода вимиває мастило і викликає іржу. Тому екскаватор, що часто працює під дощем, у болоті, при чищенні русел річок чи каналів, відчуває подвійну проблему – бруд + вода. За таких умов необхідно частіше змащувати вузли водовідштовхуючим мастилом. Якщо цього не робити – корозійний знос сильно скоротить ресурс. Низькі температури теж впливають: при морозі мастило густішає і може взагалі не потрапляти в зазор, плюс метал стискається – перші рухи “на суху” здатні зняти загартований шар. Тому в холодному кліматі ранок без прогріву і шприцювання – ризик “задира” на пальці. Навпаки, в дуже спекотних умовах мастило розріджується і швидше витікає, також погіршуючи захист. Такі кліматичні фактори треба враховувати, підбираючи масло відповідного класу.

Режим навантаження і вид роботи. Екскаватор може виконувати різні завдання – копання траншей, навантаження сипучих матеріалів, демонтаж (з гідромолотом), планування і т.д. Максимальний знос зазвичай при важкому копанні та довбанні: коли оператор використовує ковш як лом для скель, б’є ним, вириває каміння. При цьому виникають ударні навантаження і постійні мікроудари в шарнірах, які руйнують масляну плівку. Вібрація від гідромолота: якщо на рукояті встановлено гідромолот, вібрації передаються на всі пальці стріли і ковша. Такі високочастотні коливання можуть викликати *фреттинг-знос* – поступове стирання навіть без видимого обертання, а також розхитування пальців у посадках. Тому при роботі з гідромолотом технічні керівництва рекомендують частіше обслуговувати пальці. Спокійніші режими – планування ґрунту, робота з легкими матеріалами – менше зношують техніку. Показовий факт: ресурс сильно залежить від оператора. Оператор, що плавно працює, не б’є ковшем об землю і тримає вузли змащеними, може продовжити життя пальців удвічі проти агресивного стилю роботи.

Навантаження на межі можливостей. Екскаватор, що постійно працює на повну вантажопідйомність або максимальне зусилля, швидше зношує шарніри. Наприклад, спроби підняти надто важкий вантаж на повному вильоті призводять до величезних напружень у кореновому пальці стріли і пальцях циліндрів – це може навіть деформувати їх. Якщо така робота систематична, з’являються пластичні деформації: пальці можуть злегка гнутися або втулки – роздавлюватися. Після цього нормальна геометрія порушена і знос прискорюється лавиноподібно. У гіршому випадку можливий злам пальця (хоча це рідко, зазвичай пальці ламаються при браку матеріалу або при значних ударах). Тому перевантаження – ворог довговічності, хоча виробники і закладають коефіцієнт запасу.

Тривалість змін і технічне обслуговування. Якщо екскаватор працює у дві-три зміни без вихідних (наприклад, на виробництві), інтервали між мащенням в годинах стають коротшими (адже за день наробіток йде 16–24 години). Потрібно частіше змащувати, але іноді персонал не встигає або економить час – і мастило може закінчитися ще до наступної регламентної точки. До того ж, без перерв деталі майже не охолоджуються, мастило не загусає – воно може повністю витікати. Безперервна експлуатація без належного ТО може прискорити знос. З іншого боку, якщо техніка простоює тривалий час на відкритому повітрі, може піти іржа по незначно зношених пальцях – і при пуску після простою цей ржавий наліт швидко сточується, забираючи метал.

Специфічні фактори. У деяких випадках на знос може впливати хімічне середовище. Наприклад, екскаватор на металургійному шлаку чи сміттєзвалищі контактує з агресивними речовинами, що можуть потрапляти в шарніри (кислоти, луги) – це спричиняє хімічну корозію. Такі ситуації рідкісні, але мають місце. Інший фактор – пил від цементу або дрібні частинки, які проникають всюди (в тому числі і в мастило) та прискорюють знос навіть дрібних шарнірів контролерів, не лише основних.

На основі наведеного можна зробити висновок: ідеальні умови для довговічності – це помірне навантаження, чистий ґрунт (або відсутність абразиву), сухий клімат без надлишку води, температура +10...+30 °С, і регулярне змазування. Найгірші умови – важкий кам'янистий ґрунт, пил або пісок, вода/бруд, різкі перепади температур, перевантаження обладнання. В реальності екскаватори часто працюють в далеких від ідеалу обставинах, тому ресурс пальців сильно варіює. Оператору і механіку важливо коригувати обслуговування під умови: скажімо, при роботі в піску мастило з MoS₂ (молібденом) краще витісняє пісок; у воді – мастило з підвищеною липкістю; в мороз – більш м'яке мастило або підігрів перед роботою. Такі заходи відносяться вже до експлуатаційних прийомів підвищення зносостійкості, що теж є частиною теми.

Розташування шарнірної осі в кінематичній схемі екскаватора визначає характер її роботи – амплітуду повороту, тип навантажень, можливість мащення, вплив довкілля тощо. Тому кожен шарнір “зношується по-своєму”. Розглянемо особливості зношування для основних позицій (номер позиції згідно з рис. 1):

1 і 4 (пальці кріплення гідроциліндра підйому стріли): Нижній (1) та верхній (4) пальці гідроциліндра стріли зазвичай мають малу амплітуду кочення (циліндр трохи качається вуском під час підйому/опускання). Вони добре захищені пильниками, і бруд до них майже не доходить. Їх знос здебільшого втомно-тертевий: від повторних циклів навантаження можуть утворюватися дрібні гофри на поверхні. Але як правило, ці пальці служать дуже довго. Якщо й зношуються – то рівномірно по колу, бо кочення відбувається на невеликому куті і мастило там довго зберігається. Особливість – зміщення навантаження при різних висотах стріли: у крайніх положеннях стріли навантаження на пальці міняється, через що знос може концентруватися в певних секторах (але не настільки явно, як у ковшових).

2 (кореневий палець стріли): Цей шарнір здійснює кут повороту стріли від горизонту до низу (~70–90°). Він великий за діаметром і має дві втулки по краях. Знос тут переважно поступовий, рівномірний, якщо регулярно змащувати – мастило розподіляється по великій площі. Однобічний знос може проявлятися, якщо екскаватор часто працює в одній переважній позі (наприклад, тільки копання на максимальному вильоті) – тоді та сторона пальця, що постійно навантажена, трохи більше спрацюється. Але конструктивно кореневий палець роблять з дуже товстим загартованим шаром і максимально захищеним (іноді з кришками). Тому особливість – повільний абразивно-втомний знос. Після великого напрацювання можна помітити “виходжену” матову смугу в зоні найбільшого тертя. Якщо шарнір не змащувати, знос піде швидше і проявиться як помітний люфт стріли (що вже небезпечно). Тож ключова відмінність – цей шарнір прощає деяку недбалість довше, ніж інші, але коли вже зноситься, ремонт дуже трудомісткий.

3 і 6 (пальці кріплення гідроциліндра рукояті): Палець кріплення циліндра рукояті до стріли (3) та до рукояті (6) працюють в умовах значних сил від копання. Вони зазнають багато циклів руху кожного разу, коли рукоять притягується чи виштовхується. Знос цих пальців частіше проявляється у вигляді усадки втулок: втулки можуть трошки провертатись (особливо верхня, №6), якщо послабло пресове сидіння, і так розтирати отвір. Але якщо все затягнуто, то знос іде на внутрішній поверхні втулки та на пальці. Тут також спостерігається однобічний характер: при копанні циліндр рукояті виштовхує рукоять – навантажена верхня сторона пальця №6 і задня сторона пальця №3. При підйманні – навпаки інші сторони. В сумі може виходити відносно рівномірно. Проте, нижній палець (3) ближче до ґрунту, тож за відсутності пильовиків може трохи отримувати бруду. Знос гідроциліндрових пальців помітний по появі “скрипу” або зміщення циліндра в посадці. Втім, за даними експлуатації, ці вузли часто переживають навіть кілька замінь ковшових пальців. Особливістю можна вважати поступове розбивання отворів у вушках циліндра, якщо палець не щільно посаджений – тоді ремкомплект включає розточку отвору циліндра і встановлення вкладиша.

5 (шарнір стріла-рукоять): Як вже згадувалось, цей вузол дуже навантажений. Знос тут зазвичай комбінований – абразивно-втомний. Абразив може потрапляти при копанні (пил осідає на змащених частинах, бо вузол відкритий), а навантаження від кожного руху рукояті створює мікрослизьке тертя. Поверхня пальця може отримати мікропітинг (точкові вибоїни). Характерна особливість – розширення

отворів у рукояті при сильному зносі: спочатку зношується втулка, потім починає тертися сам отвір в рукояті. Це проявляється як овальність отвору. Якщо довести до цього – потрібна розточка і наплавлення (дорогий ремонт). Тому такий вузол зазвичай профілактично перебирають: міняють втулки і пальці до того, як знос піде в тіло рукояті. Однобічний знос пальця теж буває (рукоять часто працює під певним фіксованим кутом при завантаженні самоскида, наприклад – частина пальця постійно навантажена). В цілому, шарнір №5 – індикатор умов експлуатації: якщо він сильно люфтить при невеликому напруженні, значить, екскаватор працював у важких умовах або без належного догляду.

7, 8, 9, 10 (ковшовий механізм): Це група найбільш швидкозношуваних шарнірів. Палець ковша (9) – має найбільший кут повороту (ковш при кожному циклі повертається від повністю відкритого до закритого $\sim 120^\circ$) і найбільше забруднюється. Він отримує і абразив, і воду, і удари. Тому знос ковшового пальця носить інтенсивний абразивно-корозійний характер. При відсутності мастила він може буквально за кілька днів роботи стати овальним. Його втулки теж зношуються швидко – стають тоншими, можуть тріснути. Особливість ковшового пальця – дуже сильний однобічний знос: сторона, яка тягне ковш при копанні, стає плескатою. Як писав один оператор, “палець стерся з боку ковша на 3/16 дюйма” (≈ 5 мм) всього за 150 ярдів копання, тоді як протилежна сторона майже ціла. Це через те, що ковш завжди тягне в одному напрямку відносно рукояті. Тому при огляді часто бачимо еліпс на пальці. – Палець коромисла (crowd link) до ковша (10): з ним схожа історія, він паралельний пальцю ковша і теж сильно зношується. Буває, що ковш зняли, а цей палець забули – потім він “стукає” в коромислі. Знос тут також швидкий, особливо якщо ковш трохи розхитався і б’є по цьому пальцю. – Палець коромисла-рукоять (8): працює в парі з ковшовим, одержує майже ті ж навантаження, але дещо менше бруду (вище від землі). Все одно, він у трійці найшвидше зношуваних. – Палець штока циліндра ковша (7): трохи осторонь, але теж входить в ковшовий механізм. Він краще захищений (часто має манжети) – тому його знос значно повільніший, ніж у 9 чи 10. Його особливість – ударне навантаження від гідроциліндра: коли ковш різко закривають або відкривають, інерція створює ривки, що б’ють цей палець в вушках штока. Тому на ньому можуть з’являтися сліди вдавлень від контакту (якщо слабко змащено). Але загалом цей палець живе довше і часто при ремонті ковшового механізму його не чіпають.

10a, 11 (Ram eye bush, “king post” у деяких машинах): На діаграмі Rhinox №10a – втулка штока циліндра ковша (частина 7), а 11 – Bucket pin/bush схоже дублює 9. 12 – King Post pin – це центральний палець кріплення стріли до поворотної платформи (у деяких екскаваторах, переважно екскаватор-навантажувачів чи малих). 13 – Slew ram pin – пальці циліндрів повороту (у колісних екскаваторах чи навантажувачах). Їхні особливості: “King post” (центральний шарнір стріли) схожий на кореневий палець (2), але може мати ще бічні навантаження при поворотах стріли убік, знос у нього помірний при нормальному змащуванні. Пальці поворотних циліндрів (13) – доволі малі, але мають постійне маятникове навантаження, іноді страждають від ударів при різкому повороті башти. Проте у гусеничних екскаваторах цих вузлів немає, тому зупинятися не будемо.

Підсумок по розташуванню: ковшові шарніри – швидкий абразивний знос, стрілові – повільніший втомний знос, циліндрові – повільний рівномірний (при догляді). Пріоритет змащення – ковш, коромисло, рукоять-стріла; пріоритет контролю люфтів – ті самі. Правильний ремонт та профілактика враховують цю різницю: часто перевертання або перестановка пальця (повернути менш зношеною стороною в напрямок навантаження) практикується як тимчасовий захід на ковші. А на стрілі так робити рідко потрібно через рівномірність зносу. Ці нюанси добре відомі досвідченим механікам.

За останнє десятиліття інженери і дослідники приділили значну увагу проблемі зносу шарнірів в будівельних машинах. Мета – знайти нові способи продовжити ресурс, знизити затрати на обслуговування, підвищити надійність. Розглянемо основні напрями досліджень і перспективні технології, відображені в наукових публікаціях останніх 10 років.

Поліпшені методи термічної обробки і зміцнення поверхні. Кілька досліджень зосередились на тому, як оптимізувати твердість і структуру сталі пальців для максимального опору зносу/

Індукційне гартування та комбіновані методи зміцнення. Робота Kakade & Narwade (2016) показала, що комбіноване поверхневе зміцнення (індукційне загартування, цементация, легування поверхні) дозволяє підвищити твердість робочого шару пальця з $\sim 50\text{--}52$ HRC до $\sim 60\text{--}62$ HRC [5]. Це дало суттєвий приріст зносостійкості і продовження життя пальців. Автори аналізували пальці екскаватора і запропонували оптимальний режим індукційного гартування, який усуває проблеми низького виходу, повзучості і втоми, що призводять до поломок [5]. Висновок: застосування індукційної обробки з правильними параметрами – відносно недорога технологія, яка на практиці

збільшила ресурс пальців. Цей висновок впроваджений – більшість OEM-пальців тепер індукційно гартуються на заводі, і дослідження лише підтверджують ефективність.

Повторна термообробка відновлених пальців. Дослідження Appiah et al. (2018) у Гані проаналізувало властивості відновленого пальця ковша після різних режимів гартування [4]. Вони показали, що місцево відновлені пальці, відпущені для обробки, мають низьку міцність, і запропонували оптимізоване загартування (850°C + гартування в соляному розчині + відпуск при 200–500°C). При правильному режимі отримали покращення твердості та міцності близько на 20–25%. Це важливо для практики відновлення: науково обґрунтований режим термообробки здатен дати вживаним пальцям “друге життя” з майже заводськими характеристиками [4].

Кріогенна обробка сталей. Хоч специфічно по пальцях екскаватора прямих публікацій мало, загальні трибологічні дослідження зазначають, що глибока кріообробка (охолодження до -185°C) покращує зносостійкість сталей за рахунок перетворення залишкового аустеніту в мартенсит і утворення дрібних карбідів [6, 7]. Наприклад, відомо, що для сталей типу D2 кріообробка збільшує зносостійкість на сотні відсотків. Для 4140 ефект не такий драматичний, але є. Отже, є перспектива: виробники можуть впровадити кріообробку пальців після гартування для максимальної зносостійкості. Зараз це роблять рідко через додаткові витрати, але науково ефект підтверджено – “молотильні” частини живуть довше після кріообробки. Можливо, у майбутньому, коли вартість технології знизиться, це застосують і для пальців.

Наноструктурування поверхні. Сучасні матеріалознавчі роботи досліджують методи як ультразвукова ударна обробка (UIP) чи лазерна поверхнева обробка, які створюють градієнтну наноструктуровану поверхню з високою твердістю. Такі методи можуть підвищити опір втомі і зносу без крихкості. Наприклад, UIP застосовується для ресор і валів, підвищуючи їхню контактну витривалість. Для пальців екскаватора це теоретично може дати більш зносостійку поверхню без традиційного гартування. Поки що це на рівні досліджень лабораторних деталей, економічно не впроваджено, але перспектива є.

Нові матеріали втулок – самозмащувальні та композитні. Значний прогрес відбувся у створенні самозмащувальних підшипникових матеріалів:

Маслонаповнені бронзові та залізні пористі матеріали. Інженери Komatsu ще раніше (до 2010) розробили спеціальні матеріали втулок, які дозволяють збільшити інтервали мащення до 500 мотогодин. звіт 2003 р. (Tanaka et al.) згадано розробку двох матеріалів: міднобазовий матеріал BMRC для повільно рухомих шарнірів (висока стійкість до задирів) і залізобазовий OMRF для високої зносостійкості [8]. Ці втулки застосували на екскаваторах Komatsu PC400-7 і досягли продовження інтервалів змазки вдвічі (з 250 до 500 год). Тобто, науковий підхід до матеріалу втулки дав практичний результат – менше ТО, менше знос. У 2010-х це продовжилось: в літературі з’являються згадки про полімер-метал композити. Пористі металеві втулки, просочені маслом, або вставки з твердих змащувачих речовин (графітові або дисульфід молібдену “таблетки” в пресованій бронзі). Патенти описують втулки з вставками твердого мастила для екскаваторів, що дають кращу самозмащувальність і зносостійкість, ніж просто порошкова бронза [9]. За твердженням патенту, такі втулки мають значно більшу зносостійкість і саммащення у порівнянні зі звичайними сталевими чи навіть просоченими втулками [9].

Полімерні підшипники та композити: У малих екскаваторах і особливо в навантажувачах почали з’являтися інженерні пластикові втулки (напр. нейлонові, поліацеталеві з твердими мастильними включеннями). Виробники підшипників (GGB та ін.) пропонують високоміцні пластикові втулки EP® з вбудованим твердим мастилом, які не потребують зовнішнього змазування [10]. Їх плюс – вони не ржавіють, добре працюють у бруді (частинки вминаються в пластик), легкі в заміні. Мінус – несуть менше навантаження, швидше старіють під ударом. Науково досліджують посилені скловолокном або вуглеволокном полімери для таких втулок. За останні роки якість композитів зросла, і деякі компактні екскаватори вже використовують композитні втулки на невідповідальних з’єднаннях. Перспектива: якщо вдасться створити полімер, що витримує високі навантаження (наприклад, армований термореактивний композит з тефлоновими включеннями), то можна буде мати шарнір взагалі без мащення, з мінімальним зносом. Наразі це більше в теорії, для важких екскаваторів металеві втулки все ще поза конкуренцією.

Покриття втулок: Ще один напрям – нанесення на внутрішню поверхню втулок спеціальних покриттів з низьким тертям. Наприклад, досліджуються комбіновані покриття з твердих мастил (MoS₂) та керамік. Втулка може мати тонкий шар пористого хрому, просоченого твердим мастилом – таке

зустрічається у авіації. Для екскаваторів поки дорого, але наукові праці з трибології металокерамічних пористих покриттів демонструють значне зменшення коефіцієнта тертя і зносу. Можливо, по мірі здешевлення, ця технологія прийде і в будтехніку.

Функціональні покриття пальців та нові сплави. Окрім втулок, вчені експериментують з тим, щоб сам палець зробити практично “вічним”:

Твердосплавні та напилені покриття: Існують зносостійкі покриття (карбіди хрому, вольфраму тощо), які можна наносити методом газотермічного напилення (HVOF) або плазмовим напиленням. Вони дають надзвичайно тверду поверхню (вище 70 HRC) з високою стійкістю до абразиву. Такі покриття широко застосовуються на бурових інструментах, насосних плунжерах. Для пальців екскаватора це потенційно означало б різке подовження життя. Але виникає проблема “міцність vs знос пар”: якщо палець надтвердий, втулка буде зношуватись сильніше (якщо її не змінити на також тверду). В ідеалі – і палець, і втулка мають бути дуже зносостійкі і працювати з мінімальним тертям. Науковці з Materials Science пропонують покриття зі зниженим коефіцієнтом тертя: наприклад, алмазоподібні вуглецеві плівки (DLC). DLC-покриття дає і твердість (\approx HRC 60–70 екв.) і низьке тертя без мастила. Однак на великих площах і при ударних навантаженнях ці плівки можуть сколюватися. Втім, в 2010-х з’явилися покращені варіанти DLC з домішками металів для підвищення адгезії, які витримують удари. Є приклади їх застосування в гідравлічних циліндрах. Можливо, недалеким є час, коли пальці покривуть таким чином. Поки що реальних впроваджень нема, але дослідження тривають (вони більше сфокусовані на автомобільних деталях – шкворнях, пальцях поршнів тощо).

Наноструктуровані та високоміцні сплави: Академічний інтерес представляють нові сплави типу високоентропійних сплавів (HEA) або металокерамік для зносостійких компонентів. HEA – це суміші багатьох елементів, які можуть мати унікальне поєднання твердості та в’язкості. Наприклад, сплави на основі Co-Cr-Fe-Ni-Mn. Якщо такий матеріал навчатись виробляти у вигляді прутків економічно, він потенційно міг би замінити традиційні сталі, надаючи кращий опір зносу. Поки що це лабораторія і невеликі виробниці. Інший напрям – наплавлення шарів з карбидовмісних сплавів на звичайну сталь пальця (щось подібне до твердої наплавки, але за допомогою сучасних технологій наплавлення під флюсом або лазерної наплавки). Одна з російських публікацій, наприклад, розглядала одношарове твердосплавне наплавлення зубів екскаваторних ковшів як спосіб підвищення їх ресурсу. Для пальців теж можна наплавити шар зносостійкого сплаву (типу Fe-Cr-C). Згадувана нами компанія із відновлення пальців шляхом наплавлення стверджувала про п’ятикратне продовження строку служби після нанесення спеціального зносостійкого шару. Науково це підтримується: так, електроди типу UTP 7200 призначені для наплавлення зносостійких шарів на екскаваторні пальці, ковші тощо. Цей електрод дає аустенітну наплавку з високим вмістом Mn, стійку до ударів і стирання. Тобто технологія існує, потрібно її адаптувати у виробництво або ремонті. Багато екскаваторних майстерень вже це роблять при ремонті (наплавляють порошковим дротом твердий метал), але перспективно – можливо, прямо з заводу будуть робити пальці з наплавленим твердим шаром. Якщо це не надто ускладнить виробництво, виграш – величезний ресурс. Можливо, такий підхід впровадять спершу в найкритичніших пальцях (ковшові фронтальні навантажувачі, наприклад).

Моделювання і оптимізація конструкції. Окрім матеріалів, науковці працюють над моделюванням зносу для оптимізації конструкції шарнірів:

Комп’ютерне моделювання динаміки і зносу. У 2024 році Xuehui Chen et al. опублікували роботу, де за допомогою програмного моделювання (ADAMS, FEM) проаналізували динамічні навантаження і процес зношування шарнірів екскаватора [3]. Вони виявили, які з’єднання за яких режимів мають найбільші коливання навантажень, і навіть змодельовали глибину зносу по Арчарду на торцевих поверхнях шарнірів. Було підтверджено, що знос супроводжується підвищенням температури, виникненням втомних тріщин і абразивним стиранням [3]. Такі дослідження дають конструкторам ідеї, як змінити конструкцію: наприклад, додати опорні поверхні, збільшити довжину втулки, щоб зменшити торцевий (по торцях вушок) знос. Chen et al. звернули увагу на знос торців втулок/пальців (ендфейс), про який раніше мало думали – виявилось, що він теж суттєвий і неоднаковий з різних боків [3]. Це може привести до конструктивних заходів: скажімо, ставити тонкі підшипникові шайби на торцях як жертвені елементи.

Оптимізація розмірів і посадок. Деякі наукові роботи аналізували, як зазор та твердість впливають на знос. Наприклад, при більшому початковому зазорі легше пробиватися абразиву, але і мастило краще проходить – є оптимум. Вчені моделюють гідродинамічну змазку у шарнірі, щоб підібрати ідеальний зазор і структуру канавок. Це впроваджується: сучасні втулки мають канавки

певної форми для утримання мастила. Rhinox та інші виробники втулок тестують різні профілі – результати цих емпіричних дослідів зводяться до того ж наукового підходу.

Нові конструкції з'єднань. Концептуально, можуть бути запропоновані альтернативні шарніри – наприклад, шарнір на роликових підшипниках замість ковзної втулки. У деяких механізмах (напр. шарнір ковша навантажувача) інколи ставлять роликові підшипники, які мають менший момент тертя і менше зношуються за умови герметичності. Однак для екскаватора поки що стандарт – ковзні підшипники через ударний характер навантажень. Можливо, з'являться магнітореологічні підшипники чи гідростатичні шарніри (де тиск мастила підтримує зазор) – це поки футуристично, але така ідея існує для важких поворотних вузлів.

Прогрес у мастилах та антифрикційних добавках. Хоча мастила – це витратний матеріал, але вони теж продукт науки. В останні роки з'явилися “розумні” мастила з нанодобавками (нанографіт, WS₂ наночастки), які здатні формувати на поверхнях захисні плівки. Наприклад, згадується, що сучасні присадки можуть створювати захисні шари, які заповнюють нерівності і запобігають зносу та корозії. Такі мастила (як от згадане EuroL CS-2/502-S) хоч і дорожчі, але продовжують життя вузлів і зменшують простой. Науково підтверджено: додавання дисульфиду вольфраму в мастило зменшує знос при boundary lubrication режими. В перспективі – мастила з графеном, які ще ефективніші. Це значить, що майбутні регламенти ТО можуть перейти на нові мастила, і шарніри будуть краще захищені навіть без конструктивних змін.

“Maintenance-free” концепція. Загальна тенденція у науковців і виробників – зробити вузли максимально обслуговування-незалежними. Як зазначено в звіті Komatsu, це відповідає “течії часу, що вимагає звільнити людей від клопоту обслуговування” [8]. Тобто мета – екскаватор, котрий не треба щодня шприцювати, а шарніри все одно не зношуються швидко. До цього ведуть усі технології: самозмащувальні втулки, ущільнення, нові покриття. У останні 10 років науковий прогрес суттєвий у матеріалах, і деякі екскаватори вже рекламуються як такі, що потребують мінімального змащення (деякі міні-екскаватори мають втулки з графітовими вставками, що дозволяє змащувати раз на 250 годин, тоді як раніше треба було щотижня). 7. Контроль зносу та інтелектуальні системи. Хоч не зовсім “технологія підвищення зносостійкості”, але смежний прогрес – це моніторинг стану шарнірів. Окремі наукові роботи пропонують вбудовувати датчики зносу або використовувати вібраційну діагностику для визначення люфтів. Наприклад, модель зносу гідроциліндра (Sage Journals, 2015) могла оцінювати деградацію продуктивності через знос шарніра [11]. В майбутньому екскаватор може сам сигналізувати, що “пальці ковша потребують заміни”, розраховуючи це за датчиками тиску і позицій (вже зараз деякі екскаватори мають датчики положення ковша, які можуть за непрямыми ознаками визначити люфт). Це дозволить вчасно втручатися і запобігати катастрофічному зносу. Отже, аналіз сучасних наукових праць показує комплексний підхід до проблеми зносу: від металургії до моделювання.

Контроль зносу та інтелектуальні системи. Хоч не зовсім “технологія підвищення зносостійкості”, але смежний прогрес – це моніторинг стану шарнірів. Окремі наукові роботи пропонують вбудовувати датчики зносу або використовувати вібраційну діагностику для визначення люфтів. Наприклад, модель зносу гідроциліндра (Sage Journals, 2015) могла оцінювати деградацію продуктивності через знос шарніра [11]. В майбутньому екскаватор може сам сигналізувати, що “пальці ковша потребують заміни”, розраховуючи це за датчиками тиску і позицій (вже зараз деякі екскаватори мають датчики положення ковша, які можуть за непрямыми ознаками визначити люфт). Це дозволить вчасно втручатися і запобігати катастрофічному зносу. Отже, аналіз сучасних наукових праць показує комплексний підхід до проблеми зносу: від металургії до моделювання. Перспективні технології включають:

- вдосконалені методи зміцнення (індукційне гартування, кріообробка, лазерне зміцнення) – дають твердішу та витривалішу поверхню пальців;
- нові матеріали втулок (композити, самозмащувальні сплави) – зменшують залежність від зовнішнього змазування і стійкі до задирів;
- проривні покриття (DLC, напилені карбіди) – здатні радикально знизити знос, якщо вирішити питання сумісності пар тертя;
- інтелектуальне змащення (автоматичні системи + передові мастила) – підтримує оптимальні умови в шарнірі, мінімізуючи тертя;
- проєктні оптимізації (форма канавок, додаткові шайби, кращі ущільнення) – невеликі зміни, що спираються на моделювання, але дають непропорційно великий ефект у довговічності.

Всі ці заходи спрямовані до кінцевої мети: збільшити міжремонтний ресурс шарнірів робочого обладнання. За останні 10 років зроблено суттєві кроки: багато екскаваторів тепер мають подовжені інтервали змазки, матеріали покращились (майже всі виробники перейшли на 4140/42CrMo замість дешевших сталей для пальців, оптимізували термообробку). Наукові дослідження слугують базою для наступних інновацій. Наприклад, можливо, у найближчому майбутньому з'являться серійні екскаватори, де всі шарніри мають "life-time" самозмащувальні втулки і не потребують шприцювання – ці технології вже випробовуються.

Список використаних джерел

1. Materials Used in Excavator Buckets. URL: <https://info.texasfinaldrive.com/shop-talk-blog/materials-used-in-excavator-buckets#:~:text=Excavator%20pins%20are%20usually%20made,increases%20strength%20and%20hardenability%2C%20too>
2. Офіційний сайт JCB. URL: <https://www.jcb.com/en-in/jcb-pins-bushes#:~:text=JCB%20Pins%20%26%20Bushes%20made,inner%20grooved%20surface%20of%20bush>
3. Xuehui Chen, Lei Zhang , Wei Li, Zijian Wang, Zhengbin Zhang, Ting Gao and Wei Liu. Analysis of Dynamic Wear Characteristics of Joint Contact Friction Pair of Excavators Working Device. *Lubricants*. 2024, 12, 113. <https://doi.org/10.3390/lubricants12040113>.
4. Eugene Sefa Appiah, Anthony Andrews, Emmanuel Benyah. Properties of a Refurbished Excavator bucket pin. *EJUR*. Volume 2. Issue 1. July 2018. P. 54-60.
5. Kakade K.S., Narwade P.A. Analysis & Induction Hardening on Excavator Pins. *International Journal of Engineering and Techniques*. Volume 2. Issue 5. P. 100-106.
6. Peter Jur̃ci, Ivo Dlouhý. Cryogenic Treatment of Martensitic Steels: Microstructural Fundamentals and Implications for Mechanical Properties and Wear and Corrosion Performance. *Materials (Basel)*. 2024 Jan 23;17(3):548. doi: 10.3390/ma17030548.
7. Nursel Altan Özbek, Onur Özbek. Effect of cryogenic treatment holding time on mechanical and microstructural properties of Sverker 21 steel. *Materials Testing*. November 202264(12):1809-1817.
8. Yoshikiyo Tanaka, Masanori Ueyama, Takemori Takayama. Development of New Materials for Special Oil-Impregnated Bearings. *Komatsu Technical Report*. 2003.VOL. 49 .152.
9. EP 4 112 208 A1 Bushing manufacturing method, bushing, and excavator. XU Guo, CHEN Bo, FENG Kun. European patent application. Applicant: Jiangsu XCMG Construction Machinery Research Institute Ltd. Xuzhou, Jiangsu 221004 (CN).
10. WO 2006124418 A3. Self-lubricating bushings, bearings and bearings assemblies. International application published under the patent cooperation treaty (PCT). Applicant (for all designated States except US): Sankyo oilless industry, (USA) CORP. [US/US].
11. Yuanguo Cao, Xudong DaiView. Modeling for performance degradation induced by wear of a hydraulic actuator of a hydraulic excavator. *Mechanical Engineering Science*. Vol. 229, Is. 3. 2014. P. 556-565 <https://doi.org/10.1177/0954406214535926>.
12. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.
13. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. *Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології»*. 2020. № 2. С 34–41.
14. Борак К. В., Крук І. С. Вплив швидкості руху ґрунтообробних агрегатів на інтенсивність зношування робочих органів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2020. №1. С. 30–36.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЖИТОМИРСЬКИЙ АГРОТЕХНІЧНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ



ЗБІРНИК ТЕЗ

XI Міжнародної науково-практичної конференції
**«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій
та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»**

<https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025>



11 квітня 2025 року
м. Житомир

<https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025>

УДК 631.2:621.017:615.281:340(477)

Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь. PTDSTSAMT-2025» з нагоди 30-річчя започаткування підготовки ОС «Бакалавр» за спеціальністю «Агроінженерія». 11 квітня 2025 року. МОН України. Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Житомир. 2025. 333 с. <https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025>.

Рекомендовано до друку методичною радою Житомирського агротехнічного фахового коледжу МОН України (протокол від 10.04.2025 р. № 6)

Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference "Prospects and Trends in Development of Structures and Technical Service of Agricultural Machinery and Tools. PTDSTSAMT-2025." on occasion of the 30th anniversary of the initiation of the preparation of the Bachelor's Entity in the specialty "AgroEngineering". April 11, 2025. Ministry of Education and Science of Ukraine. Zhytomyr Agrotechnical Professional College. Zhytomyr. 2025. 333 p. <https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025>.

В збірнику представлені тези доповідей науково-педагогічних працівників, наукових співробітників, аспірантів та студентів Житомирського агротехнічного фахового коледжу, провідних вітчизняних і закордонних закладів вищої освіти та наукових установ, в яких розглядаються завершені етапи розробок.

The collection presents abstracts of reports by scientific and pedagogical workers, researchers, postgraduates and students of the Zhytomyr Agrotechnical Professional College, leading domestic and foreign higher educational institutions and scientific institutions, which consider the completed stages of development.

Передрук або інше відтворення в будь-якій формі в цілому або частково матеріалів, опублікованих у цьому віданні, дозволено лише за посиланням на джерело і дотриманням вимог законодавства