

26. Умінський О.В. Поліський національний університет, м. Житомир, Україна.

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗУБІВ КОВША ЕКСКАВАТОРА

Основними матеріалами для виготовлення змінних зубів екскаваторного ковша є високоміцні сталі та спеціальні сплави. Найбільш поширені: низьколегована загартована сталь, високовуглецева марганцева сталь (Hadfield steel), та високохромистий білий чавун. Кожен має свої переваги і недоліки. Низьколеговані сталі ($\approx 0,3\%$ C з додаванням Si, Mn, Cr, Mo, Ni) після термообробки набувають мартенситну структуру – їх твердість сягає $\sim 48\text{--}52$ HRC при міцності на розрив >1500 МПа. Вони забезпечують високу зносостійкість та достатню в'язкість удару (прикл., Charpy $\sim 20\text{--}25$ Дж) навіть за -40 °C. Високомарганцеві сталі ($\sim 11\text{--}14\%$ Mn, $1\text{--}1,2\%$ C) формують аустеніт при загартуванні і відомі надзвичайною ударною в'язкістю та здатністю до зміцнення під час роботи. Їх початкова твердість помірна (близько $220\text{--}300$ HB), але при ударних навантаженнях поверхня швидко наклепується до $\sim 450\text{--}500$ HB, що значно підвищує зносостійкість. Високохромисті леговані чавуни ($2\text{--}3\%$ C, $10\text{--}20\%$ Cr) мають дуже високу твердість ($55\text{--}65$ HRC) і виняткову абразивну зносостійкість, проте дуже низьку ударну в'язкість – вони крихкі і схильні до відколів [1]. Окрім цих, застосовуються також австемперований ковкий чавун (ADI) та інші інноваційні матеріали. ADI-плавки після ізотермічного гартування містять бейнітно-феритну матрицю і поєднують міцність і ударну в'язкість, близьку до сталей, з високою твердістю ($\sim 300\text{--}400$ HB). Іноді для спеціальних умов використовують зуби з напаяними твердосплавними наконечниками (карбід вольфраму) – вони дуже тверді, але дорогі і застосовуються рідко.

Середній строк служби зубів вимірюється напрацюванням в мотогодинах і дуже залежить від умов копання. В піщано-глинистому ґрунті з низькою абразивністю ресурс може перевищувати 800 годин на зубець. В змішаних умовах (ґрунт, глина, дрібний гравій) типова довговічність становить 400–800 год. У жорстких абразивних породах (щебінь, пісковик) строк служби скорочується до $\sim 200\text{--}400$ год., а при екстремальному абразивному навантаженні (наприклад, висококварцові граніти) – менше 200 годин. Дослідження також підтверджують, що дуже абразивний ґрунт (пісок з твердими частками) здатен зменшити напрацювання зубів до всього $\sim 72\text{--}120$ годин [2].

Фактори, що зменшують ресурс:

- абразивність матеріалу – велика кількість твердих мінералів (кварцу, руди) у ґрунті пришвидшує спрацювання робочої поверхні зуба [2]. Ударні навантаження – розколювання великих каменів і ударні

контакти спричиняють мікро-відколювання матеріалу зуба. Після багаторазових сильних ударів можливе утворення тріщин;

- неправильна експлуатація – бічне навантаження на зуб (при підриванні ґрунту важелем ковша), надмірне зусилля при невідповідних режимах копання, відсутність планової заміни сильно зношених зубів тощо підвищують шанс поломки;

- низька температура середовища – в холодному кліматі сталь зубів втрачає ударну в'язкість, стає крихкішою. Це різко скорочує ресурс, якщо спеціальний матеріал не передбачений для Арктики.

Зазвичай виробники вказують рекомендовані умови для кожного типу зубів. Наприклад, Caterpillar класифікує зуби за категоріями ґрунтів: General Duty – для легких робіт (>800 год на комплект), Heavy Duty – універсальні (400–800 год), Severe Duty – для абразивних порід (200–400 год), Extreme Duty – для надабразивних умов (<200 год). Правильний вибір типу і своєчасна заміна забезпечують максимальний ресурс.

Зуб ковша поступово втрачає працездатність через зношування або раптово виходить з ладу через механічне руйнування. Основні механізми:

Абразивне спрацювання (зношення) – поступове сточування та притуплення ріжучого краю під дією ґрунту. Зуб зрештою втрачає форму і здатність ефективно різати, що вимагає його заміни. Абразивне зношування є неминучою природною причиною “смерті” зуба, яка визначає його ресурс.

Ударне руйнування – відколювання або зламування зуба від раптового удару чи надмірного навантаження. Вершина зуба може відколотися при ударі об дуже твердий камінь або при перевищенні міцності матеріалу. Таке руйнування часто трапляється раніше за повне спрацювання, особливо якщо зуби не призначені для настільки високих ударів.

Втомні тріщини – при багаторазових навантаженнях (ударних або вигинаючих) у матеріалі можуть зароджуватися мікротріщини, які з часом ростуть. Накопичення втомних пошкоджень призводить до раптового відламу зуба навіть без явного разового перевищення навантаження.

Матеріалознавчі дефекти – приховані дефекти литва (усадкові раковини, шлакові вclusions) є частою причиною передчасного відколу “коронки” зубів. Вони служать концентраторами напружень і ініціаторами тріщин. Так, аналіз поломок зубів екскаваторів в Арктиці показав, що головні винуватці – саме дефекти лиття та недостатня холодостійкість сталі: гарячі тріщини і неметалеві вclusions зумовлюють зародження тріщин, а низька в'язкість на морозі спричиняє їх швидке ростання і крихкий злам.

Випадки випадання зубів – окремо слід згадати не руйнування матеріалу, а втрату зуба через вихід з зачеплення. Якщо фіксуючий палець неякісно встановлений або спрацьований, зуб може випасти з адаптера. Ця ситуація не пошкоджує сам зуб, але є аварійною (втрата деталі в масі ґрунту) і потребує встановлення нового зуба.

На практиці близько 70–80% зубів замінюють саме через абразивне зношування, коли робочий профіль вже не забезпечує потрібного проникнення [2]. Решта випадків – це поломки (відколювання, тріщини) або втрата зуба. Правильний вибір матеріалу та конструкції під умови роботи знижує ризик раптових відмов. Наприклад, для холодних умов застосовують спеціальні низьковуглецеві сталі з підвищеною холодостійкістю, щоб запобігти крихким зламам.

Процес зношування зуба ковша є складним поєднанням декількох механізмів, переважність яких залежить від умов роботи. Основні види спрацювання: абразивне (тертя частинок) та ударно-абразивне. При копанні різними породами спостерігаються такі стадії зношування:

- Ударне зношування. На початковому етапі заглиблення зуба в матеріал основне навантаження – ударне. В момент встромлення вершина зуба відчуває концентрований ударний тиск, що викликає пластичне деформування і дрібні сколи на поверхні металу [3]. Такий механізм називають ударно-крихким зношуванням: тверді частинки породи діють як різці, мікро-вирізаючи матеріал зуба і утворюючи борозни [3]. Ударне зношування характерне при розробці твердих порід і проявляється у вигляді заокруглення та викришування гострого краю зуба.

- Двотільне абразивне зношування. У міру проникнення зуба глибше в ґрунт, по його поверхні починає інтенсивно ковзати ґрунтовий матеріал [3]. Великі частки породи стирають метал безпосереднім тертям – це класичний абразивний знос (двотільний, «metal-to-rock»). Він проявляється як поступове шліфування передньої та бічних граней зуба, особливо помітне ближче до вершини, де тиск найбільший.

- Тритільне абразивне зношування. Коли зуб заглиблюється, частина роздрібненого матеріалу заповнює простір між його поверхнею і породою, діючи як абразивний прошарок [3]. Дрібні піщинки

виконують роль третього тіла – вони перетираються між зубом і ґрунтом, одночасно стираючи метал. Таке тритільне зношування особливо значуще при роботі в піску, дрібному гравії, а також при висипанні породи з ковша (розвантаженні) – в ці моменти зуби теж труться дрібнозернистим матеріалом.

- Адгезійне та фретинг-зношування. Вібрації і коливання ковша в породі можуть викликати тертя з малими амплітудами між зубом та адаптером або сусідніми деталями, що призводить до фретингу (стирання контактних поверхонь кріплення). Адгезійне зношування (прилипання) між металом зуба і частинками ґрунту виражене слабо, хоча в особливих умовах (мокрый глинистий ґрунт) можлива клейка взаємодія, що утворює налипання на зуб.

У реальних умовах всі ці механізми діють одночасно, але їх відносна роль залежить від середовища. Наприклад, при розробці міцного скельного ґрунту переважають ударні і двотільні абразивні процеси – зуб швидко притуплюється від сколювання. Натомість у м'якіших піщано-гравійних ґрунтах основний внесок у знос дає тритільне тертя дрібних часток. Важливо розуміти, що зношування не є суто властивістю матеріалу зуба, а визначається всією системою “зуб-порода” [3]. Тому виробники (наприклад, Caterpillar) створюють цілі лабораторії ґрунтів для випробувань, а науковці спільно з компаніями (Komatsu та ін.) досліджують вплив властивостей матеріалу і технології обробки на характер зношування зубів.

Швидкість і характер спрацювання зуба сильно залежать від типу ґрунту та режиму роботи. В м'якому ґрунті (глини, суглинки) зуби зношуються відносно рівномірно і повільно переважно за рахунок стирання. У твердих скельних породах спочатку може відбутися часткове відколювання верхівки зуба від ударів, після чого зношування продовжується шляхом інтенсивного шліфування оголеної поверхні. В дуже абразивному сипучому середовищі (напр., піщаник, рудний пісок) зуби стираються головню тритільним зносом – їх робочі грані шорсткішають, але без великих сколів. При цьому кут загострення поступово росте (лезо тупиться). Цікаво, що темп зношування може змінюватися з часом: польові спостереження показали, що нові, гострі зуби спочатку зношуються швидше, а після притуплення їх знос уповільнюється [4]. Це пояснюють тим, що на початку експлуатації вирізаються та сточуються дрібні нерівності й малостійкі ділянки литого металу, а після формування заокругленого профілю навантаження розподіляється рівномірніше і подальше стирання йде стабільнішим темпом. Графік зношування зазвичай має криву зі спадною швидкістю: високий початковий знос (період приработки) переходить у більш повільний лінійний режим. Водночас окремі дослідження відзначали протилежний ефект при роботі у вкрай жорстких породах – після затуплення зуба площа контакту збільшується і загальний об'єм втраченого металу за цикл може зростати. Тому залежність “швидкість зношування vs час” не універсальна і визначається балансом між зменшенням напружень на притупленому зубі та збільшенням площі тертя.

Зубб, встановлені по краях і в центрі ковша, можуть зношуватися по-різному. Центральні зуби зазвичай занурюються в ґрунт глибше, раніше вступають в контакт і приймають основну силу, тому їх вершини часто спрацьовуються швидше. Крайні (бокові) зуби додатково піддаються бічному тертю об стінки траншей і можуть зношуватися по бокових гранях. Дослідження розподілу зносу на багатозубому ковші показують, що знос нерівномірний – один чи кілька зуби (наприклад, другий від краю) може втрачати масу швидше за інші [2]. Це пов'язано з геометрією копання: при нерівномірному завантаженні ковша певний зуб може працювати як “найвиступаючий” та контактувати з ґрунтом інтенсивніше. Практично це вирішується перестановкою зубів місцями під час планового огляду (щоб вирівняти знос) або застосуванням диференційованих за формою зубів – наприклад, бічні зуби роблять товщими і міцнішими, оскільки вони часто зношуються швидше.

Різні матеріали зубів демонструють різну довговічність і надійність в експлуатації. Зносостійкість відображає, наскільки повільно матеріал спрацьовується (тобто скільки породи може розробити зуб до затуплення або критичного зносу). Надійність означає стійкість до поломок – здатність матеріалу витримувати удари та навантаження без утворення тріщин і відколів. Як правило, існує компроміс: найтвердіші матеріали (найбільш зносостійкі) є найменш в'язкими, тобто крихкішими.

Найбільш збалансованими матеріалами є леговані сталі та ADI-чавуни – вони забезпечують одночасно високий опір зносу і достатню опірність ударам. Високохромні чавуни значно перевершують сталі за абразивною стійкістю, але ризик крихкого руйнування обмежує їх застосування переважно умовами без сильних ударів. Високомарганцеві сталі навпаки, винятково витривалі проти ударів, але програють за швидкістю стирання у піщано-абразивних середовищах (якщо не відбувається належного наклепу). Окрім вибору матеріалу, ресурс підвищують конструктивні та технологічні рішення:

наприклад, композитні зуби з твердим вставним наконечником показали збільшення ресурсу на ~50% порівняно з цільнометалевими. Також ефективним є наплавлення твердим сплавом – наприклад, покриття наконечника зносостійким шаром карбідів дає змогу зменшити інтенсивність зношування в 2–4 рази.

Сучасні форми зубів проектується таким чином, щоб при зношуванні вони самозагострювались. Це досягається оптимізацією внутрішнього профілю та твердості різних зон. Наприклад, зуби Volvo мають спеціальну геометрію і розташування матеріалу, що забезпечує самозагострюваність – зуб зберігає форму клина упродовж всього строку служби. Подібно, у системах John Deere, West-Trak та ін. всі типи зубів сконструйовані так, щоб під час зносу утворювалася нова ріжуча крайка, і нема потреби розвертати чи перевстановлювати зуби. Наукові дослідження підтверджують ефективність такого підходу, зокрема було спроектовано зубець складеної конструкції зі сталі Hardox, що мав самозагострювану геометрію, завдяки чому залишався гострим і працював щонайменше вдвічі довше за традиційні литі зуби. Отже, правильно вибраний дизайн може підтримувати оптимальний кут атаки протягом більшої частини ресурсу зубів.

Для збереження форми зубів важливий належний догляд і техніка роботи:

- не слід допускати повного сточування і “розплющування” наконечника – зубець краще замінити або наплавити до того, як кут стане надто тупим (зазвичай коли втрачено ~50% початкової довжини). Вчасна заміна підтримує ефективність копання і знижує навантаження на машину;

- рекомендується періодично переставляти зуби (між різними позиціями на ковші), якщо це можливо, щоб вирівняти їх зношування. Наприклад, найбільш затуплені середні зуби можна поміняти місцями з крайніми – це вирівняє кути атаки;

- оператор повинен дотримуватися правильного кута входження ковша в ґрунт. Якщо ківш занадто задертий або, навпаки, нахилений, зуби будуть зношуватися нерівномірно – утворюються “зносні фаски”, що псує геометрію різальної крайки. Оптимальний кут врізання дозволяє всією площиною ріжучої грані працювати рівномірно;

- своєчасне усунення люфтів у кріпленні зубів (замінюваних пальців, стопорів) теж опосередковано впливає на кут атаки. Розхитаний зуб може відхилятися під навантаженням і сточуватися під нетиповим кутом. Тому при техогляді треба підтягувати або міняти зношені кріплення, щоб зуб сидів щільно.

Дотримання цих рекомендацій дозволяє максимально зберегти профіль зубів наближеним до проектного, тим самим підтримуючи ефективність врізання в ґрунт. В результаті екскаватор витрачає менше енергії на копання, а самі зуби служать довше до досягнення граничного ступеня затуплення.

Коли зуби зношуються або пошкоджуються, існує кілька підходів до їх відновлення, що дозволяють продовжити строк служби і зекономити на придбанні нових. Сучасні технології ремонту зосереджені на наплавленні зносостійких матеріалів та повторній термічній обробці, а також на вдосконаленні конструкції змінних елементів.

Наплавлення (хардфейсинг). Це нанесення на зношену частину зуба шару дуже твердого зносостійкого металу (наприклад, електродами з високовуглецевого хромистого сплаву або порошковою наплавкою карбідів). Наплавлення дозволяє відновити геометрію зуба (процедура build-up) і одночасно значно зміцнити його поверхню проти стирання (процедура overlay) [5]. Правильно виконане наплавлення може повернути навіть сильно спрацьований зуб до майже нового стану за 25–75% вартості нового зуба, і при цьому продовжити його ресурс на 200–300% [5]. Наприклад, наплавлення шару твердого сплаву на робочу поверхню високоманганцевого зуба здатне знизити знос до 1/6 від початкового (тобто ресурс збільшується в ~6 разів) [6]. Важливо враховувати матеріал основи при наплавленні: низьколеговані сталі і м’які марганцеві сталі добре піддаються наплавленню, тоді як високовуглецеві сталі потребують підігріву і повільного охолодження, щоб не утворювалися тріщини. Технології наплавлення постійно розвиваються – зараз застосовують автоматизоване порошкове наплавлення, а також лазерне наплавлення (лазерна наплавка), яке забезпечує тонкий прецизійний шар з металургійним сплавленням з основою та мінімальною зоною термічного впливу. Це дає дуже тверду і зносостійку поверхню без значного ослаблення серцевини зуба.

Термічна обробка при ремонті. Після наплавлення або при виявленні ознак втрати твердості зуб може піддаватися повторному загартуванню і відпуску. Термічна обробка відновлює мартенситну структуру в зоні ремонту і знімає залишкові напруження. Наприклад, великий зубець після нарощування металу може бути прогрітий і загартований, щоб наплавлений шар набув максимальної твердості, а перехідна зона – достатньої в’язкості. Крім того, виробники практикують покращення

серійних зубів термічними методами: поверхнєве зміцнення (індукційна загартування носка зуба) підвищує ресурс без значного погіршення ударної міцності.

Заміна зубів. Незважаючи на існування методів ремонту, найпоширенішим рішенням залишається повна заміна зношених зубів на нові. Конструкція сучасних зубів передбачає швидку заміну – зуб кріпиться до адаптера за допомогою фіксуючого штифта або клина без зварювання. Це дозволяє оперативно міняти окремі елементи навіть в полі. Зазвичай парк машин має запасні комплекти зубів, і як тільки зуб стає непридатним (чи то через знос, чи то через скол), його збивають з адаптера і ставлять новий, забезпечуючи безперервність робіт.

Багато підприємств, щоб знизити витрати, відновлюють великі зубів (напр. для гірничих екскаваторів) шляхом наплавлення твердими сплавами по кілька циклів – поки базовий корпус зуба не втратить міцність. Практика показує, що комбінуючи наплавлення і правильну термообробку, можна многократно продовжити життя дорогих деталей: наприклад, відновлений наплавленням зуб може служити додатково 50–100% від початкового ресурсу при кожному відновленні. Однак існує межа, коли внутрішні тріщини чи втома металу роблять подальший ремонт недоцільним – тоді зубець повністю замінюють. Отже, методи відновлення зубів ковша – наплавлення, термообробка, своєчасна заміна – дозволяють суттєво підвищити ефективність і економічність експлуатації землерийної техніки. Завдяки їм підтримується оптимальна форма різальних елементів і мінімізуються простой через поломки обладнання. У поєднанні з правильним вибором матеріалу та конструкції нового зуба, ці заходи забезпечують максимальний термін служби робочих органів екскаватора при найменших витратах.

Список використаних джерел

1. Bucket Teeth Supplier. URL : <https://www.investmentcastingpci.com/bucket-teeth/#:~:text=The%20most%20used%20materials%20for,They%20have%20their%20own%20characteristics>
2. Menderes Kalkat, Mehmet Bahadır, Furkan Yılmaz. The determination of the working life of backhoe-loader bucket teeth showing abrasive wear under the effect of dynamic loads. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*. 2023; 12(4), 1499-1507.
3. Zhengxing Dong, Feng Jiang, Yuanqiang Tan, Fuzeng Wang, Rong Ma, Jiawen Liu. Review of the Modeling Methods of Bucket Tooth Wear for Construction Machinery. *Lubricants*. 2023, 11, 253. <https://doi.org/10.3390/lubricants11060253>.
4. Jamal Choudhry. A study of wear and load behaviour on bucket teeth for heavy-duty cable shovels. Luleå: Luleå University of Technology. 2020. 70 p. DOI:10.13140/RG.2.2.16335.71848.
5. Hobart Brothers. Hardfacing Can Keep Equipment In Service Longer. URL : <https://www.hobartbrothers.com/resources/technical-articles/hardfacing-can-keep-equipment-in-service-longer/#:~:text=Build,worn%20by%20impact%20or%20abrasion>.
6. Zhongxin Wang, Long Sun, Dong Wang, Bo Song, Chang Liu, Zhenning Su, Chaobin Ma Xiaoyong Ren. Abrasive Wear Properties of Wear-Resistant Coating on Bucket Teeth Assessed Using a Dry Sand Rubber Wheel Tester. *Materials*. 2024, 17, 1495. <https://doi.org/10.3390/ma17071495>

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-ptdtsamt.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