

УДК 621.891:631.31

## САМОЗАГОСТРЮВАННЯ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ҐРУНТООБРОБНИХ І ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН В УМОВАХ ЗМІЦНЕННЯ ЇХ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ

**В.В. Аулін, професор, к.т.н., С.О. Карпушин, доцент, к.т.н., А.А. Тихий, інженер, Кіровоградський національний технічний університет**

*Анотація.* Розглянуто динаміку зміни напруженого стану і стану зношення різальних елементів робочих органів ґрунтообробних і землерийних машин за різних варіантів зміцнення. Виявлено вплив варіантів зміцнення на проявлення ефекту самозагострювання різальних елементів.

*Ключові слова:* різальні елементи, знос, зміцнення, робочі поверхні, робочий орган, самозагострювання, ґрунт, різальна крайка.

## САМОЗАТАЧИВАНИЕ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ И ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ УПРОЧНЕНИЯ ИХ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**В.В. Аулин, профессор, к.т.н., С.О. Карпушин, доцент, к.т.н., А.А. Тихий, инженер, Кировоградский национальный технический университет**

*Аннотация.* Рассмотрена динамика изменения напряженного состояния и состояния износа режущих элементов рабочих органов ґрунтообрабатывающих и землеройных машин при разных вариантах упрочнения. Обнаружено влияние вариантов упрочнения на проявление эффекта самозатачивания режущих элементов.

*Ключевые слова:* режущие элементы, износ, упрочнение, рабочие поверхности, рабочий орган, самозатачивание, ґрунт, режущая кромка.

## SELF-SHARPENING OF CUTTING ELEMENTS OF CULTIVATING AND EARTH-MOVING MACHINES IN CONDITIONS OF REINFORCING THEIR WORKING SURFACES

**V. Aulin, Professor, Candidate of Engineering Sciences,  
C. Karpushin, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences,  
F. Tikhiy, engineer, Kirovograd National Technical University**

*Abstract.* The dynamics of stress state variation and wear for cutting elements of cultivating and earth-moving machine work tools has been considered in various reinforcement conditions. The effect of reinforcement conditions on self-sharpening of cutting elements has been ascertained.

*Key words:* cutting elements, wear, reinforcement, working surfaces, work tool, self-sharpening, soil, cutting edge.

### Вступ

У процесі експлуатації робочі органи ґрунтообробних і землерийних машин (РОГЗМ) зазнають інтенсивного зношення. Інтенсив-

ність зношення залежить від зношувальної здатності ґрунту, його гранулометричного складу, напружено-деформованого стану (НДС), матеріалу самого різального елемента (РЕ) робочого органа. Це, безумовно, дає

можливість обрати такі технології зміцнення, які, враховуючи локальний характер зносу (рис.1), а також форму деталей РЕ РОГЗМ, дозволять проводити процес відділення стружки від ґрунтового масиву за мінімально можливих значень опору протягом більш тривалого проміжку часу.

### Аналіз публікацій

Динаміку розвитку питань врахування зношення клиноподібного РЕ РОГЗМ для математичного опису процесів взаємодії з ґрунтом, вплив параметрів площадки зношення на процес розробки ґрунту, зокрема на зміну НДС ґрунту, можна спостерігати в роботах відомих вітчизняних вчених: Горячкіна В.П., Соколовського В.В., Ветрова Ю.А., Зеленина О.М., Баловнєва В.І., Хмари Л.А. та ін. [1–5].



Рис. 1. Локальне зношення різальних крайок робочого органа одноківшового екскаватора ЭО-2621. (Виробничий експеримент із використанням машинного парку Кіровоградська ДЕД ДП «Кіровоградський обласвтодор»)

Виробництво самозагострюваних РОГЗМ з РЕ зумовлює більш високі вимоги до підвищення їх надійності [6]. Як показала практика, перевага надається самозагострюванню 1-го роду, коли рекомендують зміцнювати РЕ РОГЗМ тільки з нижньої (тильної) сторони. Це пояснюють тим, що у міру зношеності клиноподібного РЕ при верхньому зміцненні, самозагострювання 2-го роду основний шар

поблизу різальної крайки потовщується й умови самозагострювання погіршуються, через утворення на цьому шарі додаткової потиличної фаски, хоча в ряді випадків ця фаска не заважає роботі РЕ.

Досліджуючи РЕ РОГЗМ із верхнім зміцненням твердим сплавом сормайт, В.М. Винокуров дійшов висновку, що найкраща геометрія РЕ з верхнім наплавленням отримується за дуже малих товщин основного шару [7]. Такі РЕ є недостатньо міцними, тому доцільно наплавляти нижню поверхню для підвищення працездатності і міцності. З цих причин верхнє зміцнення було припинено, хоча достатньо не обґрунтованими є параметри, що забезпечують самозагострювання у даному випадку.

Одним із напрямів підвищення міцності та надійності РЕ РОГЗМ є створення багатошарових матеріалів, які володіють цілим рядом переваг у порівнянні з лезами однорідними чи двошаровими. РЕ у цьому випадку отримують міцнішими, оскільки багатошарові матеріали здатні до пластичної деформації, підвищується ударна в'язкість і конструкційна міцність [8, 9]. Окрім того, разом із самозагострюванням РЕ, виключається викришування твердого, різального шару, оскільки він затиснутий між двома пластичними зовнішніми шарами.

### Мета і постановка задачі

Метою роботи є дослідження НДС і стану зношення РЕ РОГЗМ та з'ясування умов ефекту самозагострення за різних варіантів зміцнення.

### Методика дослідження НДС і стану зношення РЕ РОГЗМ

Розрахунок поля напружень в РЕ у процесі взаємодії його з абразивним технологічним середовищем визначали методом кінцевих елементів на ПЕОМ [9].

Аналіз та розрахунок поля напружень і деформацій на робочих поверхнях РЕ виконували за допомогою пакета COSMOSWorks, інтегрованого в CAD-систему SolidWorks.

На першому етапі будували модель РЕ в CAD-системі SolidWorks з урахуванням геометричних параметрів. Після цього для про-

ведення аналізу побудованої моделі активізували модуль COSMOSWorks (Manager). За допомогою панелі інструментів обирали вікно Study, в якому задавали тип аналізу Static Type та тип кінцевих елементів Mesh Type.

В менеджері COSMOSWorks обирали матеріал деталі (пункт меню Apply/Edit Material). Зазначимо, що COSMOSWorks має бібліотеку матеріалів та їх властивостей, яку можна редагувати у разі відсутності відомостей про досліджуваний матеріал. Редагування проводять у текстових і цифрових полях панелі Material.

Після цього в менеджері COSMOSWorks вводили граничні умови – Restraints. У вікні Restraints обирали грані переміщення, які в умовах задачі необхідно обмежити у визначених напрямках.

Потім на досліджуваних поверхнях розподіляли навантаження, аналогічно тим, що спостерігаються в умовах експлуатації РЕ, за допомогою панелі Pressure відповідними опціями.

Після перевірки настройки аналізу методом кінцевих елементів будували сітку за допомогою пункту меню Mesh, в якому задають необхідні параметри та визначають розміри кінцевих елементів.

Далі із контекстного меню, що відповідає піктограмі Static Analysis – Pressure, запускали процедуру розрахунку командою Run. При цьому в менеджері з'являються папки Stress (Напруження), Displacement (Переміщення), Strain (Деформація), Deformation (Деформований вигляд), Design Check (Перевірка міцності), в яких подано результати розрахунків відповідних величин та їх наочне представлення. В навантаженій деталі виділяються характерні області з різною величиною напруження. Про це свідчить колір областей. Величину напружень можна визначити за шкалою, розміщеною справа від деталі.

Отриману інформацію про напружено-деформаційний стан деталі наочно можна подати й у вигляді сукупності ліній, точок, де величини напружень є однаковими. Її можна використати при виборі варіантів подовження ресурсу РОГЗМ, удосконалення технології обробки ґрунту, спрямувати пошук мож-

ливостей створення нової геометрії двошарового та багатошарового РЕ РОГЗМ з оптимальним поєднанням міцності, зносостійкості і самозагострюваності, як із нижнім, так і з верхнім варіантами зміцнення. Величину лінійного зносу РЕ по ширині та зміну його профілю за різного шляху тертя  $L$  визначали за схемою, представленою на рис. 2.

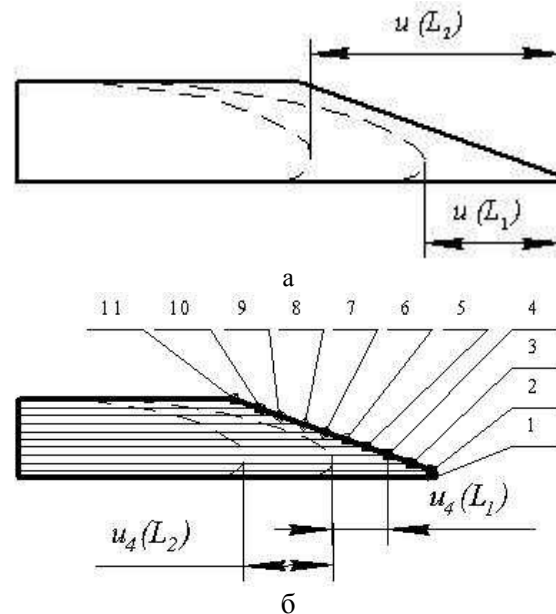


Рис. 2. Схема визначення лінійного зносу РЕ (а) та зміни його профілю (б) залежно від шляху тертя:  $u(L_1)$ ,  $u(L_2)$  – величини зносу за відповідного шляху тертя  $L_1$  і  $L_2$ , 1–11 – характерні зони профілю РЕ

Для визначення величини зносу в точках зони і форми профілю фотографували цифровою камерою перерізи РЕ з фіксованою величиною збільшення. Електронну інформацію зображення імпортували в окремий шар програми Компас – 3D V11.

Після створення другого шару поверх першого проводили окреслення профілю РЕ. Співставляючи профілі, отримані за різних шляхів тертя, автоматизовано визначали величину зносу РЕ в характерних точках. Окрім цього, за допомогою зазначеної процедури визначали радіус різальної крайки. Зразки РЕ РОГЗМ підлягали випробуванню на модернізованому стенді.

Поряд із визначенням лінійного зносу і форми профілів визначали величину масового зносу за даний проміжок часу випробувань (шляху тертя) ваговим методом. Зважування

проводили на аналітичних вагах АДВ-200 з точністю до 0,1 мг. На робочі поверхні РЕ наносили зносостійкі покриття різними технологіями нанесення товщиною 0,60–1,5 мм. Через кожні 2 години вимірювали лінійні та вагові зноси зразків. Після 4–6 год установлювалась постійна швидкість зношування. Час випробування – 8 год. За інформацією процесу зношування будували епюру зносу. Порівняльний аналіз зміни поля напруження і епюри зносу РЕ РОГЗМ, зміцнених за різними варіантами.

В даній роботі розглянуто різні варіанти зміцнення наплавленням твердими сплавами: нижньої поверхні, верхньої та двостороннє зміцнення. Оскільки наплавлення проводили різними сплавами, то спостерігали різну інтенсивність зношування та відносну зносостійкість робочих поверхонь.

Результати вимірювання поля напружень і величини зношування в характерних точках дали можливість побудувати епюри напружень і зносу РЕ (табл. 1). За результатами досліджень, наведених у табл. 1, можна бачити, що вихідний стан зразків РЕ є однако-вими для всіх варіантів зміцнення. З напрацюванням, тобто збільшенням шляху тертя, спостерігаються різні закономірності зміни епюри напруження і зносу.

Максимальний рівень напружень зосереджено у вузькій області різальної крайки, і у міру віддалення від цієї області величина напружень спадає. Характерним є те, що за мінімального радіуса заокруглення різальної крайки область напруженого матеріалу є достатньо невеликою. У міру затуплення різальної крайки НДС змінюється. При цьому радіус заокруглення різальної крайки збільшується, що зумовлює збільшення й області максимальних напружень.

Розподіл залишкових напружень по глибині зміцненого шару показав, що зона напружень стиску поширюється на глибину до 200 мкм і більше. Це залежить від способу зміцнення та товщини зміцненого шару. Величина напружень при цьому складає – 200–400 МПа, що свідчить про сприятливий характер в експлуатації цих шарів в умовах абразивного зношування.

Варіант зміцнення сприяє перерозподілу напруженої зони РЕ при взаємодії його з грун-

том: за зміцнення верхньої робочої поверхні картина НДС матеріалу швидше стає усталеною, ніж за зміцнення нижньої робочої поверхні; якщо зміцнити обидві робочі поверхні однаковими способами і в однакових технологічних режимах, то картина НДС зі збільшенням шляху тертя є подібною до незміцненого РЕ, але інтенсивність її зміни є набагато меншою і характер перерозподілу поля напружень і деформації інший; у випадках, коли робочі поверхні зміцнено різними способами або в різних технологічних режимах, картина НДС є подібною до варіантів зміцнення однієї з робочих поверхонь РЕ. Але зі збільшенням шляху тертя інтенсивність зміни картини НДС є меншою і дещо іншим є характер перерозподілу полів напруження і деформації.

На увагу заслуговує і локальний (дискретний) характер зміцнення у зазначених варіантах. При навантаженні тертям таких РЕ спостерігається суперпозиція НДС локальних ділянок робочої поверхні, суттєво відрізняється як сама картина НДС РЕ, так і характер її зміни зі збільшенням шляху тертя. Ці варіанти ще потребують ретельних досліджень.

Дослідження профілю зразків РЕ й епюри зносу показали, що незміцнені зразки вже за шляху тертя 30 км інтенсивно затуплюються. Подальше збільшення напрацювання призводить до збільшення радіуса заокруглення різальної крайки і, за певних умов, до утворення потиличної фаски.

Застосування різних варіантів зміцнення при реалізації певних умов сприяє стабілізації геометрії профілю РЕ, тобто спостерігається ефект самозагострювання. Це дає можливість підвищити ресурс РЕ до вибракування і дозволяє спостерігати допустимі параметри РЕ при напрацюванні 130–150 км. При цьому не спостерігаються відшарування наплавленого твердого сплаву, через його високу міцність зчеплення з основою.

Виявлено, що при певному напрацюванні спостерігається стабілізація інтенсивності зносу. Поява цього моменту залежить від способу зміцнення, його технологічних параметрів і варіантів зміцнення. Спостереження за динамікою зміни різальної крайки показали зміну її радіуса зі збільшенням шляху тертя.

Таблиця 1 Залежність поля напружень РЕ РОГЗМ та епюри зносу від варіанта зміцнення

| Робочі поверхні не зміцнені      |   |    |    |    |
|----------------------------------|---|----|----|----|
| Поля напружень                   |   |    |    |    |
| Епюри зносу                      |   |    |    |    |
| Нижня робоча поверхня зміцнена   |   |    |    |    |
| Поля напружень                   |   |    |    |    |
| Епюри зносу                      |   |    |    |    |
| Верхня робоча поверхня зміцнена  |   |    |    |    |
| Поля напружень                   |   |    |    |    |
| Епюри зносу                      |   |    |    |    |
| Верхня і нижня поверхні зміцнені |   |    |    |    |
| Поля напружень                   |   |    |    |    |
| Епюри зносу                      |   |    |    |    |
| Шлях тертя, км                   | 0 | 30 | 60 | 90 |

При оцінці радіуса різальної крайки на ПЕОМ виявлено, що найбільший радіус різальної крайки спостерігався у незміцнених зразках та при їх об'ємному гартуванні. Виявлено, що оптимальним за різних варіантів зміцнення є зміцнений шар товщиною 0,75–1,00 мм. Формування радіуса різальної крайки залежить від величини лінійного зносу в характерних точках профілю РЕ. Ефект самозагострювання визначається стабілізацією лінійного зносу в усіх характерних точках профілю РЕ.

Порівняльний аналіз полів напружень і епюри зносу РЕ від варіантів зміцнення показав узгодженість закономірностей їх зміни. Виявлено, що при формуванні вузької області максимальних напружень епюра зносу практично не змінюється, що свідчить про наявність стабілізації геометричних параметрів РЕ, тобто про реалізацію ефекту самозагострювання.

Виявлено, що ефект самозагострювання, момент його появи суттєво залежать від варіанта зміцнення та властивостей зміцнених шарів: за однакових способів зміцнення верхньої і нижньої робочих поверхонь РЕ ефект самозагострювання швидше реалізується у РЕ, зміцнених за верхнім варіантом; кут загострення у цьому випадку є меншим; у випадках зміцнення і верхньої, і нижньої робочих поверхонь РЕ ефект самозагострення реалізується за різних способів зміцнення, або різних технологічних параметрів зміцнення; спостерігається також аналогія проявлення ефекту самозагострення односторонніх варіантів зміцнення; не спостерігається ефект самозагострення у незміцнених зразках РЕ, за їх об'ємного термічного гартування, або при поверхневому зміцненні обох робочих поверхонь однаковими способами, з однаковими технологічними параметрами зміцнення.

Для обґрунтування оптимальних параметрів РЕ РОГЗМ, їх варіантів зміцнення слід провести порівняльний аналіз їх самозагострюваності, міцності та зносостійкості.

На рис. 3 показано виникнення ефекту самозагострювання залежно від відносної зносостійкості ( $\epsilon$ ) верхньої і нижньої робочих поверхонь РЕ.

Незважаючи на зміну розмірів РЕ, у процесі зношування зберігається його гострота і різальна здатність. Реалізація ефекту самозагострювання дозволяє виключити процес загострення і суттєво підвищити довговічність РЕ.

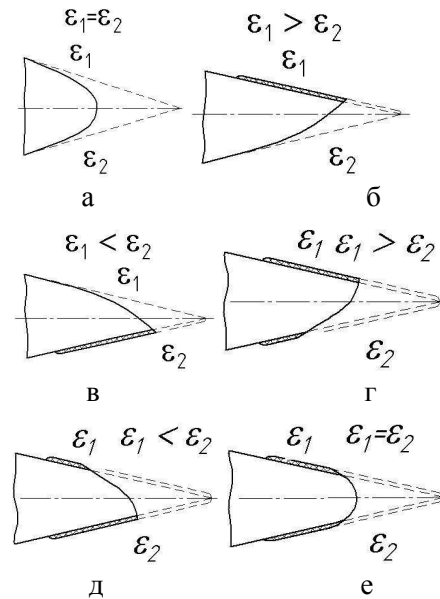


Рис. 3. Виявлення ефекту самозагострювання РЕ за різних співвідношень відносної зносостійкості робочих поверхонь РЕ: а, е – відсутній; б–д – спостерігається

Самозагострювальні РЕ найчастіше мають двошарову структуру в поперечному перерізі. У двошаровому РЕ один шар – різальний (із твердістю  $H_1$ ) – забезпечує гостроту і зносостійкість, а тому він повинен мати малу товщину за високої зносостійкості матеріалу. Другий шар – несучий (із твердістю  $H_2$ ) – повинен мати такі розміри і властивості основного матеріалу, щоб забезпечити міцність РЕ, зношуючись одночасно з різальним шаром, не збільшуючи товщини РЕ і не оголюючи надмірно різального шару.

Для отримання ефекту самозагострювання суттєве значення має співвідношення твердостей  $H_1/H_2$ , а не їх абсолютні значення. Наявність самозагострювання можна оцінити кількісно за допомогою безрозмірного критерію самозагострювання

$$K_c = v_{\text{ук}} \sin \beta / (v_{\text{уп}} \cos \beta + v_{\text{уф}}), \quad (1)$$

де  $v_{\text{уп}}$ ,  $v_{\text{уф}}$ ,  $v_{\text{ук}}$  – відповідні швидкості лінійного зношення по зміцненій поверхні (покриття), по фасці і крайці РЕ;  $\beta$  – кут загострення.

Проведена оцінка за виразом (1) показує, що: при  $K_c = 1$  спостерігається самозагострювання; при  $K_c > 1$  – затуплення; при  $K_c < 1$  – переагострювання. Останній випадок є небажаним, оскільки оголюється різальний шар, що призводить до обламування РЕ. Збільшення співвідношення  $H_1/H_2$  зменшує критерій  $K_c$ .

Для експериментального дослідження явища самозагострювання РЕ використовували двошарові зразки з  $H_1/H_2 > 1$ , які порівнювали з одношаровим зразком, у якого  $H_1/H_2 = 1$  і  $K_c \gg 1$ . Для кожної серії зразків за значення твердостей  $H_1/H_2$  визначали критерій  $K_c$ , за значенням якого робили висновок про збільшення (зменшення)  $H_1/H_2$ , за якого спостерігається самозагострювання, тобто визначали таке значення  $H_1/H_2$ , за якого  $K_c = 1$ .

Таким чином, реалізацію ефекту самоагострення РЕ можна представити як знаходження оптимального значення цільової функції  $K_c = f(v_{уп}, v_{уф}, v_{ук}, S, H_1/H_2)$ . Цього можна досягти як збільшенням твердості покриття, так і зменшенням твердості основного матеріалу, тобто необхідно збільшувати співвідношення  $H_1/H_2$ , також враховуючи зношувальні властивості матеріалу РЕ та зношувальну здатність ґрунтів.

### Висновки

Дослідження напружено-деформованого стану та епюри зносу РЕ РОГЗМ з різними варіантами зміцнення дали можливість експериментально визначити проявлення ефекту самоагострення, а також характер його протікання. Виявлено, що при цьому суттєвим є співвідношення відносної зносостійкості матеріалу робочих поверхонь РЕ, тобто при абразивному зношенні співвідношення їх твердостей та зношувальної здатності ґрунтів і геометричних параметрів РЕ.

### Література

1. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М.: Гостехтеориздат, 1954. – 275 с.
2. Баловнев В.И. Новые методы расчета сопротивлений резанию грунтов / В.И. Баловнев. – М.: Росвузиздат, 1963. – 96 с.
3. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин: учебное пособие / В.И. Баловнев. – М.: Машиностроение, 1994. – 432 с.
4. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А.Н. Зеленин. – М.: Машиностроение, 1968. – 375 с.
5. Ветров Ю.А. Расчёты сил резания и копания грунтов / Ю.А. Ветров. – К.: Изд-во Киевского университета, 1965. – 167 с.
6. Винокуров В.Н. Повышение износостойкости культиваторных лап путем обеспечения их самозатачивания / В.Н. Винокуров // Повышение надежности и долговечности сельскохозяйственных машин : сб. науч. тр. – М., 1964. – С. 369–375.
7. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – К.: Техника, 1970. – 396 с.
8. Волошко Н.И. К методике проектирования многослойных лезвий / Н.И. Волошко // Научный вестник Луганского национального аграрного университета. Серия «Технические науки». – Луганск: Вид-во ЛНАУ. – 2009. – №3. – С. 81–83.
9. Черновол М.І. Напружений стан різальних елементів деталей ґрунтообробних машин в процесі взаємодії з абразивним середовищем / М.І Черновол, В.В. Аулін, В.М. Бобрицький // Вісник інженерної академії України. – 2007. – №3–4. – С. 256–261.

Рецензент: М.Д. Каслін, професор, к.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 12 червня 2012 р.