

Ю. Г. Сухенко, д-р техн. наук, проф.,  
В. Ю. Сухенко, канд. техн. наук, доц.

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МОЛОТКІВ ПОДРІБНЮВАЧІВ ЗЕРНА

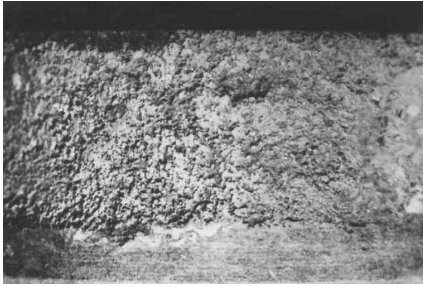
Національний університет біоресурсів і природокористування України,  
[suhenko@ukr.net](mailto:suhenko@ukr.net)

*Установлено, що досліджені самофлюсовані тверді сплави ПГ-СР4 і ПГ-10Н-01 підвищують зносостійкість молотків дробарок в 4,5 разу, а також те, що евтектичні сплави ФМІ не поступаються сплавам ПГ-СР4 і ПГ-10Н-01 за ударно-абразивною зносостійкістю, а їх вартість значно менша. На використання самофлюсованих покриттів суттєво впливає правильно вибраний режим оплавлення. Найвища зносостійкість сплаву ПГ-10Н-01 досягалась за температури оплавлення 1060 °С.*

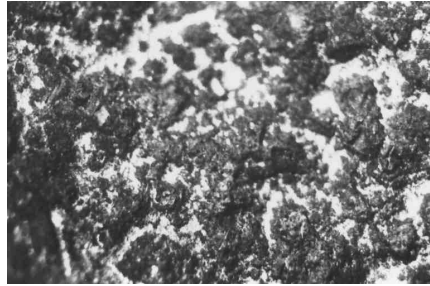
**Постановка завдання.** У переробних і харчових галузях агропромислового комплексу (АПК) експлуатується велика кількість подрібнювачів (ДДМ, ДКМ-5, МД-300, МД-600, ДБ-5 та ін.), які застосовуються для подрібнення картоплі, солоду, зерна. Їх надійність і довговічність безпосередньо залежить від ударно-абразивної зносостійкості окремих деталей.

У працях [1; 2] показано, що сила удару молотка по зерну пшениці становить 1–2 Н. За продуктивності млина МД-300, що становить 160 кг/год, його молотки за одну годину отримують близько 5 млн ударів, а для млина МД-600 – до 40 млн ударів. Тому для таких деталей характерне ударно-абразивне втомлювальне зношування (рис. 1).

Найчастіше на переробних підприємствах АПК молотки виготовляють із випадково взятих сталей Ст2, Ст3, Ст5 і використовують без термообробки. А тому їх зносостійкість у декілька разів менша, ніж могла б бути у разі використання належних матеріалів. Г.О. Прейс відзначав, що для виготовлення молотків доцільно застосовувати сталь 30 ХГСА і загартовувати їх з використанням струмів надвисокої частоти [1], які дозволяють отримати тверду поверхню деталей на конструкційно міцній матриці. Разом з тим перелік перспективних сталей зазвичай не обмежується сталями типу 30ХГСА.



×2



×20

Рис. 1. Утомне зношування поверхні  
молотка подрібнювача МД-300

З урахуванням ударного характеру навантаження цих деталей доцільно було б випробувати молотки з пружинної сталі 65Г. Цю сталь спеціально створювалась для експлуатації в подібних умовах і має добрі демпфірувальні властивості. За останній період промисловість також освоїла випуск евтектичних та самофлюсованих порошкових сплавів для газотермічного зміцнення деталей машин, які після нанесення поєднують у собі високу твердість, пластичність та конструкційну міцність [3–6]. А тому доцільно застосовувати ці матеріали для підвищення зносостійкості молотків.

**Мета роботи.** Визначити найменш зносостійкі деталі молоткового подрібнювача, дослідити процес їх зношування і причину низької зносостійкості та запропонувати дієві способи підвищення довговічності деталей, які працюють в умовах ударно-абразивного втомлювального зношування.

**Методика досліджень.** В основу аналізу і нормування показників надійності та зносостійкості деталей подрібнювачів типу ДДМ було покладено поелементне оцінювання за схемою «деталь – спряження – вузол – агрегат – подрібнювач». У процесі поелементного оцінювання виявлено деталі з низьким ресурсом, які визначають надійність і довговічність молоткового млина в цілому. Для отримання первинної інформації були організовані опорні пункти на трьох комбикормових заводах. Термін спостережень за шістьма млинами – міжремонтний період.

Після випробувань проводили дослідження топографії, хімічного складу і структури поверхонь молотків і тонких приповерхневих

шарів металу методами оптичної (Neofot-21) та електронно-растрової (Jamp-10S) мікроскопії. Для металографічних досліджень поверхневих шарів молотків виготовлялись косі мікрошліфи.

Оже-спектральні дослідження проводились на оже-спектрометрі Jamp-10S. Перед початком досліджень проводилось дослідження зразка на ультразвуковому диспергаторі послідовно у таких середовищах: суміші бензолу (ГОСТ 5955–68) з толуолом (ГОСТ 5789–69), нагрітію до 80 °С, ацетоні (ГОСТ 2603–69) та спирті етиловому (ГОСТ 5962–67). Термін очищення – 15 хв у кожному розчиннику. Дослідження зношеної поверхні проводили за прискорювальної напруги 10 кВ, струму первинного електронного пучка близько 5000 А, діаметра електронного зонда від 25 нм до 50 мкм, напруги на каналотроні – 2,5 кВ, напруги модуляції – 5 еВ і вакууму не меншому за  $2 \cdot 10^{-6}$  Па.

З метою визначення розподілу елементів на глибині від поверхні зразка проводилось пошарове стравлювання іонами аргону за прискорювальної напруги 3 кВ, струму на катоді 30 мА та діаметра іонного зонда сканувальної гармати 50 мкм. Здатність спектрального методу для визначення концентрації досліджуваного елемента була на рівні 0,2%. Реєстрація та обробка даних проводились на мікрокомп'ютері типу LSI 11-23, який входить до складу виміральної системи і працює за програмою виготовлювача (Японія).

**Результати досліджень.** Середню частоту відмов подрібнювачів через низьку зносостійкість за групами деталей подано на рис. 2. Очевидно, що найменш надійними є молотки і сита, на які припадає близько 75–80% відмов зерноподрібнювачів. Середнє напрацювання сит до відмови становить 556 год, а молотків – 579 год. Ці деталі працюють в умовах ударно-абразивного зношування і на їх поверхні розвиваються втомлювальні процеси. Завдяки цьому, наприклад, молотки доводиться замінювати через 5 – 10 днів експлуатації (залежно від марки сталі, вибраної для виготовлення та способу її термообробки).

Дослідження рельєфу і елементного складу поверхонь тертя зерноподрібнювачів зі сталі 65Г показали, що провідним видом їх спрацювання є механохімічна форма ударно-абразивного зношування (рис. 3). Експериментально встановлено, що в процесі експлуатації обладнання відбувається деформаційне активування по-

верхневих шарів деталей, миттєва взаємодія з робочим середовищем з утворенням нових фаз (вторинних структур) та їх наступне руйнування. Деформаційні й окиснювальні процеси, що відбуваються в зоні динамічного контакту зі зернами пшениці, в результаті дії абразивних частинок інтенсифікуються.

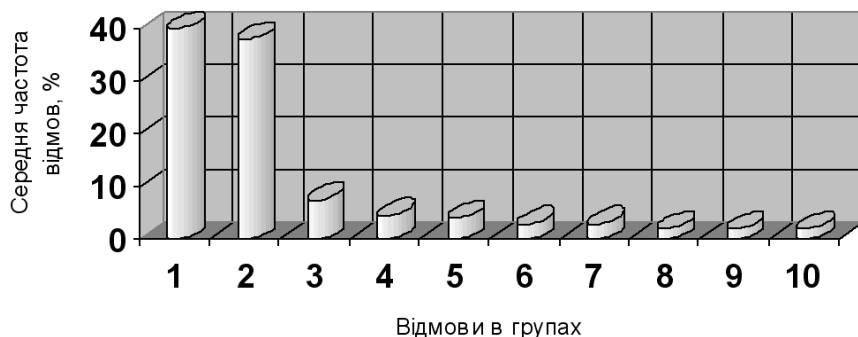


Рис. 2. Середня частота відмов елементів зерноподрібнювачів за групами деталей: 1 – молотків; 2 – сит; 3 – муфт; 4 – електродвигунів; 5 – пружин; 6 – автоматичних блокувальних пристроїв; 7 – дек; 8 – підшипників; 9 – скріплювальних деталей; 10 – інших елементів (шиберів, ушлілень тощо)

Деформаційне активування поверхневих шарів молотків, миттєва взаємодія з активними елементами середовища, окиснення з утворенням вторинних структур у сукупності призводять до їх інтенсивного руйнування.

Результати оже-спектрального аналізу свідчать про важливу роль окиснювальних процесів у формуванні структури поверхонь тертя молотків. Ударно-абразивна взаємодія зерна з молотками спонукає до утворення на металевій поверхні деталей подрібнювача двох ділянок, які розрізняються вмістом заліза, кисню, вуглецю та кремнію (рис. 3). Ділянка, яка розміщена на поверхні ( $l = \text{min}$ ), характеризує склад нової трансформованої поверхневої фази, що відрізняється від елементного складу основного металу ( $l = 0,8\text{--}1 \text{ мкм}$ ). Глибина зміненого і окисненого шару – близько  $0,3\text{--}0,5 \text{ мкм}$ . Хімічний склад вторинної структури характеризується підвищеним умістом кисню (15–30%), а тому застосування для поверхневого зміцнення захисних газотермічних покриттів, які утворюють з киснем зносостійкі структури, може дати позитивні результати для підвищення зносостійкості.

Під час пошарового стравлювання тонких шарів металу виявилось, що максимальна кількість кисню засереджується не на самій поверхні, а на глибині близько 0,1–0,2 мкм. Це означає, що процеси руйнування тонких поверхневих шарів глибиною до 0,1 мкм відбуваються більш інтенсивно, ніж процеси їх окиснення, а тому для збільшення зносостійкості молотків доцільно максимально підвищувати їх поверхневу твердість. Отже, ударно-абразивну зносостійкість молотків можна збільшити за рахунок керування параметрами їх механічних властивостей і впливом на хімічну активність поверхневих шарів деталей.

Для збільшення довговічності молотків було реалізовано відому конструкторську ідею, яка передбачає виготовлення частини деталі з вуглецевої або малолегованої сталі, що задовольняє потреби конструкційної міцності, а стійкості в контакті з перероблюваним продуктом забезпечити сформованим спеціальним шаром, який можна оптимізувати за складом і структурою використанням газотермічних покриттів, нанесених із підібраної суміші порошків.

Процес утомлювального руйнування молотків можна розглядати як результат поширення ударних імпульсів зернового потоку. Хвильовий імпульс, поширюючись у металі, частково розсіюється і відбивається від дефектів кристалічної ґратки. Такі імпульси формують зони локального енергетично напруженого стану, достатнього для утворення втомлювальних тріщин. Тому збільшення зносостійкості можна досягнути, унеможлививши утворення локальних енергетично напружених зон у металі завдяки штучному зниженню імпульсу в процесі його поширення в глибину молотка. Інакше кажучи, треба зменшити швидкість пластичної деформації до швидкості пружної і таким чином розсіювати імпульс в тілі робочого органа подрібнювача. Для цього можна використовувати правило позитивного градієнта [3] зміни властивостей поверхні деталі, відоме в триботехніці (рис. 4).

Спосіб реалізації цього підходу полягає в такому. Якщо на сталевій поверхні отримати зносостійкий шар підвищеної твердості (*a*) завтовшки (*d*), який буде виконувати роль демпфера, то для найшвидшої релаксації контактних напружень у зоні (*a*) підповерхневий шар (*e*) має плавно знижувати механічні властивості аж до рівня використаної сталі (*c*). Відсутність великого градієнта властивостей у перехідній зоні (мале значення кута  $\beta$ ) є запорукою високої

стійкості деталі в умовах полідеформаційного ударного навантаження. Такі зміцнювальні шари можна отримати за рахунок газотермічного напилення прошарку й основного покриття та наступного їх оплавлення з використанням напилювачів Могул-У9С та Євроджет-ХС виробництва заводу Інтерфакел.

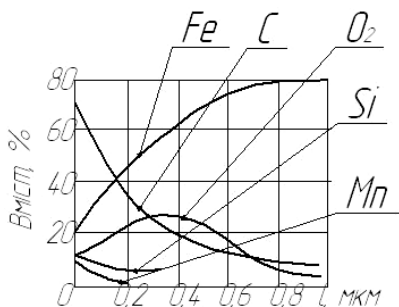


Рис. 3. Результати оже-спектрального аналізу розподілу елементів у поверхневому шарі молотка зі сталі 65Г після випробувань протягом 1 год

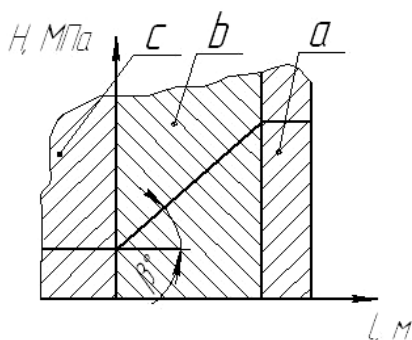


Рис. 4. Схема композиційного захисту поверхні молотка: *a* – зона підвищеної твердості; *b* – приповерхневий шар деталі; *c* – основний метал;  $\beta$  – кут, що характеризує інтенсивність зміни твердості по товщині зони зміцнення

Установлено, що евтектичні газотермічні покриття системи Fe–Mn–C–B, розроблені в Фізико-механічному інституті НАН України, мають достатню твердість і високу пластичність [4–6].

Це пояснюється наявністю в структурі покриття пластичної матричної фази (легований перліт або аустеніт, армований марганцевокислим карбідом заліза  $Fe_{0,4}Mn_{3,6}C$ ) і наявністю дисперсних карбідів металів типу  $Cr_7C_3$ ,  $Fe_3C$  і бориду  $Fe_2B$ . Тому для зміцнення молотків зерноподрібнювачів були використані наплавки сплавом ФМІ-1 (фазовий склад  $\alpha\text{-Fe} + Fe_{0,4}Mn_{3,6}C + Fe_3C + Fe_2B$ ), а також застосовані кремнієвмісні наплавлювані сплави і широковідомі самофлюсові тверді сплави типу ПГ-СР4 та ПГ-10Н-01 системи Ni–Cr–B–Si.

**Висновки.** Кращі результати були отримані з використанням самофлюсованих твердих сплавів ПГ-СР4 і ПГ-10Н-01; зносостійкість молотків підвищилась у 4,5 разу. Евтектичні сплави ФМІ майже не поступались сплавам ПГ-СР4 і ПГ-10Н-01 за ударно-

абразивною зносостійкістю, але їх вартість значно менша, тому їх також можна рекомендувати для застосування.

Для застосування евтектичних і самофлюсованих сплавів дуже важливо правильно вибрати режим їх оплавлення. Так, найвища зносостійкість сплаву ПГ-10Н-01 досягалась за температури оплавлення 1060 °С. У разі недооплавлення покриття можливе виникнення втомних тріщин як у самому покритті, так і на межах його зчеплення з тілом молотка внаслідок поширення і відбиття ударних хвиль від основи.

### Список літератури

1. *Прейс Г.А.* Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности./ Прейс Г.А., Сологуб Н.А., Некоз А.И. // – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.
2. *Сухенко Ю.Г.* Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості./ Сухенко Ю.Г., Некоз О.І., Стечишин М.С.// –К.: Елерон, 1993. –107 с.
3. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. –М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
4. *Голубец В.М.* О характере разрушения эвтектических покрытий на основе железа при ударных нагрузках / Голубец В.М., Зима Ю.В., Пашечко М.И. // Физико-химическая механика материалов. – 1987. –№ 4. –С. 101–102.
5. *Хрупкость эвтектических покрытий при деформации царапанием* / Голубец В.М., Пурич Е.И., Пашечко М.И. и др. // Физико-химическая механика материалов. – 1984. – № 5. –С. 123–124.
6. *Кіндрачук М.В.* Напружено-деформований стан та трибологічна оцінка евтектичних покриттів / Кіндрачук М.В., Дудка О.І., Сухенко Ю.Г. // Пр. III Міжнар. симпозіуму укр. інженерів-механіків. – Л.: Львівська політехніка. – 1997. – С. 216–217.

УДК 663/664:621.891

*Сухенко Ю.Г., Сухенко В.Ю.* **Обеспечение износостойкости молотков измельчителей зерна** // Проблемы тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2009. – Вип. 52. – С.234–241. Установлено, що досліджані самфлюсуємі тверді сплави ПГ-СР4 і ПГ-10Н-01 підвищують зносостійкість молотков дробилок в 4,5 рази, а також те, що евтектичні сплави ФМІ не уступали сплавам ПГ-СР4 і ПГ-10Н-01 по ударно-абразивній зносостійкості. Суттєвний вплив при використанні самфлюсуємих покриттів має правильно вибраний режим оплавлення. Найвища зносостійкість сплаву ПГ-10Н-01 досягалась при температурі оплавлення 1060 °С.

Рис.: 4, список лит.: 6 найм.

### **Providing of wearproofness of hammers of grindings down of grain**

It is set that the investigational independently of gumboils carboloies of PG-SR4 and PG-10N-01 promote wearproofness of hammers of crushers in 4,5 time, and also that the eutecticum alloys of FMI practically did not yield to the alloys of PG-SR4 and PG-10N-01 on shock abrasive firmness and their cost considerably below. Substantial influence at the use independently of gumboils of coverages has the correctly chosen mode of melting. The greatest wearproofness of alloy of PG-10N-01 was arrived at at the temperature of melting of 1060°C.

Стаття надійшла до редакції 12.10.09.