

О.М. Пилипенко, д.т.н., проф.

Черкаський державний технологічний університет

МІНІМІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ ПРИ РІЗАННІ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА АВТОДЕТАЛЯХ

Механічна обробка автодеталей шатунно-поршневої групи з газотермічними покриттями суттєво ускладнюється через їх структурну дефектність. Комбіноване різання з примусовими високочастотними коливаннями покращує оброблюваність покриттів, і мінімізація енергетичних витрат є обов'язковим елементом технологічної операції.

Постановка проблеми у загальному вигляді та аналіз існуючих робіт. Рівень енергетичних витрат при знятті дефектного поверхневого шару зносостійких газотермічних покриттів є залежним від їх структурної побудови. Нормальні і дотичні напруження в площині зсуву в 2,5–3,0 рази менші, ніж у гомогенних матеріалів аналогічного хімічного складу [1], [2].

Оцінюючи кристалічну побудову міжчастинкової зони (МЧЗ) і межі розподілу „покриття–основа” та виключаючи з розгляду порушений простір, можна моделювати активні контактні центри як певний континуум з великокутовим розблокуванням частинок – зерен. Правомірне застосування для цього випадку класичних підходів теорії дислокацій дозволить здійснити аналітичну оцінку адгезійно-когезійних зв'язків у покриттях і розробити раціональний метод їх руйнування при механічній обробці [3], [4].

Мета роботи. Враховуючи, що більшість відновлених або зміцнених напленням автодеталей є контактними і мають високу точність та чистоту поверхні, метою роботи є розробка комбінованої технології механічної обробки. Така технологія повинна враховувати особливості структурної побудови покриттів і мінімізувати енергетичні витрати на процес стружкоутворення.

Основна частина роботи. Енергія міжчастинкової зони буде дорівнювати сумі енергій збурюючих парних зв'язків всіх атомів, віднесених до контактної площі. Тому при звичайному різанні газотермічних покриттів (ГТП) процес стружкоутворення складається з регулярного повторення двох видів пластичної деформації – стиснення і зсуву, а сили, які викликають деформації, визначаються за такими формулами:

(1)

$$P_N = \sigma \cdot l_1 \cdot b;$$

$$P_\tau = \tau \cdot l_2 \cdot b,$$

де σ, τ – нормальні та дотичні напруження; l_1, l_2 – довжина зони пластичної деформації стиснення і зсуву відповідно; b – ширина елемента стружки.

Гетерогенність покриттів обумовлює нерегулярність стиснення і зсуву, яка буде зростати зі збільшенням відношення усереднених значень τ / σ і товщини зрізаного припуску. При накладанні на процес звичайного різання примусових ультразвукових коливань досягається ефект швидкісного різання за умови перевищення вібраційної швидкості над швидкістю різання.

$$2\pi fA > \frac{\pi Dn}{1000}, \quad (2)$$

де f, A – частота і амплітуда примусових коливань; D – діаметр заготовки; n – частота обертання заготовки.

У цьому випадку відношення τ / σ і нерівномірність процесу стружкоутворення будуть зменшуватись.

Дислокації МЧЗ є її дефектами і при дії сили різання єдиною площиною руху при зсуві є сама зона. Сковзання дислокацій на межі окремих частинок призводить до пластичного зсуву однієї частинки відносно іншої. Сили і напруження зсуву по площині МЧС значно менші, ніж по площині суцільної частинки, що видно з аналізу рівняння Пайерса–Набарро.

$$\tau_{кр.} = \frac{2G}{1 - \mu} l^{-2\pi a / b(1-\mu)}, \quad (3)$$

де $\tau_{кр.}$ – критичні напруження зсуву; G – модуль зсуву; μ – коефіцієнт Пуассона; a – параметр ґратки; b – вектор Бюргерса.

Енергетична активація міжчастинкової зони акустичним опроміненням знижує модуль пружності покриття і необхідні для руйнування критичні напруження зсуву. Поглинаючи акустичну енергію і коливаючись, дислокації МЧЗ стикаються з тепловими фононами і передають їм частину своєї енергії. У площині сковзання таких дислокацій суттєво послаблюються міжатомні зв'язки, і дислокації отримують більшу

рухливість. Для самофлюсівних матеріалів покриттів квазікрихкого типу руйнація відбувається за механізмом пластичної деформації до деякого критичного стану з послідуєчим зародженням і поширенням тріщин. При організації комбінованого різання по лінії максимальних дотичних напружень за рахунок імпульсного ударного навантаження утворюється мікротріщина. Поява мікротріщин у зрізаному шарі буде локалізуватись переважно у міжчастинковій зоні. Подальший розвиток мікротріщини у напрямку дії максимального напруження вимагатиме значно менших енергетичних витрат, ніж при її зародженні.

Експериментальна частина роботи. Для оцінки енергоємності стружкоутворення при імпульсному характері різання різних типів покриттів і, особливо, на першому етапі – етапі утворення мікротріщини, була створена спеціальна установка (рис. 1).

Встановлення плоских зразків 5 з покриттям ПГ-СРЗ ТУ48-4206-156-82 товщиною 400-600 мкм здійснювалось у затискачі на мікрометричному столі 6. Траверса 2 з різцем 3 вільно падає на зразок з різної висоти, отримуючи різний запас потенційної енергії E_n . Напрявні штовки 1 забезпечують прямолінійність руху траверси і з'єднуються у своїй верхній частині планкою 8 для підтримання жорсткості установки і постійності міжцентрової відстані. В кінці ділянки падіння відбувається зустріч вершини різального леза різця з напиленим шаром дослідного зразка. На визначеному шляху руху різця відбувається стругання покриття з заданою глибиною. У цьому випадку $E_n = E_k = A$, де E_k – кінетична енергія; A – робота процесу стружкоутворення.

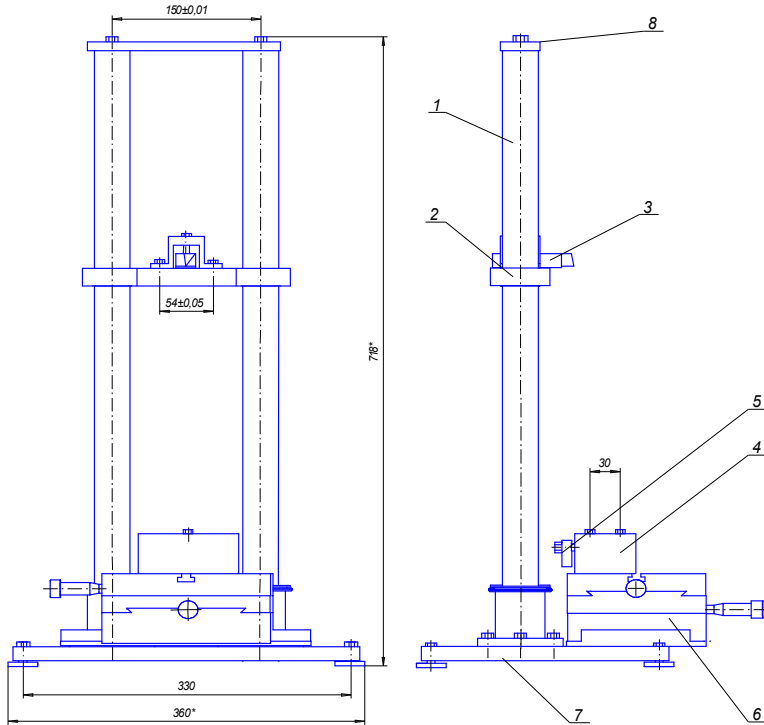


Рис. 1. Загальний вигляд установки для дослідження енергоємності лезового різання покриттів:
 1 – напрямні штоки; 2 – траверса; 3 – різець;
 4 – пристрій установки зразка;
 5 – зразок; 6 – мікрометричний стіл;
 7 – базова плита; 8 – планка

При проведенні досліджень використовувались три типи різців, оснащених пластинками з надтвердих матеріалів:

- а) композит – 01, твердість HV ГПа 76,0
 - б) композит – 10, твердість HV ГПа 74,0
 - в) киборит, твердість HV ГПа 69,0
- } [5]

З метою встановлення кореляційних зв'язків між питомою енергоємністю стружкоутворення (кінематична енергія подаючих елементів, що приходить на одиницю шляху різання $E_n = E_k / l$) і умовами різання було реалізовано повний факторний експеримент типу 2^3 . Ви-

значення величини E_n для різних умов різання і типів покриттів дозволило здійснити розрахунок і виготовити магніострикційний повід. Змінними кількісними факторами при проведенні експериментальних досліджень визначені такі:

- 1) $x_1 = t$ – глибина різання, мм з областю визначення $0,2 \div 0,3$ мм;
- 2) $x_2 = E_k$ – кінетична енергія падаючих частин в момент різання різця в дослідний зразок, Дж з областю визначення $1 \div 6$ Дж;
- 3) $x_3 = HV$ – твердість інструментального матеріалу за Вікерсом з областю визначення $69,0 \div 76,0$ ГПа.

Алгебраїчний поліном першого ступеня, як відрізок ступеневого ряду, для змінних факторів буде мати такий вигляд:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 ;$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коефіцієнти регресії математичної моделі досліджуваного процесу.

Для розрахунку коефіцієнтів рівняння регресії використовуємо метод найменших квадратів (МНК). Розрахунок здійснюємо за допомогою ЕОМ у пакеті Windows Exel (Microsoft) і отримуємо рівняння математичної моделі канонічного вигляду:

$$y = 188,64338 + 52,8314 \cdot X_1 + (-39,8541)X_2 + (-2,31862)X_3 + (-28,76)X_1 X_2 + 0,323875X_1 X_3 + 0,71837X_2 X_3 + (-0,7901)X_1 X_2 X_3. \quad (4)$$

Спростуємо рівняння (4) шляхом заміни суми членів добутками і визначення коефіцієнтів регресії здійснюємо методом логарифмування (використовується не дійсне значення відгуку, а його логарифм). В результаті розрахунку нових коефіцієнтів рівняння (4) буде мати такий вигляд:

$$E_{num} = 6,611 \cdot t^{5,8136} E_k^{-20,3913} HV^{-0,4108}. \quad (5)$$

Після перевірки однорідності дисперсії повторювальності, значимості коефіцієнтів регресії (коефіцієнт b_{12} за критерієм Стьюдента є незначимим), адекватності моделі (за критерієм Фішера математична модель є адекватною) здійснено розрахунок функціональної залежності (4) і побудовано графічні залежності питомої енергоємності від глибини різання, кінетичної енергії рухомих елементів і твердості інструментального матеріалу. На рисунках 2, 3 показані графіки функцій, побудовані за допомогою програми MathCad.

Аналіз графічної залежності $E_{пум} = f(t, E_k)$ при постійному значенні твердості інструментального матеріалу (киборит) показує, що глибина різання і кінетична енергія найбільш суттєво впливають на питому енергоємність. Так, при $t = 0,30$ мм $E_{пум}$ досягає максимального значення 308,17 Дж/м. Це пояснюється значним сумарним опором, що чинить покриття процесу руйнації від матеріалу різального інструмента, який має фіксований прямолінійний напрямку руху. Площина зсуву розташовується як по міжчастинкових зонах, так і по осердю окремих частинок. Має місце як інтеркристалітний, так і транс-кристалітний відколи. Тому незначне збільшення глибини різання суттєво підвищує енергетичні витрати на процес порушення міжатомних і когезійних зв'язків.

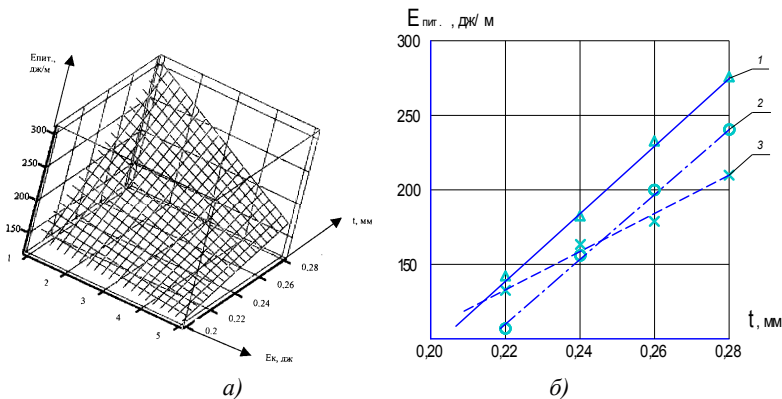


Рис. 2. Графік залежності $E_{пум} = f(t, E_k)$ при $HV = 69,0$ ГПа
 1 – $M_c = 0,08/20$; 2 – $M_c = 0,10/40$; 3 – $M_c = 0,12/60$

Значний вплив на питому енергоємність руйнування досліджуваного покриття має його структурна пошкоджуваність, яку можна оцінювати коефіцієнтом $M_c = \Pi/A$, де Π – поруватість покриття; A – зернистість напилуваного порошку. Пасивний експеримент при середньому значенні кінетичної енергії $E_k = 30$ Дж дозволив дослідити функціональну залежність $E_{пум} = f(t)$ для різного рівня структурної пошкоджуваності (рис. 2, б). Підвищення структурної пошкоджуваності покриття призводить до зменшення питомої енергоємності руйнування, що обумовлюється втратою когезійної міцності матеріалу.

Зростання кінетичної енергії різця призводить навіть до зменшення питомої енергії стружкоутворення. Це підтверджує факт квазікрихкого руйнування покриття, коли основна енергія удару витрачається на зародження мікротріщини, а її подальше зростання не вимагає великих витрат енергії. Значить частоту імпульсних рухів різця при вібротехнічному різанні (мікроударів) доцільно підвищувати в межах технічних можливостей вібратора.

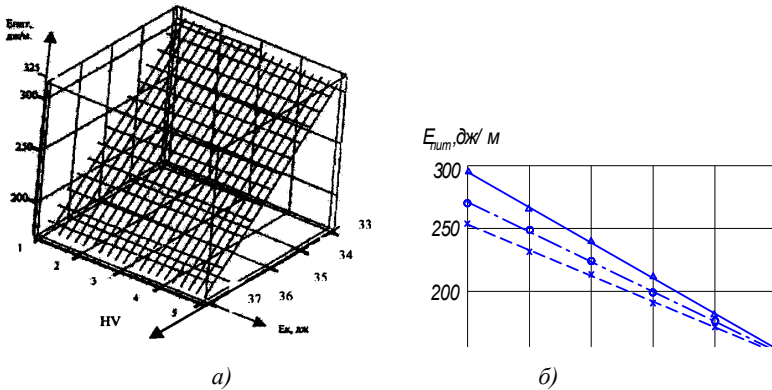


Рис. 3. Графік залежності $E_{num} = f(E_k, HV)$ при $t = 0,20$ мм
 1 – $M_c = 0,08/20$; 2 – $M_c = 0,10/40$; 3 – $M_c = 0,12/60$

На графіку рис. 3 найбільш активно впливає на питому енергоємність твердість інструментального матеріалу. З підвищенням твердості інструментального матеріалу параметр E_{num} зростає у лінійній залежності. Це пояснюється тим, що надтверді матеріали, маючи мікротвердість вищу, ніж у природного корунду (більше 20 ГПа), за співвідношенням σ_T / E належать до крихких матеріалів – матеріалів іонно-ковалентної кристалічної побудови, у яких зсув супроводжується розірванням атомних зв'язків [5]. Стикаючись при ударі з твердим неоднорідним покриттям, надтвердий матеріал за рахунок значно вищого модуля пружності (720÷850 ГПа у порівнянні з 30÷35 ГПа) матеріалу покриття швидко поглинає енергію удару і довжина шляху різання скорочується. З одного боку, імпульсний характер навантаження знижує втомну міцність інструментального матеріалу, а з іншого, – завдяки високій пружності енергія удару спрямовується на руйнацію мікрооб'ємів покриття.

Підвищення рівня пошкоджуваності покриття (M_c) призводить до зменшення контактної жорсткості його поверхневого шару при пруж-

но-пластичному ударі інструмента. Дисипація механічної енергії відбувається через перехід матеріалу покриття у квазіпружний стан.

Висновки. Дослідження дозволили оцінити оптимальну величину енергетичних витрат при руйнації самофлюсівних покриттів, ПГ-СРЗ які використовуються для зміцнення автодеталей шатунно-поршневої групи, і призначити відповідні параметри магнітострикційного повода. Частотний діапазон примусових височастотних коливань визначається з умов перевищення вібраційної швидкості над швидкістю різання. Верхня межа частотного діапазону не повинна перевищувати 25 кГц, оскільки це ускладнить технологію виготовлення магнітостриктора і збільшить його потужність [6]. Більш ефективним є зменшення швидкості різання, оскільки частота обертання заготовки при такій організації різання виконує функцію кругової подачі.

В результаті проведених досліджень питомої енергоємності стружкоутворення зафіксовано, що для самофлюсівного покриття ПГ-СРЗ при ударній дії різця в момент його зустрічі з досліджуваним матеріалом відбувається зсув відокремленого елемента стружки. Розміри утворених елементів стружки визначаються розмірами окремих частинок покриття або їх конгломератів. З графіків видно, що при малих значеннях E_k величина питомої енергоємності збільшується. Такий процес руйнування матеріалу ГТП є неефективним. Оптимальна енергія одного імпульса визначається розмірами частинок, що напилюються, загальною площею активних центрів з утвореними зв'язками і поруватістю покриття. Якщо перевищити оптимальне значення енергії руйнування, то таке перевищення буде використовуватись без користі. Дослідження глибини різання на параметр E_{num} показують, що він зменшується при обробці з товщиною зрізу, кратною з амплітудою коливань і середніми розмірами напилюваних частинок. Саме у цьому випадку імпульсна енергія вібратора забезпечить ефективність протікання двох етапів стружкоутворення – зародження розвиненої мікротрищини і зсуву.

При конструюванні і виготовленні вібратора для вібромеханічної обробки покриттів з подібними механічними властивостями необхідно приймати амплітудне значення вібромеханічних коливань в межах 5÷10 мкм, і частоту в межах 18÷20 кгц, а розрахункову потужність магнітостриктора 100÷120 Вт, що відповідає значенням питомої енергоємності руйнування покриттів досліджуваного класу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Клименко С.А.* Особенности обработки защитных покрытий // Сверхтвердые материалы. – 1998. – № 3. – С. 44 – 55.
2. *Пилипенко О.М.* Вібраційна обробка газотермічних покриттів. – Черкаси: Сіяч, 2000. – 203 с.
3. *Екабори Т.* Научные основы прочности и разрушения металлов. – Киев: Наук. думка 1978. – 364 с.
4. *Старков В.К.* Дислокационное представление о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1979. – 280 с.
5. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова. – Киев: ИСМ НАНУ, 2001. – 528 с.
6. *Кумабэ Д.* Вибрационное резание. – М.: Машиностроение, 1985. – 425 с.

ПИЛИПЕНКО Олександр Михайлович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобілів та технологій їх експлуатації Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- зміцнення та реновація автодеталей;
- комбінована обробка газотермічних покриттів.

Тел.: (0472) 422-183

Подано 12.03.2005

Пилипенко О.М. Мінімізація енергетичних витрат при різанні зносостійких покриттів на автодеталях

Пилипенко А.М. Минимизация энергетических затрат при резании износостойких покрытий на автодеталях

Pylypenko A.M. The minimization of energy expenses at cutting of wear resistance coatings on autodetails

УДК 621.941

Мінімізація енергетичних витрат при різанні зносостійких покриттів на автодеталях / О.М. Пилипенко

Механічна обробка автодеталей шатунно-поршневої групи з газотермічними покриттями суттєво ускладнюється через їх структурну дефектність. Комбіноване різання з примусовими високочастотними коливаннями покращує оброблюваність покриттів, і мінімізація енергетичних витрат є обов'язковим елементом технологічної операції.

УДК 621.941

Минимизация энергетических затрат при резании износостойких покрытий на автодеталях / А.М. Пилипенко

Механическая обработка автодеталей шатунно-поршневой группы с газотермическими покрытиями существенно усложняется из-за их структурной дефектности. Комбинированное резание с принудительными высокочастотными колебаниями улучшает обрабатываемость покрытий и минимизация энергетических затрат при этом является обязательным элементом технологической операции.

УДК 621.941

The minimization of energy expenses at cutting of wear resistance coatings on autodetails / A.M. Pylypenko

The mechanical machining of autodetails of connecting rod-piston group with gas thermal coatings is complicated to a great extent because of their structural defectness. The compined cutting with forced high-frequency oscillations improves coatings machining and the minimization of energy expenses during this process is a compulsory element of technological operation.