

В.О. Коновалов, к.т.н., с.н.с.

О.У. Петасюк, пров. інж.

В.В. Шатохін, м.н.с.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ЗАКРІПЛЕННЯ АЛМАЗНОГО ЗЕРНА У ЗВ'ЯЗЦІ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Розроблено методику та проведено експериментальні дослідження міцності закріплення алмазного зерна у зв'язці в умовах циклічного навантаження на спеціально створеній установці. Отримано втомленісні криві, які дозволяють оцінити циклічну міцність – фізичну межу витривалості матеріалу зв'язки. Встановлено, що точка перетину похилої і горизонтальної ділянок побудованих кривих набуває критеріального значення як одного з основних показників міцності закріплення зерна у зв'язці, а відношення відносної глибини закріплення зерна до кількості циклів навантаження, визначене координатами точки їх перетину, дозволяє прогнозувати швидкість зношування алмаза в інструменті.

Вступ. Робота алмазно-абразивного інструмента в режимі самозаточування забезпечує стабільні різальні властивості протягом усього часу експлуатації та виключає періодичну правку робочої поверхні алмазмісного шару з метою відновлення її різальної здатності [1]. Тому при формуванні робочого шару важливо дотримуватися відповідності міцності зерна й утримуючої здатності зв'язки, а також швидкостей зношування зерен і зв'язки [2]. Для цього необхідно чітко уявляти умови навантаження зерна в процесі шліфування і механізм передачі навантаження на утримуючу його матрицю-зв'язку.

До останнього часу вважалось [3, 4], що алмазне зерно робить корисну роботу до моменту досягнення деякої критичної глибини закріплення під впливом тангенціальної складової сили опору різанню, після чого видаляється із зв'язки шляхом руйнування бічної стінки лунки. На цьому принципі побудований метод визначення утримуючої здатності зв'язки при статичному тангенціальному навантаженні зерна.

У той же час багато дослідників процесів алмазно-абразивної обробки [3, 5] фіксували у відпрацьованому шламі розмір алмазних зерен, що випали, у напрямку їхнього зношування близько 0,7–0,9 від вихідного. Це свідчить про те, що зерна видалялися із зв'язки при глибині закріплення більше половини зерна, що зробити при статичному навантаженні практично неможливо. Отже існує інше уявлення про механізм реактивного впливу оброблюваного матеріалу на зерно і передачі його на зв'язку.

Метою роботи є оцінка впливу міцності закріплення одиничного алмазного зерна на його стійкість на основі визначення витривалості металічної зв'язки при циклічному навантаженні.

Викладення основного матеріалу. У реальному процесі шліфування алмазне зерно піддається ударному динамічному навантаженню з частотою 30–80 с⁻¹. Період стійкості зерна в робочому шарі інструмента визначається сотнями тисяч циклів. Тому варто припустити втомленісний механізм руйнування (пластичного деформування) зв'язки при циклічному навантаженні алмазного зерна.

Дійсно, швидкість зношування одиничного алмазного зерна, яка при роботі в режимі самозаточування приблизно дорівнює швидкості зношування всього робочого шару, можна визначити як відношення величини ефективно використаної частини зерна (за нормаллю до робочої поверхні) до періоду його стійкості:

$$v_l = \frac{\eta \cdot d}{T_3} \quad (1)$$

Оскільки період стійкості адекватний кількості циклів навантаження:

$$T_3 = N_{\max} \frac{\pi \cdot D}{V}, \text{ то} \quad (2)$$

$$v_l = \frac{\eta}{N_{\max}} \cdot \frac{d \cdot V}{\pi \cdot D} \quad (3)$$

де d – розмір (діаметр) зерна;

D – діаметр круга;

V – колова швидкість круга;

η – коефіцієнт використання алмазу;

N_{\max} – максимальна кількість циклів навантаження зерна.

З отриманої формули (3) можна зробити висновок, що за інших рівних умов швидкість зношування алмазу в інструменті залежить від співвідношення $\frac{\eta}{N_{\max}}$.

Аналіз роботи алмазно-абразивного інструменту показує, що одиначне зерно піддається багаторазовому навантаженню з частотою обертання інструменту. Тобто має місце пульсуючий цикл навантаження [6], коли $\sigma_{\min} = 0$ і коефіцієнт асиметрії циклу $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0$.

Таким чином, здатність зв'язки утримувати алмазні зерна значною мірою буде визначатися втомленісною кривою, отриманою в умовах квазістаціонарного пульсуючого навантаження. Ця крива дозволяє оцінити циклічну міцність – фізичну границю витривалості матеріалу зв'язки.

Оцінка втомленісної міцності матеріалу є досить трудомістким завданням, пов'язаним з великою тривалістю експериментів і великим розкидом експериментальних точок [7]. Це залежить від умов проведення експерименту, форми і розмірів зразка, наявності концентраторів напруг, масштабного фактору та ін.

Незважаючи на перераховані недоліки, метод втомленісних випробувань найбільш близько відповідає навантаженню алмазного зерна і утримуючої його зв'язки в процесі шліфування. Тому його доцільно використовувати як основу при розробці методики визначення міцності закріплення алмазного зерна в умовах циклічного навантаження.

Для експериментального дослідження міцності закріплення алмазного зерна у зв'язці при динамічному навантаженні розроблена установка, принцип дії якої ґрунтується на прикладанні до закріпленого у зв'язці алмазного зерна пульсуючого навантаження та визначенні кількості циклів навантаження до виривання зерна із зв'язки (рис. 1).

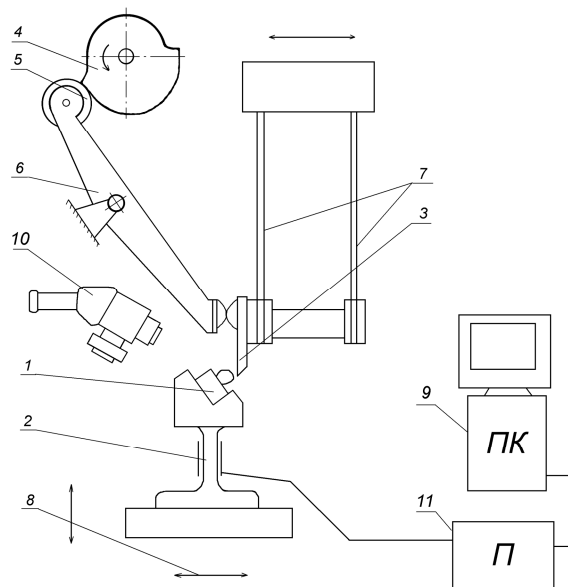


Рис. 1. Блок-схема установки для визначення алмазоутримання в циклічному режимі навантаження зерна

Зразок 1, у вигляді паралелепіпеда, на одній із граней якого за діючою технологією закріплені алмазні зерна, встановлюється в динамометрі 2 і за допомогою механізму подач 8 орієнтується відносно індентора 3. Частота навантаження задається обертанням кулачка 4 і через важіль 6 з роликком 5 передається на пружний елемент 7. Сигнал з динамометра передається на підсилювач 11. Посилений сигнал подається на інтерфейсну плату збору й обробки аналогової інформації, яка встановлена в комп'ютері 9. Спеціально розроблена програма дає можливість обробити отримані дані за допомогою комп'ютера.

Тарировка динамометра проводилася методом вільного падіння кульки. Побудова графіка тарировки за значеннями сили удару сталевих кульок різної маси та відповідним їм значенням висоти імпульсу дає можливість задати необхідне значення динамічної сили в режимі настроювання, що створюється механізмом подач при візуальному контролі за допомогою монітора і камери, встановленої на мікроскопі 10.

Момент виривання зерна із зв'язки фіксується зупинкою процесу навантаження за допомогою спеціально розробленого механізму. Кількість циклів навантаження зерна до моменту виривання

визначається спеціальним пристроєм, а глибина закріплення зерна – вимірюванням глибини лунки після виривання зерна за допомогою мікронної індикаторної головки ІГМ-1.

Таким чином, у процесі експерименту визначаються кількість циклів навантаження до руйнування N і глибина закріплення зерна h_3 .

Первинною кривою є залежність $N = f(h_3)$ або $N = f(\varepsilon)$, де ε – відносна глибина закріплення зерна, що являє собою відношення глибини закріплення до розміру зерна. На рис. 2 наведена первинна експериментальна залежність $N = f(\varepsilon)$ при циклічному навантаженні силою 16 Н алмазних зерен АС125 500/400, закріплених у металічній зв'язці марки М6-14.

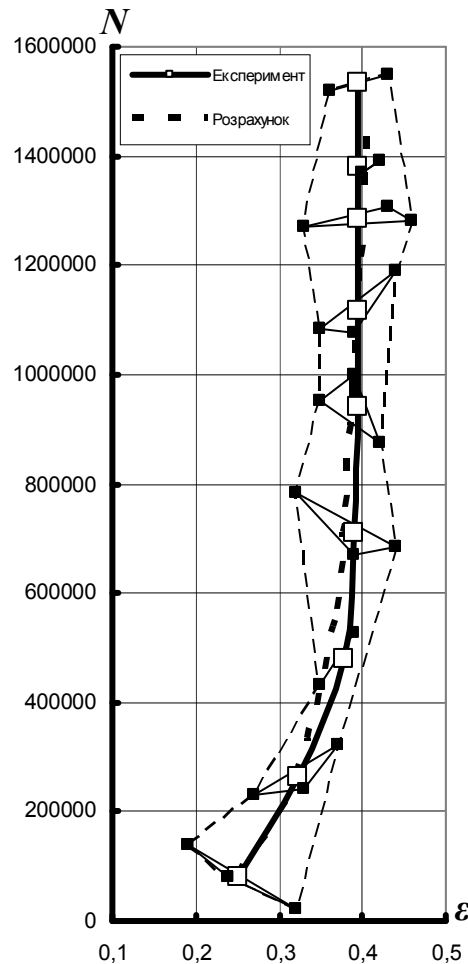


Рис. 2. Вплив відносної глибини закріплення зерна на його стійкість до випадання зі зв'язки

Поле з 24 експериментальних точок отримано шляхом тривалих випробувань, де кожному експерименту в середньому відповідає близько 800000 імпульсів тривалістю більше 10 годин. Наведена залежність побудована за середнім значенням, отриманим геометричним усередненням.

Вірогідність геометричного усереднення отриманих експериментальних даних була перевірена розробленими в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України алгоритмом і комп'ютерною програмною системою багатоваріантної побудови й аналізу емпіричних математичних моделей [8].

З більш ніж 30000 проаналізованих можливих варіантів отримана найбільш адекватна математична модель для обчислення кількості циклів навантаження залежно від глибини закріплення зерна. Емпірична формула має вигляд:

$$N = 1470 - \frac{485,47}{\varepsilon^{2,75}} + \frac{202,65}{\varepsilon^{3,5}} - \frac{1,33}{\varepsilon^6}. \quad (4)$$

Математична модель має такі показники середньоквадратичного відхилення:

- абсолютне значення $S_a = 10,257\%$;
- відносне значення $S_o = 9,541\%$;
- максимальне значення $S_{\max} = 20,748\%$.

Рівень ризику при 5%-ному припустимому відхиленні становить 33,33%.

Для оцінки витривалості матеріалу зв'язки необхідно побудувати залежність $\sigma = f(N)$, тобто визначити напруження, які виникають в результаті динамічної дії алмазного зерна на зв'язку. На рис. 3 зображена фізична модель одиначної системи зерно-зв'язка, де алмазне зерно, схематизоване рівновеликою за об'ємом кулею, навантажене динамічною силою P під кутом θ , що відповідає куту нахилу рівнодіючої сил мікрорізання при шліфуванні. Зерно передає на зв'язку квазіпостійне циклічне навантаження із частотою обертання шліфувального круга, створюючи контактне напруження, яке чисельно визначається як відношення діючої сили до площі проекції контактної поверхні.

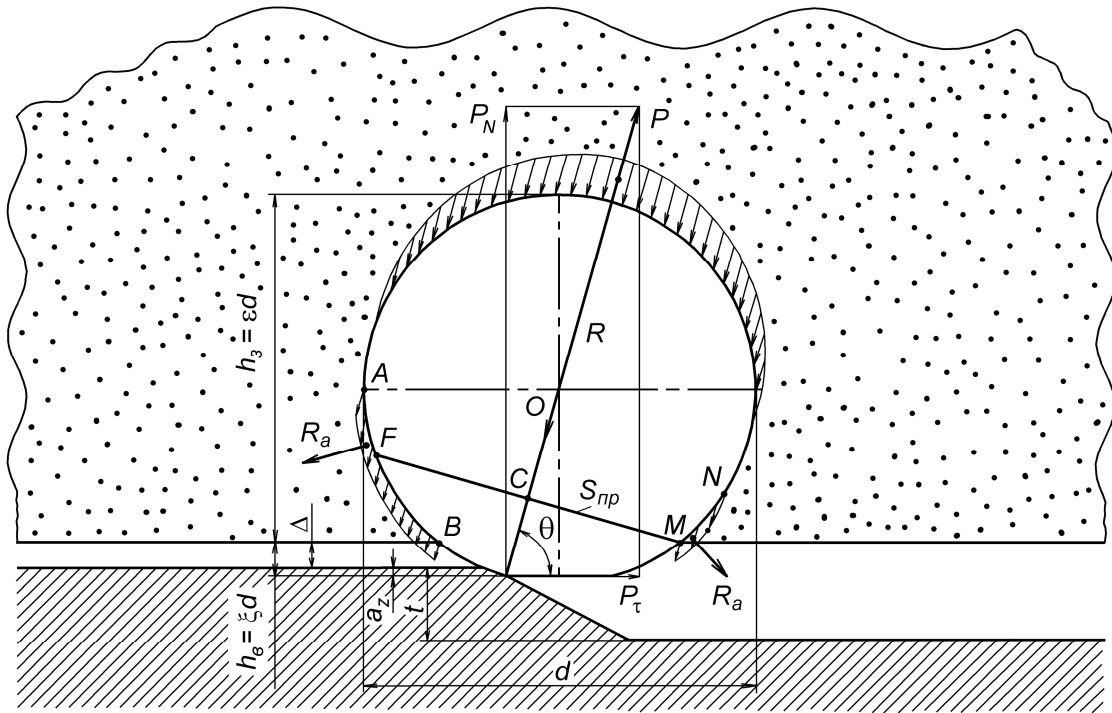


Рис. 3. Модель навантаження одиначної системи зерно-зв'язка

Зазначена площа змінюється залежно від глибини закріплення зерна у відповідності до формули:

$$S_{np} = \frac{\pi d^2}{4} \sin^2 [\theta + \arcsin(2\varepsilon - 1)], \tag{5}$$

де d – діаметр алмазного зерна;

θ – кут дії прикладеної сили.

Слід зазначити, що контактна площа, яка сприймає навантаження в напрямку дії сили P , максимально може зростати до розміру площі напівсфери діаметром d , проекція якої дорівнює $\frac{\pi d^2}{4}$.

У результаті обчислення експериментальних даних у відповідності до описаної моделі можна одержати залежність $\sigma = f(N)$, наведену на рис. 4.

σ

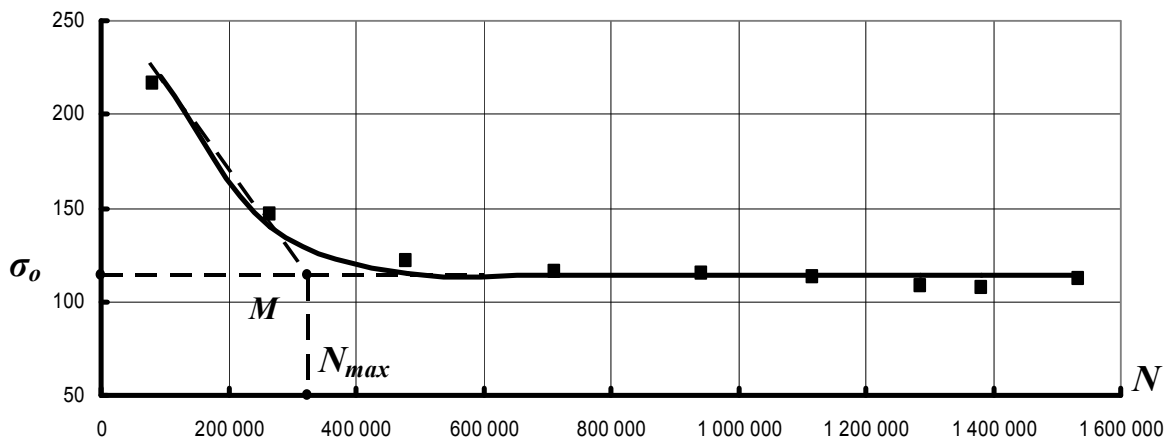


Рис. 4. Залежність міцності закріплення алмазного зерна від кількості циклів навантаження

Горизонтальна ділянка кривої відповідає "мікрограниці" витривалості матеріалу зв'язки. Іншими словами, при значеннях $\sigma < \sigma_0$ слід очікувати опір зв'язки дуже великої кількості циклів навантаження зерна ($n \cdot 10^6$), що може призвести до втрати різальної здатності інструмента через відсутність самозаточування.

Таким чином, для забезпечення роботи в режимі самозаточування необхідно створювати у зв'язці напруження, що перевищують σ_0 , тобто робочою є похила ділянка кривої $\sigma = f(N)$. У зв'язку з цим точка перетину похилої і горизонтальної ділянок M набуває критеріального значення як одного з основних показників міцності закріплення зерна у зв'язці. До того ж, їй відповідає максимальне число циклів навантаження, яке вимірюється декількома сотнями тисяч, що набагато менше можливої стійкості зерна. Це пояснює наявність у шлами залишків зерен розміром 0,7–0,9 від вихідного а також низьку ефективність використання алмаза в шліфувальному крузі у порівнянні з різанням одиничним зерном [9].

Якщо повернутися до вихідного експериментального графіка (рис. 2), то описана вище точка перетину ділянок кривої $\sigma_0 = f(N)$ буде відповідати аналогічній точці перетину ділянок кривої $N = f(\varepsilon)$, яка визначається координатами $\varepsilon_{кр}$ та N_{max} – критичною відносною глибиною закріплення зерна та максимальною кількістю циклів навантаження (роботи).

Оскільки коефіцієнт ефективного використання зерна в інструменті визначається за формулою:

$$\eta = 1 - \varepsilon_{кр} - \xi, \tag{6}$$

де $\xi = h_g / d$ – відносна величина виступання зерна із зв'язки, яка відповідає конкретному процесу обробки, то формулу для швидкості зношування (3) можна записати у вигляді:

$$v_l = \frac{(1 - \varepsilon_{кр} - \xi) \cdot d \cdot V}{N_{max} \cdot \pi \cdot D}, \tag{7}$$

де параметри ξ , d , V і D відповідають конкретному процесу обробки, а значення $\varepsilon_{кр}$ та N_{max} визначаються координатами точки перетину ділянок залежності $N = f(\varepsilon)$.

Тобто експериментальні дослідження міцності утримання алмазного зерна у зв'язці дають можливість "паспортизувати" зв'язки, що застосовуються, за значеннями $\varepsilon_{кр}$ та N_{max} , що дозволяє прогнозувати стійкість інструменту на їх основі.

Висновки. Розроблено методику та отримано нові результати міцності утримання алмазних зерен у зв'язці при циклічному навантаженні.

Встановлено, що точка перетину похилої і горизонтальної ділянок побудованих кривих набуває критеріального значення як одного з основних показників міцності закріплення алмазного зерна у зв'язці. Координати точки перетину цих кривих визначають відношення глибини закріплення зерна до кількості циклів навантаження, що дозволяє прогнозувати швидкість зношування алмазу в інструменті.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 207 с.
2. Новиков Н.В и др. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. – Т. 2. – Композиционные инструментальные материалы / Металлообразивные композиты. – Киев: Наук. думка, 1986. – С. 96–118.

3. *Zhang Yianzhi*. Designing Principle for Impregnated Tools. // Proceedings of 4th Zhengzhou International Superhard Materials & Related Products Conference. – China Machine Press. – 2003. – Pp. 386–393.
4. *Сердюк В.М., Коновалов В.А., Чальый В.Т.* Исследование прочности удержания алмазных зерен в органической связке // Синтетические алмазы. – 1971. – № 4. – С. 35–37.
5. *Мишинаевский Л.А., Галков А.В.* Особенности износа алмазов при шлифовании титановых сплавов // Сверхтвердые материалы. – № 3. – 1981. – С. 56–62.
6. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов. – Главная редакция физико-математической литературы изд-ва “Наука”, 1967. – 552 с.
7. *Троценко В.Т., Гетман А.Ф.* Исследование влияния малых упруго-пластических деформаций на несущую способность образцов с концентраторами напряжений в условиях повторно-переменного нагружения // Пробл. прочности. – 1972. – Сообщ. 1. – № 2. – С. 13–17; Сообщ. 2. – № 3. – С. 17–23.
8. *Петасюк Г.А., Петасюк О.У.* Алгоритм багатоваріантної комп’ютерної побудови та аналізу емпіричних та математичних моделей технологічних процесів // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Збірник наукових праць Житомирського державного технологічного університету. – 2005. – Випуск 1. – С. 181–193.
9. *Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В.* Износ алмазов и алмазных кругов. – М.: Машиностроение, 1967.

КОНОВАЛОВ Валерій Олексійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

– формування робочого шару алмазовмісних металокомпозитів.

Тел.: (044) 430-76-94.

shilo@ism.kiev.ua

ПЕТАСЮК Ольга Ульянівна – провідний інженер Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

– обчислювальна математика.

Тел.: (044) 430-35-31.

ШАТОХІН Володимир Володимирович – молодший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

– формування робочого шару алмазовмісних металокомпозитів.

Тел.: (044) 430-76-94.

shatokhin_ism@yahoo.com

Подано 30.05.2006

