

УДК 631.171.075.3

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕОРІЙ РУЙНУВАННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ

Тарасенко В.В., д.т.н.,

Сушко О.В., к.т.н.

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел. (0619) 42-13-54

**Анотація** – в статті проаналізовані існуючі теорії руйнування крихких матеріалів з метою їх застосування при встановленні фізичних аспектів механізму руйнування надтвердих матеріалів при абразивній обробці алмазними кругами на металевих зв'язках.

**Ключові слова** – синтетичні надтверді матеріали, абразивний інструмент, шліфувальні круги, алмазні зерна, концепції теорії руйнування, алмазно-металеві композиції.

*Постановка проблеми.* Визначальним фактором вдосконалення вже існуючих та створення нових інструментів та інструментальних матеріалів є застосування синтетичних надтвердих матеріалів (НТМ) у різноманітних галузях народного господарства. Так як алмазне шліфування як традиційний процес обробки НТМ є дорогим, низькопродуктивним, який часто характеризується нестабільною якістю оброблюваних виробів, проблема ефективності обробки цих матеріалів залишається актуальною. Інструмент, який застосовується при цьому, відрізняється високою витратою дороговартісних алмазних зерен в процесі експлуатації.

Методологія вибору оптимального поєднання властивостей міцності алмазних зерен та металеві зв'язки стосовно обробки конкретного оброблюваного матеріалу практично відсутня. Існуючі рекомендації щодо застосування тих чи інших алмазних зерен та металевих зв'язок носять загальний характер. Такі рекомендації, з урахуванням високої вартості алмазних зерен, призводять до низької ефективності їх використання та високої собівартості процесу алмазного шліфування. До нераціонального використання алмазних зерен приводить також не завжди обґрунтоване призначення рівня їх концентрації в алмазних кругах, яке потребує суттєвого уточнення. При цьому повинна вирішуватися задача оптимального поєднання властивостей міцності

металевої зв'язки та алмазних зерен з точки зору збереження їх цілісності в процесі спікання кругів.

Тому з метою підвищення роботоздатності алмазних кругів у даній роботі проаналізовані основні існуючі теорії руйнування крихких матеріалів для подальшого дослідження процесу їх спікання (з точки зору визначення умов максимального збереження цілісності зерен) та можливості виявлення оптимального поєднання марок, зернистостей, концентрацій алмазних порошків з типом металевої зв'язки, які забезпечують мінімальну дефектність спечених шліфувальних кругів.

*Аналіз останніх досліджень.* При виготовленні деталей з крихких неметалевих матеріалів основними процесами для отримання якісних поверхонь є шліфування та полірування за допомогою абразивних порошків у вільному та зв'язаному стані. Забезпечення ефективності процесу формоутворення виробів в кожному конкретному випадку можливе, якщо з'ясовані фізичні аспекти процесу руйнування крихких матеріалів при абразивній обробці.

Існуючі теорії руйнування твердих тіл засновані на вченні про її міцність. Більшість досліджень для крихких неметалевих матеріалів виконані для скла, як найбільш давно і широко поширеному у цій категорії матеріалів. Дослідженням міцності та механізму руйнування матеріалів на основі скла присвячено велика кількість робіт [1, 2, 3]. Під міцністю твердих крихких тіл розуміють опір розриву, завдяки тому, що саме розтягуючі напруги або максимальні нормальні напруги є тими, що обмежують міцність крихких матеріалів і можуть служити критерієм руйнування [4]. Руйнування тіла є складним процесом, розвиток якого залежить від температури, швидкості навантаження, характеру напруженого стану, структури тіла, навколишнього середовища і т. ін. [5, 6].

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Проаналізувати існуючі теорії руйнування крихких матеріалів з метою їх застосування при встановленні фізичних аспектів механізму руйнування крихких матеріалів при абразивній обробці алмазними кругами на металевих зв'язках.

*Основна частина.* До вирішення проблеми міцності в даний час існують два основних підходи, які умовно називаються механічним та кінетичним. Засновником механічної концепції є Гриффітс. Згідно його теорії, запропонованої для скла, руйнування є результатом втрати стійкості твердим тілом, яке знаходиться в полі зовнішніх та внутрішніх напружень. При цьому тіло розглядається як суцільне середовище, яке містить багаточисельні найдрібніші дефекти у вигляді мікротріщин, що діють як концентратори напружень [4]. Причому, на краях мікротріщин під дією прикладеного розтягуючого напруження  $\sigma$  ви-

никають перенапруження  $\sigma_k$ , які можуть в багато разів перевищувати середні напруження. Коли величина перенапруг у вершини найбільш небезпечної мікротріщини, що обумовлена прикладеною середньою напругою, досягає рівня теоретичної міцності, відбувається катастрофічне (зі швидкістю, близькою до швидкості звуку) поширення тріщини та зразок руйнується на частини. Прикладена середня напруга при цьому відповідає критичному напруженню  $\sigma_k$ . За Гриффітсом умова зростання тріщини, яка приводить до руйнування, має вид:

$$\frac{d}{d_a} \left( \frac{\pi a^2 \sigma^2}{2E} \right) > \frac{d}{d_a} (2\gamma_k a), \quad (1)$$

де  $E$  – модуль Юнга;

$\sigma$  – енергія утворення нової поверхні руйнування при розриві;

$a$  – глибина тріщини;

$\gamma_k$  – поверхнева енергія руйнування.

Таким чином, критична напруга росту тріщини буде дорівнювати:

$$\sigma_k = \beta_k \left( \frac{E\gamma_k}{a} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

де  $\beta_k$  – постійна.

Якщо розповсюдження тріщини супроводжується пластичною деформацією матеріалу перед її вершиною, то у виразі  $\gamma_k$  замінюється величиною ефективною поверхневою енергією руйнування  $\gamma_{ке} = \gamma_k + \gamma_{кр}$ , яка враховує роботу пластичної деформації  $\gamma_{кр}$ . Аналогічними залежностями можуть бути враховані впливи на величину  $\gamma_{ке}$  теплового руху та поверхнево-активного середовища.

Основоположником кінетичної концепції є С. Н. Журков, в подальшому вона отримала розвиток в роботі [6]. Згідно з цією концепцією, руйнування розглядається як результат процесу, який розвивається в матеріалі протягом часу, тобто як кінцевий етап поступового розвитку і накопичення субмікроскопічних руйнувань, або як процес розвитку мікротріщин на молекулярному рівні. Цей процес відбувається в напруженому тілі під дією так званих теплових флуктуацій і механічних напруг. В процесі теплового руху розподіл енергії по окремим частинкам, які складають тіло, весь час змінюється. Тому кінетична енергія окремої частинки  $W$ , наприклад, атома в полімерному ланцюгу скла, з плином часу змінюється, досягаючи в деякі відрізки часу досить великих значень  $W^*$ , щоб розірвати хімічний зв'язок

між атомами. Відхилення кінетичної енергії частинок  $\bar{W}$  від середнього значення й називають флуктуаціями.

При цьому довговічність знаходження під навантаженням, тобто час  $\tau$ , необхідний для розвитку руйнування від моменту навантаження тіла до його руйнування при розриві, зв'язана з величиною розривного напруження  $\sigma$  та температурою  $T^\circ$  співвідношенням:

$$\tau = \tau_0 \exp\left[\frac{(U_0 - \chi_k \sigma)}{kT^\circ}\right], \quad (3)$$

де  $U_0$  – енергетичний бар'єр (залежить від природи матеріалу, для металів, близький до сублімації енергії, для полімерів – до енергії термічної деструкції);

$\tau_0$  – постійна, близька до періоду теплових коливань атомів, приблизно рівна  $10^{-13}$  -  $10^{-11}$  с;

$\chi_k$  – коефіцієнт, що визначає ступінь зниження початкового бар'єру  $U_0$  під дією руйнівної напруги  $\sigma$ ;

$k$  – постійна Больцмана.

Тривалість тимчасового процесу, який проходить у тілі від моменту навантаження до його руйнування, визначається згідно з (3) величиною активаційного бар'єру  $U = U_0 - \chi_k \sigma$  та температурою  $T^\circ$ . Чим вище напруга, тим більше знижується бар'єр і менший час потрібний для руйнування.

Різні фізичні теорії, що пояснюють тимчасові ефекти міцності твердих тіл, які ґрунтуються на положенні, що процес руйнування є активаційним процесом розриву тих чи інших зв'язків, коли енергія активації знижується, а ймовірність і швидкість руйнування зростають при збільшенні прикладеної напруги. Щоб зв'язати між собою атомно-молекулярні процеси та мікроскопічне руйнування крихких матеріалів, вводиться певний локальний критерій, який встановлює основну причину руйнування більшості конструкційних матеріалів, що перебувають у крихкому стані. Зазвичай в таких матеріалах завжди є велика кількість різних початкових мікротріщин і найбільш небезпечна з них є ініціатором руйнування.

У монографії Р. М. Бартенева наведена молекулярна модель мікротріщини, що є узагальненням відомих моделей тріщин Гриффітса і Ребіндера. При крихкому або квазікрихкому руйнуванні тріщини (рис. 1) у її вершині відбувається послідовний розрив (та відновлення) хімічних зв'язків, які супроводжуються витратою кінетичної енергії на подолання потенційних бар'єрів.

У навантаженому матеріалі, коли  $\sigma \neq 0$ , розтягуючі напруження сприяють розриву зв'язків та перешкоджають їх відновленню. Отже, для розриву зв'язків потрібна менша  $U$ , а для їх відновлення – більша  $U'$ , ніж в ненавантаженому стані. При зростанні розтягуючого напруження ймовірність розриву зв'язків зростає, а відновлення – зменшується; більш ймовірним стає розрив зв'язків і мікротріщина росте:  $U < U'$ . Напруга  $\sigma = \sigma_{сТ}$  (де  $\sigma_{сТ}$  – напруга відновлення зв'язків), при якій ймовірність розриву та відновлення зв'язків рівні, є безпечною напругою тріщини.

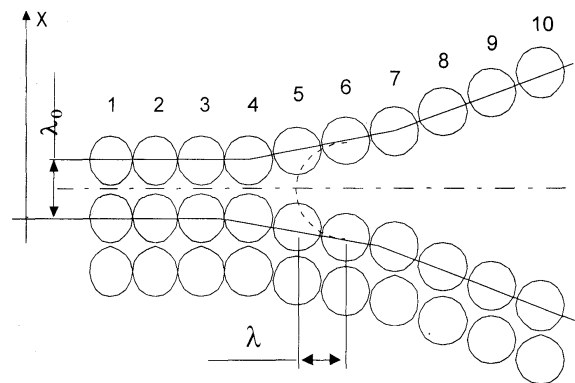


Рис. 1. Молекулярна модель мікротріщини

При цьому потенційні енергії активації  $U_*$  та рекомбінації  $U_*'$  є рівними:  $U_* = U_*'$ .

При навантаженні крихкого матеріалу, коли розтягуюча напруга  $\sigma > \sigma_{сТ}$ , мікротріщина починає рости. Швидкість її росту залежить від того, наскільки величина напруг розтягування  $\sigma$  більше величини безпечної напруги  $\sigma_{сТ}$ . При невеликому перевищенні  $\sigma$  відносно  $\sigma_{сТ}$  на першій стадії внаслідок повільного зростання мікротріщини на поверхні розриву утворюється гладка або дзеркальна зона руйнування. Поступово, зі зростанням мікротріщини, навіть при стаціонарному навантаженні, ростуть локальні напруження  $\sigma_l$  біля кінчика тріщини. Внаслідок цього збільшується швидкість росту тріщини, так як зі зростанням локальних напружень зростає нерівність:  $U < U'$ .

На другій стадії руйнування, що протікає зі швидкістю, близькою до швидкості поширення поперечних пружних хвиль у твердому тілі, виникає шорстка зона руйнування. Руйнування на другій стадії відбувається за механізмом, який Гриффітс вважав єдиним і характерним для крихких тіл.

У цьому випадку локальна напруга біля вершини тріщини стає критичною, енергія активації перетворюється в нуль і відбувається перехід від активаційного термофлуктуаційного механізму розриву зв'язків до безактиваційного атермічного, при якому відбувається ро-

зрив зв'язків під дією механічної сили, і для розриву не потрібно теплових флуктуацій. Тобто, узагальнивши положення кінетичної теорії, можна зробити висновок, що процес руйнування складається з наступних стадій: збудження міжатомних зв'язків, розрив цих зв'язків під дією теплової флуктуації, утворення субмікроскопічних тріщин, виникнення магістральної тріщини під дією механічної сили та розрив зразка.

Наведена вище залежність (3) отримана за умови дії на крихкі матеріали постійних (стаціонарних) навантажень (напруг) і є фундаментом для з'ясування природи та механізмів руйнування цих матеріалів. Розглядаючи механізми руйнування скломатеріалів при абразивній обробці, цікавими є інші тимчасові режими деформації, які виникають при циклічних навантаженнях або багаторазових деформаціях, що супроводжують процес взаємодії абразивних зерен з оброблюваною поверхнею, який можна характеризувати як динамічний режим з періодичним законом зміни параметрів. Якщо механізм руйнування один і той же при статичних і циклічних навантаженнях, то для умов крихкого руйнування наближено вірний так званий «інтегральний критерій руйнування Бейлі», який враховує довжину початкової тріщини в тілі до прикладання навантаження, концентрацію напружень у мікрodefекті та величину флуктуаційного об'єму, який визначається структурою матеріалу, та може бути визначений залежністю:

$$\int_0^{\tau_p} \left[ 1/\tau(\sigma, T^\circ, l_0) \right] dt = 1 \quad (4)$$

де  $\tau_p$  – довговічність зразка при будь-якому нестационарному режимі випробування;

$\tau(\sigma, T^\circ, l_0)$  – довговічність при постійній (стаціонарній) нарузі, яка визначається за основним рівнянням довговічності для зразка з початковою мікротріщиною  $l_0$  при  $T^\circ = const$ .

Критерій Бейлі справедливий у разі, якщо:

1) розглядаються матеріали, для яких руйнування є незворотнім процесом, тобто для них пошкодження, що накопичилися в зразку при припиненні дії навантаження, не зникають;

2) швидкість руйнування, під якою розуміють швидкість росту тріщин, залежить тільки від прикладеної напруги, а не від ступеня вже наявних пошкоджень.

Перша умова для матеріалів на основі скла виконується повністю, друга – частково, так як для крихких твердих тіл, строго кажучи,

швидкість руйнування залежить не тільки від напруги, але й від ступеню вже наявного руйнування в матеріалі  $[l(t)]$ . Тому для крихкого руйнування критерій (4) вірний лише наближено для досить швидких руйнувань, коли дзеркальна зона займає малу частку поверхні розриву. Абразивна обробка скло матеріалів є прикладом саме такого швидкого руйнування. В цьому випадку практично можна вважати, що швидкість процесу руйнування визначається номінальною напругою  $\sigma$ , близькою до напруги  $\sigma'$ , яка розрахована на незруйнований поперечний переріз зразка.

За даними [7] порівняння міцності твердого тіла при статичному та динамічному способі впливу на нього певної сили (навантаження) можливо тільки при одній і тій же величині переданої енергії. У полі цієї тези знаходяться результати досліджень Р. Румпфа. Він стверджує, що руйнування скла обумовлено двома умовами: силовим та енергетичним. Силова умова передбачає, що при руйнуванні скла повинні бути подолані молекулярні сили зчеплення, які на один-два порядки більше фактичної міцності скла, яка обумовлена наявністю дефектів і мікротріщин Гриффітса. Енергетична умова полягає в тому, що при диференціальному розвитку тріщин підведена і споживана енергія повинні бути рівні одна одній. Позначаючи кінетичну енергію, віднесену до одиниці довжини фронту тріщини через  $W/l$ , автор отримав загальну енергетичну умову, пов'язану з поширенням тріщини:

$$\sum G_i = 2\gamma_0 + \frac{dW}{dt}, \quad (5)$$

де  $\sum G_i$  – сума сил, що впливають на поширення тріщини;  
 $\gamma_0$  – питома поверхнева енергія.

*Висновки.* Більшість дослідників схиляється до переваги використання для вивчення та описання процесів руйнування крихких неметалевих матеріалів (зокрема, і при абразивній обробці) кінетичної теорії руйнування. Причому, при фінішній обробці (полірування, доводка) превалюючим при руйнуванні буде термофлуктуаційний механізм розриву зв'язків. У разі силового шліфування (чорнові та напівчистові операції обробки конструкційних матеріалів, що супроводжуються зняттям значного припуску) процес руйнування матеріалу при формоутворенні можна умовно вважати таким, який здійснюється за рахунок виникнення та розвитку магістральних тріщин під дією механічних сил (сил різання). Формування в обробленому матеріалі так званого дефектного шару є наслідком порушення суцільності матеріалу при різанні, розвитку та перетину мікротріщин. Виходячи з основних положень теорій руйнування, глибина поширення цих тріщин бу-

де залежати від ступеня напружено-деформованого стану в обробленому тілі та визначається енергетичними умовами процесу обробки.

Література:

1. *Ардамацкій А.Л.* Алмазная обработка оптических деталей / *А.Л. Ардамацкій.* – Л: Машиностроение. Ленингр. отд., 1978. – 232 с.
2. *Си. Г.* Математическая теория хрупкого разрушения / *Г.Си, Г.Либовиц* // Разрушение. – М.: Мир, т.2, 1975. – с.13-82.
3. Механика разрушения и прочность материалов. Справ. пособие в 4-х томах (под ред. В.В. Панасюка). – Киев: Науковадумка, 1988, т.1-3.
4. *Griffith A.A.* The phenomenon of rupture and flow in solids / *A.A. Griffith* // *Phil. Trans. Roy. Soc., ser. A.* – 2000, V.221. – P.163-198.
5. *Журков С.Н.* Кинетическая концепция прочности твердых тел (Термофлуктуационный механизм разрушения) / *С.Н. Журков* // Вестник АН СССР. – М. – 1978, 3№. – с.46-52.
6. *Дунаев И.М.* Общий энергетический анализ хрупкого разрушения для критерия типа Гриффитса / *И.М. Дунаев, В.И. Дунаев* // Известия вузов: Сев.- Кавк. регион, 2000, №3. – с.60-63.
7. *Новиков Н.В.* Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов / *Н.В Новиков, А.Л. Майстренко, В.Н. Кулаковский.* – Киев: Наук. думка, 2003. – 220 с.

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕОРИЙ РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Тарасенко В.В., Сушко О.В.

**Аннотация** - в работе проведен анализ существующих теорий разрушения хрупких материалов с целью их применения при установлении физических аспектов механизма разрушения сверхтвердых материалов при абразивной обработке алмазными кругами на металлических связках.

## ANALYSIS OF EXISTING THEORIES OF THE FRACTURE OF BRITTLE MATERIALS

V. Tarasenko, O. Sushko

### *Summary*

**In work the analysis of existing theories of the fracture of brittle materials with a view to their use in the assessment of the physical aspects of the destruction mechanism of superhard materials when abrasive machining with diamond circles on metal ligaments.**