

УДК 667.64:678.026

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ З ДВОКОМПОНЕНТНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ

*А. В. БУКЕТОВ, О. О. САПРОНОВ, М. В. БРАЇЛО,
Д. О. ЗІНЧЕНКО, В. Д. НІГАЛАТІЙ*

Херсонська державна морська академія

Досліджено вплив вмісту двокомпонентного наповнювача ($Al_2O_3 + V$) на інтенсивність зношування епоксикомпозитних покривів. Розроблено покриви з оптимальними показниками зношування, які можна використовувати в умовах гідроабразивного середовища. Встановлено, що мінімальною інтенсивністю зношування $I = 0,36\%$ та коефіцієнтом зносотривкості $K_{wr} = 3,66$, порівняно з епоксидною матрицею, характеризуються матеріали із вмістом оксиду алюмінію (60 т.р.) та бору кристалічного (40 т.р.) на 100 т.р. епоксидного олігомера ЕД-20 та 10 т.р. твердника поліетилен-поліаміна.

Ключові слова: *епоксидний композит, інтенсивність зношування, коефіцієнт зносотривкості, твердість.*

Традиційні шляхи вирішення матеріалознавчих питань передбачають істотну економію енергоресурсів внаслідок розробки модифікованих матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Сьогодні для зміцнення поверхні деталей машин і механізмів технологічного устаткування широко використовують функціональні захисні та зносотривкі покриви на епоксидній основі. При цьому особливі вимоги ставлять до покривів, які працюють в умовах гідроабразивного зношування. Підвищення експлуатаційних характеристик композитних матеріалів (КМ) досягають введенням у матрицю пластифікаторів, модифікаторів та різних за дисперсністю та природою наповнювачів. Детальним вивченням фізико-хімічних процесів під час гідроабразивного зношування КМ встановлено [1–3], що основними чинниками, які визначають механізм їх руйнування є: режим експлуатації досліджуваного матеріалу, кут нахилу вектора швидкості частинок до поверхні деталі (кут атаки), співвідношення мікротвердості частинок гідроабразиву і матеріалу покриву, а також безпосередньо властивості і структура матеріалу, що зношується. Слід зазначити, що ресурс роботи вузлів тертя деталей машин, механізмів та агрегатів у багатьох випадках визначають фізико-механічні властивості поверхневих шарів матеріалів, з яких їх виготовлено. Потрапляння в зону тертя пилу, піску та інших сторонніх домішок призводить до інтенсифікації гідроабразивного зношування робочих поверхонь [4, 5]. Тому одним із напрямків поліпшення властивостей КМ є оптимізація їх інгредієнтів, у тому числі і вмісту двокомпонентного наповнювача.

Мета роботи – дослідити зносотривкість епоксидних композитів з двокомпонентним наповнювачем.

Матеріали і методика дослідження. Як основний компонент для матриці під час формування КМ вибрали епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20

(ГОСТ 10587-84), який характеризується високою когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю за нанесення на поверхні складного профілю. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), який дає змогу затверджувати матеріали за кімнатних температур. Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію за стехіометричного співвідношення компонентів (м.р.) ЕД-20:ПЕПА = 100:10. Як наповнювачі під час формування КМ використали порошок оксиду алюмінію (Al_2O_3) з дисперсністю $63 \mu m$ і бору кристалічного (БК) з дисперсністю $8...12 \mu m$.

Епоксидний композит, який містить частинки двокомпонентного наповнювача, формували за такою технологією: попереднє дозування епоксидіанової смоли ЕД-20, її нагрівання до $T = 353 \pm 3 K$ і витримка за цієї температури упродовж $20 \pm 0,1$ min; дозування наповнювачів та подальше введення їх у епоксидний зв'язувач; гідродинамічне суміщення олігомера ЕД-20 і двокомпонентного наповнювача упродовж $1 \pm 0,1$ min; ультразвукова обробка композиції упродовж $1,5 \pm 0,1$ min; охолодження композиції до кімнатної температури упродовж 60 ± 5 min; введення твердника ПЕПА і перемішування композиції упродовж $5 \pm 0,1$ min. Далі затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримання упродовж $12,0 \pm 0,1$ h за температури $293 \pm 3 K$, нагрівання зі швидкістю $v = 3 K/min$ до $T = 393 \pm 3 K$, витримання КМ упродовж $2,0 \pm 0,05$ h та повільне охолодження до температури $293 \pm 2 K$. Для стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували упродовж 24 h на повітрі за температури $293 \pm 2 K$ з подальшим проведенням експериментальних випробувань.

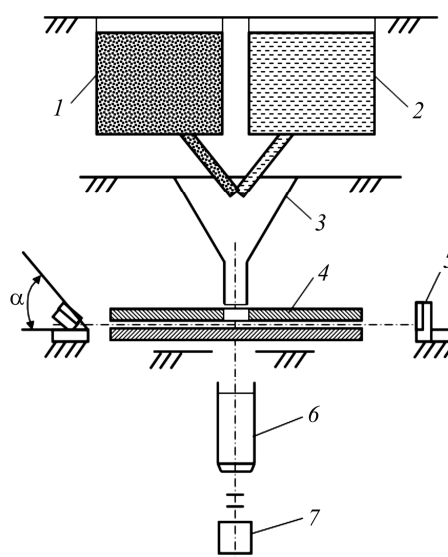
Відносну стійкість КМ до дії гідроабразиву визначали за методикою випробування матеріалів і покриттів на газоабразивне зношування з використанням відцентрового прискорювача (ГОСТ 23201-78). Методика дозволяє моделювати реальне зношування деталей механізмів під дією гідроабразиву (рис. 1) [1]. Швидкість обертання ротора відцентрового прискорювача становила 3000 rpm. Як гідроабразивну суспензію використали суміш технічної води і абразивних частинок кварцового піску (5:1 за об'ємом). Випробовували зразки розміром $30 \times 20 \times 4$ mm за кута атаки гідроабразивної суміші 45° . Маса використаного під час дослідження кварцового піску $9 \pm 0,1$ kg.

Рис. 1. Схема відцентрового прискорювача:

- 1 – резервуар з абразивними частинками;
- 2 – резервуар з технічною водою;
- 3 – бункер для змішування абразивних частинок з водою; 4 – ротор;
- 5 – зразок з покритвом;
- 6 – електродвигун;
- 7 – тахометр.

Fig. 1. Scheme of a centrifugal accelerator:

- 1 – tank with abrasive particles;
- 2 – industrial water tank;
- 3 – tank for mixing abrasive particles with water; 4 – rotor;
- 5 – coated sample;
- 6 – electric motor;
- 7 – tachometer.



Відносну інтенсивність зношування визначали за формулою

$$I = \frac{m_0 - m_{end}}{m_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де m_0 та m_{end} – маса зразка на початку та у кінці дослідження, kg, відповідно.

Коефіцієнт зносотривкості визначали за формулою

$$K_{wr} = I_E / I, \quad (2)$$

де I_E та I – відносні інтенсивності зношування еталона (сталь 45) та КМ, %, відповідно.

Зважували зразки перед і після випробувань на електронних вагах DRS-8000 “SHIMADZU” з точністю $0,02 \pm 0,001$ g.

Твердість досліджуваних матеріалів досліджували за методом Брінелля, згідно з ГОСТ 9012-59, на приладі ТШП-4 за температури від 293 ± 2 К. Твердість визначали за формулою

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (3)$$

де D – діаметр кульки, mm; d – діаметр відбитка у досліджуваному матеріалі, mm; F – навантаження, яке діє на кульку, N.

Результати досліджень та їх обговорення. Для порівняння досліджували гідроабразивну зносотривкість таких матеріалів: сталь 45; епоксидна матриця після ультразвукової обробки; КМ 1 (Al_2O_3 (60 т.р.) + БК (40 т.р.)); КМ 2 (Al_2O_3 (70 т.р.) + БК (35 т.р.)); КМ 3 (Al_2O_3 (80 т.р.) + БК (30 т.р.)).

Відомо [5–7], що за гідроабразивного зношування розрізняють два випадки взаємодії абразиву з матеріалом: удар за прямого кута атаки ($\alpha = 90^\circ$) і косий удар ($0 < \alpha < 90^\circ$). Досліджували КМ за косого удару, а саме за кута атаки $\alpha = 45^\circ$. На характер пошкодження поверхні за такого удару суттєво впливають дотична складова імпульсу й опір матеріалу впливу дотичних сил на поверхню. При цьому на поверхні матеріалу виникають дотичні напруження, які спричиняють мікро- і макрорізання матеріалу, та нормальні напруження, які призводять до пластичних деформацій поверхневого шару КМ.

Аналіз відносної інтенсивності зношування досліджуваних матеріалів дає можливість стверджувати, що найбільшу інтенсивність зношування ($I = 1,32\%$) встановлено для контрольного зразка зі сталі 45. Стосовно розроблених матеріалів максимальний показник спостерігали у модифікованій ультразвуком епоксидної матриці ($I = 1,23\%$). Можна припустити, що інтенсивність зношування тут залежить не тільки від контактної взаємодії поверхні матеріалу і частинок абразиву та кута їх атаки, але й від твердості поверхні покриття. Слід зазначити, що композити, які містять двокомпонентний наповнювач, характеризуються меншим ступенем зношування (КМ 1 – $I = 0,36\%$; КМ 2 – $0,41\%$; КМ 3 – $0,38\%$).

На поверхні композитів виявлені незначні подряпини, що свідчить про хаотичне мікрорізання матеріалів, характерне для зношування твердих і жорстких гетерогенних КМ. Найменшу інтенсивність зношування ($I = 0,36\%$) виявлено для композита КМ 1 із вмістом частинок оксиду алюмінію (60 т.р.) і бору кристалічного (40 т.р.). Попередніми дослідженнями встановлено, що матеріал із зазначеним двокомпонентним наповнювачем має поліпшені адгезійні, фізико-механічні та теплофізичні властивості. Відповідно інтенсивність зношування такого матеріалу є меншою порівняно з епоксидною матрицею. Не менш важливим під час дослідження є відсутність деформаційної дії абразивних частинок на поверхню покриття, які не дряпають, а видавлюють лунки чи борозни і викликають за багатократного повторення локальні втомні руйнування. Можна припустити, що це є однією з основних причин підвищення інтенсивності зношування композитів

КМ 2 і КМ 3, порівняно з КМ 1, за однакових умов дослідження. Виходячи з цього, можна стверджувати, що композит з двокомпонентним наповнювачем КМ 1 доцільно використовувати для експлуатації в умовах дії гідроабразивного середовища.

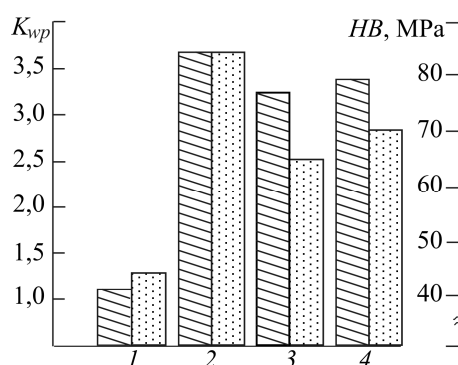
Завдяки вивченню залежності коефіцієнта зносотривкості (K_{wr}) від вмісту двокомпонентного наповнювача змогли підтвердити попередні експериментальні дослідження. Встановлено, що найменшим коефіцієнтом зносотривкості ($K_{wr} = 1,07$) характеризується епоксидна матриця (рис. 2). Доведено, що введення двокомпонентного наповнювача у епоксидний олігомер його суттєво підвищує. Найбільше значення K_{wr} встановлено для матеріалу КМ 1 ($K_{wr} = 3,66$). Також слід зазначити, що для композитів КМ 2 і КМ 3 коефіцієнт зносотривкості хоча і менший (3,21 і 3,47 відповідно), порівняно з КМ 1, але значно вищий, ніж для епоксидної матриці. Тому розроблені матеріали можна використовувати як покриття для захисту технологічного устаткування в умовах впливу гідроабразивних середовищ.

Рис. 2. Залежність коефіцієнта зносотривкості (▨) і твердості (▤) від вмісту двокомпонентного наповнювача:

1 – матриця (контрольний зразок);
2 – КМ 1; 3 – КМ 2; 4 – КМ 3.

Fig. 2. Dependence of wear-resistance coefficient (▨) and hardness (▤) on two-component filler:

1 – matrix (a control sample);
2 – КМ 1; 3 – КМ 2; 4 – КМ 3.



Одним із основних критеріїв під час аналізу експлуатаційних характеристик композитів є показники твердості покриттів. Встановлено, що матриця відзначається найменшою серед усіх досліджуваних зразків твердістю – $HB = 45$ МПа (рис. 2). Максимальними показниками твердості характеризується КМ 1 ($HB = 84$ МПа), що добре узгоджується з результатами випробувань на зносотривкість тих же зразків. Слід зазначити, що КМ 2 і КМ 3 мають меншу твердість (65 і 70 МПа відповідно) порівняно з КМ 1. При цьому зазначимо, що їх також можна використовувати як захисні покриття, що експлуатуються в умовах впливу гідроабразивних середовищ.

ВИСНОВКИ

Встановлено інтенсивність зношування епоксикомпозитів, наповнених двокомпонентним наповнювачем, в умовах впливу гідроабразиву. Показано, що механізм зношування композитних матеріалів зумовлений фізико-механічними процесами руйнування і незначного мікрорізання поверхневого шару матеріалів під дією абразивних частинок за визначеного кута атаки гідроабразивної суміші ($\alpha = 45^\circ$). При цьому матеріал, що містить оксид алюмінію (60 т.р.) і бор кристалічний (40 т.р.) на 100 т.р. епоксидного олігомера ЕД-20 та 10 т.р. твердника ПЕПА характеризується найменшою інтенсивністю зношування ($I = 0,36\%$) порівняно зі сталлю 45. Крім того, розроблений композитний матеріал з двокомпонентним наповнювачем (з $K_{wr} = 1,07$ до $K_{wr} = 3,66$) має підвищені коефіцієнт зносотривкості та твердість (з $HB = 45$ МПа до $HB = 84$ МПа) порівняно з епоксидною матрицею. Цей композит рекомендовано для захисту деталей вузлів і механізмів зі складним профілем поверхні від гідроабразивного зношування.

РЕЗЮМЕ. Исследовано влияние содержания двухкомпонентного наполнителя ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{B}$) на интенсивность износа эпоксикомпозитных покрытий. Разработаны покрытия с оптимальными показателями износа, которые могут эксплуатироваться в условиях гидроабразивной среды. Установлено, что минимальной интенсивностью износа $I = 0,36\%$ и коэффициентом износостойкости $K_{wr} = 3,66$, по сравнению с эпоксидной матрицей, характеризуются материалы с содержанием оксида алюминия (60 м.р.) и бора кристаллического (40 м.р.) на 100 м.р. эпоксидного олигомера ЭД-20 и 10 м.р. отвердителя полиэтиленполиамина.

SUMMARY. The dependence of the content of the two-component filler ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{B}$) on the wear rate of the epoxy composite coatings is investigated. Coatings with optimal wear properties, which can be used in the water-jet environment, are developed. It is found that the minimum intensity of wear is $I = 0.36\%$ and the coefficient of wear $K_{wr} = 3.66$, compared with an epoxy matrix, is typical for the material, containing aluminum oxide (60 m.p.) and boron crystal (40 m.p.) per 100 m.p. epoxy oligomer ED-20 and 10 m.p. polyethylenpoliamin hardener.

1. Букетов А. В., Стухляк П. Д., Чихіра І. В. Властивості модифікованих ультразвуком епоксипластів. – Тернопіль: Крок, 2011. – 202 с.
2. Износостойкость покрытий в условиях гидроабразивного изнашивания / А. П. Кудрин, В. Ф. Лабунец, О. А. Вишнеvский, Али Ризк // Промислова гідравліка і пневматика. – 2004. – № 4 (6). – С. 67–72.
3. Wang J. Abrasive waterjet machining of polymer matrix composites: cutting performance, erosive analysis and predictive models // Int. J. of Advanced Manufacturing Technol. – 1999. – **15**. – P. 757–768.
4. Shanmugam D., Nguyen T., and Wang J. A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining // Composites Part A. – 2008. – **39** (6). – P. 923–929.
5. Стухляк П. Д., Букетов А. В., Редько О. І. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості. – Тернопіль: Крок, 2011. – 166 с.
6. Богданович П. Н. Особенности изнашивания эпоксидных полимеров // Трение и износ. – 1988. – **9**, № 6. – С. 1000–1006.
7. Буря А. И. Трение и изнашивание углепластиков на основе ароматических полиамидов // Трение и износ. – 2001. – **22**, № 6. – С. 677–683.

Одержано 10.03.2016