УДК 667.64:678.026

Букетова Н.М., Нігалатій В.Д.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОАБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНО-РЕМОНТНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

За результатами дослідження встановлено зносостійкість епоксикомпозитів, наповнених дисперсними частками різної фізичної природи. Показано, що механізм зношування композитних матеріалів зумовлений фізико-механічними процесами на поверхні композитів, визначальними з яких є процеси мікрорізання і пластичного деформування поверхневого шару. Доведено, що зносостійкість матеріалів залежить від кута атаки гідроабразивної суміші. Встановлено, що максимальну зносостійкість композитів спостерігали при куті атаки гідроабразивної суміші å = 30°, де вирішальне значення у мікроруйнуванні мають дотичні сили. Найменшими показниками зносостійкості характеризуються композити при куті атаки суміші å = 60...75° за рахунок виникнення на поверхні водночас дотичних напружень, які спричиняють мікро- і макрорізання матеріалу, та нормальних напружень, які призводять до пластичних деформацій поверхневого шару.

Ключові слова: *епоксидний композит, матриця, наповнювач, зносостійкість*

Рис. 3. Літ. 25

Букетова Н.Н., Нигалатий В.Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-РЕМОНТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

По результатам исследования установлена износостойкость эпоксикомпозитов, наполненных дисперсными частицами различной физической природы. Показано, что механизм износа композитных материалов обусловлен физико-механическими процессами на поверхности композитов, определяющими из которых являются процессы микрорезания и пластического деформирования поверхностного слоя. Доказано, что износостойкость материалов зависит от угла атаки гидроабразивной смеси. Установлено, что максимальную износостойкость материалов наблюдали при угле атаки гидроабразивной смеси å = 30°, где решающее значение в микроразрушении имеют касательные силы. Наименьшими показателями износостойкости характеризуются композиты при угле атаки смеси å = 60...75° за счет возникновения на поверхности одновременно касательных напряжений, вызывающих микро- и макрорезание материала, и нормальных напряжений, которые приводят к пластическим деформациям поверхностного слоя.

Ключевые слова: *эпоксидный композит, матрица, наполнитель, износостойкость*

Buketova N.M., Nihalatiy V.D.

RESEARCH HYDROABRASIVE WEAR RESISTANCE OF EPOXY COMPOSITES WITH HIGH MAINTENANCE AND REPAIR OF TRANSPORT FOR PERFORMANCE

The study found durability epoxy composites filled with dispersed particles of different physical nature. It is shown that the wear mechanism of composite materials caused by physical and mechanical processes on the surface of composites determinants of which are processes micro cutting and plastic deformation of the surface layer. Proved that the durability of materials depends on the angle of attack hydroabrasive mixture. Established that the maximum wear resistance of composites was observed at an angle of attack hydroabrasive mixture å = 30°, where critical in micro fracture are tangential force. Lowest rate composites characterized by durability at an angle of attack mixture å = 60...75° by the appearance on the surface while shear stresses that cause micro- and macro fracture material and normal stresses, which lead to plastic deformation of the surface layer.

Keywords: *epoxy composite, matrix, filler, wear*

Постановка проблеми. На сьогодні полімерні композитні матеріали (КМ) широко використовують у вигляді конструкційних виробів або захисних покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик обладнання загального та спеціального призначення [1-6]. Такі матеріали повинні характеризуватися поліпшеними фізико-механічними властивостями, що дозволить підвищити надійність їх експлуатації в умовах гідроабразивного зношування засобів транспорту. У цьому плані перспективним є використання полімерних матеріалів і покриттів на епоксидній основі, які відзначаються підвищеними адгезійними і когезійними характеристиками [7-12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел вказує на значний вплив природи і об’ємного вмісту наповнювача на властивості КМ, у тому числі і зносостійкість [13-18]. Перспективним напрямком полімерного матеріалознавства є розроблення композитів на епоксидній основі, наповнених дисперсними частками різної фізичної природи. Відомо, що введення наповнювачів забезпечує поліпшення фізико-механічних властивостей композитних матеріалів (КМ) у комплексі, таких як міцність, жорсткість, ударна в’язкість та ін. [13]. Такі

© Н.М. Букетова, В.Д. Нігалатій

композити експлуатують у широкому діапазоні температур і циклічних навантажень. Актуальним також є використання активних наповнювачів, які не лише підвищують показники когезійної міцності КМ, але й дозволяють формувати матеріали, що забезпечують збільшення міжремонтного ресурсу експлуатації деталей в умовах впливу гідроабразивного зношування. Останнє є особливо актуальним при розробці матеріалів, призначених для захисту засобів морського та річкового транспорту.

Мета роботи – дослідити гідроабразивну зносостійкість епоксидних композитів, які містять частки активного наповнювача.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні покриттів вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10. Як модифікатор використано бензен-1,3-діамін (ДБ). Формула бензен-1,3-діаміну має вигляд $C_6H_8N_2$.

Як наповнювачі для експериментальних досліджень використано карбонат літію (Li_2CO_3), який застосовують для виробництва скла, пластмас, електроізоляційного фарфору, ситалів, а також у чорній металургії (десульфурація сталі) і карбонат нікелю ($NiCO_3$), який переважно застосовують у лакофарбовій промисловості для фарбування керамічних виробів. Також він є вихідним матеріалом для одержання інших сполук нікелю. Дисперсність наповнювачів становить 8…10 мкм.

Додатково використовували ультрадисперсний алмаз (УДА), отриманий методом детонаційного синтезу. Частки УДА з розміром d = 4...6 нм складаються з вуглецю (80...88 %), який, в основному, знаходиться в алмазній фазі. Додатково у частках присутній кисень (10 % і більше), водень (0,5...1,5 %), азот (2...3 %) і вогнетривкий залишок (0,5...8,0 %), який складається з оксидів, карбідів та солей різних елементів, таких як Fe, Ti, Cr, Cu, K, Ca, Si, Zn, Pb і т.п.

Епоксидні композити формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2$ К і витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0{,}1$ хв; гідродинамічне суміщення олігомеру і модифікатора впродовж часу $\tau = 1 \pm 0{,}1$ хв; гідродинамічне суміщення композиції і наповнювачів впродовж часу $\tau = 10 \pm 0{,}1$ хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу $\tau = 1{,}5 \pm 0{,}1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = 60 \pm 5$ хв; введення твердника і перемішування композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0{,}1$ хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримування впродовж часу $\tau = 12{,}0 \pm 0{,}1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $\upsilon = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримування впродовж часу $\tau = 2{,}0 \pm 0{,}05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним 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 реальні процеси зношування деталей механізмів під дією гідроабразиву (рис. 1). Швидкість обертання ротора відцентрового прискорювача становила 3000 об/хв. Як гідроабразивну суспензію використано суміш технічної води і абразивних часток кварцового піску (5:1 за об'ємом). Випробування зразків з розміром 30 × 20 × 4 мм проводили при зміні кута атаки гідроабразивної суміші в межах від å = 30° до å = 90°. Для порівняння отриманих результатів експериментальних досліджень як еталон використано зразки зі сталі Ст 3 і алюмінієвого сплаву марки Д 16. Маса використаного при дослідженні кварцового піску становить $m = 9 \pm 0{,}1$ кг.

Відносну інтенсивність зношування визначали за формулою:

$$I = \frac{m_0 - m_к}{m_0} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

де m_0 – маса зразка на початку дослідження, кг; $m_к$ – маса зразка у кінці дослідження, кг.

Коефіцієнт зносостійкості визначали за формулою:

© Н.М. Букетова, В.Д. Нігалатій

$$K_З = \frac{I_E}{I}, \quad (2)$$

де I_E – відносна інтенсивність зношування еталону (сталь Ст 3 або алюмінієвий сплав Д16) %; I – відносна інтенсивність зношування КМ, %.

Зважування зразків перед і після випробувань проводили на електронних вагах DRS-8000 «SHIMADZU» з точністю 0,02 ± 0,001 г.

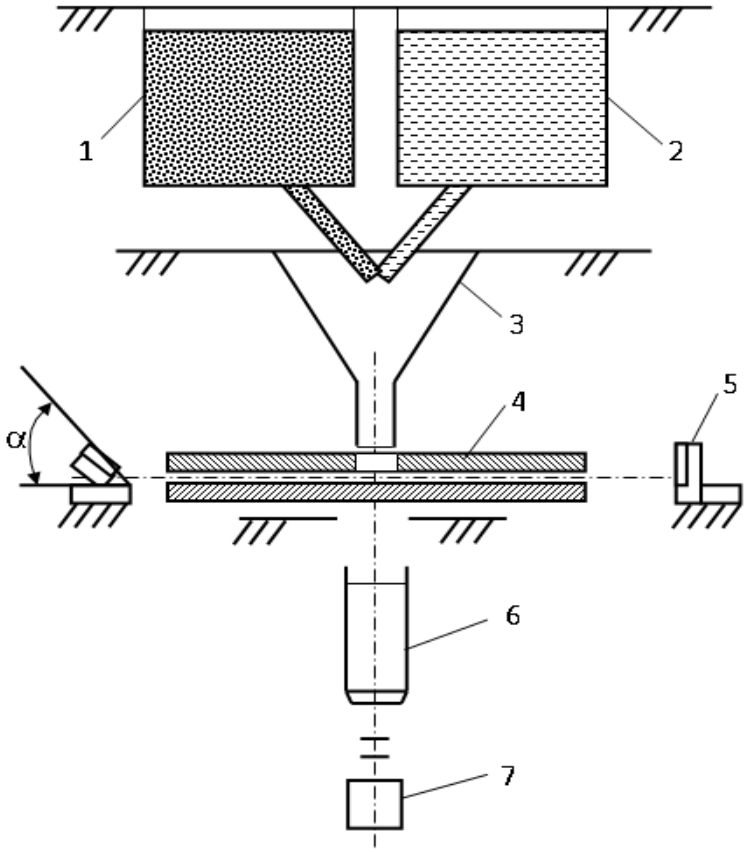

Рис. 1. **- Схема відцентрового прискорювача: 1 – резервуар з абразивними частками; 2 – резервуар фз технічною водою; 3 – бункер для змішування абразивних часток з водою; 4 – ротор; 5 – зразок з покриттям; 6 – електродвигун; 7 – тахометр.**

Результати досліджень та їх обговорення. Для підвищення гідроабразивної зносостійкості технологічного устаткування морського та річкового транспорту, яке експлуатують у агресивних середовищах, досліджували розроблені захисні покриття на основі епоксидного зв'язувача з двокомпонентним бідисперсним наповнювачем, вміст якого попередньо визначали методом математичного планування експерименту.

Випробовували контрольні металеві еталонні зразки і п'ять складів захисних покриттів:

- сталь марки Ст 3 (еталонний зразок);
- алюмінієвий сплав марки Д16 (еталонний зразок);
- матриця (контрольний зразок) (матрицю формували за наступного співвідношення компонентів – епоксидний олігомер ЕД-20 : твердник ПЕПА – 100 : 10);
- КМ 1 (композит формували за наступного співвідношення компонентів – зв'язувач : модифікатор бензен-1,3-діамін (БД) : ультрадисперсний алмаз (УДА) (d = 4…6 нм) : карбонат літію (8…10 мкм) – 100 : 0,25 : 0,05 : 0,5);
- КМ 2 (композит формували за наступного співвідношення компонентів – зв'язувач : модифікатор БД : УДА : карбонат літію – 100 : 1,5 : 0,08 : 3,0);
- КМ 3 (композит формували за наступного співвідношення компонентів – зв'язувач : модифікатор БД : УДА : карбонат нікелю (8…10 мкм) – 100 : 0,25 : 0,05 : 3,0);
- КМ 4 (композит формували за наступного співвідношення компонентів – зв'язувач : модифікатор БД : УДА : карбонат нікелю – 100 : 1,5 : 0,08 : 10,0).

При гідроабразивному зношуванні розрізняють два випадки взаємодії абразиву з матеріалом: удар при прямому куті атаки (å = 90°) і косий удар (0 < å < 90°) [14, 19-25]. Виходячи з цього, під час удару гідроабразиву на поверхні матеріалу може виникати пружна або пластична деформація, крихке руйнування, що спричиняє видалення як полімеру, так і часток наповнювача. При косому ударі (0 < å < 90°) на характер пошкодження поверхні суттєво впливає дотична складова імпульсу й опір матеріалу впливу дотичних сил на поверхню. Навпаки, при прямому ударі (å = 90°) на характер руйнування поверхні суттєво вплив мають нормальні сили.

Аналіз залежностей коефіцієнту зносостійкості досліджуваних КМ від кута атаки гідроабразивної суміші дозволяє стверджувати, що в усіх, без винятку, зразках зносостійкість є відносно високою при кутах атаки гідроабразиву å = 30…45°. При кутах атаки гідроабразиву å = 60…75° коефіцієнт зносостійкості є найменшим, а за прямого удару (å = 90°) *Кз* знову підвищується. Це можна пояснити тим, що за невеликих кутів атаки (å = 30…45°) суттєвий вплив на руйнування матеріалів мають дотичні сили. При збільшенні кута атаки суміші до å = 60…75° на процеси руйнування водночас впливають як дотичні, так і нормальні сили. Це, у свою чергу, призводить до інтенсивного мікрорізання поверхні матеріалів з наступним видаленням матриці і часток наповнювача функціонального шару композиту. За прямого удару під кутом å = 90° діють лише нормальні сили. У такому випадку інтенсивність зношування зменшується, що зумовлено демпферними властивостями полімерних КМ. Внаслідок цього частки гідроабразиву відбиваються від поверхні КМ, не суттєво руйнуючи останню.

Експериментально встановлено, що найнижчими показниками коефіцієнту зносостійкості серед усіх досліджуваних композитів відзначається пластифікована епоксидна матриця (рис. 2). Показано, що при куті атаки гідроабразиву å = 30° коефіцієнт зносостійкості матриці становить *Кз* = 1,24. Збільшення кута таки гідроабразиву до å = 60...75° призводить до зменшення коефіцієнту зносостійкості матриці (*Кз* = 0,82…1,03), а при куті атаки å = 90° відносна зносостійкість матриці становить *Кз* = 1,12. Отримані результати дослідження можна пояснити тим, що інтенсивність зношування, як було показано вище, залежить від перебігу двох процесів руйнування: мікрорізання та пластичного деформування. При цьому домінуючий вплив кожного з процесів залежить не лише від когезійної міцності КМ, але й в основному від кута атаки гідроабразивної суміші. При дослідженні матриці залежно від кута таки гідроабразиву спостерігали обидва види руйнування поверхневого шару матеріалу. Зокрема, при кутах атаки суміші å = 60...75° на початковому етапі відбувається макрорізання поверхні, а далі – пластичне деформування і видалення матеріалу.

Додатково встановлено (рис. 2), що введення у пластифікований епоксидний олігомер дисперсних часток забезпечує підвищення зносотійкості КМ стосовно полімерної матриці. Зокрема, показано (рис. 2, б, в), що при куті атаки гідроабразиву å = 30° зносостійкість КМ 1 і КМ 2 підвищується стосовно матриці від *Кз* = 1,24 до *Кз* = 1,44…1,52. Методом електронної мікроскопії підтверджено, що на поверхні таких композитів спостерігали канавки, які виникли внаслідок мікрорізання під дією гідроабразиву. При цьому порівняно з матрицею вони не такі глибокі, а довжина їх є значно меншою. Крім того, доведено, що при кутах атаки å = 60...75° зносостійкість КМ 1 і КМ 2 порівняно з матрицею підвищується від *Кз* = 0,82…1,03 до *Кз* = 1,02…1,18, а при куті атаки гідроабразиву å = 90° – від *Кз* = 1,12 до *Кз* = 1,20…1,22. У першу чергу покращення зносостійкості епоксикомпозитів можна пояснити їх поліпшеними когезійними властивостями порівняно з епоксидною пластифікованою матрицею. Попередньо встановлено, що КМ з частками ультрадисперсного алмазу і карбонату літію відзначаються підвищеними показниками руйнівних напружень та модуля пружності при згинанні, а також ударною в’язкістю. Введення у полімерний зв’язувач даних часток за критичного вмісту забезпечує формування гетерогенних композитів з підвищеним вмістом гель-фракції, позаяк максимальна кількість полімеру переходить у стан зовнішніх поверхневих шарів. Останні відзначаються більшою міцністю, порівняно з полімером у об’ємі. Відповідно покращується когезійна міцність КМ, а, отже, і їх зносостійкість.

Аналіз результатів дослідження у комплексі дозволяє констатувати, що найкращими показниками зносостійкості відзначаються композити, наповнені частками ультрадисперсного алмазу і карбонату нікелю. Доведено (рис. 2, г, д), що при куті атаки гідроабразиву å = 30° зносостійкість КМ 4 підвищується стосовно матриці від *Кз* = 1,24 до *Кз* = 1,86, при кутах атаки å = 60...75° – від *Кз* = 0,82…1,03 до *Кз* = 1,52…1,57, а при куті атаки гідроабразиву å = 90° – від *Кз* = 1,12 до *Кз* = 1,78. Водночас спостерігали результати мікрорізання, що характерно для зношування твердих та жорстких гетерогенних КМ. Методом електронної мікроскопії

підтверджено, що багатократні деформації КМ у результаті мікроударів абразивними частками зумовлюють утворення на поверхні мікророзривів, площина яких перпендикулярна до напрямку руху гідроабразивної суміші. У такому випадку на поверхні контакту виникають канавки, які мають орієнтацію у напрямку вектора швидкості ковзання гідроабразивного потоку. Можна констатувати, що при зношуванні таких зразків домінуючим є механізм пластичної деформації [21, 24]. При реалізації такого механізму зношування окремі абразивні частки під впливом значного номінального тиску гідроабразивного потоку вклинюються у поверхневий шар КМ, пластично деформуючи при цьому епоксидну матрицю.

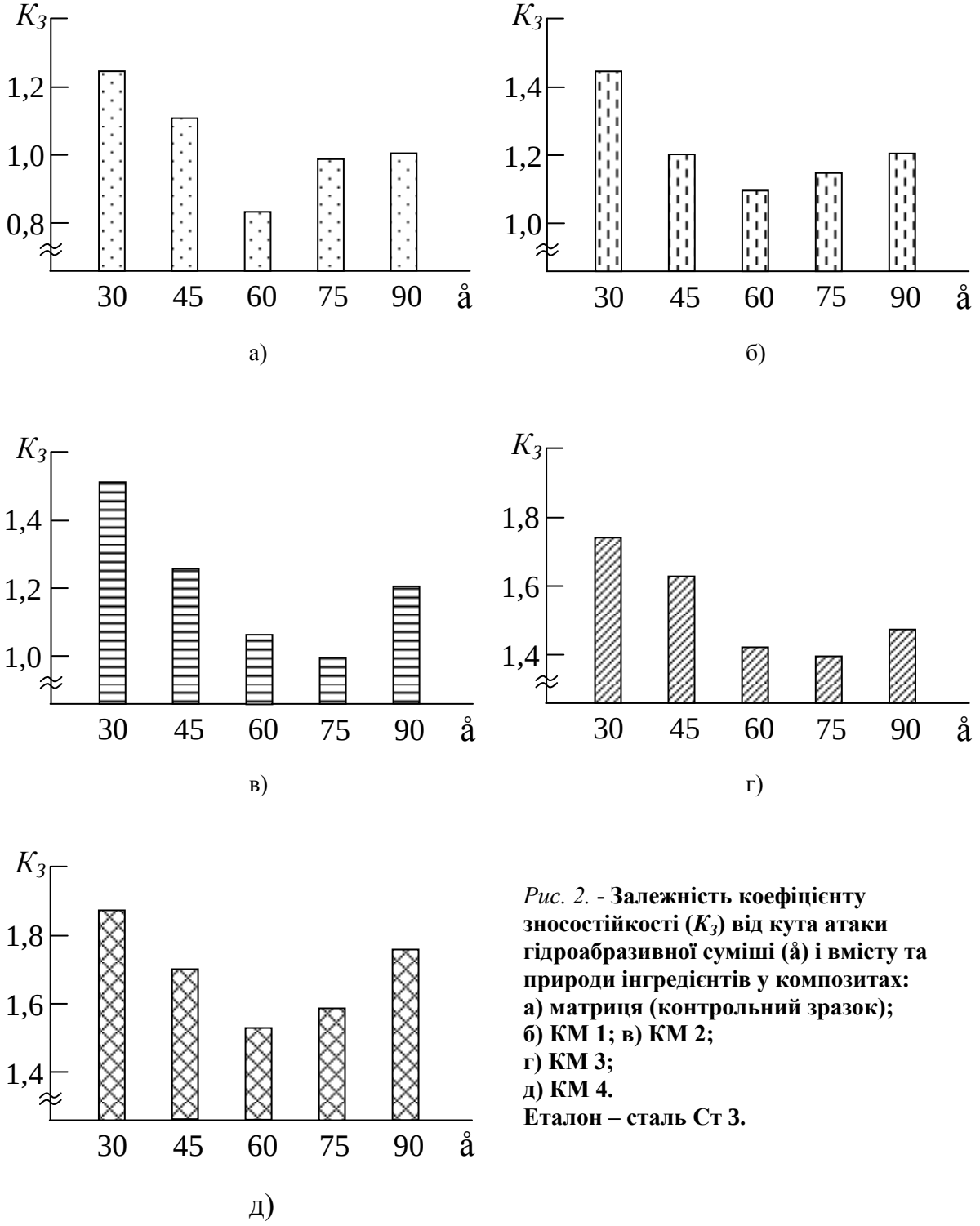

Рис. 2. - **Залежність коефіцієнту зносостійкості ($K_З$) від кута атаки гідроабразивної суміші (å) і вмісту та природи інгредієнтів у композитах:**
а) матриця (контрольний зразок);
б) КМ 1; в) КМ 2;
г) КМ 3;
д) КМ 4.
Еталон – сталь Ст 3.

Виходячи з того, що розроблені матеріали доцільно використовувати для захисту не лише стального устаткування, але й деталей на основі кольорових металів, у роботі досліджували інтенсивність зношування розроблених композитів відносно еталону на основі алюмінієвого

сплаву марки Д 16. Експериментально встановлено (рис. 3), що коефіцієнт зношування епоксидної матриці при куті атаки гідроабразивної суміші å = 45° є найменшим серед усіх досліджуваних зразків і становить *Кз* = 2,23. Максимальними показниками зносостійкості характеризується КМ 4 (*Кз* = 3,35), що добре узгоджується з результатами випробувань зносостійкості тих же зразків стосовно сталі Ст 3. Слід зазначити, що КМ 1, КМ 2 і КМ 3 мають меншу зносостійкість (*Кз* = 2,59, *Кз* = 2,73 і *Кз* = 3,10 відповідно) порівняно з КМ 4. При цьому зазначимо, що вони також можуть бути використані у вигляді захисних покриттів, які експлуатуються в умовах впливу гідроабразивних середовищ. Отже, доведено, що результати дослідження зносостійкості стосовно еталону алюмінію корелюють з коефіцієнтом зносостійкості покриттів, де за еталон взято зразок зі сталі Ст 3. При цьому зауважимо, що показники коефіцієнту зносостійкості матеріалів порівняно з алюмінієвим сплавом марки Д 16 є у 1,8 разів більшими порівняно зі сталлю марки Ст 3. Це зумовлено різницею у твердості алюмінієвого і стального матеріалів.

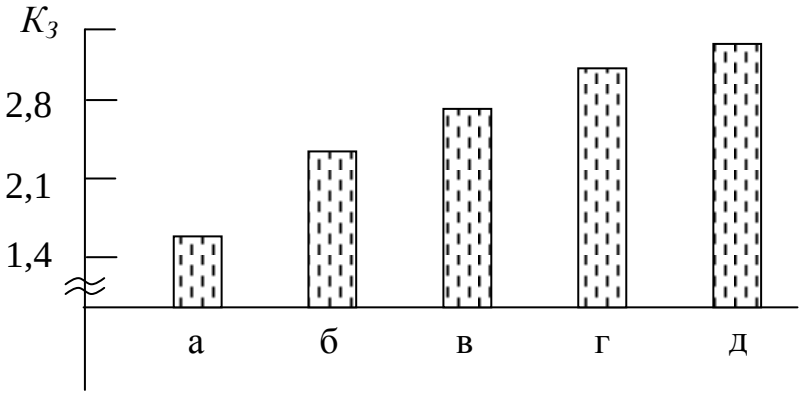

Рис. 3. - **Залежність коефіцієнту зносостійкості ($K_З$) при куті атаки гідроабразиву å = 30° від вмісту та природи інгредієнтів у композитах: а) матриця (контрольний зразок); б) КМ 1; в) КМ 2; г) КМ 3; д) КМ 4. Еталон – алюмінієвий сплав Д 16.**

Висновки. За результатами дослідження встановлено зносостійкість епоксикомпозитів, наповнених дисперсними частками різної фізичної природи. Показано, що механізм зношування композитних матеріалів зумовлений фізико-механічними процесами на поверхні композитів, визначальними з яких є процеси мікрорізання і пластичного деформування поверхневого шару. При цьому можна констатувати наступне.

1. Зносостійкість матеріалів залежить від кута атаки гідроабразивної суміші. Встановлено, що максимальну зносостійкість КМ спостерігали при куті атаки гідроабразивної суміші å = 30°, де вирішальне значення у мікроруйнуванні мають дотичні сили. Найменшими показниками зносостійкості характеризуються композити при куті атаки суміші å = 60...75° за рахунок виникнення на поверхні водночас дотичних напружень, які спричиняють мікро- і макрорізання матеріалу, та нормальних напружень, які призводять до пластичних деформацій поверхневого шару.

2. Аналіз результатів дослідження у комплексі дозволяє констатувати, що найкращими показниками зносостійкості відзначається полімерний композит, що складається з наступних компонентів: епоксидна діанова смола (100 мас.ч.), твердник поліетиленполіамін (10 мас.ч.), модифікатор бензен-1,3-діамін (1,5 мас.ч.), наповнювач ультрадисперсний алмаз (4…6 нм) (0,08 мас.ч.), наповнювач карбонат нікелю (8…10 мкм) (10 мас.ч.). Доведено, що при куті атаки гідроабразиву å = 30° зносостійкість композиту підвищується стосовно матриці від *Кз* = 1,24 до *Кз* = 1,86, при кутах атаки å = 60...75° – від *Кз* = 0,82…1,03 до *Кз* = 1,52…1,57, а при куті атаки гідроабразиву å = 90° – від *Кз* = 1,12 до *Кз* = 1,78. Під час зношування матеріалу домінуючим є механізм пластичної деформації, при якому абразивні частки під впливом значного номінального тиску гідроабразивного потоку вклинюються у поверхневий шар композиту, пластично деформуючи при цьому епоксидну матрицю.

3. Встановлено кореляційну залежність відносної зносостійкості композитів і фізико-механічних властивостей еталонних зразків. Показано, що показники коефіцієнту зносостійкості матеріалів відносно алюмінієвого сплаву марки Д 16 є у 1,8 разів більшими порівняно зі сталлю марки Ст 3. Це зумовлено різницею у твердості алюмінієвого і стального матеріалів.

© Н.М. Букетова, В.Д. Нігалатій

ЛІТЕРАТУРА:

1. Белошенко В.А. Эффект памяти формы в полимерах и его применение / В.А. Белошенко, В.Н. Варюхин.-К.: Наукова думка, 2005.-191с.

2. Kausch H.H. Failure of particulate reinforced polymers / H.H.Kausch, Ph.Beguelin, M.Fisher // Механика композитных материалов.-2000.-36, №3.-С.305-316.

3. Wang K.N. Morphology and physical properties of polyethylene / silicate nanocomposite prepared by melt inter-calation / K.N.Wang, M.N.Choi, C.M.Koo et al // J. Polum. Sci.-2002.-40B, N 14.-P.1454-1463.

4. Tjong S.C. Structure and properties of polyamide-6 / vermiculite nanocomposites prepared by direct melt compounding / S.C.Tjong, Y.Z.Meng, Y.Xu // J. Polum. Sci.-2002.-40B, N 24.-P.2860-2870.

5. Gall K. Shape memory polymer nanocomposites / K.Gall, M.L.Dunn, Y.Liu et all // Acta Mater.-2002.-50, N20.-P.5115-5126.

6. Gall K. Internal stress storage in shape memory polymer nanocomposites / K.Gall, M.L.Dunn, Y.Liu // Appl. Phus. Lett.-2004.-85, N2.-P.290-292.

7. Белошенко В.А. Влияние волокнистых наполнителей на деформационно-прочностные свойства эпоксидного полимера / В.А.Белошенко, А.П.Борзенко, В.Ф.Строганов, В.И.Шелудченко // Физика и техника высоких давлений.-2001.-11, №1.-С.48-50.

8. Зеленкова-Мышкова Свойства эпоксидных систем с глиносодержащими нанокомпозитами / М. Ю.Зеленка, В.Шпачек, Ф.Соча // Механика композитных материалов.-2003.-39, №2.-С.177-182.

9. Белошенко В.А. Термоусаживающиеся муфты из наполненных эпоксидных композиций / В.А.Белошенко, А.П.Борзенко, В.А.Глазунова, М.К.Пактер // Физика и техника высоких давлений.-2004.-14, №4.-С.109-116.

10. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров / В.Г.Хозин.-Казань: ПИК «Дом печати», 2004.-446с.

11. Белошенко В.А. Эволюция структуры композита эпоксидный полимер – терморасширенный графит при реализации эффекта памяти формы / В.А.Белошенко, А.П.Борзенко, Т.П.Заика, Е.Г.Пашинская // Физика и техника высоких давлений.-2001.-11, №3.-С.54-60.

12. Белошенко В.А. Еффект памяти формы и электрическое сопротивление композиции эпоксидный полимер – терморасширенный графит / В.А.Белошенко, Я.Е.Бейгельзимер, В.Н.Варюхин, Ю.В.Возняк // Высокомоллекуляр. соед. Серия А.-2005.-47, №7.-С.1169-1177.

13. Стухляк П.Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням / П.Д.Стухляк, А.В.Букетов.-Тернопіль: Збруч, 2009.- 237с.

14. Трибологія: підруч./ М.В.Кіндрачук, В.Ф.Лабунець, М.І.Пашечко, Є.В.Корбут.-К.: В-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк».-2009.-392с.

15. Шевеля В.В. Трибохимия и реология износостойкости: монографыя / В.В.Шевеля, В.П.Олександренко.-Хмельницкий: ХНУ, 2006.-278с.

16. Чернець М. Дослідження і розрахунок трибосистем ковзання, методи підвищення довговічності і зносостійкості. В 3 т. Т.1. Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання / М.Чернець, М.Пашечко, А.Невчас.-Дрогобич: Коло, 2001.-492с.

17. Дмитриченко М.Ф. Триботехніка та основи надійності машин: навч. Посібник / М.Ф.Дмитриченко, Р.Г.Мнацаканов, О.О.Мікосянчик.-К.: ІНФРМАВТОДОР, 2006.-216с.

18. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безизносность): учеб. / Д.Н.Гаркунов.-4-е изд.-М.: Изд-во “МСХА”, 2001.-606с.

19. Кондратюк В.Л. Исследование износостойкости многослойных поли-меркомпозиционных материалов//Сб. трудов науч.-практ. семинара.-Тернополь: ТДПИ.-1989.-С.34-36.

20. Кальба Е.Н., Кондратюк В.Л., Оверко И.В., Помелуйко А.Т. Полимер-композиционные износо- и коррозионностойкие покрытия для деталей сельхоз-машин // Лакокрасочные материалы и их применение.-1991.-N1.-С.43-44.

21. Богданович П.Н. Трение и износ в машинах / П.Н.Богданович, В.Я.Прущак.-Минск: Вышейшая школа, 1999.-376с.

22. Тененбаум М.М. Сопротиление абразивному изнашиванию / М.М.Тененбаум.-М.:Машиностроение, 1976.-272с.

23. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н.Гаркунов.-М.:Химия, 1985.-424с.

24. Богданович П.Н. Особенности изнашивания эпоксидных полимеров // П.Н.Богданович // Трение и износ.-1988.-Т.9, №6.-С.1000-1006.

25. Баран А.А., Дерягин Б.В., Васько Я.Я., Курлиенко О.Д. Изучение флокуляции гидрофобных золей водорастворимыми полимерами методом проточной ультрамикроскопии / А.А.Баран, Б.В.Дерягин, Я.Я.Васько, О.Д.Курлиенко // Коллоид. журнал.-1976.-Т.38, №5.-С.835-841.

Стаття надійшла до редакції 09.03.2017

© Н.М. Букетова, В.Д. Нігалатій