

Букетов А. Дослідження гідроабразивного зношування градієнтних епоксикомпозитів / Букетов А., Стухляк П., Чихіра І. // Вісник ТНТУ. — 2011. — Том 16. — № 1. — С.33-42. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 667.64:678.026

А.Букетов¹, докт. техн. наук; П.Стухляк², докт. техн. наук; І.Чихіра², канд. техн. наук

¹ Херсонський державний морський інститут

² Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ГРАДІЄНТНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

Резюме. Досліджено вплив умісту і природи дисперсних наповнювачів на відносну зносостійкість епоксидних композитів. Встановлено, що зношування композитних матеріалів залежить від фізичної природи, вмісту полідисперсного двокомпонентного наповнювача, фізико-механічних властивостей композитів і кута атаки гідроабразивної суміші. За результатами дослідження рекомендовано покриття з підвищеними експлуатаційними характеристиками для захисту від гідроабразивного зношування технологічного устаткування.

Ключові слова: інтенсивність зношування, поверхневий шар, композитний матеріал.

A.Buketov, P.Stuhlyak, I.Chyhira

RESEARCH WATERJET WEAR GRADIENT EPOXY COMPOSITES

The summary. The influence of content and nature of dispersed fillers on the relative durability of epoxy composites is investigated. Established that the wear of composite materials depends on the angle of attack of water jet mixture, physical nature, poly-disperse two-component filler content and physical and mechanical properties of composites. The coverage's with high-performance for water-jet anti-wear protection of technology equipment are recommended.

Key words: intensity of wear, surface layer, composite material.

Постановка проблеми. Полімери використовують у вигляді конструкційних матеріалів для виготовлення різноманітних виробів і обладнання загального та спеціального призначення [1, 2]. Такі матеріали характеризуються поліпшеними фізико-механічними і підвищеними експлуатаційними характеристиками, а також високою економічністю при формуванні у виробі [3–6]. У цьому плані перспективним є використання полімерних матеріалів і покриттів на епоксидній основі, які відзначаються високими адгезійними, когезійними характеристиками, корозійною тривкістю і зносостійкістю [7–12].

Перспективним напрямком полімерного матеріалознавства є розроблення композитів на епоксидній основі, наповненими 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]. При введенні дисперсних часток епоксидні композити набувають нових функціональних властивостей: електропровідності, термо- і теплостійкості, корозійної тривкості і зносостійкості. Такі композити експлуатують у широкому діапазоні температур і циклічних навантажень в умовах впливу гідроабразиву. Актуальним є використання дешевих наповнювачів (відходів промислового виробництва). Окрім підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних КМ, це призводить до здешевлення розроблюваних епоксикомпозитних матеріалів. Частково вирішуються проблема утилізації відходів, що покращує екологічні умови. Слід зазначити, що для поліпшення когезійних властивостей КМ і

покриттів на їх основі необхідно формувати матеріал з рівномірним розподілом у об'ємі часток з різною дисперсністю за оптимального вмісту. Важливим є використання для захисту технологічного устаткування функціонально-градієнтних покриттів, які містять два шари різного функціонального призначення. Показано [13], що у таких покриттях перший шар забезпечує поліпшену адгезійну взаємодію до металевої основи, а другий (функціональний шар) характеризується поліпшеними когезійними властивостями, що забезпечує підвищення експлуатаційних характеристик устаткування та ремонтоздатності. При цьому експериментально розроблені технологічні режими формування таких композитів забезпечують активну взаємодію між шарами у процесі формування покриттів, що зумовлює появу градієнта їх властивостей за товщиною і, як наслідок, збільшує ресурс експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на значний вплив природи і об'ємного вмісту наповнювача на властивості КМ, у тому числі й зносостійкість [14–18]. При цьому М.В. Кіндрачук [14] і В.В.Шевель [15] показали, що на зносостійкість гетерогенних матеріалів суттєво впливає напружений стан, який, у свою чергу, визначається перебігом фізико-хімічних процесів при структуроутворенні композитів на межі поділу фаз. Відомі експериментальні й теоретичні дані не дають змоги робити висновки про розподіл напружень у КМ, які експлуатують у реальних умовах. Проте слід зауважити, що під час зношування максимальні напруження виникають у мікрооб'ємах зовнішніх поверхневих шарів (ЗПШ), які формуються навколо дисперсних часток наповнювача у полімерній матриці. Об'єм таких шарів визначається активністю поверхні наповнювача і залежить від процесів міжфазової взаємодії при формуванні епоксикомпозитів. При цьому встановлено, що для поліпшення когезійної міцності, а, відповідно, і зносостійкості КМ у зв'язувач необхідно вводити наповнювачі з частками різної дисперсності [13]. Це забезпечить формування тиксотропної гетерогенної системи зі структурою, де максимальна кількість полімера перебуватиме у стані ЗПШ. Під ЗПШ розуміємо шари, що виникають на межі поділу у системі “епоксидний зв'язувач – наповнювач” і мають відмінні характеристики від наповнювача і матриці. Вони формуються з адсорбційних шарів і шарів, що мають інші оптичні характеристики і, на нашу думку, відрізняються напруженнями.

Відомо [19], що формування напруженого стану залежить від величини нормального і тангенціального навантаження, яке визначається кутом дії гідроабразивної суміші на КМ. Залежно від напрямку ударної дії на поверхні матеріалів суттєво збільшуються нормальні й тангенціальні напруження, величина яких залежить від когезійної міцності епоксикомпозитів. Тому важливим, з наукової і практичної точки зору, є проведення досліджень з метою визначення впливу кута атаки гідроабразивної суміші на зносостійкість КМ. У зв'язку з цим, задля розроблення нових епоксидних функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ) і захисних покриттів на їх основі, а також можливості керування їх експлуатаційними характеристиками у широкому діапазоні температур і циклічних навантажень, виникає практична необхідність дослідження зносостійкості епоксикомпозитів при різних напружено-деформованих станах залежно від вмісту і фізичної природи введеного у зв'язувач двокомпонентного полідисперсного наповнювача, а, отже, і фізико-механічних властивостей матеріалів.

Метою роботи є дослідження зносостійкості функціонально-градієнтних епоксикомпозитних матеріалів при різних кутах атаки гідроабразивної суміші.

Матеріали і методика дослідження. В якості об'єкта дослідження обрано епоксидний олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для полімеризації епоксидних композицій використовували затверджувач ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78).

Для порівняння досліджували гідроабразивну зносостійкість композитів:

- на основі епоксидної матриці;
- з рівномірним розподілом двокомпонентного полідисперсного наповнювача;
- функціонально-градієнтний матеріал.

При формуванні композитів із рівномірним розподілом двокомпонентного полідисперсного наповнювача в епоксидний зв'язувач вводили частки коричневого шламу (КШ) з дисперсністю 63 мкм і вмістом 40 мас.ч., діоксиду титану з дисперсністю 10-20 мкм і вмістом 60 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 і 10 мас.ч. ПЕПА. При формуванні ФГМ вводили частки КШ і діоксид титану при тому ж вмісті й додатково вводили карбід кремнію при вмісті 80 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20.

Композити з рівномірним розподілом двокомпонентного полідисперсного наповнювача формували за такою технологією: дозування компонентів, гідродинамічне суміщення дисперсних часток і зв'язувача, введення затверджувача ПЕПА і формування композиції. Затверджували покриття за експериментально встановленим режимом, далі проводили дослідження.

Функціонально-градієнтний матеріал формували за такою технологією:

- формування адгезійного шару товщиною 100 мкм, який містить частки КШ і діоксиду титану; витримка упродовж 2 год. при температурі $T = (293 \pm 2) \text{ K}$;
- нанесення корозійностійкого шару товщиною 200 мкм, який містить карбід кремнію; витримка покриття упродовж 72 год. при температурі $T = (293 \pm 2) \text{ K}$.

Для стабілізації структурних процесів у матриці усі досліджувані зразки перед випробуваннями витримували упродовж 60 год. при кімнатній температурі.

Відносну стійкість до гідроабразивного зношування КМ визначали за методикою випробування матеріалів і покриттів на газоабразивне зношування з використанням відцентрового прискорювача (ГОСТ 23201-78). Методика дозволяє моделювати реальні процеси спрацювання деталей механізмів під дією гідроабразиву (рис. 1). Швидкість обертання ротора відцентрового прискорювача становила 3000 об/хв. Як гідроабразивну суспензію використано суміш технічної води й абразивних часток у співвідношенні за об'ємом 5:1 [20]. Випробування зразків розміром 20×10×4мм проводили при зміні кута атаки гідроабразивної суміші в межах від $\alpha=30^\circ$ до $\alpha=90^\circ$.

Відносну інтенсивність зношування визначали за формулою

$$\varepsilon = \frac{m_n - m_k}{m_n} \cdot 100\%,$$

де m_n – маса зразка на початку дослідження, кг; m_k – маса зразка у кінці дослідження, кг.

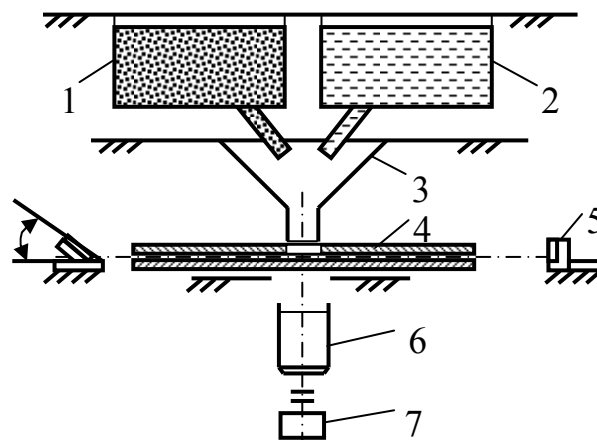


Рисунок 1. Схема відцентрового прискорювача: 1 – резервуар з абразивними частинками; 2 – резервуар з технічною водою; 3 – бункер для змішування суміші; 4 – ротор; 5 – зразок з покриттям; 6 – електродвигун; 7 – тахометр

Зважування зразків перед дослідженнями і після випробувань проводили на аналітичних вагах ВЛР-200 з точністю до $\pm 0,001$ г.

Експериментальні результати дослідження. У роботі досліджували гідроабразивну зносостійкість таких композитів:

КМ 1 – на основі епоксидної матриці;

КМ 2 – з рівномірним розподілом двокомпонентного полідисперсного наповнювача;

КМ 3 – функціонально-градієнтний матеріал.

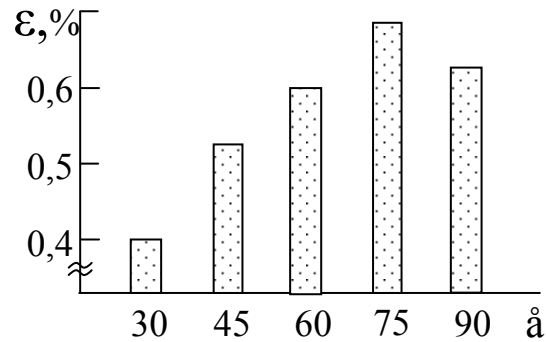
Автори [14, 21–24] при гідроабразивному зношуванні розрізняють два випадки взаємодії абразиву з матеріалом: удар при прямому куті атаки ($\alpha=90^\circ$) і косий удар ($0<\alpha<90^\circ$). Показано, що залежно від маси часток, швидкості їх падіння, властивостей абразиву і фізико-механічних характеристик КМ при прямому куті атаки на поверхні зношування може виникати пружна або пластична деформація, крихке руйнування, відділення матеріалу у вигляді лусочок [14, 21]. За косого удару на характер пошкодження поверхні суттєво впливає дотична складова імпульсу й опір матеріалу впливу дотичних сил на поверхню. Залежно від співвідношення твердості абразиву і поверхні КМ швидкість зношування зменшується зі збільшенням кута атаки до прямого, а згодом стає постійною або, навпаки, швидкість зношування може зростати і досягати максимуму при деякому куті атаки, а потім зменшуватись.

Аналіз залежності відносної інтенсивності зношування досліджуваних КМ від кута атаки гідроабразивної суміші дозволяє стверджувати, що в усіх, без винятку, зразках зносостійкість зменшується при косому ударі ($0 < \alpha < 90^\circ$) часток абразиву. Максимальну зносостійкість КМ спостерігали при куті атаки гідроабразивної суміші $\alpha = 30^\circ$, де вирішальне значення у мікроруйнуванні мають дотичні напруження (рис. 2). Найбільшими показниками інтенсивності зношування характеризуються КМ при куті атаки суміші $\alpha = 60\dots 75^\circ$. Це можна пояснити виникненням на поверхні КМ водночас дотичних напружень, які спричиняють мікро- і макрорізання матеріалу, та нормальних напружень, котрі призводять до пластичних деформацій поверхневого шару. При прямому куті атаки гідроабразивної суміші ($\alpha = 90^\circ$) спостерігали підвищення показників зносостійкості епоксикомпозитів порівняно з КМ, котрі досліджували при кутах атаки $\alpha = 60\dots 75^\circ$. Зменшення інтенсивності зношування КМ у цьому випадку можна пояснити впливом лише нормальної складової зовнішніх навантажень, унаслідок чого на поверхні матеріалів виникають пружні, а потім пластичні деформації. За кута атаки суміші $\alpha = 90^\circ$ процес мікрорізання не відбувається, а поверхневий шар матеріалу руйнується за рахунок утворення лунок на початковому етапі. Надалі лунки розширюються і поглиблюються за рахунок викришування часток наповнювача і, як наслідок, макроруйнування поверхневого шару КМ. Крім того, частки гідроабразиву, які відскакують при ударі від поверхні покриття, перешкоджають або сповільнюють рух наступних часток.

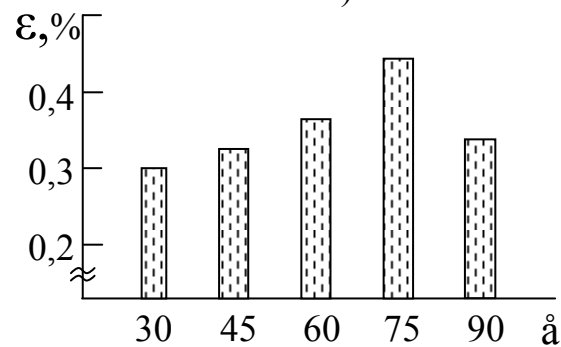
Експериментально встановлено, що найвищими показниками інтенсивності зношування серед усіх досліджуваних композитів відзначається епоксидна матриця (рис. 2). Показано, що при куті атаки гідроабразиву $\alpha = 30^\circ$ інтенсивність зношування епоксидної матриці (КМ 1) становить $\varepsilon = 0,40$ %. Збільшення кута атаки гідроабразиву до $\alpha = 60\dots 75^\circ$ призводить до збільшення інтенсивності зношування матриці ($\varepsilon = 0,60\dots 0,69$ %), а при куті атаки $\alpha = 90^\circ$ інтенсивність зношування КМ 1 становить $\varepsilon = 0,62$ %. Відомо, що зношування КМ зумовлено сукупністю фізико-хімічних процесів у ділянці контакту абразивних часток із поверхнею матеріалу, що призводить до двох видів руйнування матеріалу: мікрорізання і втоми поверхневого шару при багатократному його деформуванні абразивними частками [15, 20, 21]. Інтенсивність та домінуючий вплив кожного з процесів залежить від структури полімеркомпозитів, природи та вмісту наповнювача. При дослідженні КМ 1 залежно від кута атаки гідроабразиву спостерігали обидва види руйнування поверхневого шару матеріалу.

Зокрема, при кутах атаки суміші $\alpha = 60 \dots 75^\circ$ на початковому етапі відбувається макрорізання поверхні, а далі – пластичне деформування і видалення матеріалу. Кількість видаленого матеріалу залежить від його когезійної міцності.

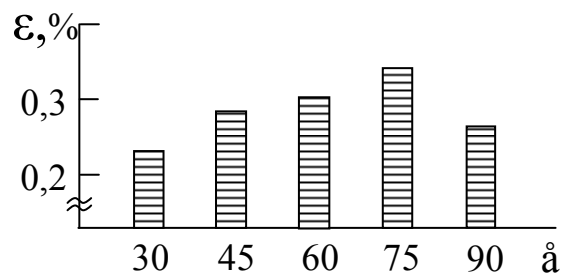
Встановлено (рис. 2), що введення в епоксидний олігомер дисперсних часток забезпечує зменшення інтенсивності зношування КМ 2 і КМ 3 стосовно полімерної матриці КМ 1 у 1,38...1,74 раза (при куті атаки гідроабразиву $\alpha = 30^\circ$). Водночас спостерігали механічні процеси мікрорізання, що характерно для зношування твердих і 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.



а)



б)



в)

Рисунок 2. Залежність відносної інтенсивності зношування КМ від кута атаки гідроабразивної суміші: а) КМ 1; б) КМ 2; в) КМ 3

У такому випадку на поверхні контакту виникають канавки, які мають орієнтацію у напрямку вектора швидкості ковзання гідроабразивного потоку. Такий механізм вносить незначний вклад у процес зношування і характерний для композитів КМЗ (рис. 3), для яких відносна зносостійкість є найвищою серед усіх досліджуваних матеріалів і при куті атаки гідроабразиву $\alpha = 30^\circ$ становить $\varepsilon = 0,23\%$. Методом електронної мікроскопії підтверджено, що при збільшенні кута атаки гідроабразиву до $\alpha = 60^\circ$ на поверхні зразків спостерігали мікророзриви (рис. 3б), а при куті атаки $\alpha = 75^\circ$ поверхня контакту характеризується формуванням канавок у напрямку вектора швидкості ковзання гідроабразивного потоку (рис. 3в). Підвищення відносної зносостійкості КМЗ, порівняно з іншими досліджуваними матеріалами, можна пояснити впливом структури ФГМ на поліпшення експлуатаційних характеристик. Показано (рис. 4), що при формуванні КМЗ, утворюється градієнтна структура композиту, який попередньо складався з двох шарів. При формуванні матеріалу забезпечили взаємодію між шарами, з утворенням монолітного композиту. При цьому у процесі дослідження верхній шар (функціональний) забезпечує зносостійкість композитів, а нижній шар виконує функцію не лише підвищення адгезійної міцності, але й поліпшення демпфуючих властивостей (рис. 4). У комплексі поєднання двох шарів, які при встановлених режимах формування взаємодіють, утворюючи монолітний матеріал з градієнтом властивостей за товщиною, забезпечує максимальну зносостійкість ФГМ.

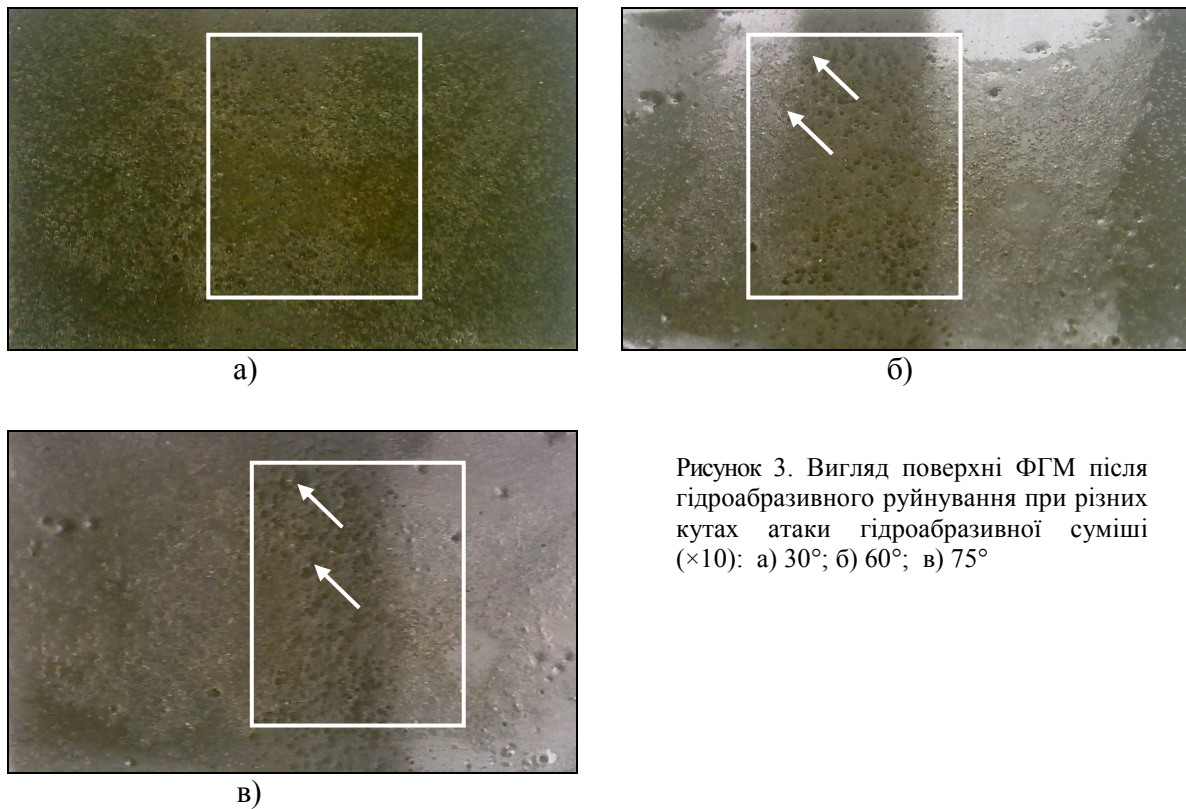


Рисунок 3. Вигляд поверхні ФГМ після гідроабразивного руйнування при різних кутах атаки гідроабразивної суміші ($\times 10$): а) 30° ; б) 60° ; в) 75°

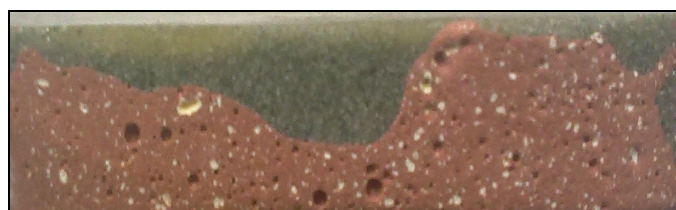


Рисунок 4. Мікросвітлина перерізу ФГМ ($\times 80$)

Для композитів КМ 2 домінуючим є механізм пластичної деформації [21, 24]. При такому механізмі зношування окремі абразивні частки під впливом значного номінального тиску гідроабразивного потоку вклинюються у поверхневий шар КМ, пластично деформуючи при цьому епоксидну матрицю. Внаслідок цього утворюється область деформації стиску (попереду ділянки контакту) та деформація розтягу (позаду ділянки контакту), що призводить до утворення різної величини мікротріщин і пластичних деформацій [14]. Під впливом дотичної сили гідроабразивного потоку абразивна частка разом з частиною полімера видаляється з поверхні матеріалу. Багатократне деформування КМ 2 у результаті подальшого спрацювання призводить до втоми та локального видалення матеріалу матриці. З часом руйнування локалізується на тих ділянках КМ, які мають найбільшу густину мікророзривів. При цьому можна очікувати появу макророзриву, орієнтованого перпендикулярно до напрямку швидкості руху гідроабразивної суміші. Під впливом повторних максимальних деформацій відбувається збільшення макрозруйнованих ділянок з видаленням полімером, що призводить до утворення хвилеподібного рельєфу під назвою “рисунок Шалломаха” [14, 21]. Такий рельєф спостерігали методом електронної мікроскопії на поверхні зразків КМ 2, що містять частки КШ і TiO_2 , розміщені перпендикулярно до напрямку руху абразивних часток, причому топологію поверхні зношування спостерігали і після повторних досліджень.

Механізм зменшення інтенсивності зношування КМ 2 і КМ 3, наповнених дисперсними частками, порівняно з вихідною полімерною матрицею КМ 1 можна пояснити формуванням ЗПШ поблизу поверхні наповнювача, що призводить до зростання когезійної міцності епоксикомпозитів. При введенні дисперсних часток формуються термодинамічні неврівноважені системи із ЗПШ, які відзначаються більшим ступенем зшивання від матеріалу матриці в об’ємі полімера. Макромолекули епоксидного олігомера характеризуються дипольним моментом, тому, згідно з моделлю Б.В.Дерягіна, орієнтуються перпендикулярно до поверхні часток [14, 25]. Така взаємодія призводить до формування адсорбційних шарів навколо часток, які мають товщину від 0,1 до 2 мкм (рис. 5). Конформаційний набір макромолекул у адсорбційному шарі суттєво залежить від хімічної природи дисперсних часток, яка визначається кількістю кінетично-активних центрів на поверхні наповнювача [13, 26]. Аналіз ІЧ-спектрів КМ 3, наповнених частками КШ, TiO_2 і SiC свідчить, що введення наповнювача зумовлює зміщення смуги поглинання при частоті $\nu = 1180 \text{ см}^{-1}$ в область вищих частот на 20 см^{-1} . Це пов’язано із взаємодією активних центрів на поверхні часток з молекулами олігомера по зв’язках $-\text{CN}-$, унаслідок чого додатково утворюються первинні ($-\text{CH}-\text{NH}_2-$) аміни. Також виявлено зміщення смуги поглинання $-\text{OH}$ -груп при частоті 1248 см^{-1} , що зумовлено участю у міжфазовій взаємодії гідроксильних груп. Крім того, у КМ, порівняно з вихідною матрицею, з’являється нова смуга поглинання з максимумом при хвильовому числі 1558 см^{-1} , що свідчить про виникнення взаємодії між каталітично-активними центрами на поверхні наповнювача з макромолекулами зв’язувача, при цьому утворюється зв’язок типу $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{C}\equiv$.

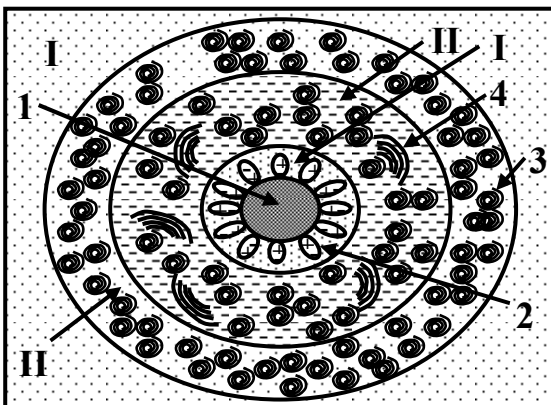


Рисунок 5. Схема формування ЗПШ при структуроутворенні КМ:

- 1 – частка наповнювача;
- 2 – диполі;
- 3 – глобули;
- 4 – фібрили.

Крім того, введення наповнювача у гетерогенну систему призводить до зростання її термодинамічної несумісності, що призводить до морфологічних змін, унаслідок чого утворюються адсорбційні та перехідні шари зі значною протяжністю. Перехідні шари є складовою ЗПШ, залежать від фізичної активності наповнювача і визначаються відмінними залишковими напруженнями у порівнянні з напруженнями у матриці. Товщина таких ЗПШ у епоксидних КМ сягає значень 20...30 мкм [13]. Дані результати пояснюють, виходячи із адсорбційної взаємодії за рахунок обмежуючого впливу поверхні наповнювача на процеси структуроутворення матриці. На початковому етапі контактування двох фаз попередня адсорбційна взаємодія призводить до блокування процесів структуроутворення поблизу поверхні часток. Це зумовлює формування першого поверхневого шару у ЗПШ зі значними релаксаційними характеристиками у результаті молекулярної рухливості ланцюгів зв'язувача (рис. 5). Залежно від активності, топології поверхні й дисперсності часток у першому поверхневому шарі можуть формуватися надмолекулярні глобулярні та фібрилярні структури, кількість яких в одиниці об'єму матриці визначає ступінь зшивання і товщину шару. У другому поверхневому шарі, суміжному з матеріалом чистої матриці, кількість надмолекулярних утворень є незначною, що зменшує міцність матеріалу. Зазначимо, що кількість прошарків у ЗПШ залежить від природи наповнювача і межа поділу між ними є умовною. Внаслідок дифузійних процесів відбувається взаємна міграція не тільки сегментів чи макромолекул, але й агрегатів молекул з одного прошарку в інший. Дані припущення підтверджені результатами дослідження теплостійкості та фізико-механічних властивостей КМ [27]. Показано, що властивості дисперснонаповнених КМ суттєво поліпшуються порівняно з полімерною матрицею, однак залежать від фізичної природи, вмісту і дисперсності часток. Отже, використання термодинамічного і кінетичного підходу до обґрунтування механізму формування композитів з урахуванням міжфазових явищ відкриває нові можливості направлено керування експлуатаційними характеристиками епоксидних КМ, у тому числі і їх зносостійкістю.

Висновки. За результатами експериментальних досліджень композитних матеріалів встановлено зносостійкість епоксикомпозитів, наповнених дисперсними частками різної фізичної природи. Показано, що механізм зношування композитних матеріалів зумовлений фізико-механічними процесами, визначальними з яких є процеси мікрорізання і пластичного деформування поверхневого шару. При цьому інтенсивність зношування епоксикомпозитів залежить від таких основних факторів:

1. Кута атаки гідроабразивної суміші. Встановлено, що мінімальну інтенсивність зношування КМ спостерігали при куті атаки гідроабразивної суміші $\alpha=30^\circ$, де вирішальне значення у мікроруйнуванні має дотична складової навантаження. Найбільшими показниками інтенсивності зношування характеризуються композити при куті атаки суміші $\alpha = 60...75^\circ$ 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. Структури композиту, фізичної природи і вмісту полідисперсного наповнювача. Показано, що формування функціонально-градієнтних композитів за експериментально встановленими температурно-часовими режимами, а також у результаті введення дисперсних часток карбіду кремнію, коричневого шламу і діоксиду титану забезпечує формування міцнозшитих тиксотропних гетерогенних композитів з мінімальними залишковими напруженнями. Зношування у таких матеріалах відбувається за механізмом мікрорізання. Композити з рівномірним розподілом двокомпонентного полідисперсного наповнювача коричневого шламу і діоксиду титану характеризуються недостатньою міцністю, що зумовлює перебіг процесів пластичного деформування матеріалу при зношуванні.

3. Фізико-механічних властивостей композитів. Встановлена кореляційна залежність відносної інтенсивності зношування композитів і їхніх фізико-механічних властивостей. Доведено, що інтенсивність зношування визначається фізико-хімічною взаємодією компонентів при структуроутворенні матеріалів, у результаті чого в матриці навколо часток наповнювача формуються зовнішні поверхневі шари, які визначають експлуатаційні характеристики епоксикомпозитів, у тому числі і їхню зносостійкість.

За результатами дослідження розроблено технологічні методи підвищення зносостійкості композитних матеріалів на епоксидній основі та рекомендовано функціонально-градієнтні матеріали для формування покриттів з підвищеними експлуатаційними характеристиками для захисту від гідроабразивного зношування поверхонь складного профілю технологічного устаткування.

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. Polym. 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. Polym. Sci. – 2002. – 40B, N 24. – P.2860–2870.
5. Gall K. Shape memory polymer nanocomposites / K.Gall, M.L.Dunn, Y.Liu et al // 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. Phys. Lett. – 2004. – 85, N2. – P.290–292.
7. 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. – Т.11, №1. – С.48–50.
8. Свойства эпоксидных систем с глинодержащими нанокompозитами / М.Ю. Зеленка, В. Шпачек, Ф. Соча // Механика композитных материалов. – 2003. – Т.39, №2. – С.177–182.
9. Термоусаживающиеся муфты из наполненных эпоксидных композиций / В.А. Белошенко, А.П. Борзенко, В.А. Глазунова, М.К. Пактер // Физика и техника высоких давлений. – 2004. – Т.14, №4. – С.109–116.
10. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров / В.Г. Хозин. – Казань: Дом печати, 2004. – 446с.
11. 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. – Т.11, №3. – С.54–60.
12. Эффект памяти формы и электрическое сопротивление композиции эпоксидный полимер – терморасширенный графит / В.А. Белошенко, Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Ю.В. Возняк // Высокомолекуляр. соед. Серия А. – 2005. – Т.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: підручник / 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. Трибохімія і реологія износоустойкости: монографія / В.В. Шевеля, В.П.Олександренко. – Хмельницький: ХНУ, 2006. – 278с.
16. Чернець М. Дослідження і розрахунків 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): учебник / Д.Н. Гаркунов. – 4-е изд. – М.: Изд-во “МСХА”, 2001. – 606с.
19. Кондратюк В.Л. Исследование износоустойкости многослойных полимеркомпозиционных материалов // Сб. трудов науч.-практ. семинара. – Тернополь: ТДПИ, 1989. – С.34–36.
20. Полимер-композиционные износо- и коррозионностойкие покрытия для деталей сельхоз-машин / Е.Н. Кальба, В.Л. Кондратюк, И.В. Оверко, А.Т. Помелуйко // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1991. – N1. – С.43–44.

21. Богданович П.Н. Трение и износ в машинах / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск: Высшая школа, 1999.-376с.
22. Тененбаум М.М. Сопротивление 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. Изучение флокуляции гидрофобных золь 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.
26. Kal'ba E.M. Adhesion strength of polymer-containing protective coatings / E.M.Kal'ba, A.V.Buketov, P.P.Savchuk and S.M.Holotenko // Materials Science. Chemistry and Materials Science. – New York. – Volume 35, Number 1/January. – 1999. – P.125–128.
27. Стухляк П.Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, І.Г. Добротвор. – Тернопіль: Збруч, 2008.– 208с.

Отримано 21.01.2011