

ЗАЛЕЖНІСТЬ ГІДРОАБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ ВІД ПРИРОДИ І ВМІСТУ ДВОКОМПОНЕНТНОГО НАПОВНЮВАЧА

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

²Луцький національний технічний університет

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

Постановка проблеми. Значну кількість полімерів використовують у вигляді конструкційних матеріалів для виготовлення різноманітних виробів і обладнання загального та спеціального призначення [1; 2]. Такі матеріали повинні характеризуватися 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]. Крім того, при введенні дисперсних часток епоксидні композити набувають нових функціональних властивостей: електропровідності, термо- і

теплостійкості та ін. Такі композити експлуатують у широкому діапазоні температур і циклічних навантажень. Актуальним також є використання дешевих наповнювачів (відходи від промислового виробництва), окрім підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних КМ, приводить до економії конструкційних матеріалів, що вигідно з економічної і екологічної точки зору.

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 [14–18]. При цьому М.В.Кіндрачуком [14] і В.В.Шевелею [15] показано, 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 та теоретичні дані не дають змоги робити висновки про розподіл напружень у КМ, які експлуатують в 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 і 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 КМ 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 впливу напружено-деформованого стану у епоксикомпозитних матеріалах на їх гідроабразивну зносостійкість від вмісту дисперсних наповнювачів різної фізичної природи і розмірів.

Матеріали і методика дослідження. Об'єктом дослідження вибрано епоксидний олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для зшивання композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78). Як пластифікатор використано дибутилфталат (ГОСТ 2102-72). Зв'язувач формували при такому вмісті інгредієнтів, мас.ч.: епоксидний олігомер ЕД-20 – 100, пластифікатор дибутилфталат – 8, твердник ПЕПА – 8. З метою з'ясування впливу фізичної природи і топології поверхні наповнювачів на властивості КМ використано грубодисперсні (63мкм) і дрібнодисперсні (10...20мкм) частки. Як грубодисперсні наповнювачі застосовували зольні мікросфери (ЗМ) (ТУ 5712-010-80338612-2008), частки коричневого шламу (КШ) і карбїду кремнію. Як дрібнодисперсні наповнювачі використовували частки вспученого вермикулїту (ВВ), газової сажі (ГС) і оксиду хрому зеленого (ГОСТ 2912-79).

Зольні мікросфери є мінеральними відходами, що містяться у золі при спалюванні вугілля на електростанціях. Перевагою їх використання є низька густина, невеликі розміри, сферична форма, висока температура плавлення. Хімічний склад ЗМ, %: SiO_2 – 55,0...59,0; Al_2O_3 – 27,0...31,0; Fe_2O_3 – 4,6...5,5; K_2O – 3,2...3,7; CaO – 1,1...1,8; MgO – 1,3...1,7; TiO_2 – 0,1...1,1; SO_2SO_3 – 0,05...1,00; $\text{Cl} < 0,1$.

Коричневий шлам як доступний і активний наповнювач вводили для здешевлення КМ та активації взаємодії на межі фаз. КШ складається з суміші оксидів (мас.ч.): оксид заліза – 46...48, оксид алюмінію – 7...9, оксид кремнію – 12...14, оксид кальцію – 18...21, оксид магнію – 1...2, оксид титану – 4...7, оксид ванадію – 1,5...2,5, оксид олова – 0,9...1,6, оксид барію – 0,7...1,0, інші оксиди – до 100.

Вспучений вермикуліт є пористим матеріалом у вигляді лускатих часток, який отримують відпалом вермикулітового кноцентрата – гідрослюди, що містить між елементарними шарами зв'язану воду. Хімічний склад ВВ, %: SiO_2 – 33...36; Fe_2O_3 – 5...17; FeO – 0,2; Al_2O_3 – 6...18; MgO – 14...25; CaO – 1,2...2,0; K_2O – 3...5; Mn – 0,06; Na_2O – 0,5; TiO_2 – 0,4; $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ – 6,8...7,0.

Композити формували за такою технологією: дозування компонентів, суміщення пластифікатора та епоксидної смоли ЕД-20, термооброблення суміші протягом часу $\tau = 4,0 \pm 0,1$ год при температурі $T = 393 \pm 2$ К, суміщення часток і зв'язувача, введення твердника ПЕПА, затвердження композиції за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримка протягом 2-х год при температурі $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю 3 град/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримка протягом часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. Далі зразки витримували протягом часу $\tau = 60$ год на повітрі при температурі $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням випробувань.

Відносно 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 і абразивних часток (5:1 у об'ємі) [20]. Випробування зразків з розміром $20 \times 10 \times 4$ мм проводили при зміні кута атаки гідроабразивної суміші в межах від $\alpha = 30^\circ$ до $\alpha = 90^\circ$. Для порівняння отриманих результатів експериментальних досліджень як еталон використано зразок зі сталі Ст.3.

Відносно зносостійкість визначали за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\delta_e}{\delta_3},$$

де: δ_e – втрата маси сталюого зразка (Ст.3), кг; δ_3 – втрата маси досліджуваного зразка, кг.

Зважування зразків перед дослідженнями і після випробувань проводили на аналітичних вагах ВЛР-200 з точністю до $\pm 0,01$ г.

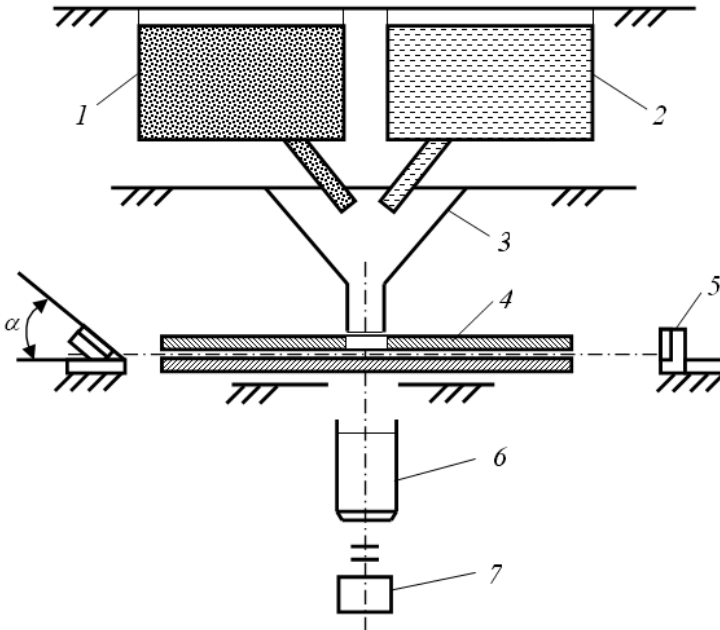


Рис. 1. Схема відцентрового прискорювача: 1 – резервуар з абразивними частинками; 2 – резервуар з технічною водою; 3 – бункер для змішування суміші; 4 – ротор; 5 – зразок з покриттям; 6 – електродвигун; 7 – тахометр.

Обговорення експериментальних результатів дослідження. У роботі досліджували двошарові покриття. Як адгезійний шар використовували матеріал на основі пластифікованої епоксидної матриці (100 мас.ч.), що містить частки ЗМ (10 мас.ч.) і ГС (5 мас.ч.). Поверхневий шар з підвищеною зносостійкістю має відзначатися поліпшеними когезійними властивостями і незначними залишковими напруженнями. У

зв'язку з цим, виходячи з результатів попередніх досліджень фізико-механічних властивостей КМ і математичного планування експерименту, досліджували такі варіанти поверхневого шару покриттів:

КМ 1 – пластифікована епоксидна матриця (контрольний зразок);

КМ 2 – основний наповнювач ЗМ (20 мас.ч.) і додатковий ВВ (5 мас.ч.);

КМ 3 – основний наповнювач ЗМ (30 мас.ч.) і додатковий ВВ (20 мас.ч.);

КМ 4 – основний наповнювач КШ (50 мас.ч.) і додатковий Cr_2O_3 (50мас.ч.);

КМ 5 – основний наповнювач SiC (60 мас.ч.) і додатковий ВВ (20 мас.ч.);

КМ 6 – основний наповнювач SiC (80 мас.ч.) і додатковий Cr_2O_3 (40 мас.ч.).

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 твердостей 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 залежностей відносної зносостійкості 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). Найменшими показниками зносостійкості характеризуються КМ при куті атаки суміші

$\alpha=60...75^\circ$. Це можна пояснити виникненням на поверхні КМ водночас дотичних напружень, які спричиняють мікро- і макрорізання матеріалу, та нормальних напружень, які призводять до пластичних деформацій поверхневого шару.

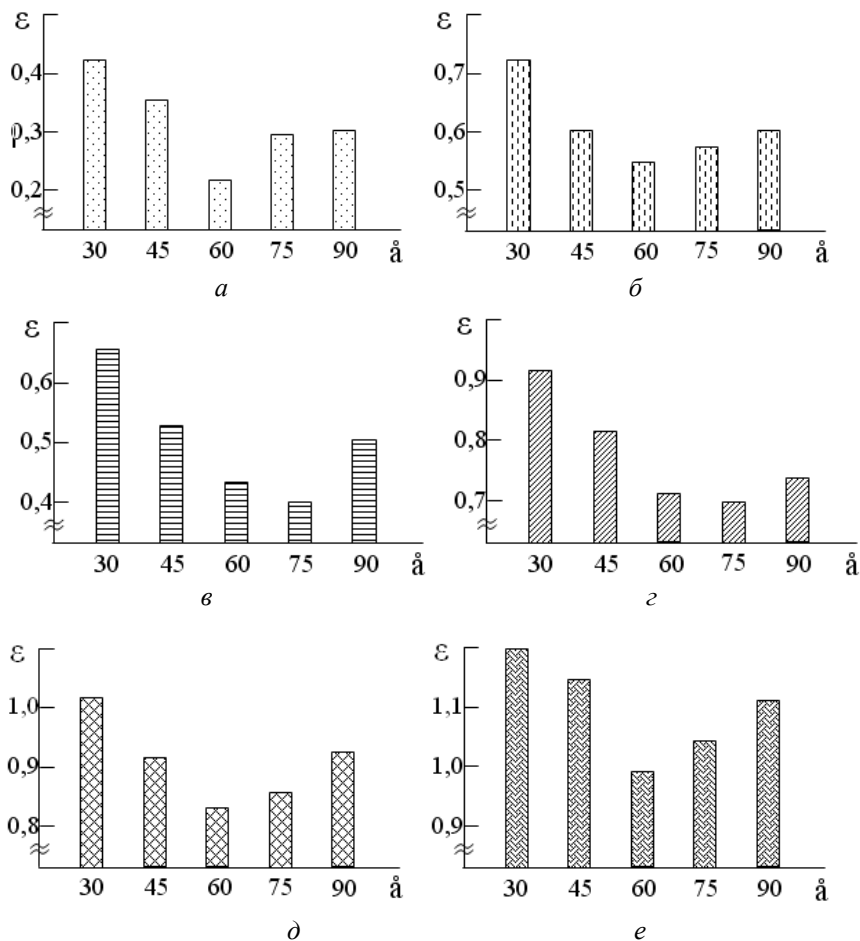


Рис. 2. Залежність відносної зносостійкості від кута атаки гідроабразивної суміші і природи наповнювача (мас.ч. на 100 мас.ч. зв'язувача) у КМ:
 а) КМ 1: матриця; б) КМ 2: 3М (20) + ВВ (5); в) КМ 3: 3М (30) + ВВ (20);
 г) КМ 4: КШ (50) + Cr₂O₃ (50); д) КМ 5: SiC (60) + ВВ (20);
 е) КМ 6: SiC (80) + Cr₂O₃ (40)

При прямому куті атаки гідроабразивної суміші ($\alpha=90^\circ$) спостерігали підвищення показників зносостійкості епоксикомпозитів порівняно з КМ, які досліджували при кутах атаки $\alpha=60...75^\circ$. Підвищення зносостійкості КМ у цьому випадку можна пояснити впливом лише нормальної складової зовнішніх сил, внаслідок 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 внаслідок пластичного деформування лунки розширюються і поглиблюються, що зумовлює відрив 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 найнижчими показниками зносостійкості серед усіх досліджуваних композитів відзначається пластифікована епоксидна матриця (рис. 2). Показано, що при куті атаки гідроабразиву $\alpha=30^\circ$ відносна зносостійкість КМ 1 становить $\epsilon=0,42$. Збільшення кута атаки гідроабразиву до $\alpha=60...75^\circ$ призводить до зменшення зносостійкості матриці ($\epsilon=0,22...0,28$), а при куті атаки $\alpha=90^\circ$ відносна зносостійкість КМ 1 становить $\epsilon=0,30$. Відомо, що спрацювання КМ зумовлено сукупністю фізико-хімічних процесів у ділянці контакту абразивних часток з 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 $\alpha=60...75^\circ$ 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 у пластифікований епоксидний олігомер дисперсних часток забезпечує підвищення

зносостійкості КМ стосовно полімерної матриці у 1,6...2,8 разів (при куті атаки гідроабразиву $\alpha=30^\circ$). Водночас спостерігали механічні процеси 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, площа 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. Такий механізм вносить незначний вклад у процес зношування і характерний для композитів КМ 5: SiC (60) + BB (20) і КМ 6: SiC (80) + Cr₂O₃ (40), для яких відносна зносостійкість є найвищою серед усіх досліджуваних матеріалів і при куті атаки гідроабразиву $\alpha=30^\circ$ становить $\varepsilon=1,02$ і $\varepsilon=1,20$ відповідно. Для композитів КМ 2: ЗМ (20) + BB (5), КМ 3: ЗМ (30) + BB (20) і КМ 4: КШ (50) + Cr₂O₃ (50) 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 деформує 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 та пластичних деформацій [14]. Під впливом дотичної сили гідроабразивного потоку абразивна частка разом з частиною полімера видаляється з поверхні матеріалу. Багатократне деформування КМ, що містять частки ЗМ, у результаті подальшого спрацювання призводить до втоми та локального видалення матеріалу матриці. Крім того, у результаті ударної дії гідроабразиву, на відміну від часток карбиду кремнію, спостерігали руйнування пустотілих зольних мікросфер, що зумовлює утворення нових мікророзривів у КМ. 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 хвилевидного рельєфу під назвою «рисунок Шалломаха» [14; 21]. Хвилі, які спостерігали методом електронної мікроскопії на поверхні зразків КМ, що містять частки ЗМ і КШ (основний наповнювач), розміщені перпендикулярно до напрямку руху абразивних часток, причому рисунок поверхні зношування зберігається і після повторних досліджень.

Механізм підвищення відносної зносостійкості КМ, наповнених дисперсними частками, порівняно з вихідною полімерною матрицею можна пояснити формування ЗППШ навколо добавок, внаслідок чого зростає когезійна міцність епоксикомпозитів. При введенні дисперсних часток формуються термодинамічні неврівноважені системи із ЗППШ, які відзначаються більшим ступенем зшивання від матеріалу матриці у 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. 3). 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, наповнених частками ЗМ і SiC свідчить, що введення наповнювача зумовлює зміщення смуги поглинання при частоті $\nu = 1180\text{см}^{-1}$ у область вищих частот на 20см^{-1} . Це пов'язано із взаємодією активних центрів на поверхні часток з макромолекулами олігомера по зв'язках $-\text{CN}-$, внаслідок чого додатково утворюються первинні ($-\text{CN}-\text{NH}_2-$) аміни. Також виявлено зміщення смуги поглинання $-\text{OH}$ -груп при частоті 1248см^{-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 1558см^{-1} , що свідчить про виникнення взаємодії між каталітично-активними центрами на поверхні наповнювача з макромолекулами зв'язувача, ри цьому утворюється зв'язок типу $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{C}\equiv$.

Крім того, введення наповнювача у гетерогенну систему призводить до зростання її термодинамічної несумісності і при цьому спостерігають морфологічні зміни, внаслідок чого

утворюються адсорбційні та перехідні шари із значною протяжністю. Перехідні шари є складовою частиною ЗПШ, залежать від фізичної активності наповнювача і визначаються залишковими напруженнями. Товщина таких ЗПШ у епоксидних КМ досягає значень 20...30мкм [13].

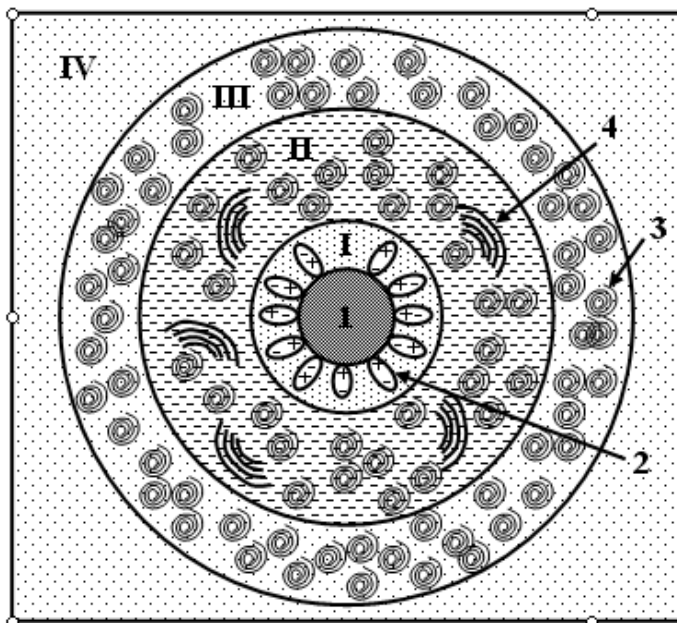


Рис. 3. Схема формування ЗПШ при структуроутворенні КМ:
 1 – частка наповнювача; 2 – диполі; 3 – глобули; 4 – фібрили.
 I – адсорбційний шар; II – перший поверхневий шар; III – другий поверхневий шар; IV – матриця

Дані результати пояснюють, виходячи із адсорбційних уявлень та 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 приповерхневого шару у ЗПШ зі значними релаксаційними характеристиками у результаті молекулярної рухливості ланцюгів зв'язувача (рис. 3). Залежно від

активності, топології поверхні і дисперсності часток у першому приповерхневому шарі можуть формуватися надмолекулярні глобулярні і фібрилярні структури, кількість яких у одиниці об'єму матриці визначає ступінь зшивання і товщину шару. У другому приповерхневому 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 у інший. Дані припущення підтвердженні 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 врахуванням міжфазових явищ відкриває нові можливості направленої керування експлуатаційними характеристиками епоксидних КМ, у тому числі і їх зносостійкістю.

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 зносостійкість епоксикомпозитів залежить від таких основних факторів.

1. Кут атаки гідроабразивної суміші. Встановлено, що максимальну зносостійкість КМ спостерігали при куті атаки гідроабразивної суміші $\alpha=30^\circ$, де вирішальне значення у мікроруйнуванні мають дотичні сили. Найменшими показниками зносостійкості 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. Фізична природа і вміст полідисперсного двокомпонентного наповнювача. Показано, що введення дисперсних часток карбїду кремнію та оксиду хрому забезпечує формування міцнозшитих тиксотропних гетерогенних композитів з мінімальними залишковими напруженнями. Зношування у таких матеріалах відбувається за механізмом мікрорізання. Композити, наповнені частками зольних мікросфер і вспученого вермикулїту характеризуються недостатньою міцністю, що зумовлює перебіг процесів пластичного деформування матеріалу при зношуванні.

3. Фізико-механічні властивості композитів. Встановлена кореляційна залежність відносної зносостійкості композитів і їхніх фізико-механічних властивостей. Крім того обґрунтовано, що зносостійкість визначається фізико-хімічною взаємодією при структуроутворенні матеріалів, в результаті чого у 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 покриття з підвищеними експлуатаційними характеристиками для захисту від гідроабразивного зношування поверхонь складного профілю технологічного устаткування.

Список літератури

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

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 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. Phys. 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.* 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. –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. *Трибология: підруч./* М.В.Кіндрачук, В.Ф.Лабунець, М.І.Пашечко, С.В.Корбут. –К.: В-во Нац. авіац. ун-ту “НАУ-друк”.–2009. –392с.

15. *Шевеля В.В.* Трибохимия и реология износостойкости: монография / В.В.Шевеля, В.П.Олександренко. –Хмельницкий: ХНУ, 2006. –278 с.

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. –492 с.

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. –606 с.

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.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. *Баран А.А., Дерягин Б.В., Васько Я.Я., Курлиенко О.Д.* Изучение флокуляции гидрофобных зольей 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.* Эпоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями / П.Д.Стухляк, А.В.Букетов, І.Г.Добротвор. –Тернопіль: Збруч, 2008.–208с.

Роботу виконано за рахунок бюджетних коштів Державного фонду фундаментальних досліджень України.

***Стухляк П.Д., Букетов А.В., Редько О.И.* Зависимость гидроабразивной износостойкости эпоксикомпозитов от природы и содержания двухкомпонентного наполнителя // Проблемы тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 53. – С.159–174.**

Исследовано влияние содержания и природы дисперсных наполнителей на относительную износостойкость эпоксидных композитов. Установлено, что износ композитных материалов зависит от угла атаки гидроабразивной

смеси, физической природы, содержания полидисперсного двухкомпонентного наполнителя и физико-механических свойств композитов. В результате исследований рекомендовано покрытия с повышенными эксплуатационными характеристиками для защиты от гидроабразивного износа технологического оборудования.

Рис. 3, список лит.: 27 наим.

Dependence of water jet durability of epoxycomposites of the nature and content of two-component filler.

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.

Стаття надійшла до редакції 27.05.10