

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 667.64:678.026

А.В. БУКЕТОВ, М.Ю. АМЕЛІН, О.М. БЕЗБАХ, Р.Ю. НЕГРУЦА
Херсонська державна морська академія**ЗАХИСНІ ЕПОКСИКОМПОЗИТНІ ПОКРИТТЯ З ПОЛІПШЕНИМИ
АНТИКОРОЗІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ І ЗНОСОСТІЙКІСТЮ**

У роботі обґрунтована доцільність відновлення деталей та механізмів у різних галузях промисловості полімерними композитами. Розроблено нові захисні епоксикомпозитні покриття з поліпшеними антикорозійними властивостями і зносостійкістю.

Для формування композитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі використано епоксидний діановий олігомер ЕД-20, модифікатор, твердник поліетиленполіамін і нано- і мікродисперсні частки. Досліджено антикорозійні властивості матеріалів у природних умовах та у агресивних середовищах.

Доведено, що найменшими показниками корозійної стійкості відзначається захисне покриття, модифіковане парааміноазобензолом і наповнене частками суміші нанодисперсних сполук, залісної окалини і Waltrap. Проникність у природних умовах такого покриття впродовж часу $t = 250...300$ діб дослідження становить 1,8 %, що у 3,8 разів менше за аналогічні показники вихідної епоксидної матриці.

Обґрунтовано, що найвищими показниками зносостійкості відзначається захисне покриття, модифіковане парааміноазобензолом і наповнене частками суміші нанодисперсних сполук, залісної окалини і Agosel S-2000. Коефіцієнт зносостійкості під дією гідроабразиву такого покриття становить $K_z = 1,75$, що у 1,3 разів більше за аналогічні показники вихідної епоксидної матриці. Показано, що механізм зношування матеріалів зумовлений фізико-механічними процесами на поверхні композитів, визначальними з яких є процеси мікрорізання і пластичного деформування поверхневого шару.

Ключові слова: епоксидний композит, корозійна тривкість, зносостійкість, наповнювач, покриття.

А.В. БУКЕТОВ, М.Ю. АМЕЛІН, О.М. БЕЗБАХ, Р.Ю. НЕГРУЦА
Херсонская государственная морская академия**ЗАЩИТНЫЕ ЭПОКСИКОМПОЗИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ
АНТИКОРРОЗИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ**

В работе обоснована целесообразность восстановления деталей и механизмов в различных отраслях промышленности полимерными композитами. Разработаны новые защитные эпоксикомпозитные покрытия с улучшенными антикоррозионными свойствами и износостойкостью.

Для формирования композитных материалов и защитных покрытий на их основе использован эпоксидный диановый олигомер ЭД-20, модификатор, отвердитель полиэтиленполиамин и нано- и микродисперсные частицы. Исследованы антикоррозионные свойства материалов в естественных условиях и в агрессивных средах.

Доказано, что наименьшими показателями коррозионной стойкости отличается защитное покрытие, модифицированное парааминоазобензолом и наполненное частицами смеси нанодисперсных соединений, железной окалины и Waltrap. Проницаемость в естественных условиях такого покрытия в течение времени $t = 250...300$ суток исследования составляет 1,8%, что в 3,8 раза меньше аналогичных показателей исходной эпоксидной матрицы.

Обосновано, что самыми высокими показателями износостойкости отличается защитное покрытие, модифицированное парааминоазобензолом и наполненное частицами смеси нанодисперсных соединений, железной окалины и Agosel S-2000. Коэффициент износостойкости под действием гидроабразива такого покрытия составляет $K_z = 1,75$, что в 1,3 раза больше аналогичных показателей исходной эпоксидной матрицы. Показано, что механизм износа материалов обусловлен физико-механическими процессами на поверхности композитов, определяющими из которых являются процессы микрорезания и пластического деформирования поверхностного слоя.

Ключевые слова: эпоксидный композит, коррозионная стойкость, износостойкость, наполнитель, покрытие.

A.V. BUKETOV, M.YU. AMELIN, O.M. BEZBAKH, R.YU. NEGRUTCA
Kherson State Maritime Academy

PROTECTIVE EPOXY COMPOSITE COATINGS WITH IMPROVED ANTICORROSIVE PROPERTIES AND WEAR RESISTANCE

The feasibility of restoring parts and mechanisms in various industries with polymer composites is grounded in the work. New protective epoxy-composite coatings with improved anticorrosive properties and wear resistance have been developed.

To form composite materials and protective coatings based on them, epoxy diene oligomer ED-20, a modifier, a hardener polyethylene polyamine and nano- and micro-dispersed particles were used. The anticorrosive properties of materials under natural conditions and in aggressive media have been investigated.

It is proved that the protective coating modified with paraaminoazobenzene and filled with particles of a mixture of nanodispersed compounds, iron scale and Waltrop is shown to have the least indicators of corrosion resistance. Permeability in natural conditions of such coating for a time $t = 250 \dots 300$ days of study is 1.8%, which is 3.8 times less than the same parameters of the initial epoxy matrix.

It is substantiated that the protective coating modified with paraaminoazobenzene and filled with particles of a mixture of nanodispersed compounds, iron scale and Agocel S-2000 is characterized by the highest wear resistance indexes. The coefficient of wear resistance under the action of the hydroabrasive of such a coating is $K_s = 1.75$, which is 1.3 times greater than that of the initial epoxy matrix. It is shown that the wear mechanism of materials is due to physical and mechanical processes on the surface of composites, the determining of which are the processes of microcutting and plastic deformation of the surface layer.

Keywords: epoxy composite, corrosion resistance, wear resistance, filler, coating.

Постановка проблеми

Полімерні композитні матеріали (КМ) і захисні покриття на їх основі широко застосовують для збільшення ресурсу роботи деталей та механізмів технологічного обладнання хімічної, нафтопереробної галузі, машино- та суднобудування. Захисні композитні покриття (КП) на полімерній основі завдяки нескладній технології формування є вигідними не лише з економічної, але й з технологічної точки зору. Крім того, такі матеріали мають широку сировинну базу на території України і завдяки широкому спектру інгредієнтів та технологічності формування композицій у природних умовах мають широкий спектр впровадження у промисловості впродовж останніх десятиліть.

Водночас розвиток промисловості ставить умови створення нових матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками у комплексі. При цьому важливе значення мають антикорозійні властивості захисних КП, а також зносостійкість готових виробів. У даному контексті ефективним є використання полімерних КП на епоксидній основі. Такі матеріали відзначаються у комплексі поліпшеними теплофізичними, фізико-механічними, адгезійними властивостями та незначними залишковими напруженнями. При цьому прогнозоване керування технологічними прийомами введення інгредієнтів різної активності, дисперсності і природи за критичного вмісту на початковій стадії формування композицій дозволить формувати захисні покриття з поліпшеними антикорозійними властивостями і зносостійкістю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведений аналіз публікацій у напрямку дослідження властивостей епоксидних КМ вказує на необхідність введення у зв'язувач пластифікаторів, модифікаторів та наповнювачів для отримання епоксиполімерів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Доведено [1-3], що введення у зв'язувач модифікаторів та дисперсних часток, навіть за незначної кількості, забезпечує зміну швидкості перебігу фізико-хімічних процесів при структуроутворенні КМ. Причому важливе значення при регулюванні процесів зшивання епоксидних КМ має не лише хімічна і фізична природа, але й вміст та дисперсність часток. Як зазначено у праці [4], для поліпшення адгезійних властивостей у зв'язувач доцільно вводити дрібнодисперсні частки (8...30 мкм), у той час як для поліпшення когезійної міцності композитів необхідно використовувати дисперсний наповнювач (63...120 мкм). Враховуючи це, вважали за доцільне проведення відповідних досліджень зі встановлення впливу природи як модифікатора, так і дисперсного наповнювача на антикорозійні властивості і зносостійкість епоксидних КМ.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – дослідити антикорозійні властивості і зносостійкість багатокомпонентних полімерних покриттів для відновлення деталей транспорту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Матеріали та методика дослідження

Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ 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.

Як модифікатор використано парааміноазобензол (ПААБ). Згідно з результатами попередніх досліджень модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту 1,0 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна маса парааміноазобензолу – 197. Температура плавлення – 400 К.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як нанодисперсний наповнювач для експериментальних досліджень використано порошок, який є сумішшю нанодисперсних сполук (СНДС) і характеризується наступним складом, %: Si_3N_4 – 90, I_2O_3 – 5; Al_2O_3 – 5. Зернистість часток становить $d = 30...90$ нм. Згідно з результатами попередніх досліджень модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту 0,25 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20.

Як мікродисперсні наповнювачі для експериментальних досліджень використано частки порошоків Agocel S-2000 (АС) і Waltrap (ВТ). Це порошки відповідно білого і жовтого кольору виробництва Німеччини. Використовують у вигляді наповнювачів для КМ будівельного призначення. Розмір часток становить 8...12 мкм.

Додатково як наповнювач було використано частки залізної окалини ($3O$), що характеризується наступним складом, %: SiO_2 – 0,803; Al_2O_3 – 0,36; Fe_2O_3 – 32,57; FeO – 64,85; MgO – 0,03; MnO – 0,44; CaO – 0,21; S – 0,031. Залізна окалина є відходом виробництва металу на металургійних підприємствах. Зернистість часток становить $d = 60...63$ мкм.

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 олігомерів, модифікатора і часток наповнювача 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 витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у композиті зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: корозійну тривкість і гідроабразивну зносостійкість.

Корозійну тривкість захисних покриттів визначали шляхом занурення зразків у воду, бензин, ацетон, розчини натрію, сірчаної та азотної кислот. Тривалість витримки зразків з розміром $60 \times 10 \times 10$ мм в агресивних середовищах становила 720 год за температури $T = 293 \pm 2$ К. Зразки з масою 1,0...1,2 г перед дослідженнями і після витримки в агресивних середовищах зважували на аналітичних вагах марки ВЛР-200 з точністю до $\pm 0,001$ г.

При збільшенні маси зразків розрахунок проникності агресивних середовищ проводили за формулою:

$$\chi = \frac{b-a}{a} \cdot 100\%,$$

а при зменшенні маси зразків розрахунок проникності агресивних середовищ проводили за формулою:

$$\chi = \frac{a-b}{a} \cdot 100\%,$$

де: χ – корозійна тривкість, %; a – маса зразків до випробувань, г; b – маса зразків після випробування, г.

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 $30 \times 20 \times 4$ 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 зразки зі сталі Ст 3. Маса використаного при дослідженні кварцового піску становить $m = 9 \pm 0,1$ кг.

Відносну інтенсивність зношування визначали за формулою:

$$I = \frac{m_0 - m_k}{m_0} \cdot 100\%,$$

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

Коефіцієнт зносостійкості визначали за формулою:

$$K_3 = \frac{I_E}{I},$$

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

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

Відхилення значень при дослідженнях показників гідроабразивної зносостійкості властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

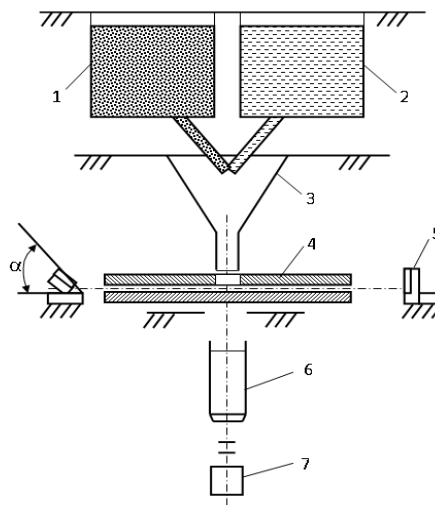


Рис. 1. Схема відцентрового прискорювача:

1 – резервуар з абразивними частками; 2 – резервуар з технічною водою;

3 – бункер для змішування абразивних часток з водою; 4 – ротор;

5 – зразок з покриттям; 6 – електродвигун; 7 – тахометр

Для протикорозійного захисту технологічного устаткування, яке експлуатують у агресивних середовищах, досліджували розроблені захисні покриття на основі модифікованого епоксидного зв'язувача з трикомпонентним дисперсним наповнювачем, вміст якого визначали попередньо [5, 6].

Випробовували п'ять складів антикорозійних покриттів:

- 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 парааміноазобензол (ПААБ) : нанопорошок, який є сумішшю нанодисперсних сполук (СНДС) (30...90 нм) : залізна окалина (ЗО) (60...63 мкм) : Waltrop (ВТ) (8...12 мкм) – 100 : 1,0 : 0,25 : 70 : 10);

- КМ 2 (композит формували за наступного співвідношення компонентів – зв'язувач : модифікатор ПААБ : СНДС : ЗО : ВТ – 100 : 1,0 : 0,25 : 60 : 20);

- КМ 3 (композит формували за наступного співвідношення компонентів – зв'язувач : модифікатор ПААБ : СНДС : ЗО : Agocel S-2000 (АС) (8...12 мкм) – 100 : 1,0 : 0,25 : 60 : 30);

- КМ 4 (композит формували за наступного співвідношення компонентів – зв'язувач : модифікатор ПААБ : СНДС : ЗО : АС – 100 : 1,0 : 0,25 : 70 : 20).

Експериментально встановлено, що сорбція води епоксикомпозитами суттєво залежить від природи та когезійної міцності покриттів (рис. 2). Встановлено, що найбільш водотривкими є композити, наповнені залізною окалиною і частками Waltrop, а композити, які містять частки залізної окалини і Agocel S-2000, відзначаються значною сорбцією води. Отримані результати добре узгоджуються з результатами випробування когезійних властивостей досліджуваних покриттів – найбільш висока водотривкість спостерігається у покриттях зі значною когезійною міцністю і незначними показниками

залишкових напружень [1, 6]. Встановлено, що на початковій стадії дослідження (до 150 діб) спостерігали інтенсивне набухання усіх без винятку захисних покриттів. Передбачали, що агресивне середовище проникає не лише у поверхневий шар покриттів, але й у їх об'єм. У результаті на даній стадії дослідження відносна маса захисних покриттів становить $\chi = 0,5...1,2$ %. Доведено (рис. 2), що максимальними показниками проникності ($\chi = 1,8$ %) впродовж визначеного проміжку дослідження ($t = 150$ діб) відзначаються зразки з епоксидної матриці. На наш погляд, отримані результати зумовлені інтенсивним проникненням молекул агресивного середовища не лише у об'єм полімеру, але й до металеві основи. При цьому відбувається заміщення зв'язків «полімер-субстрат» на «середовище-субстрат» [3]. Відомо [2, 3], що адгезійні зв'язки в такому напруженому стані з часом руйнуються, утворюючи мікротріщини, оскільки, згідно з розклинюючим ефектом Ребіндера, агресивне середовище, проникаючи в тріщину, зумовлює її подальший розвиток. Порівняно з досліджуваними захисними покриттями вихідна епоксидна матриця відзначається найменшими показниками адгезійної і когезійної міцності, а також значними залишковими напруженнями. У результаті проникнення агресивного середовища у об'єм полімеру на початковій стадії відбувається його набухання, надалі згідно з ефектом Ребіндера утворюються мікротріщини, а потім сітка макротріщин. Це, у свою чергу, призводить до інтенсифікації процесу набухання, що спостерігали в основному впродовж часу $t = 50...100$ діб дослідження.

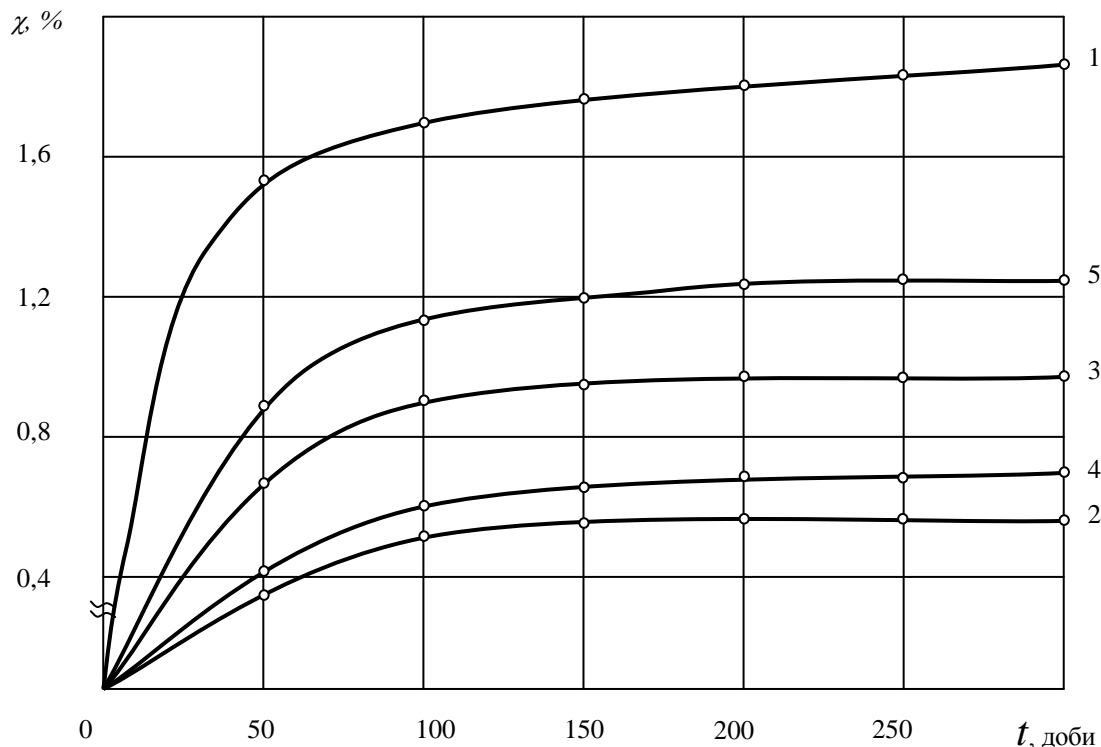


Рис. 2. Залежність сорбції води у природних умовах захисними покриттями від тривалості витримки: 1 – матриця (контрольний зразок); 2 – КП 1; 3 – КП 2; 4 – КП 3; 5 – КП 4

Надалі аналіз результатів дослідження дозволяє констатувати, що впродовж часу $t = 150...300$ діб дослідження відносна маса зразків (КП 1...КП 4) практично не змінюється (значення знаходяться у межах похибки експерименту). Однак, слід зазначити, що у даний проміжок дослідження відносна маса зразків з вихідної епоксидної матриці зростає від $\chi = 1,8$ до $\chi = 1,9$ %. Це свідчить про продовження процесу проникнення агресивного середовища у полімер, що зумовлює подальше руйнування хімічних зв'язків і, як наслідок, відшарування покриття від основи.

Порівняльний аналіз поведінки досліджуваних композитів (КП 1... КП 4) в умовах впливу агресивного середовища у природних умовах дозволяє констатувати, що швидкість дифузії води у полімеркомпозит визначається переважно дифузиею на межі поділу «полімер – наповнювач». Попередньо доведено [5, 6], що матеріали КП 1 і КП 3 відзначаються найкращими показниками адгезійної і когезійної міцності серед гама усіх досліджуваних матеріалів. Встановлено (рис. 2), найменшими показниками корозійної тривкості відзначається захисне покриття, модифіковане парааміноазобензолом ($q = 1$ мас.ч.) і наповнене частками суміші нанодисперсних сполук (30...90 нм) ($q = 0,25$ мас.ч.), залізної окалини (60...63 мкм) ($q = 60$ мас.ч.) і Waltrop (8...12 мкм) ($q = 20$ мас.ч.).

Проникність у природних умовах такого покриття впродовж часу $t = 250 \dots 300$ діб дослідження становить $\chi = 1,8\%$, що у 3,8 разів менше за аналогічні показники вихідної епоксидної матриці. Це зумовлено підвищеними показниками когезійної і адгезійної міцності розробленого покриття до металевої основи, що є визначальним при формуванні адгезивів з поліпшеними антикорозійними властивостями.

Цікавим з наукової і практичної токи зору було проведення додаткових досліджень корозійної тривкості розроблених матеріалів у різних агресивних середовищах. Тому з метою підтвердження наведених вище результатів випробовували проникність композитів у наступних середовищах: бензин (А-95), ацетон, NaOH (50 %), мастило марки И-20 і H₂SO₄ (10 %). Результати експериментальних досліджень показують високу хімічну стабільність матеріалів на основі епоксидного зв'язувача в різних агресивних середовищах. Встановлено, що найбільш агресивним середовищем до полімерної матриці є розчин сірчаної кислоти (табл. 1). Це пов'язано з тим, що значна деструкція матриці в розчині кислоти відбувається внаслідок сорбції полімером компонентів агресивного середовища, при цьому змінюється структура матриці та руйнування фізичних та хімічних зв'язків.

Встановлено (табл. 1), що введення в епоксидний зв'язувач дисперсних наповнювачів сприяє підвищенню хімічної тривкості. Це зумовлено зменшенням відносного вмісту полімеру в об'ємі композиту та збільшенням шляху проникнення молекул корозійно-активних агентів при дифузії до металевої основи внаслідок бар'єрного ефекту, який створюють дисперсні частки наповнювача [7]. Отримані результати дослідження матеріалів у агресивних середовищах корелюють з аналогічними результатами випробувань цих же композитів у природних умовах. Встановлено (табл. 1), що композит КП 1 відзначається найкращими показниками хімічної тривкості серед усіх досліджуваних матеріалів. Доведено, що формування покриття на епоксидній основі з частками залізної окалини і Waltrop за оптимального вмісту (відповідно $q = 70$ мас.ч. і $q = 10$ мас.ч. на $q = 100$ мас.ч. смоли ЕД-20) підвищує стосовно вихідної епоксидної матриці показники хімічної стійкості: у 2,9 разів в бензині (А-95); у 3,3 разів в ацетоні; у 2,9 разів в NaOH (50 %); у 2,9 разів в мастилі марки И-20; у 2,0 разів в H₂SO₄ (10 %). У першу чергу це зумовлено когезійною взаємодією на межі поділу фаз «полімер – наповнювач», що суттєво впливає на захисні властивості КП. Невисока адгезія дисперсних часток до полімеру у об'ємі покриття знижує захисні властивості адгезиву внаслідок розвитку сітки тріщин, що, у більшості випадків, пов'язано з розклинюючою дією агресивного середовища.

Композити, наповнені залізною окалиною і додатково частками Agocel S-2000, мають невисоку хімічну стійкість, особливо у мастилі марки И-20 і в розчинах NaOH та H₂SO₄. Це зумовлено адсорбцією води та молекул активних реагентів на поверхні гідрофільних оксидів у вигляді гідроксильних груп, які утримуються водневими зв'язками.

Таблиця 1

**Відносна зміна маси (χ , %) композитів після їх витримки у агресивних середовищах
(за температури $T = 293 \pm 2$ К, впродовж $\tau = 720$ год)**

Вид покриття	Агресивне середовище				
	Бензин (А-95)	Ацетон	NaOH (50 %)	Мастило марки И-20	H ₂ SO ₄ (10 %)
Матриця	5,2	5,0	5,3	6,3	8,4
КП 1	1,8	1,5	1,8	2,2	4,3
КП 2	2,4	2,8	2,6	3,2	5,5
КП 3	1,9	1,9	2,2	2,8	5,0
КП 4	2,7	2,8	2,9	3,6	6,1

На наступному етапі досліджували зносостійкість під дією гідроабразиву розроблених матеріалів. Аналіз коефіцієнту зносостійкості досліджуваних КМ при куті атаки гідроабразивної суміші $\alpha = 45^\circ$ дозволяє стверджувати, що в усіх, без винятку, зразках зносостійкість є відносно високою. Експериментально встановлено, що найнижчими показниками коефіцієнту зносостійкості серед усіх досліджуваних композитів відзначається вихідна епоксидна матриця (рис. 3). Показано, що при куті атаки гідроабразиву $\alpha = 45^\circ$ коефіцієнт зносостійкості матриці становить $K_z = 1,32$. Авторами [7] доведено, що інтенсивність зношування залежить від перебігу двох процесів руйнування: мікрорізання та пластичного деформування. При цьому домінуючий вплив кожного з процесів залежить від когезійної міцності КМ. Методом оптичної мікроскопії доведено, що для матриці характерні два види руйнування поверхневого шару матеріалу: макрорізання і пластичне деформування з подальшим видаленням матеріалу.

Додатково встановлено (рис. 3), що найвищими показниками стійкості до гідроабразивного спрацювання характеризується композит КП 3, для якого спостерігали наступний показник

зносостійкості – $K_z = 1,75$. Методом електронної мікроскопії підтверджено, що на поверхні такого композиту спостерігали розгалужені рельєфні смуги, які виникли внаслідок мікрорізання під дією гідроабразиву. При цьому порівняно з матрицею вони не такі глибокі, а довжина їх є значно меншою. Покращення зносостійкості епоксикомполімерів можна пояснити їх поліпшеними когезійними властивостями порівняно з епоксидною матрицею, що передбачає підвищення коефіцієнту зносостійкості.

Дещо гіршими показниками зносостійкості відзначаються композити, наповнені частками залізної окалини і Waltrap (КП 1, КП 3). Доведено (рис. 3), що при куті атаки гідроабразиву $\alpha = 45^\circ$ їх зносостійкість підвищується стосовно матриці від $K_z = 1,32$ до $K_z = 1,54 \dots 1,68$. При цьому спостерігали перебіг процесів мікрорізання, що характерно для зношування жорстких гетерогенних КМ. Методом електронної мікроскопії підтверджено, що 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 [7].

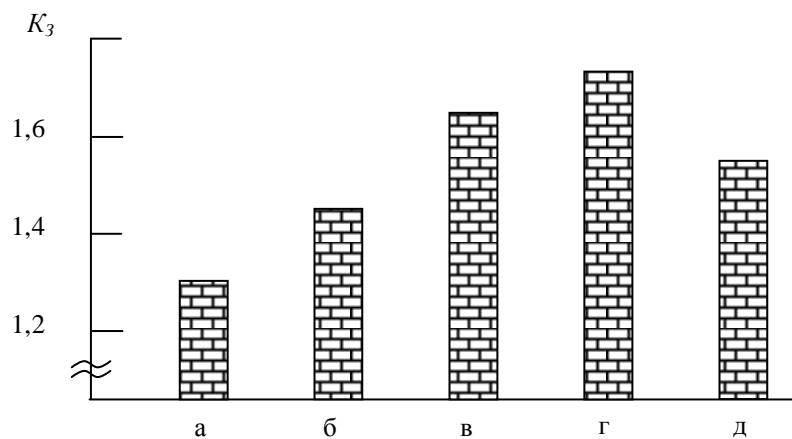


Рис. 3. Залежність коефіцієнту зносостійкості (K_z) при куті атаки гідроабразиву $\alpha = 45^\circ$ від вмісту та природи інгредієнтів у композитах: а) матриця (контрольний зразок); б) КП 1; в) КП 2; г) КП 3; д) КП 4. Еталон – сталь Ст 3

Отже, за результатами дослідження встановлено, що найвищими показниками зносостійкості відзначається захисне покриття, модифіковане парааміноазобензолом ($q = 1$ мас.ч.) і наповнене частками суміші нанодисперсних сполук (30...90 нм) ($q = 0,25$ мас.ч.), залізної окалини (60...63 мкм) ($q = 60$ мас.ч.) і Agocel S-2000 (8...12 мкм) ($q = 30$ мас.ч.). Коефіцієнт зносостійкості під дією гідроабразиву такого покриття становить $K_z = 1,75$, що у 1,3 разів менше за аналогічні показники вихідної епоксидної матриці. Показано, що механізм зношування матеріалів зумовлений фізико-механічними процесами на поверхні композитів, визначальними з яких є процеси мікрорізання і пластичного деформування поверхневого шару.

Висновки

У роботі розроблені модифіковані епоксидні композитні захисні покриття з поліпшеними антикорозійними властивостями і зносостійкістю в умовах дії гідроабразиву.

1. Встановлено, що найменшими показниками корозійної тривкості відзначається захисне покриття, модифіковане парааміноазобензолом ($q = 1$ мас.ч.) і наповнене частками суміші нанодисперсних сполук (30...90 нм) ($q = 0,25$ мас.ч.), залізної окалини (60...63 мкм) ($q = 60$ мас.ч.) і Waltrap (8...12 мкм) ($q = 20$ мас.ч.). Проникність у природних умовах такого покриття впродовж часу $t = 250 \dots 300$ діб дослідження становить $\chi = 1,8 \%$, що у 3,8 разів менше за аналогічні показники вихідної епоксидної матриці. Це зумовлено підвищеними показниками когезійної і адгезійної міцності розробленого покриття до металевої основи, що є визначальним при формуванні адгезивів з поліпшеними антикорозійними властивостями.

2. Доведено, що формування покриття на епоксидній основі з частками залізної окалини і Waltrap за оптимального вмісту (відповідно $q = 70$ мас.ч. і $q = 10$ мас.ч. на $q = 100$ мас.ч. смоли ЕД-20) підвищує стосовно вихідної епоксидної матриці показники хімічної стійкості: у 2,9 разів в бензині (А-95); у 3,3 разів в ацетоні; у 2,9 разів в NaOH (50 %); у 2,9 разів в мастилі марки И-20; у 2,0 разів в H_2SO_4 (10 %). Це зумовлено когезійною взаємодією на межі поділу фаз «полімер – наповнювач», що суттєво впливає на захисні властивості адгезиву.

3. Обґрунтовано, що найвищими показниками зносостійкості відзначається захисне покриття, модифіковане парааміноазобензолом ($q = 1$ мас.ч.) і наповнене частками суміші нанодисперсних сполук (30...90 нм) ($q = 0,25$ мас.ч.), залісної окалини (60...63 мкм) ($q = 60$ мас.ч.) і Agocel S-2000 (8...12 мкм) ($q = 30$ мас.ч.). Коефіцієнт зносостійкості під дією гідроабразиву такого покриття становить $K_z = 1,75$, що у 1,3 разів більше за аналогічні показники вихідної епоксидної матриці. Показано, що механізм зношування матеріалів зумовлений фізико-механічними процесами на поверхні композитів, визначальними з яких є процеси мікрорізання і пластичного деформування поверхневого шару.

Список використаної літератури

1. Buketov A.V. Nanomodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles / A.V. Buketov, D.O. Zinchenko, S.O. Smetankin // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. – 2017. – Vol. 8. – P. 41-54.
2. Стухляк П.Д. Структурные уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, С.В. Панин, П.О. Марущак, К.М. Мороз, М.А. Полтаранин, Т. Вухерер, Л.А. Корниенко, Б.А. Люкшин // *Физическая мезомеханика*. - 2014. - Т. 17. - № 2. - С. 65-83.
3. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // *Transport*. – 2016. – Vol. 31(3). – P. 333-342.
4. Brailo M.V. Optimization of contents of two-component polydispersed filler by applying the mathematical design of experiment in forming composites for transport repairing / M.V. Brailo, A.V. Buketov, S.V. Yakushchenko, O.O. Sapronov, L. Dulebova // *Вісник КарГУ*. – 2018. - № 1(89). – С. 93-104.
5. Ходаковський О.В. Дослідження впливу парааміноазобензолу на адгезійні властивості епоксидної матриці для захисних покриттів засобів транспорту / О.В. Ходаковський, М.Ю. Амелін, С.О. Сметанкін, О.В. Акімов, В.М. Яцюк // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2016. - № 50 (1222). – С.42-46.
6. Амелін М.Ю. Відновлення деталей транспорту полімерними композитами з мікродисперсними частками, що є відходами виробництва / М.Ю.Амелін, О.О.Сапронов, О.В.Ходаковський, Н.М.Букетова // *Наукові нотатки*. - Луцьк: ЛНТУ. – Випуск 60. – 2017. – С. 22-30.
7. Букетов А.В. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів / А.В.Букетов, П.Д.Стухляк, Є.М.Кальба. - Тернопіль: Збруч, 2005.-182с.