

ВПЛИВ СИНТЕЗОВАНОЇ ПОРОШКОВОЇ ТИТАНО-АЛЮМІНІЄВОЇ ШИХТИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ ДЛЯ ЗАСОБІВ МОРСЬКОГО ТА РІЧКОВОГО ТРАНСПОРТУ

Сизоненко О. М., д.т.н., головний науковий співробітник відділу імпульсної обробки дисперсних систем Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, e-mail: sizonenko43@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-8449-2481;

Негруца Р. Ю., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії;

Торпаков А. С., к.т.н., старший науковий співробітник відділу імпульсної обробки дисперсних систем Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, ORCID: 0000-0002-9805-3914;

Букетова Н. М., докторант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0002-7670-6590;

Пилипчук Н. А., марістрант Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка

Показано, що для поліпшення антикорозійних властивостей і зносостійкості засобів морського та річкового транспорту, військової техніки, машинобудування, хімічної, нафтопереробної та газотранспортної промисловості необхідно використовувати полімерні епоксикомпозитні захисні покриття. Експлуатаційні характеристики полімерних, у тому числі епоксидних, композитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі підвищують за рахунок введення нано- і мікродисперсних наповнювачів у вигляді порошків.

У роботі для формування композитних матеріалів і захисних покриттів для транспортної галузі використано епоксидний діановий олігомер ЕД-20, твердник поліетиленполіамін ПЕПА і мікродисперсні частки синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової титано-алюмінієвої шихти. Досліджено залежність вмісту мікродисперсного порошку на адгезійні, фізико-механічні властивості і залишкові напруження епоксидних композитів. Доведено, що для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з поліпшеними адгезійними і когезійними властивостями оптимальний вміст часток становить 0,05...0,50 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20.

Перевагою розробки над зарубіжними і вітчизняними аналогами є облік основних факторів агресивних середовищ, де експлуатується технологічне обладнання, та розробка матеріалів, які у комплексі мають високі показники фізико-механічних, теплофізичних властивостей, корозійної тривкості та зносостійкості. Виходячи з цього, у епоксидний зв'язувач вводили активний до міжфазової взаємодії мікродисперсний наповнювач, у тому числі синтезований високовольтним електроіскровим розрядом. При цьому важливим є визначення критичного вмісту синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової титано-алюмінієвої мікродисперсної шихти при формуванні захисних епоксидних покриттів для засобів морського та річкового транспорту.

Ключові слова: епоксидний композит, модуль пружності, ударна в'язкість, руйнівні напруження при згинанні.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.151-161

Постановка проблеми. На сьогодні наукові школи передових країн світу займаються вирішенням важливої науково-технічної проблеми – розробкою захисних в основному полімерних антикорозійних і зносостійких покриттів для морського та річкового транспорту, військової техніки, машинобудування, хімічної, нафтопереробної та газотранспортної промисловості. Експлуатаційні характеристики полімерних, у тому числі епоксидних, композитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі підвищують за рахунок попередньої обробки інгредієнтів матриці за допомогою зовнішніх полів, а також в результаті введення нано- і мікродисперсних наповнювачів у вигляді порошків. Авторами [1–7] досліджено та обґрунтовано механізм впливу обробки за допомогою постійного та високочастотного магнітного поля на властивості композитів. Виявлено механізм впливу ультрафіолетового випромінювання на процеси структуроутворення, що дозволило підвищити експлуатаційні характеристики композитних матеріалів (КМ) з дисперсними

наповнювачами різної фізичної природи. Доведена ефективність використання комплексної ультразвукової обробки епоксидних композицій на повітрі і волокнистого наповнювача у водному середовищі для створення захисних покриттів з високою антикорозійною і зносостійкістю. На основі проведених досліджень розроблені різні технології обробки і формування епоксидних композицій з нано- і мікродисперсним наповнювачем, а також створено нові матеріали для захисних покриттів, які відзначаються високими експлуатаційними характеристиками. Крім того, в результаті спрямованого введення в епоксидну матрицю дисперсних наповнювачів, а також в результаті магнітної обробки і ультрафіолетового опромінення композицій, реалізується синергійний ефект, що дозволяє істотно підвищити експлуатаційні характеристики захисних покриттів при експлуатації обладнання в критичних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На підставі проведених досліджень авторами [1–5] розроблені нові епоксикомпозитні покриття для захисту технологічного обладнання від корозії і зносу. Цікавим для замовників може бути те, що при розробці покриттів використовували мікродисперсні наповнювачі з відходів промислового виробництва. Це дозволяє не тільки поліпшити властивості покриттів, але і істотно знизити їх вартість. Крім цього, такий підхід забезпечує одночасно утилізацію відходів, що вигідно не тільки економічно, але і з точки зору екології та охорони навколишнього середовища, що може бути суттєво не тільки для промисловості, а й для розвитку в цілому будь-якого регіону.

Перевагою даних розробок над зарубіжними і вітчизняними аналогами є облік основних факторів агресивних середовищ, де експлуатується технологічне обладнання, та розробка матеріалів, які в комплексі мають високі показники фізико-механічних, теплофізичних властивостей, корозійної тривкості та зносостійкості. Водночас слід зазначити, що проблема поліпшення механічних, антикорозійних властивостей і зносостійкості КМ у комплексі на сьогодні ще остаточно не вирішена. Потребує подальших фундаментальних досліджень область полімерного матеріалознавства, що охоплює обґрунтування механізму взаємодії інгредієнтів композицій при їх структуроутворенні на мікро-, мезо- і макрорівні. Саме такі процеси при формуванні структури матеріалів у подальшому визначають їх когезійні і, як наслідок, антикорозійні властивості та зносостійкість.

Враховуючи це, актуальним є введення у епоксидний зв'язувач активних до взаємодії мікродисперсних наповнювачів, у тому числі синтезованих високовольтним електроіскровим розрядом. При цьому важливим є проведення дослідження стосовно визначення критичного вмісту синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової титано-алюмінієвої мікродисперсної шихти при формуванні захисних епоксидних покриттів для засобів морського та річкового транспорту.

Мета роботи – дослідити вплив вмісту синтезованої шихти на адгезійні і фізико-механічні властивості епоксидних композитів для засобів морського та річкового транспорту.

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. 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, вводючи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як мікродисперсний наповнювач для експериментальних досліджень використано синтезовану порошкову титано-алюмінієву шихту (ПТАШ). Формування наповнювача проводили високовольтним електророзрядним (ВЕР) синтезом. Для високовольтного

електророзрядного синтезу наповнювача використовували дослідний стенд, описаний у роботах [8-10]. У вигляді вихідного матеріалу використовували суміш порошків наступного вихідного складу: Al (15 %) + Ti (85 %). При дослідженні накопичена енергія одиничного розряду (W_1) становила 1 кДж, а інтегральна питома енергія обробки ($W_{\text{пит}}$) становила 25 МДж/кг. У процесі досліджень виконували варіювання розподілом електричного поля та плазмових утворень у об'ємі розрядної камери шляхом використання 3-вістрійної конструкції електродної системи (рис. 1).



Рисунок 1 – 3-вістрійна конструкція електродної системи

Використання різних електродних систем дозволило керувати розподілом інтенсивності впливу основних факторів ВЕР [8]. Так, якщо у випадку використання 1-вістрійної системи більша частка накопиченої енергії трансформувалась у ударні хвилі, то використання 3-вістрійної системи дозволяє підвищити інтенсивність впливу термічних та струмових факторів. Результати досліджень показали, що у результаті ВЕР-обробки відбулось подрібнення усіх оброблених часток та зміна їх фазового складу із синтезом високомодульних сполук Ti, Al_3Ti і Ti_3AlC_2 (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати ВЕР-синтезу наповнювача

Вихідний склад	Склад після ВЕР-синтезу	Електродна система	Діаметр після обробки, d , мкм		
			$d_{\text{мін}}$	$d_{\text{макс}}$	$d_{\text{сеп}}$
Al (15 %) + Ti (85 %)	Ti (75 %) + Al_3Ti (15 %), Ti_3AlC_2 (10 %)	3	~1	122	9,5

Епоксидні композити формували за такою технологією [1, 2, 6]: 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 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: адгезійну міцність, залишкові напруження, руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні і ударну в'язкість.

Адгезійну міцність КМ до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТ 14760 - 69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759 - 69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань зразків на

автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження $v = 10$ м/с. Діаметр робочої частини зразків при відриві становив – $d = 25$ мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у покриттях визначали консольним методом [3]. Покриття товщиною $\delta = 0,3 \dots 0,8$ мм формували на металевій основі. Параметри основи: загальна довжина – $l = 100$ мм, робоча довжина – $l_0 = 80$ мм, товщина – $\delta = 0,3$ мм.

Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно з ГОСТ 4648-71 і ГОСТ 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина $l = 120 \pm 2$ мм, ширина $b = 15 \pm 0,5$ мм, висота $h = 10 \pm 0,5$ мм.

Ударну в'язкість визначали за методом Шарпі відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 при температурі $T = 298 \pm 2$ К і відносній вологості $d = 50 \pm 5$ %. Використовували зразки з такими параметрами: $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$ мм. Відстань між опорами $40 \pm 0,5$ мм.

Відхилення значень при дослідженнях показників адгезійних і фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

Результати досліджень та їх обговорення. На попередньому етапі досліджували адгезійну міцність і залишкові напруження у епоксикомпозитних матеріалах. Експериментально встановлено (рис. 2), що адгезійна міцність при відриві обробленої ультразвуком епоксидної матриці становить $\sigma_a = 24,8$ МПа. Введення наповнювача ПТАШ за незначного вмісту ($q = 0,05$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20) приводить до суттєвого поліпшення адгезійних властивостей композиту. У цьому випадку адгезійна міцність КМ збільшується від $\sigma_a = 24,8$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 38,0$ МПа. Це, у першу чергу, зумовлено активністю до міжфазової взаємодії при структуроутворенні матеріалів часток синтезованої порошкової титано-алюмінієвої шихти. На наш погляд, активні центри на поверхні дисперсної фази у вигляді Al_3Ti і Ti_3AlC_2 взаємодіють з боковими групами та сегментами макромолекул епоксидної смоли, що пришвидшує перебіг фізико-хімічних процесів міжфазової взаємодії. Це, у свою чергу, створює умови для підвищення гель-фракції у композиті, що відповідно забезпечує збільшення показників адгезійних характеристик розробленого матеріалу.

Надалі збільшення вмісту наповнювача у КМ призводить до монотонного зменшення адгезійної міцності матеріалів. Показано (рис. 2, крива 1), що введення у зв'язувач часток у кількості $q = 0,50$ мас.ч. забезпечує формування композиту з адгезійною міцністю при відриві – $\sigma_a = 28,9$ МПа, а введення у зв'язувач часток у кількості $q = 2,00$ мас.ч. призводить до зменшення показників адгезійних характеристик КМ при відриві до $\sigma_a = 19,5$ МПа. Дані значення є меншими порівняно з аналогічними показниками для полімерної матриці. Отже, експериментально встановлено критичний вміст досліджуваного наповнювача при формуванні епоксикомпозитів з поліпшеними адгезійними характеристиками при відриві. Доведено, що введення у епоксидний зв'язувач часток ПТАШ за критичного вмісту $q = 0,05$ мас.ч. забезпечує збільшення адгезійної міцності від $\sigma_a = 24,8$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 38,0$ МПа.

Додатково експериментально встановлено, що крива залежності адгезійної міцності при зсуві від вмісту досліджуваного наповнювача (рис. 2, крива 2) повністю корелює з аналогічною динамікою адгезійних характеристик при відриві (рис. 2, крива 1). Це свідчить про достовірність отриманих результатів дослідження. Показано (рис. 2), що максимальні показники адгезійних властивостей при зсуві отримано для КМ, наповненого частками ПТАШ за вмісту $q = 0,05$ мас.ч. Такий КМ характеризується адгезійною міцністю при зсуві – $\tau = 10,8$ МПа, що на 2,3 МПа є більшим від аналогічного показника для епоксидної матриці. Надалі збільшення вмісту наповнювача призводить до монотонного зменшення показників адгезійної міцності і при введенні часток у кількості $q = 2,00$ мас.ч. формується композит з адгезійною міцністю $\tau = 9,8$ МПа. На наш погляд, це зумовлено перенасиченням наповнювача у гетерогенних системах, що погіршує їх змочування епоксидним зв'язувачем. Як було зазначено вище, частки добавки є активними до міжфазової взаємодії.

Тому введення їх у гомеопатичних дозах приводить до суттєвого підвищення характеристик матеріалів. Навпаки, надмірна кількість добавки призводить до зниження як когезійних, так і адгезійних властивостей розроблених КМ.

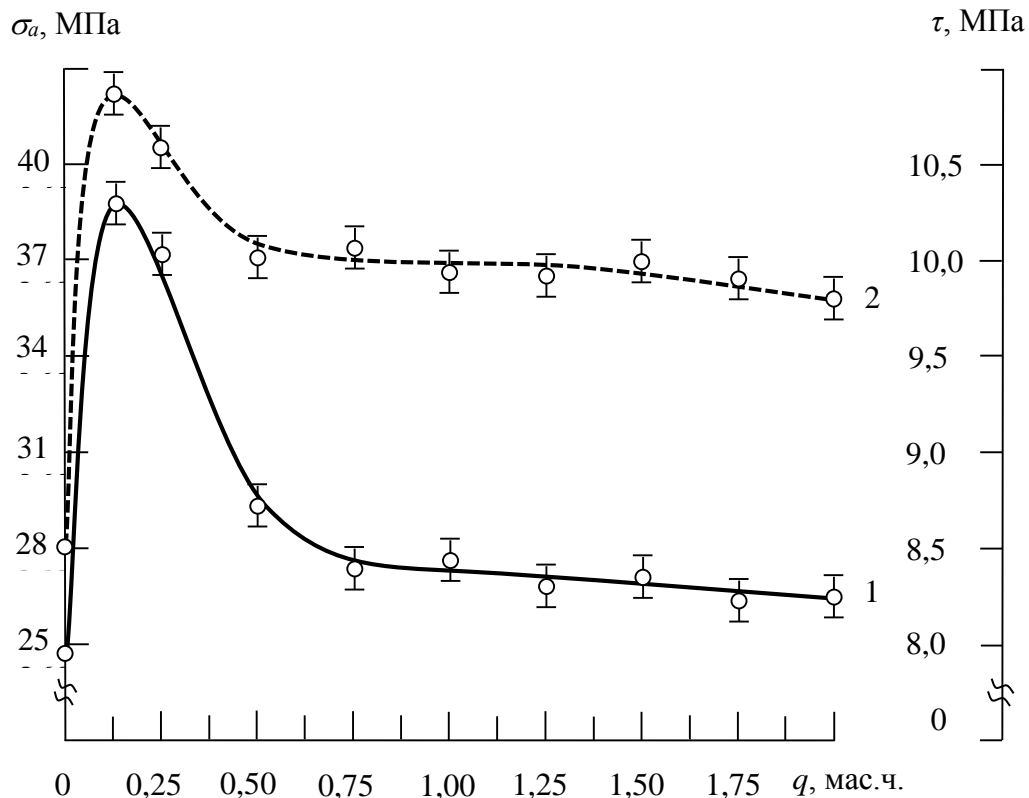


Рисунок 2 – Залежність адгезійної міцності КМ від вмісту мікродисперсного наповнювача ПТАШ: 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – адгезійна міцність при зсуві (τ).
Матеріал основи – сталь марки Ст 3

За результатами дослідження динаміки залишкових напружень від вмісту мікродисперсного наповнювача можна констатувати наступне. Максимум на гістограмі, що ілюструє залежність « $\sigma_3 - q$ », спостерігали для КМ з найбільшими значеннями адгезійної міцності при відриві і зсуві, тобто за критичного вмісту мікродисперсних часток ($q = 0,05$ мас.ч.). При формуванні такого матеріалу залишкові напруження збільшуються від $\sigma_3 = 1,4$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_3 = 1,9$ МПа. Це пояснюють тим, що за такого наповнення формується міцнозшита структура полімеру з високим ступенем зшивання. Відповідно кількість фізичних і хімічних зв'язків на одиницю об'єму полімеру є значною. Це безумовно приводить до підвищення показників залишкових напружень у розроблених КМ. Навпаки, надмірна кількість наповнювача (при $q = 0,50 \dots 2,00$ мас.ч.) призводить до формування дефектів у КМ, кількість зв'язків на одиницю об'єму зменшується, що є причиною зменшення залишкових напружень при введенні у полімер часток понад критичного вмісту.

Отже, у роботі встановлено критичний вміст мікродисперсного наповнювача синтезованої порошкової титано-алюмінієвої шихти для формування епоксидних композитів з поліпшеними показниками адгезійної міцності. Доведено, що наповнення композитів дисперсними частками у кількості $q = 0,05$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 забезпечує підвищення показників адгезійної міцності при відриві від $\sigma_a = 24,8$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 38,0$ МПа, адгезійної міцності при зсуві від $\tau = 8,5$ МПа до $\tau = 10,8$ МПа, при цьому залишкові напруження збільшуються від $\sigma_3 = 1,4$ МПа до $\sigma_3 = 1,9$ МПа.

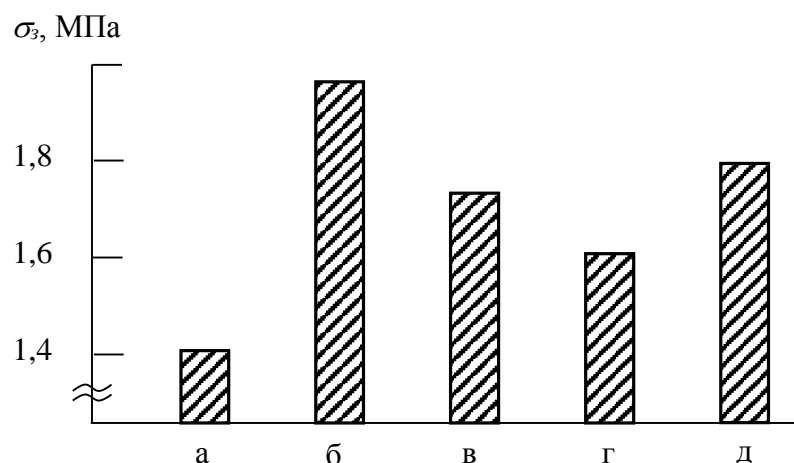


Рисунок 3 – Залежність залишкових напружень (σ_3) у КМ від вмісту (q) мікродисперсного наповнювача ПТАШ: а) вихідна матриця (контрольний зразок); б) $q = 0,05$ мас.ч.; в) $q = 0,50$ мас.ч.; г) $q = 1,00$ мас.ч.; д) $q = 2,00$ мас.ч.

На наступному етапі досліджували фізико-механічні властивості розроблених епоксидних композитів. Показано (рис. 4), що модуль пружності епоксидної матриці становить $E = 2,8$ ГПа. Експериментально доведено (рис. 4, крива 1), що введення наповнювача за вмісту $q = 0,05 \dots 0,50$ мас.ч. не приводить до збільшення показників досліджуваної властивості, позаяк різниця у значеннях складає $0,1$ ГПа. Надалі наповнення епоксидного зв'язувача частками ПТАШ у кількості $q = 0,75 \dots 2,00$ мас.ч. спричиняє погіршення пружних характеристик композитів, оскільки модуль пружності зменшується до $E = 2,5$ ГПа. Як було зазначено вище, це зумовлено надмірною кількістю дисперсної добавки у матеріалах, що призводить до погіршення когезійної міцності композитів.

Результати дослідження залежності руйнівних напружень при згинанні КМ від вмісту наповнювача дозволяють констатувати наступне. Максимум на кривій залежності « $\sigma_{3z} - q$ » спостерігали для КМ, що містять наповнювач ПТАШ у кількості $q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч. Формування таких композитів забезпечує збільшення руйнівних напружень КМ від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_{3z} = 67,3 \dots 75,2$ МПа. Надалі збільшення кількості часток спричиняє різке зменшення показників до $\sigma_{3z} = 47,7$ МПа (за вмісту наповнювача – $q = 2,00$ мас.ч.).

Результати досліджень ударної в'язкості розроблених матеріалів добре узгоджуються з динамікою наведених вище випробувань. Показано (рис. 5), що максимальними показниками ударної в'язкості відрізняються матеріали, які містять синезовану шихту у кількості $q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч. Введення досліджуваного наповнювача за такого критичного вмісту забезпечує підвищення показників ударної в'язкості КМ від $W = 7,4$ кДж/м² (для епоксидної матриці) до $W = 9,9 \dots 10,4$ кДж/м². Подальше збільшення вмісту часток призводить до погіршення механічних властивостей епоксикомпозитів при ударі.

Отже, встановлено оптимальний вміст синтезованої порошкової титано-алюмінієвої шихти для формування епоксидних композитів з поліпшеними механічними властивостями. Доведено, що наповнення композитів дисперсними частками у кількості $q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 забезпечує підвищення руйнівних напружень при згинанні КМ від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_{3z} = 67,3 \dots 75,2$ МПа, ударної в'язкості від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 9,9 \dots 10,4$ кДж/м², при цьому показники модуля пружності матеріалів практично не змінюються.

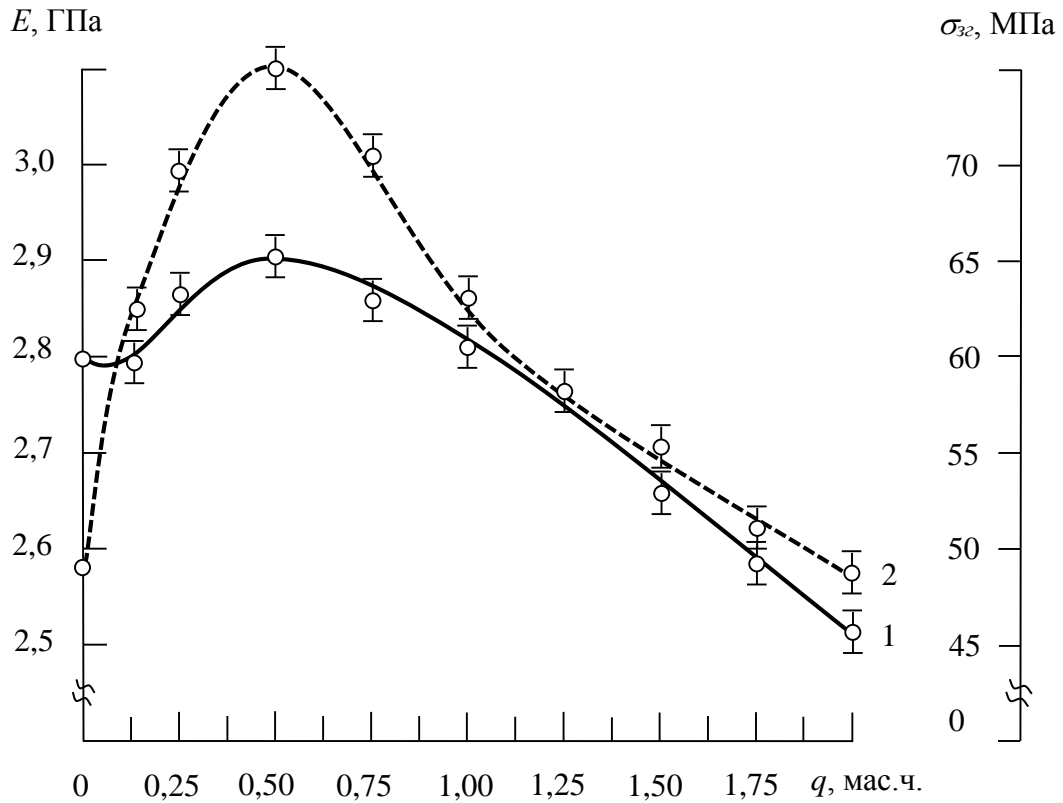


Рисунок 4 – Залежність фізико-механічних властивостей КМ від вмісту ПТАШ: 1 – модуль пружності при згинанні (E); 2 – руйнівні напруження при згинанні (σ_{32})

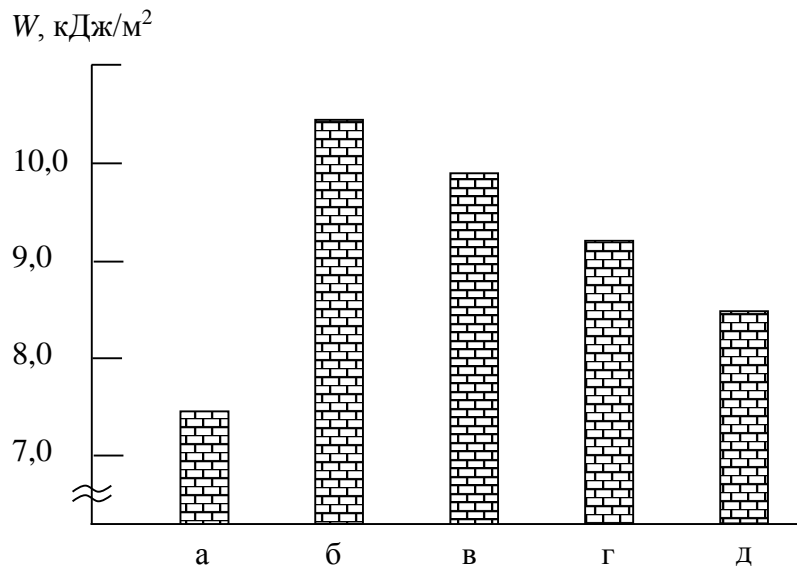


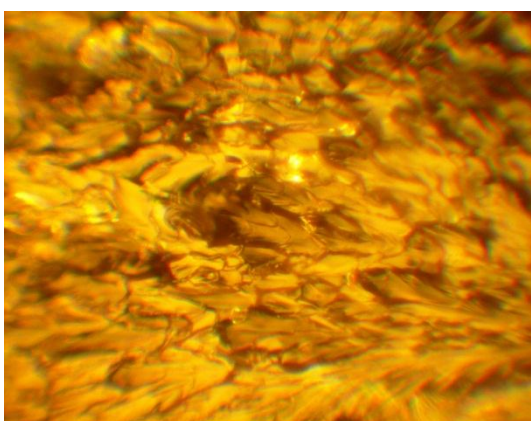
Рисунок 5 – Залежність ударної в'язкості (W) від вмісту (q) мікродисперсного наповнювача ПТАШ у КМ: а) вихідна матриця (контрольний зразок); б) $q = 0,05$ мас.ч.; в) $q = 0,50$ мас.ч.; г) $q = 1,00$ мас.ч.; д) $q = 2,00$ мас.ч.

Для підтвердження результатів отриманих випробувань додатково досліджували поверхню зламу композитів методом оптичної мікроскопії. Показано (рис. 6, а, б), що поверхня зламу КМ з частками ПТАШ у кількості $q = 0,05$ мас.ч. є не достатньо рівномірною, характеризується кластерними включеннями. З одного боку це свідчить про підвищені когезійні характеристики таких композитів, однак з іншого боку можна констатувати про формування складного напруженого стану у таких системах. Наслідком

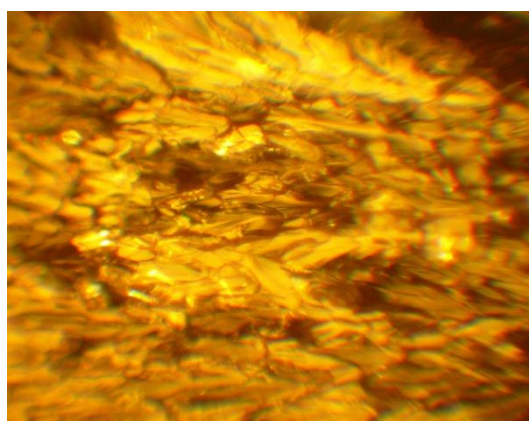
цього може бути передчасне старіння матеріалів внаслідок значних залишкових напружень. Крім цього, можна відзначити значну жорсткість таких систем за рахунок наявності кластерів, що передбачає різке поширення тріщин по контуру включень під час зовнішніх навантажень, особливо ударного характеру.

Поверхні склювання композитів з частками ПТАШ у кількості $q = 0,25$ мас.ч. (рис. б, в, г) і $q = 0,50$ мас.ч. (рис. б, д, е) є пологими, відзначаються в'язким характером руйнування. Утворені мікроструктури з полімерної матриці рівномірно розподілені як на поверхні, так і за об'ємом зразків. Це свідчить про поліпшені когезійні властивості розроблених матеріалів.

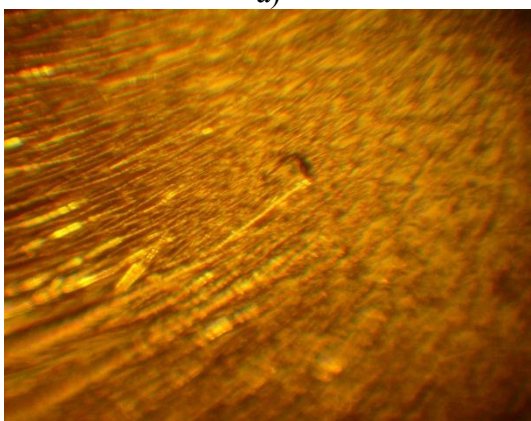
Аналіз фрактограм поверхні композитів, наповнених частками порошкової шихти у кількості $q = 2,00$ мас.ч. (рис. б, є, ж) дозволяє констатувати наступне. Поверхня зламу розрихлена, містить повітряні включення і тріщини (позначено стрілками). У першу чергу, як зазначали вище, це є причиною недостатнього змочування наповнювача внаслідок його надлишку у композиті. Це безумовно погіршує когезійні і відповідно механічні властивості епоксидних композитів.



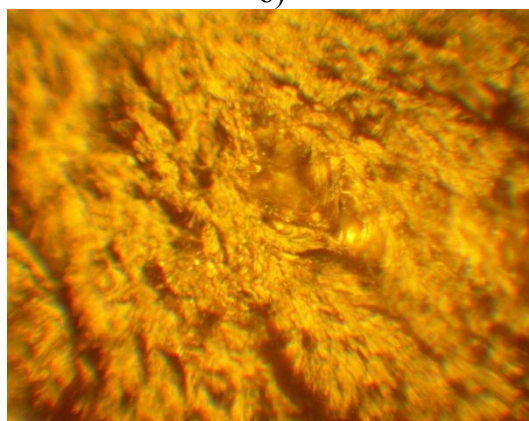
а)



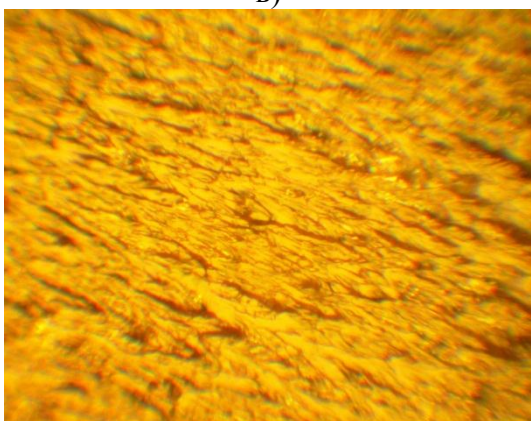
б)



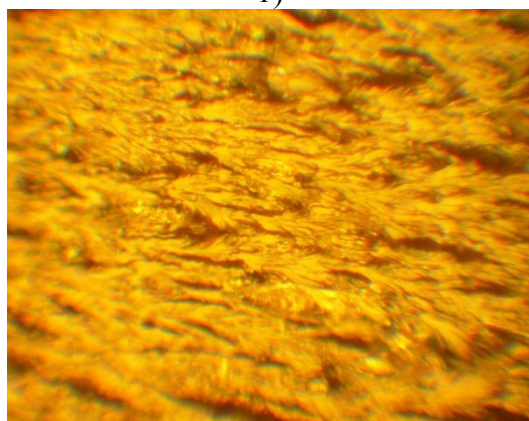
в)



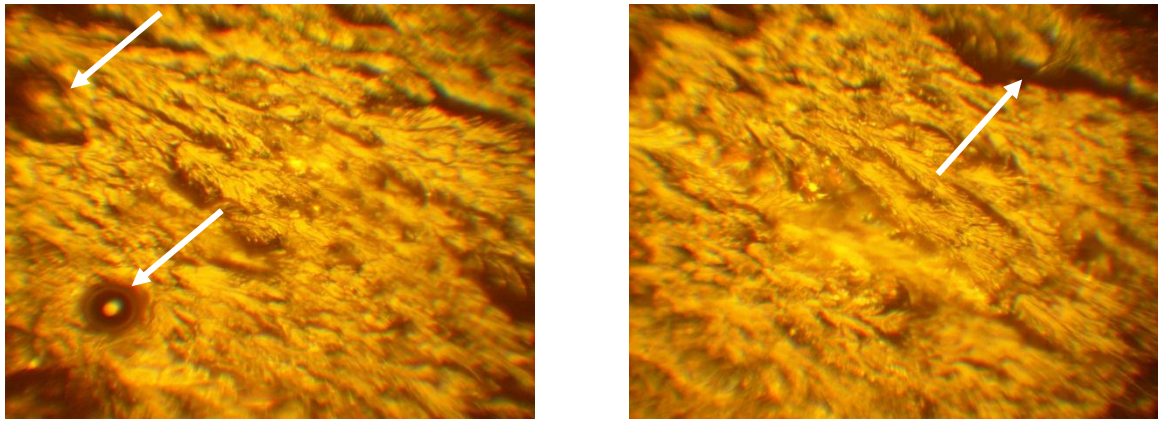
г)



д)



е)



є)

ж)

Рисунок 6 – Фрактограми зламу КМ із різним вмістом мікродисперсного наповнювача ПТАШ, q , мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 ($\times 50$): а, б) 0,05; в, г) 0,25; д, е) 0,50; є, ж) 2,00

Висновки. На основі проведених у роботі досліджень можна констатувати наступне.

1. Встановлено критичний вміст мікродисперсного наповнювача синтезованої порошкової титано-алюмінієвої шихти для формування епоксидних композитів з поліпшеними показниками адгезійної міцності. Доведено, що наповнення композитів дисперсними частками у кількості $q = 0,05$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 забезпечує підвищення показників адгезійної міцності при відриві матеріалів від $\sigma_a = 24,8$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 38,0$ МПа, адгезійної міцності при зсуві від $\tau = 8,5$ МПа до $\tau = 10,8$ МПа, при цьому залишкові напруження збільшуються від $\sigma_3 = 1,4$ МПа до $\sigma_3 = 1,9$ МПа.

2. Встановлено оптимальний вміст синтезованої порошкової титано-алюмінієвої шихти для формування епоксидних композитів з поліпшеними механічними властивостями. Доведено, що наповнення композитів дисперсними частками у кількості $q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 забезпечує підвищення руйнівних напружень при згинанні матеріалів від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_{3z} = 67,3 \dots 75,2$ МПа, ударної в'язкості від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 9,9 \dots 10,4$ кДж/м², при цьому показники модуля пружності матеріалів практично не змінюються.

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. 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.
3. Букетов А.В. Влияние модификатора 4,4-сульфонилбис (4,1-фенилен)бис(н,н-диэтилдитиокарбамата) на адгезионные свойства эпоксидной матрицы / А.В. Букетов, С.А. Сметанкин // *Механика композиционных материалов и конструкций* – 2018. – Т.24. – № 2. – С. 242-265.
4. Букетов А.В. Розроблення епоксиполіефірної матриці з поліпшеними адгезійними та фізико-механічними властивостями зі застосуванням ізоціанатного модифікатора / А.В. Букетов, М.В. Браїло, С.В. Якущенко, В.М. Яцюк // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2019. – 55, № 2. – С. 31–36.
5. Investigation of Tribological Properties of Two-Component Bidisperse Epoxy-Polyester Composite Materials for Its Use in the Friction Units of Means of Sea Transport / A. Buketov, M. Brailo, S. Yakushchenko, O. Sapronov, V. Vynar, O. Bezbakh, R. Negrutsa // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 63. – N. 3. - PP. 171-182. <https://doi.org/10.3311/PPme.13161>.

6. Buketov A.V. Epoxy composite modifications influence on the energy activation's of thermal destruction / A.V. Buketov, S.A. Smetankin, A.V. Akimov, A.G. Kulinich // *Funct. Mater.* 2019; 26 (2): 403-411. doi.org/10.15407/fm26.02.403.

7. Buketov A. The use of complex additives for the formation of corrosion- and wear-resistant epoxy composites / A.Buketov, O.Sapronov, M.Brailo, D.Stukhlyak, S.Yakushchenko, N.Buketova, A.Sapronova, V.Sotsenko // *Advances in Materials Science and Engineering.* – Vol. 2019, Article ID 8183761, 5 pages, 2019. (<https://doi.org/10.1155/2019/8183761>).

8. Sizonenko O. Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge / O.Sizonenko, G.Baglyuk, A.Torpakov and other // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* – 2012. – Vol 51, Issue 3. – P. 129-136.

9. Syzonenko O. Method of preparation of blend for aluminium matrix / O.Syzonenko, E.Shererii, S.Prokhorenko and other // *Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials.* – 2017. – Vol. 11, Issue 4. – P. 171-173.

10. Сизоненко О.Н. Моделирование и анализ электроразрядных процессов в слое порошка Ti в керосине / О.Н.Сизоненко, В.А.Трегуб, Э.И.Тафтай и др. // *Вісник українського матеріалознавчого товариства. Київ.* – 2014. – Вип. 7. – С. 55-61.

REFERENCES

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. 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.

3. Buketov A.V. Vliyanie modifikatora 4,4-sul'fonilbis (4,1-fenilen)bis(n,n-diehtilditiokarbamata) na adgezionnihe svoystva ehpoksidnoy matricih / A.V. Buketov, S.A. Smetankin // *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy* – 2018. – T.24. – № 2. – S. 242-265.

4. Buketov A.V. Rozroblennia epoksyopoliefirnoi matrytsi z polipshenyi adheziinymi ta fizyko-mekhanichnymi vlastyvoistamy zi zastosuvanniam izotsianatnoho modyfikatora / A.V. Buketov, M.V. Brailo, S.V. Yakushchenko, V.M. Yatsiuk // *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv.* – 2019. – # 2. – S. 31–36.

5. Investigation of Tribological Properties of Two-Component Bidisperse Epoxy-Polyester Composite Materials for Its Use in the Friction Units of Means of Sea Transport / A. Buketov, M. Brailo, S. Yakushchenko, O. Sapronov, V. Vynar, O. Bezbakh, R. Negrutza // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering.* – 2019. – Vol. 63. – N. 3. – PP. 171-182. <https://doi.org/10.3311/PPme.13161>.

6. Buketov A.V. Epoxy composite modifications influence on the energy activation's of thermal destruction / A.V. Buketov, S.A. Smetankin, A.V. Akimov, A.G. Kulinich // *Funct. Mater.* 2019; 26 (2): 403-411. doi.org/10.15407/fm26.02.403.

7. Buketov A. The use of complex additives for the formation of corrosion- and wear-resistant epoxy composites / A.Buketov, O.Sapronov, M.Brailo, D.Stukhlyak, S.Yakushchenko, N.Buketova, A.Sapronova, V.Sotsenko // *Advances in Materials Science and Engineering.* – Vol. 2019, Article ID 8183761, 5 pages, 2019. (<https://doi.org/10.1155/2019/8183761>).

8. Sizonenko O. Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge / O.Sizonenko, G.Baglyuk, A.Torpakov and other // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* – 2012. – Vol 51, Issue 3. – P. 129-136.

9. Syzonenko O. Method of preparation of blend for aluminium matrix / O.Syzonenko, E.Shererii, S.Prokhorenko and other // *Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials.* – 2017. – Vol. 11, Issue 4. – P. 171-173.

10. Syzonenko O.N. Modelyrovanye y analizy elektrorazriadnykh protsessov v sloe poroshka Ti v kerosyne / O.N.Syzonenko, V.A.Trehub, Э.У.Тафтай y dr. // *Visnyk ukrainskoho materialoznavchoho tovarystva. Kyiv.* – 2014. – Vyp. 7. – S. 55-61

Сизоненко О. Н., Негруца Р. Ю., Торпаков А. С., Букетова Н. Н., Пилипчук Н. А. ВЛИЯНИЕ СИНТЕЗИРОВАННОЙ ПОРОШКОВОЙ ТИТАНО-АЛЮМИНИЕВОЙ ШИХТЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ ДЛЯ СРЕДСТВ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА

Показано, что для улучшения антикоррозионных свойств и износостойкости средств морского и речного транспорта, военной техники, машиностроения, химической, нефтеперерабатывающей и газотранспортной промышленности необходимо использовать полимерные в том числе эпоксикомпозитные защитные покрытия. Эксплуатационные характеристики полимерных, в том числе эпоксидных, композитных материалов и защитных покрытий на их основе повышаются за счет введения нано- и микродисперсных наполнителей в виде порошков.

В работе для формирования композитных материалов и защитных покрытий для транспортной отрасли использован эпоксидный диановый олигомер ЭД-20, отвердитель полиэтиленполиамин ПЭПА и микродисперсные частицы синтезированной высоковольтным электроразрядом порошковой титано-алюминиевой шихты. Исследована зависимость содержания микродисперсного порошка на адгезионные, физико-механические свойства и остаточные напряжения эпоксидных композитов. Доказано, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с улучшенными адгезионными и когезионными свойствами оптимальное содержание частиц составляет 0,05...0,50 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20.

Преимуществом разработки над зарубежными и отечественными аналогами является учет основных факторов агрессивных сред, в которых эксплуатируется технологическое оборудование, и разработка материалов, которые в комплексе отличаются высокими показателями физико-механических, теплофизических свойств, коррозионной стойкости и износостойкости. Исходя из этого, в эпоксидное связующее вводили активный к межфазному взаимодействию микродисперсный наполнитель, в том числе синтезированный высоковольтным электроискровым разрядом. При этом важным является определение критического содержания синтезированной высоковольтным электроразрядом порошковой титано-алюминиевой микродисперсной шихты при формировании защитных эпоксидных покрытий для средств морского и речного транспорта.

Ключевые слова: эпоксидный композит, модуль упругости, ударная вязкость, разрушающие напряжения при изгибе.

Sizonenko O. M., Negrutza R. Yu., Torpakov O. S., Buketova N. M., Pilypchuk N. A. INFLUENCE OF SYNTHESIZED POWDER TITANIUM-ALUMINUM CHARGE ON MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXYCOMPOSITES FOR SEA AND RIVER TRANSPORT

It has been demonstrated that in order to improve anticorrosive properties and wear resistance of sea and river transport, military equipment, vehicle manufacturing, chemical, oil refining and gas industries, the utilization of polymeric epoxycomposite protective coatings is required. Polymer operational properties, including epoxy, composite materials and protective coatings based on them, have been improved due to introduction of pulverulent nano-and microdispersed fillers.

ED-20 epoxy diene oligomer, PEPA polyethylene polyamine hardener and microdispersed particles synthesized by high-voltage electrical discharge powder titanium aluminum charge have been utilized to form composite materials and protective coatings used in transport industry. The relationship between the content of microdispersed powder and adhesive, stress-related properties and residual stresses of epoxy composites has been investigated. It has been proved that in order to form a composite material or protective coating with improved adhesive and cohesive properties, the desirable particle content is to be 0.05...0.50 wt.h. per 100 wt.h. of ED-20 epoxy oligomer.

The advantage of the current development over foreign alternatives and those produced within the country is that it is possible to consider the main factors of corrosive environments where processing equipment is being operated, and development of materials, possessing high stress-related, heat-transfer, corrosion and wear resistance properties.

Given this, an interaction-active microdispersed filler synthesized by a high-voltage electrical spark discharge has been introduced into the epoxy binder. By doing so, it is of essential importance to determine the critical content of the synthesized by high-voltage electrical discharge titanium-aluminum microdispersed powder charge during formation of protective epoxy coatings for sea and river transport.

Key words: epoxy composite, modulus of elasticity, toughness, destructive bending stresses.

© Сизоненко О. М., Негруца Р. Ю., Торпаков А. С., Букетова Н. М., Пилипчук Н. А.

Статья подано
до редакції 17.04.19