

УДК 667.64:678.026

М.Ю. Амелін, О.О. Сапронов, О.В. Ходаковський, Н.М. Букетова

*Херсонська державна морська академія***ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТУ ПОЛІМЕРНИМИ КОМПОЗИТАМИ З
МІКРОДИСПЕРСНИМИ ЧАСТКАМИ, ЩО Є ВІДХОДАМИ ВИРОБНИЦТВА**

У роботі обґрунтована доцільність відновлення деталей транспорту полімерними композитами. Показано, що введення у полімер мікродисперсних часток, що є відходами виробництва, дозволяє суттєво підвищити експлуатаційні характеристики композитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі.

Для формування композитних матеріалів використано епоксидний діановий олігомер ЕД-20, твердник поліетиленполіамін ПЕПА і дисперсні частки. Досліджено залежність вмісту порошків Agocel S-2000, Waltrap і залізої окалини на адгезійні, фізико-механічні властивості та теплостійкість епоксидних композитів. Доведено, що для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з поліпшеними когезійними властивостями оптимальний вміст часток залежно від їх фізичної природи становить 10...30 або 60...80 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Такі матеріали характеризуються підвищеною механічною міцністю і здатністю чинити опір статичним, динамічним, а також навантаженням ударного характеру, позаяк показники їх властивостей суттєво підвищують порівняно з матрицею. Отримані результати експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей композитних матеріалів добре узгоджуються з результатами випробувань зразків з адгезійними характеристиками, що свідчить про їх достовірність.

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

М.Ю. Амелин, А.А. Сапронов, А.В. Ходаковский, Н.Н. Букетова

*Херсонская государственная морская академия***ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТА ПОЛИМЕРНЫМИ
КОМПОЗИТАМИ С МИКРОДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ, КОТОРЫЕ ЯВЛЯЮТСЯ
ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА**

В работе обоснована целесообразность восстановления деталей транспорта полимерными композитами. Показано, что введение в полимер микродисперсных частиц, являющихся отходами производства, позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики композитных материалов и защитных покрытий на их основе.

Для формирования композитных материалов использован эпоксидный диановый олигомер ЭД-20, отвердитель полиетиленполиамин ПЕПА и дисперсные частицы. Исследована зависимость содержания порошков Agocel S-2000, Waltrap и железной окалины на адгезионные, физико-механические свойства и теплостойкость эпоксидных композитов. Доказано, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с улучшенными когезийными свойствами оптимальное содержание частиц в зависимости от их физической природы составляет 10...30 или 60...80 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Такие материалы характеризуются повышенной механической прочностью и способностью сопротивляться статическим, динамическим, а также нагрузкам ударного характера, поскольку показатели их свойств существенно повышаются по сравнению с матрицей. Полученные результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств композитных материалов хорошо согласуются с результатами испытаний образцов с адгезионными характеристиками, что свидетельствует об их достоверности.

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

M.Yu. Amelin, A.A. Sapronov, A.V. Khodakovskii, N.M. Buketova

*Kherson State Maritime Academy***RESTORATION OF TRANSPORT PARTS WITH POLYMERIC COMPOSITES WITH
MICRODISPERSSED PARTICLES, WHICH ARE PRODUCTION WASTES**

The expediency of restoring the details of transport by polymer composites is justified in the work. It is shown that the introduction of microdispersed particles into the polymer, which are production wastes, allows to significantly increase the performance characteristics of composite materials and protective coatings based on them.

To form composite materials, an epoxy diane oligomer ED-20, a hardener polyethylene polyamine PEPA and dispersed particles were used. The dependence of the Agocel S-2000, Waltrap and iron scale on the adhesion, physicomechanical properties and heat resistance of epoxy composites was studied. It is proved that for the formation of a composite material or a protective coating with improved cohesive properties, the optimum content of particles, depending on their physical nature, is 10 ... 30 or 60 ... 80 parts by weight, by 100 parts by mass. epoxy oligomer ED-20. Such materials are characterized by increased mechanical strength and the ability to resist static, dynamic, and impact loads, since the performance of their properties is significantly increased compared to the matrix. The obtained results of experimental studies of the physico-mechanical properties of composite materials are in good agreement with the results of testing samples with adhesion characteristics, which indicates their reliability.

Key words: epoxy composite, modulus of elasticity, impact strength, breaking stresses in bending.

Постановка проблеми. Останнім часом для підвищення економічної незалежності провідних країн світу важливим є застосування новітніх технологій при імпорті та експорті

виробленої продукції. У цьому контексті провідним з економічної точки зору є використання не лише нових технологій, але й застосування композитних матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Актуальним на сьогодні є розвиток транспортних технологій, що передбачає застосування екологічно чистих матеріалів невисокої вартості з поліпшеними властивостями. У даному контексті виникає необхідність використання полімерних композитів у вигляді захисних покриттів для відновлення і ремонту засобів транспорту. Показано [1, 2], що такі покриття відзначаються довговічністю, зносостійкістю і поліпшеними антикорозійними властивостями.

Виходячи з наведеного вище, необхідно констатувати про доцільність розробки нових полімерних композитних матеріалів (КМ), які б у комплексі відзначалися поліпшеними адгезійними, фізико-механічними і теплофізичними властивостями. Цього досягають введенням дисперсних наповнювачів різної природи. При цьому використання часток, що є відходами промислового виробництва, для досягнення високих показників експлуатаційних характеристик КМ є актуальним як з точки зору економічних витрат на формування композитів, так і з боку підвищення надійності експлуатації та зменшення об'єму ремонтних робіт устаткування. Такий підхід, на наш погляд, дозволить отримати захисні покриття, які доцільно і необхідно використовувати при відновленні деталей машин та механізмів засобів транспорту, особливо річкового і морського.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний науковий і практичний досвід у напрямку розробки технологічних основ відновлення деталей транспорту полімерними композитами, а також дослідження фізико-механічних властивостей КМ висвітлено у працях авторів: Ю.С.Ліпатова, А.В.Букетова, П.Д.Стухляка, О.В.Шарка, О.М.Сизоненко, Г.М.Бартенева, Г.А.Баглюка та ін. [1-6]. Зазначеними вище науковцями показані технологічні режими формування композицій, прийоми їх нанесення на засоби транспорту у природних умовах, а також проведено аналіз основних напрямків підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів. Водночас авторами [3, 4] стверджується, що важливим при збільшенні надійності роботи деталей транспорту з полімерними покриттями є міцність зчеплення адгезиву до основи та когезійні властивості покриття. Доведено, що останні можна поліпшити введенням дисперсного наповнювача, активного до взаємодії з полімером. Виходячи з цього, актуальним є введення у полімерний зв'язувач активних дисперсних часток, що є відходами промислового виробництва. Це дозволить отримати матеріали з поліпшеними когезійними властивостями.

Мета роботи – дослідити вплив вмісту дисперсного наповнювача на властивості полімерних композитів для відновлення деталей 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: $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}-]_n$. Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

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 композитних матеріалів будівельного призначення. Розмір часток становить 8...12 мкм. Характеристики наповнювачів наведено у табл. 1.

Додатково як наповнювач було використано частки залізної окалини (ЗО), 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 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

витримування 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, витримування впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у композиті зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Таблиця 1

Характеристики наповнювачів

Характеристики	Agocel S-2000	Waltrop
Форма	Круглі частки порошку	Круглі частки порошку
Колір	Білий	Жовтий
Запах	Немає	Немає
Температура розкладу, °С	140	220
Густина сипучості, ρ , кг/м ³	660	520
Розчинність у воді при 20 °С, г/л	5	12
Значення рН при 20 °С	5...7	6...8
В'язкість динамічна при 20 °С, η , мПа·с	1500	1850

У роботі досліджували наступні властивості КМ: адгезійну міцність, залишкові напруження, руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні, ударну в'язкість і теплостійкість (за Мартенсом).

Адгезійну міцність КМ до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТ 14760 – 69 на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження $v = 10$ м/с. Діаметр робочої частини зразків при відриві становив – $d = 25$ мм.

Залишкові напруження у КМ визначали консольним методом [4]. Покриття товщиною $\delta = 0,3...0,8$ 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.

Теплостійкість (за Мартенсом) КМ визначали згідно з ГОСТ 21341-75. Методика дослідження полягає у визначенні температури, при якій досліджуваний зразок нагрівали зі швидкістю $v = 3$ К/хв під дією постійного згинаючого навантаження $F = 5 \pm 0,5$ МПа, внаслідок чого він деформується на задану величину ($h = 6$ мм).

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

Результати досліджень та їх обговорення. Попередньо експериментально досліджено властивості модифікованої ультразвуковою обробкою вихідної епоксидної матриці. Доведено (рис. 1, рис. 2), що показники її адгезійної міцності і залишкових напружень становлять відповідно $\sigma_a = 24,8$ МПа та $\sigma_z = 1,4$ МПа. Доведено (рис. 1), що введення у епоксидний зв'язувач мікродисперсних добавок приводить до підвищення показників адгезійних властивостей КМ. Слід зазначити, що у епоксидний зв'язувач вводили наповнювачі різної зернистості: АС і ВТ з розміром часток – $d = 10...12$ мкм, а також ЗО із зернистістю $d = 60...63$ мкм. Причому частки АС і ВТ вводили за максимального вмісту $q = 50$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом вміст наповнювача вказується у мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20), що зумовлено технологічними аспектами формування композицій. Останні полягають у тому, що введення даних часток за вмісту понад $q = 50$ мас.ч. зумовлює формування пористих композитів. А це значно погіршує когезійні властивості матеріалів. Виходячи з цього, вважали за недоцільне у подальшому формування і дослідження властивостей таких КМ. Крім того, виходячи з мети роботи і об'єктів впровадження частки ЗО вводили у КМ за максимального вмісту $q = 80$ мас.ч.

Встановлено, що введення дрібнодисперсних ($d = 10...12$ мкм) часток АС і ВТ забезпечує монотонне підвищення адгезійної міцності КМ. Максимум показників адгезійної міцності КМ спостерігали при введенні часток АС за вмісту $q = 30$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. При введенні часток АС за такого вмісту адгезійна міцність КМ збільшується від $\sigma_a = 24,8$ МПа (для полімерної матриці) до $\sigma_a = 36,8$ МПа. Надалі збільшення вмісту часток призводить до зменшення адгезійної міцності КМ до $\sigma_a = 32,6$ МПа.

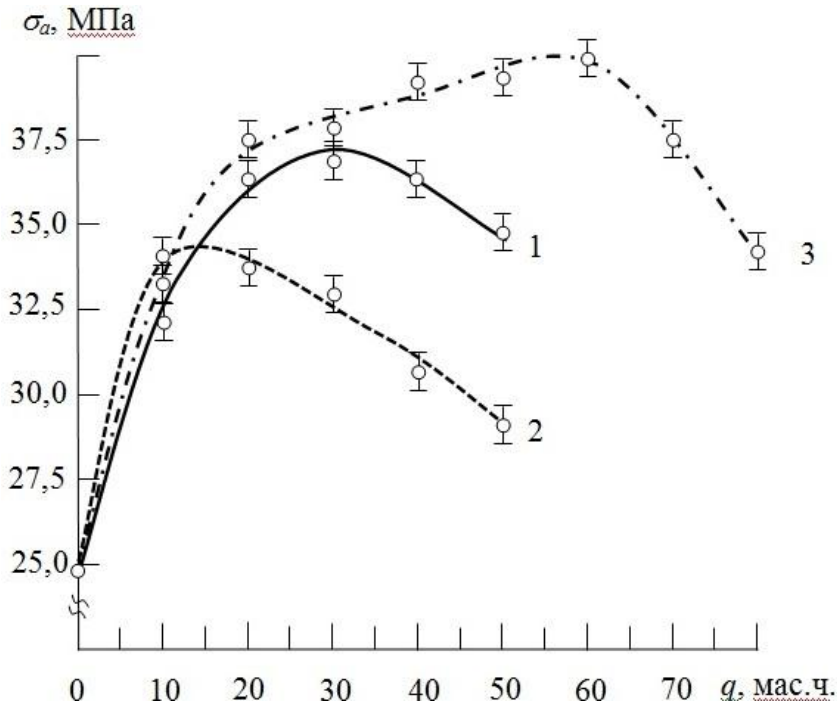


Рис. 1. Залежність адгезійної міцності (σ_a) КМ від вмісту дисперсного наповнювача, q , мас.ч.: 1 – АС ($d = 10...12$ мкм); 2 – ВТ ($d = 10...12$ мкм); 3 – ЗО ($d = 60...63$ мкм). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

Аналогічно, максимальні показники ($\sigma_a = 34,2$ МПа) на кривій залежності адгезійної міцності від вмісту дисперсних часток (рис. 1) спостерігали для КМ з наповнювачем ВТ, що містить $q = 10$ мас.ч. добавки. Введення часток за вмісту $q = 20...50$ мас.ч. призводить до монотонного зменшення адгезійної міцності до $\sigma_a = 30,0$ МПа.

Отже доведено, що наповнювачі АС і ВТ є активними до фізико-хімічної взаємодії з епоксидним зв'язувачем. При цьому, критичний вміст кожного із них є різним, що свідчить про різну динаміку перебігу процесів зшивання при структуроутворенні даних матеріалів. Максимальні показники адгезійної міцності досліджуваних КМ за критичного вмісту часток наповнювачів практично не відрізняються: $\sigma_a = 36,8$ МПа (для КМ з частками АС за вмісту $q = 30$ мас.ч.) і $\sigma_a = 34,2$ МПа (для КМ з частками ВТ за вмісту $q = 10$ мас.ч.).

Деяку іншу динаміку властивостей від вмісту наповнювача спостерігали для КМ із частками ЗО, розмір яких становить $d = 60...63$ мкм. Порівняно з іншими досліджуваними добавками також спостерігали монотонне підвищення показників адгезійної міцності КМ залежно від вмісту залізної окалини, хоча максимум виявлено для КМ, наповненого частками у кількості $q = 60$ мас.ч. Формування такого композиту забезпечує збільшення адгезійної міцності матеріалу від $\sigma_a = 24,8$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_a = 39,8$ МПа. Надалі, збільшення вмісту ЗО призводить до погіршення адгезійних властивостей КМ, що, на наш погляд, зумовлено недостатнім змочуванням дисперсних часток макромолекулами епоксидного олігомеру, а це, у свою чергу, передбачає погіршення міжфазової взаємодії при зшиванні матеріалів і, як наслідок, зменшення вмісту гель-фракції у них.

Цікавими з наукової і практичної точки зору є результати дослідження залишкових напружень у КМ, наповнених частками різної природи і зернистості. Відомо [1, 2], що залишкові напруження є одним з визначальних факторів довговічності захисних покриттів, які експлуатують у критичних умовах динаміки навантажень та за впливу агресивних середовищ. Даний показник

особливо є актуальним при оцінюванні ресурсу експлуатації засобів транспорту з нанесеними покриттями.

Встановлено (рис. 2), що введення часток призводить до збільшення залишкових напружень у покриттях. У першу чергу це зумовлено тим, що при введенні у зв'язувач добавки навколо активних часток формуються зовнішні поверхневі шари, які відзначаються поліпшеними когезійними властивостями. Це забезпечує збільшення залишкових напружень на одиницю об'єму КМ, що зумовлено формуванням термодинамічно і кінетично неврівноважених систем. Слід зазначити, що незначні показники залишкових напружень можуть свідчити про невисоку когезійну міцність матеріалів, або, навпаки, про пластифікуючу дію наповнювача. Останнє передбачає формування надмолекулярних мікро-, мезо- і макроутворень, які забезпечують синергетику властивостей КМ під дією критичних навантажень.

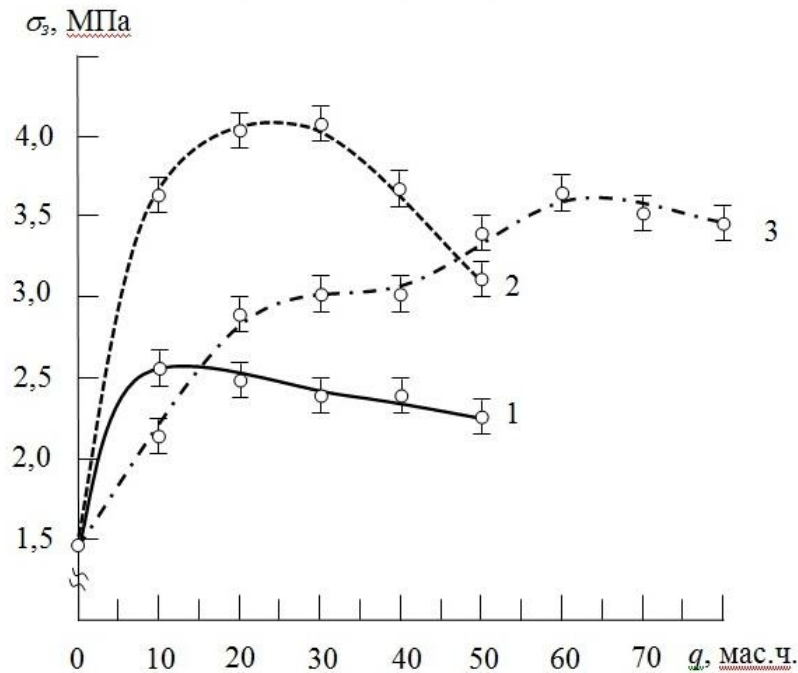


Рис. 2. Залежність залишкових напружень (σ_3) у КМ від вмісту дисперсного наповнювача, q , мас.ч.: 1 – АС ($d = 10...12$ мкм); 2 – ВТ ($d = 10...12$ мкм); 3 – ЗО ($d = 60...63$ мкм). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

Показано (рис. 2), що найвищими залишковими напруженнями серед усього діапазону досліджуваних матеріалів відзначаються КМ з частками ВТ. При цьому максимум ($\sigma_3 = 3,6...4,0$ МПа) на кривій залежності « $\sigma_3 - q$ » спостерігали за вмісту добавки у кількості $q = 10...30$ мас.ч. Отримані дані добре узгоджуються з результатами дослідження адгезійної міцності наповнених таким частками КМ, де спостерігали найвищі показники міцності прилипання адгезивів з наповнювачем ВТ за критичного вмісту до сталюї основи.

Навпаки, мінімальними показниками залишкових напружень на кривій залежності « $\sigma_3 - q$ » спостерігали для КМ з частками АС. Введення такого порошку (незалежно від кількості) призводить до несуттєвого підвищення залишкових напружень – від $\sigma_3 = 1,4$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_3 = 2,2...2,5$ МПа (для усього діапазону досліджуваних КМ з даною добавкою).

Зазначимо, що максимальними ($\sigma_3 = 3,6$ МПа) залишковими напруженнями (серед усього діапазону досліджуваного вмісту часток) характеризуються КМ, наповнені залізною окалиною при $q = 60$ мас.ч. При цьому такий КМ, відзначається максимальними показниками адгезійної міцності серед усіх досліджуваних композитів, хоча порівняно з іншими матеріалами залишкові напруження не є найвищими. Це свідчить про доцільність використання даного наповнювача при формуванні багатокомпонентних матеріалів різного функціонального призначення.

Отже, встановлено оптимальний вміст кожного з досліджуваних наповнювачів для формування захисного покриття з максимальними адгезійними характеристиками. Доведено, що при формуванні адгезійного шару захисних покриттів для деталей транспорту можна використовувати наповнювачі різної фізичної природи. Це забезпечує підвищення, порівняно з вихідною епоксидною матрицею, показників адгезійної міцності у 1,4...1,6 разів, а залишкових напружень у 1,7...2,6 разів, що дозволить:

- при введенні часток АС ($d = 10...12$ мкм) у кількості $q = 30$ мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 36,8$ МПа; залишкові напруження – $\sigma_3 = 2,4$ МПа;

- при введенні часток ВТ ($d = 10 \dots 12$ мкм) у кількості $q = 10$ мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 34,2$ МПа; залишкові напруження – $\sigma_3 = 3,6$ МПа;
- при введенні часток ЗО ($d = 60 \dots 63$ мкм) у кількості $q = 60$ мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 39,8$ МПа; залишкові напруження – $\sigma_3 = 3,6$ МПа.

На наступному етапі досліджували фізико-механічні властивості і теплостійкість КМ з різними за природою та зернистістю наповнювачами. Експериментально встановлено, що властивості модифікованої ультразвуком епоксидної матриці при наведених вище режимах формування є наступними: модуль пружності при згинанні – $E = 2,8$ ГПа, руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа, ударна в'язкість – $W = 7,4$ кДж/м², теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 341$ К.

Доведено (рис. 3, табл. 1), що максимальними показниками фізико-механічних властивостей і теплостійкості серед КМ, наповнених частками із зернистістю $d = 10 \dots 12$ мкм, відрізняються наступні матеріали:

- КМ, наповнений частками АС за вмісту $q = 30$ мас.ч., що має характеристики: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{3z} = 38,2$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 4,3$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 7,7$ кДж/м², теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 361$ К;
- КМ, наповнений частками ВТ за вмісту $q = 10$ мас.ч., що має характеристики: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{3z} = 45,2$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 4,0$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 7,9$ кДж/м², теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 366$ К.

Отримані результати добре узгоджуються з експериментальними випробуваннями адгезійної міцності КМ при відриві та залишкових напружень. Виходячи з цього, можна констатувати про інтенсивну дію активних груп на поверхні наповнювачів на процеси зшивання полімеркомполітів, що пришвидшує їх гелеотворення, внаслідок чого збільшуються показники не лише адгезійної, але й когезійної міцності розроблених матеріалів.

Окремо слід зазначити про вплив наповнювача залізної окалини на властивості епоксикомполітів. Встановлено (рис. 3, табл. 1), що введення ЗО дозволяє максимально (порівняно з іншими досліджуваними матеріалами) підвищити показники фізико-механічних властивостей КМ стосовно епоксидної матриці. Зокрема, встановлено, що введення часток ЗО за вмісту $q = 60 \dots 80$ мас.ч. забезпечує, порівняно з полімерною матрицею, підвищення показників фізико-механічних характеристик і теплостійкості у 1,2...1,9 разів. При цьому, отримали поліпшення наступних показників:

- руйнівних напружень при згинанні: від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа до $\sigma_{3z} = 54,6 \dots 56,5$ МПа;
- модуля пружності при згинанні: від $E = 2,8$ ГПа до $E = 4,4 \dots 5,3$ ГПа;
- ударної в'язкості: від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 8,0 \dots 8,2$ кДж/м²;
- теплостійкості (за Мартенсом): від $T = 341$ К до $T = 364 \dots 366$ К.

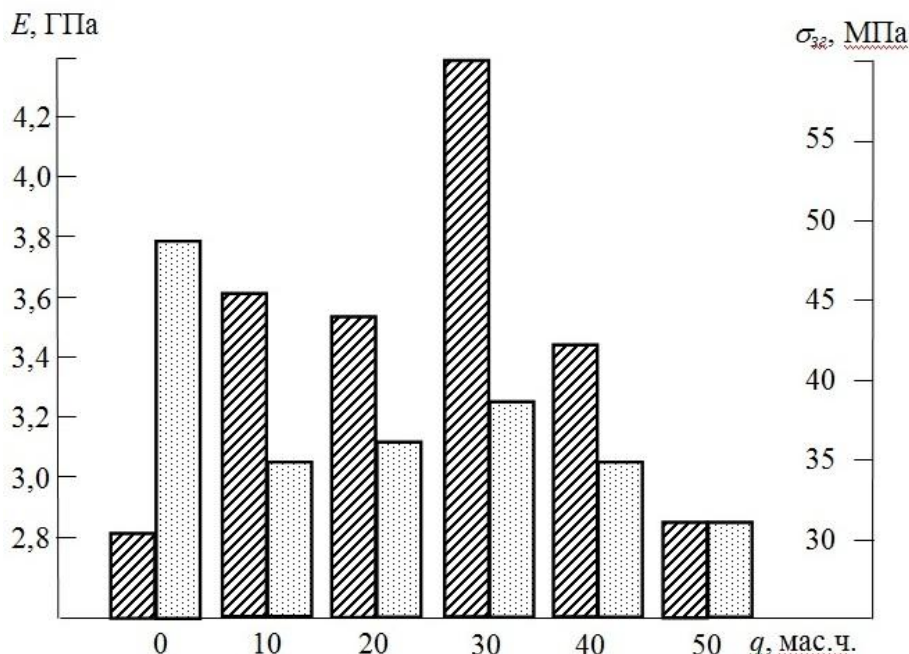


Рис. 3, а. Залежність модуля пружності (E) і руйнівних напружень при згинанні (σ_{3z}) КМ від вмісту мікродисперсних часток АС ($d = 10 \dots 12$ мкм):

- 1 – матриця; 2 – $q = 10$ мас.ч.; 3 – $q = 20$ мас.ч.; 4 – $q = 30$ мас.ч.; 5 – $q = 40$ мас.ч.; 6 – $q = 50$ мас.ч.

- ▨ – модуль пружності (E);
 ▤ – руйнівні напруження при згинанні (σ_{3z}).

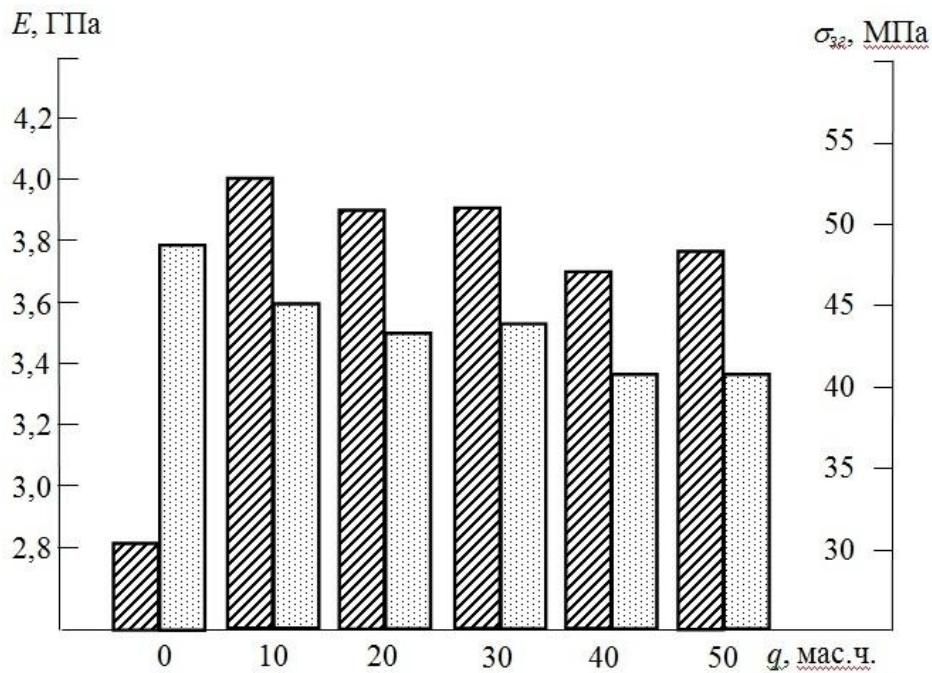


Рис. 3, б. Залежність модуля пружності (E) і руйнівних напружень при згинанні (σ_{32}) КМ від вмісту мікродисперсних часток ВТ ($d = 10...12$ мкм):

1 – матриця; 2 – $q = 10$ мас.ч.; 3 – $q = 20$ мас.ч.; 4 – $q = 30$ мас.ч.; 5 – $q = 40$ мас.ч.; 6 – $q = 50$ мас.ч.

▨ – модуль пружності (E);
 ▩ – руйнівні напруження при згинанні (σ_{32}).

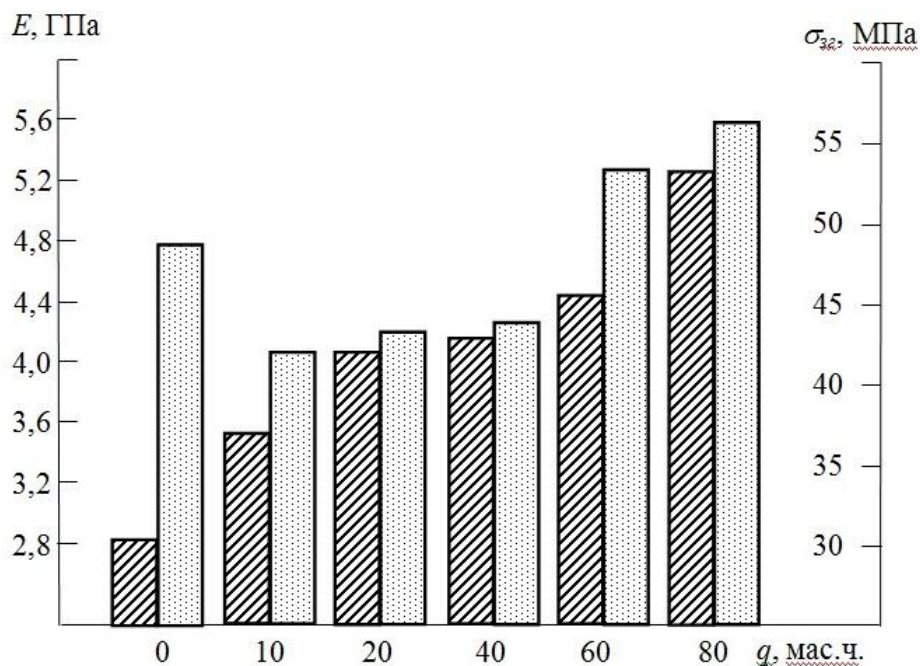


Рис. 3, в. Залежність модуля пружності (E) і руйнівних напружень при згинанні (σ_{32}) КМ від вмісту мікродисперсних часток ЗО ($d = 60...63$ мкм):

1 – матриця; 2 – $q = 10$ мас.ч.; 3 – $q = 20$ мас.ч.; 4 – $q = 40$ мас.ч.; 5 – $q = 60$ мас.ч.; 6 – $q = 80$ мас.ч.

▨ – модуль пружності (E);
 ▩ – руйнівні напруження при згинанні (σ_{32}).

Таблиця 1

Залежність ударної в'язкості і теплостійкості (за Мартенсом) КМ від вмісту і природи мікродисперсного наповнювача

КМ, наповнений частками АС ($d = 10 \dots 12$ мкм)		
Вміст наповнювача, q , мас.ч.	Ударна в'язкість, W , кДж/м ²	Теплостійкість, T , К
0	7,4	341
10	7,5	358
20	7,5	358
30	7,7	361
40	7,6	356
50	7,6	355
КМ, наповнений частками ВТ ($d = 10 \dots 12$ мкм)		
10	7,9	366
20	7,9	362
30	7,8	360
40	7,6	357
50	7,5	354
КМ, наповнений частками ЗО ($d = 60 \dots 63$ мкм)		
10	7,4	355
20	7,5	357
40	7,8	362
60	8,2	366
80	7,7	364

Висновки. У роботі встановлено оптимальний вміст кожного з досліджуваних наповнювачів для формування захисного покриття з максимальними адгезійними і когезійними характеристиками з метою підвищення надійності експлуатації засобів транспорту.

1. Доведено, що при формуванні адгезійного шару захисних покриттів для деталей транспорту можна використовувати наповнювачі різної фізичної природи. Це забезпечує підвищення, порівняно з вихідною епоксидною матрицею, показників адгезійної міцності у 1,4...1,6 разів, а залишкових напружень у 1,7...2,6 разів, що дозволить:

- при введенні часток АС ($d = 10 \dots 12$ мкм) у кількості $q = 30$ мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 36,8$ МПа; залишкові напруження – $\sigma_3 = 2,4$ МПа;

- при введенні часток ВТ ($d = 10 \dots 12$ мкм) у кількості $q = 10$ мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 34,2$ МПа; залишкові напруження – $\sigma_3 = 3,6$ МПа;

- при введенні часток ЗО ($d = 60 \dots 63$ мкм) у кількості $q = 60$ мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 39,8$ МПа; залишкові напруження – $\sigma_3 = 3,6$ МПа.

2. Показано, що максимальними показниками фізико-механічних властивостей і теплостійкості серед композитів, наповнених частками із зернистістю $d = 10 \dots 12$ мкм, відрізняються наступні матеріали:

- КМ, наповнений частками АС за вмісту $q = 30$ мас.ч., що має характеристики: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{3z} = 38,2$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 4,3$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 7,7$ кДж/м², теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 361$ К;

- КМ, наповнений частками ВТ за вмісту $q = 10$ мас.ч., що має характеристики: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{3z} = 45,2$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 4,0$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 7,9$ кДж/м², теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 366$ К.

3. Встановлено, що введення у епоксидний зв'язувач залізної окалини дозволяє максимально (порівняно з іншими досліджуваними матеріалами) підвищити показники фізико-механічних властивостей матеріалів стосовно епоксидної матриці. Зокрема, встановлено, що введення дисперсних часток окалини за вмісту $q = 60 \dots 80$ мас.ч. забезпечує, порівняно з полімерною

матрицею, підвищення показників фізико-механічних характеристик і теплостійкості композитів у 1,2...1,9 разів. При цьому, отримали порівняно з матрицею поліпшення наступних показників:

- руйнівних напружень при згинанні: від $\sigma_{3\sigma} = 48,0$ МПа до $\sigma_{3\sigma} = 54,6...56,5$ МПа;
- модуля пружності при згинанні: від $E = 2,8$ ГПа до $E = 4,4...5,3$ ГПа;
- ударної в'язкості: від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 8,0...8,2$ кДж/м²;
- теплостійкості (за Мартенсом): від $T = 341$ К до $T = 364...366$ К.

Виходячи з результатів експериментальних досліджень, можна констатувати, що введення досліджуваних наповнювачів у комплексі (за умови різної зернистості) дозволить отримати додаткове поліпшення властивостей композитних матеріалів з метою забезпечення надійності засобів транспорту внаслідок синергетичного ефекту. Такі дослідження авторами будуть проведені у майбутньому.

Література

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. Лидин Р.А. Химические свойства неорганических веществ: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., испр. – М.: Химия, 2000. – 480 с.

4. Букетов А.В. Епоксидні нанокompозити: монографія / А.В. Букетов, О.О. Сапронов, В.Л. Алексенко. – Херсон : ХДМА, 2015. – 184 с.

5. Букетов А.В. Епоксидні композити, модифіковані височастотним імпульсним магнітним полем : монографія / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, В.О.Скирденко, В. Л. Алексенко, О.І. Скирденко. – Херсон : ХДМА, 2016. – 201 с.

6. 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.

Стаття надійшла до редакції 03.12.2017