

## ЕПОКСИ-ПОЛІЕФІРНІ КОМПОЗИТИ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ РЕМОНТУ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

**Браїло М. В.**, к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: mv.brailo@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8167-9999;

**Кобельник О. С.**, аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: os.kobelnyk@gmail.com;

**Сапронов О. О.**, т.н., доцент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: oo.sapronov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1115-6556;

**Аппазов Е. С.**, к.т.н., доцент кафедри інноваційних технологій та технічних засобів судноводіння Херсонської державної морської академії;

**Ludmila Dulebová, Ph.D., Assoc. Prof., Technical University of Kosice, Košice, Slovakia,** e-mail: ludmila.dulebova@tuke.sk

У роботі розв'язана проблема вибору активної дисперсної добавки, що забезпечує поряд з технологічністю підвищення властивостей композитних матеріалів. Для забезпечення комплексу експлуатаційних характеристик композитів використано вуглецеву речовину з високими адсорбційними властивостями та гідрофобністю, яка отримана шляхом карбонізації органічних матеріалів і подальшим їх активуванням. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних композитів вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20), 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, що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Зшивали композити, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – епоксидний діановий олігомер ЕД-20: ортофталева ненасичена передприскорена литтєва поліефірна смола Norsodyne O 12335 AL : твердник: ПЕПА : твердник бутанокс-М50 (Vitanox-М50), що є перекисом метилетилкетону – 100 : 20 : 10 : 1. Введення добавки з високими адсорбуючими властивостями призводить до підвищення крихкості матеріалу, зменшуються показники руйнівних напружень при згинанні та ударної в'язкості. Водночас, висока питома площа часток наповнювача дозволяє сформувати структуру композитів із підвищеними показниками модуля пружності при згинанні та теплостійкості. Встановлено, що для формування композитів із підвищеними показниками модуля пружності доцільно використовувати добавку за вмісту  $q = 30$  мас.ч., при цьому спостерігали максимальне зростання модуля пружності до  $E = 5,7$  ГПа. Тоді, як значення показників теплостійкості (за Мартенсом) композитних матеріалів підвищується за вмісту часток активованого вугілля  $q = 5 \dots 10$  мас.ч. (від  $T = 335$  К до  $T = 343$  К). Показано, що епокси-поліефірну матрицю із оптимальним вмістом часток активованого вугілля можливо використовувати у вузлах тертя за рахунок пористої структури.

**Ключові слова:** активність наповнювача, композит, модуль пружності, руйнівні напруження при згинанні, ударна в'язкість, теплостійкість.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.134-140**

**Постановка проблеми.** В процесі експлуатації суднових транспортних засобів основним є їх безперебійна, надійна робота, яка залежить від технічного стану кожного окремого елемента всього судна. Важливу частину систем на судні займають теплообмінні апарати, що забезпечують відведення тепла від енергетичної установки і втримувати тепловий режим роботи двигуна внутрішнього згорання. Водночас елементи теплових апаратів працюють в умовах впливу агресивного середовища і постійної зміни температури. Це призводить до виникнення пошкоджень, зниження продуктивності і виходу з ладу. Важливим є можливість відновлення робочих елементів теплообмінників на судні в процесі експлуатації. Актуальним у даному напрямку є використання полімерних композитних матеріалів з прогнозованими властивостями. Водночас до полімерів висуваються високі фізико-механічні і теплофізичні вимоги. Тому актуальним є розробка полімерних матеріалів з поліпшеними експлуатаційними властивостями. В даному

напряму перспективним є використання полімерів на основі поліефірних і епоксидних смол. Наповнення епоксидного та поліефірного зв'язувачів різними за формою і природою дрібнодисперсними добавками є одним із способів забезпечення композитних матеріалів (КМ) прогнозованими технологічними та експлуатаційними характеристиками [1–6]. Основною проблемою при формуванні КМ є вибір активних наповнювачів із розвиненою поверхнею. Введення таких добавок у епоксидний зв'язувач дозволяє змінювати структуру полімеру в поверхневих шарах і у його об'ємі, а це у свою чергу забезпечує поліпшення як технологічних, так і експлуатаційних характеристик розроблених матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових праць [6–10] дозволяє констатувати, що актуальним при розробленні покриттів чи епоксидних композитів є вибір наповнювача, що може виконувати функцію гідрофобної та антиагломеруючої добавки. Це дозволяє забезпечувати матеріали поряд з високими механічними характеристиками водонепроникненість КМ, а отже стійкість матеріалів до різних зовнішніх факторів (вологість, вплив агресивних середовищ). Так у праці [7] показано, що використання стеарату кальцію за вмісту  $q = 10 \dots 20$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА забезпечує формування матеріалу з руйнівними напруженнями при згинанні  $\sigma_{32} = 72,0$  МПа та модулем пружності при згинанні  $E = 4,1$  ГПа. У даному випадку зростання механічних характеристик пов'язано з впливом стеаринової кислоти аліфатичного ряду, що входить у склад дисперсної добавки та забезпечує поряд із зменшенням водонепроникності високу пружність. Таким чином, можна стверджувати, що актуальним є вибір активних наповнювачів при формуванні композитів функціонального призначення.

**Мета роботи** – розробити епокси-поліефірні композити з підвищеними експлуатаційними характеристиками для ремонту елементів суднових технічних засобів.

**Матеріали та методика дослідження.** З метою формування матриці для КМ з поліпшеними фізико-механічними та теплофізичними властивостями використовували наступні компоненти.

1. Основним компонентом зв'язувача вибрано низькомолекулярний епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 ( $q = 100$  мас.ч.). Слід зазначити, що молекули епоксидних олігомерів містять гліцидилові та епоксидні групи, які здатні, взаємодіючи з твердником, формувати зшити структуру в матеріалах у вигляді сітки.

2. Ортофталева ненасичена передприскорена литтєва поліефірна смола Norsodyne O 12335 AL ( $q = 20$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20).

3. Твердник холодного тверднення епоксидних смол поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78) (10 мас.ч. на 100 мас.ч. ЕД-20).

4. Твердник для поліефірних смол – Бутанокс-М50 (Butanox-M50), що є перекисом метилетилкетону (МЕКП) ( $q = 1$  мас.ч. на 100 мас.ч. поліефірної смоли Norsodyne O 12335).

5. Активоване вугілля (дисперсність  $d = 5 \dots 10$  мкм) – пориста вуглецева речовина з високими адсорбційними властивостями та гідрофобністю, яка отримана шляхом карбонізації органічних матеріалів і подальшим їх активуванням. Містить значну кількість пор і тому має дуже велику питому площу поверхні, унаслідок чого має високу адсорбцію. Вміст добавки змінювали у межах  $q = 5 \dots 60$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру марки ЕД-20.

У роботі досліджено наступні фізико-механічні властивості: модуль пружності, руйнівні напруження при згинанні та ударна в'язкість; теплофізичні: теплостійкість (за Мартенсом).

Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно 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 допомогою маятникового копра згідно методу Шарпі (ГОСТ 4647-80). Визначали робочий кут відхилення маятника після руйнування зразка при

наперед заданому початковому куті підйому робочого тіла установки. Дослідження проводили за температури  $T = 298 \pm 2$  К і відносній вологості  $d = 50 \pm 5$  %. Використовували зразки з розміром:  $l \times b \times h = (65 \times 12 \times 12) \pm 0,5$  мм.

Теплостійкість (за Мартенсом) КМ визначали згідно 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).

Епокси-поліефірні композити з дисперсним наповнювачем формували за такою технологією з виконанням температурно-часових режимів: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20 та поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL; дозування наповнювача та подальше введення його в зв'язувач; гідродинамічне суміщення епокси-поліефірної композиції впродовж часу  $t = 5 \pm 0,1$  хв; введення твердника ПЕПА і Butanox-M50 та перемішування композиції впродовж часу  $t = 5 \pm 0,1$  хв. Надалі затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу  $t = 12,0 \pm 0,1$  год за температури  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 3$  К/хв до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання КМ впродовж часу  $t = 2,0 \pm 0,05$  год, повільне охолодження до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів у КМ зразки витримували впродовж часу  $t = 24$  год на повітрі за температури  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

**Результати досліджень та їх обговорення.** На початковому етапі досліджували руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні, і ударну в'язкість епокси-поліефірного матеріалу наповненого частками активованого вугілля. При введенні дисперсної добавки спостерігали зниження показників руйнівних напружень при згинанні та ударної в'язкості. За вмісту  $q = 5 \dots 15$  мас.ч. активованого вугілля значення руйнівних напружень при згинанні (рис.1, крива 1) зменшуються від  $\sigma_{32} = 50,4$  МПа (для епокси-поліефірної матриці) до  $\sigma_{32} = 34,7 \dots 35,4$  МПа. Подальше введення часток активованого вугілля призводить до різкого зниження значень руйнівних напружень при згинання до  $\sigma_{32} = 22,9 \dots 28,0$  МПа за вмісту  $q = 20 \dots 30$  мас.ч і за критичного вмісту  $q = 50$  мас.ч. становить  $\sigma_{32} = 4,8$  МПа. Слід зазначити, що максимально можливе наповнення епокси-поліефірного зв'язувача без застосування додаткових умов становило  $q = 50$  мас.ч. Введення наповнювача понад 50 мас.ч. не забезпечує достатнього змочування часток активованого вугілля зв'язувачем і, як наслідок, зшивання матеріалу проходить із значними дефектами у його структурі при отвердженні. Це обумовлено тим, що даний наповнювач характеризується високими адсорбційними властивостями, оскільки має значну кількість пор і відрізняється значною питомою площею поверхні. Активне адсорбування зв'язувача частками вугілля призводить до зниження показників фізико-механічних властивостей сформованого матеріалу. Зокрема, показники ударної в'язкості композиту знижуються вже за незначного вмісту добавки. За вмісту  $q = 5$  мас.ч. значення зменшується від  $W = 8,3$  кДж/м<sup>2</sup> (для матриці) до  $W = 3,3$  кДж/м<sup>2</sup>. Подальше введення наповнювача від  $q = 10$  мас.ч. до  $q = 50$  мас.ч. призводить до зниження показників ударної в'язкості до  $W = 2,1 \dots 2,5$  кДж/м<sup>2</sup>. Отже, монотонне зниження показників ударної в'язкості при введенні пористої добавки опосередковано свідчить, що такі матеріали характеризуються значною крихкістю. На перший погляд це вказує на недолік, а саме незначну механічну міцність. Водночас, значна пористість добавки може забезпечувати і пористість самого матеріалу, що є вагомим при використанні таких КМ у вузлах тертя. Так як матеріал може бути пористим, перспективним є подача чи наповнення КМ мастильним матеріалом, що дозволить забезпечити зниження коефіцієнту тертя. Тобто, не зважаючи на зниження ударної в'язкості і руйнівних напружень при згинанні КМ доцільно провести дослідження впливу активованого вугілля на модуль пружності при згинанні.

Отже, аналізуючи отримані результати модуля пружності при згинанні композитного матеріалу (рис. 1, крива 2) помітно, що показники підвищуються за вмісту  $q = 5 \dots 30$  мас.ч. порівняно з матрицею. Зокрема, за вмісту до  $q = 5$  мас.ч. значення підвищується від  $E = 3,6$  ГПа (для матриці) до  $E = 4,6$  ГПа і за вмісту  $q = 30$  мас.ч. становить

$E = 5,7$  ГПа. Очевидно, що значна кількість пор, а відповідно висока питома площа поверхні наповнювача дозволяє підвищити пружні властивості сформованого композиту.

Слід зауважити, що область пружних деформацій при згинанні КМ є незначною, оскільки супроводжується подальшим його руйнуванням при незначних навантаженнях (рис. 1, крива 1). Отже, отримані високі показники пружності ( $E = 5,7$  ГПа) розроблених КМ дозволяють стверджувати, що використання таких матеріалів є актуальним, але потребує поглибленого дослідження. Тобто, такі матеріали необхідно посилювати або армуючими добавками (волокна), або модифікуючими добавками (модифікатори, пластифікатори), що дозволить забезпечити комплекс поліпшених властивостей. Це у свою чергу, дозволить використовувати такі КМ у різних умовах експлуатації, зокрема і у вузлах тертя.

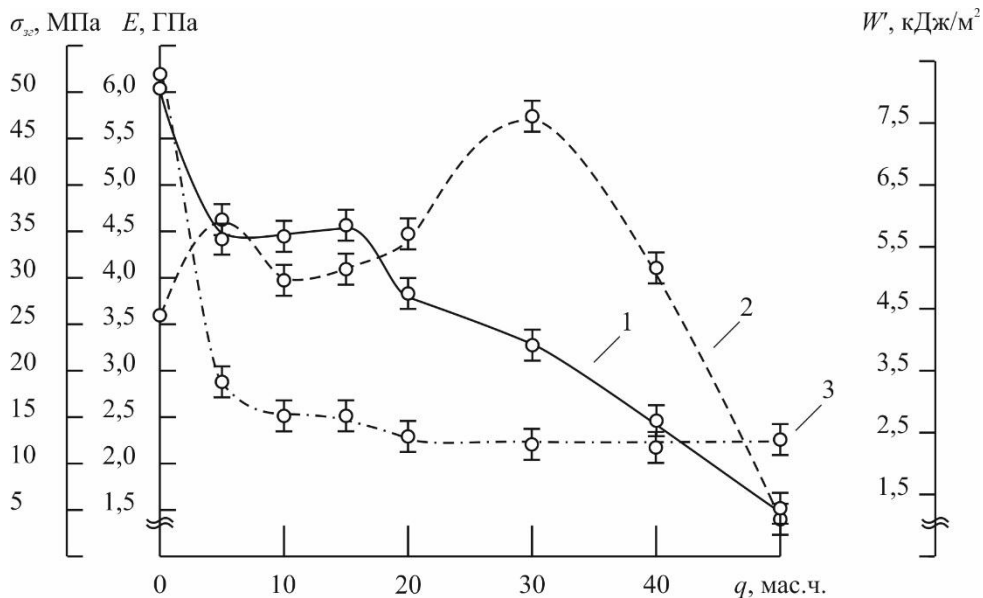


Рисунок 1 – Вплив вмісту часток активованого вугілля на фізико-механічні властивості епокси-поліефірної матриці: 1 – руйнівне напруження при згинанні ( $\sigma_{zg}$ ); 2 – модуль пружності при згинанні ( $E$ ); 3 – ударна в'язкість ( $W'$ )

На наступному етапі досліджували вплив вмісту часток активованого вугілля на теплостійкість композитного матеріалу (за Мартенсом). Встановлено, що введення активованого вугілля в діапазоні  $q = 5 \dots 10$  мас.ч. приводить до підвищення показників теплостійкості від  $T = 335$  К (для епокси-поліефірної матриці) до  $T = 343$  К. Збільшення вмісту понад  $q = 10$  мас.ч. наповнювача призводить до зниження теплостійкості матеріалу. За вмісту  $q = 15$  мас.ч. значення становить  $T = 343$  К і поступово знижується пропорційно введенню часток наповнювача до  $T = 326$  К за критичного вмісту  $q = 50$  мас.ч.

Отже, при дослідженні фізико-механічних та теплофізичних властивостей епокси-поліефірного композитного матеріалу наповненого частками активованого вугілля встановлено, що введення добавки з високими адсорбуючими властивостями призводить до підвищення крихкості матеріалу – зменшуються показники руйнівних напружень при згинанні та ударної в'язкості. Водночас, слід зазначити, що висока питома площа часток наповнювача дозволяє сформувати КМ із підвищеними показниками модуля пружності при згинанні (за вмісту  $q = 5 \dots 30$  мас.ч.) та теплостійкості КМ (за вмісту  $q = 5 \dots 10$  мас.ч.).

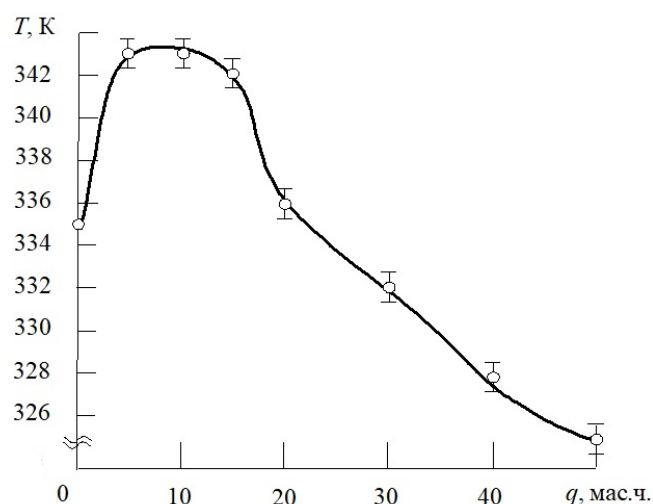


Рисунок 2 – Вплив вмісту часток активованого вугілля на теплостійкість (за Мартенсом) епокси-поліефірної матриці

На основі експериментальних досліджень встановлено, що використовувати даний композит, як покриття, або, як конструкційний матеріал, на який будуть діяти статичні, динамічні, або ударні навантаження не є доцільним. Водночас, наповнювач активоване вугілля можливо використовувати у епокси-поліефірній матриці при створенні багатокомпонентного полімерного матеріалу для підвищення показників модуля пружності при згинанні та теплостійкості (за Мартенсом) у комплексі із добавками, які впливають на стійкість матеріалу до навантажень. Додатково, пориста структура таких КМ потребує поглибленого дослідження, позаяк існує ймовірність використання розроблених матеріалів у вузлах тертя.

**Висновки.** За результатами експериментальних досліджень фізико-механічних та теплофізичних властивостей епокси-поліефірних матеріалів за різного вмісту часток активованого вугілля можна констатувати наступне:

1. Встановлено, що введення часток активованого вугілля у епокси-поліефірну матрицю забезпечує підвищення модуля пружності при згинанні і теплостійкості за Мартенсом композитних матеріалів. Доведено, що введення добавки за вмісту  $q = 30$  мас.ч. забезпечує підвищення модуля пружності розроблених матеріалів від  $E = 3,6$  ГПа (для епокси-поліефірної матриці) до  $E = 5,7$  ГПа.

2. Проаналізовано, що значення показників теплостійкості (за Мартенсом) композитних матеріалів підвищується за вмісту часток активованого вугілля  $q = 5 \dots 10$  мас.ч. від  $T = 335$  К (для епокси-поліефірної матриці) до  $T = 343$  К.

Враховуючи, що теплообмінники на судні працюють в умовах впливу температур, то показники теплостійкості матеріалів для відновлення їх технічного стану є пріоритетними. Тому, розроблений багатокомпонентний композитний матеріал з прогнозованими властивостями, на основі епокси-поліефірної матриці із оптимальним вмістом часток активованого вугілля, можливо використовувати при відновленні технічного стану судових теплообмінних апаратів. Також можливе використання розроблених матеріалів у вузлах тертя.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кербер М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. и др. ; под ред. Берлина А. А. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.

2. Buketov A. V., Sapronov O. O., Brailo M. V., Maruschak P. O., Yakushchenko S. V., Panin S. V., Nigalatiy V. D. Dynamics of destruction of epoxy composites filled with ultra-dispersed diamond under impact conditions. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2018. DOI: 10.1080/15376494.2018.1495788.

3. Buketov A., Brailo M., Yakushchenko S., Sapronova A. Development of Epoxy-Polyester Composite with Improved Thermophysical Properties for Restoration of Details of Sea and River Transport. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Article ID 6378782.
4. Duleba B. et al. Possibility of Increasing the Mechanical Strength of Carbon. *Epoxy Composites by Addition of Carbon Nanotubes, Materials Science Forum*. 2015. Vol. 818, P. 299–302.
5. Букетов А. В., Сапронов О. О., Алексенко В. Л. Епоксидні нанокompозити: монографія. Херсон : ХДМА, 2015. 184 с.
6. Salom C., Prolongo M. G., Toribio A., Martínez-Martínez A. J., Aguirre Cárcer I., Prolongo S. G. Mechanical properties and adhesive behavior of epoxy-graphene nanocomposites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2017.
7. Лещенко О. В. Дослідження впливу структурно-активної добавки на властивості епоксидних композитів. *Наукові нотатки*. Луцьк : ЛНТУ, 2018. Випуск 63. С. 114–122.
8. Abouzahr S., Wilkes G. L. Structure property studies of polyester- and polyether-based MDI–BD segmented polyurethanes: Effect of one- vs. two-stage polymerization conditions. *J. Appl. Polym. Sci.* 1984. Vol. 29. Issue 9. P. 2695–2711.
9. Букетов А. В., Браїло М. В., Кобельник О. С., Акімов О. В. Трибологічні властивості епоксикompозитів, наповнених дисперсними частинками і термопластами. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2016. №1. С. 28–35.
10. Buketov A. V., Brailo M. V., Kobel'nyk O. S., Akimov O. V. Tribological properties of the epoxy composites filled with dispersed particles and thermoplastics. *Materials Science*. 2016. Vol. 52, Number 1. P. 25–32.

## REFERENCES

1. Kerber M. L., Vinogradov V. M., Golovkin G. S. i dr. ; Berlina A. A. (Ed.) (2008). *Polimerniye kompozitsionniye materialih: struktura, svoystva, tekhnologiya*. SPb.: Professiya.
2. Buketov, A. V., Sapronov, O. O., Brailo, M. V., Maruschak, P. O., Yakushchenko, S. V., Panin, S. V. & Nigalatiy V. D. (2018). Dynamics of destruction of epoxy composites filled with ultra-dispersed diamond under impact conditions. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. DOI: 10.1080/15376494.2018.1495788.
3. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S. & Sapronova A. (2018). Development of Epoxy-Polyester Composite with Improved Thermophysical Properties for Restoration of Details of Sea and River Transport. *Advances in Materials Science and Engineering*. Article ID 6378782.
4. Duleba, B. et al. (2015). Possibility of Increasing the Mechanical Strength of Carbon. *Epoxy Composites by Addition of Carbon Nanotubes, Materials Science Forum*, Vol. 818, 299–302.
5. Buketov, A. V., Sapronov, O. O. & Aleksenko, V. L. (2015). *Epoksidni nanokompозити: monografiya*. Kherson : KhDMA.
6. Salom, C., Prolongo, M. G., Toribio, A., Martínez-Martínez, A. J., Aguirre Cárcer I., Prolongo S. G. (2017). Mechanical properties and adhesive behavior of epoxy-graphene nanocomposites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*.
7. Leshchenko, O. V. (2018). Doslidzhennia vplyvu strukturno-aktyvnoi dobavky na vlastyivosti epoksydnykh kompozitiv. *Naukovi notatky*. Lutsk : LNTU. 63, 114–122.
8. Abouzahr, S., Wilkes G. L. (1984). Structure property studies of polyester- and polyether-based MDI–BD segmented polyurethanes: Effect of one- vs. two-stage polymerization conditions. *J. Appl. Polym. Sci., Vol. 29, Issue 9*, 2695–2711.
9. Buketov, A. V., Brailo, M. V., Kobelnyk, O. S. & Akimov, O. V. (2016). Trybolohichni vlastyivosti epoksykompozitiv, napovnenykh dyspersnymy chastynkamy i termoplastamy. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, 1, 28–35.
10. Buketov, A. V., Brailo, M. V., Kobel'nyk, O. S. & Akimov O. V. (2016). Tribological properties of the epoxy composites filled with dispersed particles and thermoplastics. *Materials Science*, Vol. 52, Number 1, 25–32.

**Браило Н. В., Кобельник О. С., Сапронов А. А., Аппазов Э. С., Ludmila Dulebová ЭПОКСИ-ПОЛИЭФИРНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ РЕМОНТА ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

*В работе решена проблема выбора активной дисперсной добавки, которая обеспечивает наряду с технологичностью повышение свойств композитных материалов. Для обеспечения комплекса эксплуатационных характеристик композитов использовано углеродное вещество с высокими адсорбционными свойствами и гидрофобностью, полученной путем карбонизации органических материалов и последующим их активированием. В качестве основного компонента для связующего при формировании эпоксидных композитов выбрано эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20, который характеризуется высокой адгезионной и когезионной прочностью, незначительной усадкой и технологичностью при нанесении на поверхности сложного профиля. Для сшивания эпоксидных композиций использовано отвердитель полиэтиленполиамин ПЭПА, что позволяет отверждать материалы при комнатных температурах. Сшивали композиты, вводя отвердитель в композицию при стехиометрическом соотношении компонентов при содержании (масс.ч.) - эпоксидный диановый олигомер ЭД-20: ортофталевая ненасыщенная передприскоренная литъевая полиэфирная смола Norsodyne O 12335 AL: отвердитель ПЭПА: отвердитель бутанокс-М50 (Butanox-M50), что является перекисью метилэтилкетона – 100 : 20 : 10 : 1. Введение добавки с высокими адсорбирующими свойствами приводит к повышению хрупкости материала, уменьшаются показатели разрушающих напряжений при сгибании и ударной вязкости. В то же время, высокая удельная площадь частиц наполнителя позволяет сформировать структуру композита с повышенными показателями модуля упругости при изгибе и теплостойкости. Установлено, что для формирования композитов с повышенными показателями модуля упругости целесообразно использовать добавку за содержания  $q = 30$  масс.ч., при этом наблюдали максимальный рост модуля упругости до  $E = 5,7$  ГПа. Тогда, как значения показателей теплостойкости (по Мартенсу) композитных материалов повышается при содержании частиц активированного угля  $q = 5...10$  масс.ч. (от  $T = 335$  К до  $T = 343$  К). Показано, что эпокси-полиэфирную матрицу с оптимальным содержанием частиц активированного угля можно использовать в узлах трения за счет пористой структуры.*

**Ключевые слова:** активность наполнителя, композит, модуль упругости, разрушительные напряжения при изгибе, ударная вязкость, теплостойкость.

**Brailo M. V., Kobelnik O. S., Sapronov O. O., Appazov E. S., Ludmila Dulebová STRESS-RELATED AND HEAT-TRANSFER PROPERTIES OF EPOXY-POLYESTER COMPOSITES FILLED WITH ACTIVATED CARBON**

*The current study has solved the problem of reactive dispersed additive match, which provides, along with manufacturability, improved properties of composite materials. To ensure a set of operational characteristics of the composites, the carbon substance with high adsorption properties and hydrophobicity was used. The latter was obtained by carbonization of organic materials and their subsequent activation. ED-20 epoxy diane oligomer has been selected to be the main component for the binder during epoxy composites formation. ED-20 epoxy diane oligomer possesses high adhesive and cohesive strength, slight shrinkage and manufacturability when applied to the intricate shape surface. PEPA polyethylene polyamine hardener was used for crosslinking of epoxy compositions, which allows materials to be hardened at room temperature. The composites were crosslinked by introducing the hardener into a composition at stoichiometric ratio of components at the content (parts by weight) - ED-20 epoxy diane oligomer: Norsodyne O 12335 AL orthophthalic unsaturated pre-accelerated polyester resin: PEPA hardener: Butanox-M50 hardener (Butaneox-M50) which is methyl ethyl ketone peroxide – 100 : 20 : 10 : 1. The introduction of additives with high adsorbing properties leads to material embrittlement; the indicators of fracture stresses during bending and impact strength have been reduced. At the same time, the high specific filler particles area enables formation of a composite structure with increased elasticity modulus during bending and heat resistance. It was found that for composites formation with increased indicators of elasticity modulus, it is advisable to use an additive at the content  $q = 30$  pts.wt., while the maximum increase in elasticity modulus up to  $E = 5.7$  GPa was observed. But, the indicator values of heat resistance (according to Martens) of composite materials increase at the content of activated carbon particles  $q = 5...10$  pts.wt. (from  $T = 335$  K to  $T = 343$  K). It is shown that an epoxy-polyester matrix with an optimal content of activated carbon particles can be used in friction units due to its porous structure.*

**Keywords:** filler activity, composite, elasticity modulus, fracture stresses at bending, impact strength, heat resistance.

© Браило М. В., Кобельник О. С., Сапронов О. О., Аппазов Е. С., Ludmila Dulebová

Статтю прийнято  
до редакції 28.02.19