

## АДГЕЗІЙНІ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПОВНЕНИХ ПОЛІСТИРОЛОМ «ОАЗИС» ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЇ ТЕХНІКИ

Кулініч В. Г., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: kulinich2000@yahoo.com, ORCID: 0000-0003-0323-8236

У роботі розглянуто перспективи використання полістиролу «Оазис» для формування композитних матеріалів із покращеними адгезійними та когезійними властивостями на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20, який характеризується поліпшеною когезійною міцністю та незначною усадкою. Передбачено використання твердника ПЕПА для подальшого створення комплексних сполук із епоксидним олігомером. Досліджено вплив полістиролу «Оазис» на адгезійні та когезійні властивості епоксидної матриці. В результаті аналізу даних, отриманих після проведення експерименту, встановлено оптимальний вміст наповнювача, що забезпечує максимальні показники адгезійної міцності при відриві і зсуві, залишкових напружень, модуля пружності, руйнівних напружень при згинанні та ударної в'язкості. Отримання матеріалу із оптимальними показниками адгезійної міцності забезпечує введення наповнювача вмістом  $q = 0,08$  мас.ч. в епоксидний олігомер ЕД-20. За такого вмісту отримали наступні показники: адгезійна міцність при відриві  $\sigma_a = 37,2$  МПа, адгезійна міцність при зсуві -  $\tau = 6,1$  МПа, залишкові напруження -  $\sigma_z = 1,2$  МПа. Для формування композитних матеріалів із максимальними фізико-механічними властивостями доцільно використання добавки із вмістом  $q = 0,06 \dots 0,08$  мас.ч., що забезпечує формування матеріалів із наступними показниками: руйнівні напруження при згинанні  $\sigma_z = 32,0 \dots 44,5$  МПа, модуль пружності при згинанні  $E = 1,5 \dots 2,1$  Гпа. Оптимальним вмістом полістиролу для формування матеріалу із максимальним опором ударним навантаженням є  $q = 0,02 \dots 0,08$  мас.ч., при якому ударна в'язкість складає  $W = 9,3 \dots 11,8$  кДж/м<sup>2</sup>. Неопосередкованим підтвердженням результатів проведених досліджень є аналіз макроструктури поверхні сколювання сформованих композитних матеріалів. Виявлено збіг тенденції розвитку поверхні сколювання, характерної для матеріалів із високими показниками когезійної міцності із зміною показників ударної в'язкості в залежності від вмісту полістиролу «Оазис». Після проведення загального оцінювання отриманих даних встановлено оптимальний вміст наповнювача при формуванні композитів із покращеними когезійними та адгезійними властивостями.

**Ключові слова:** композит, адгезійна міцність, руйнівні напруження при згинанні, ударна в'язкість, модуль пружності, наповнювач.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.080-091

**Постановка проблеми.** Світова промисловість постійно розвивається і вимагає розробки матеріалів із покращеними адгезійними та когезійними властивостями у зв'язку з необхідністю їхнього використання у вигляді покриттів для захисту деталей технологічного устаткування від корозії. Серед полімерних композитних матеріалів (КМ) окремо виділяють матеріали на епоксидній основі, які характеризуються оптимальним співвідношенням вартості та якості. У роботі використовували епоксидний олігомер ЕД-20, який відрізняється покращеними адгезійними та фізико-механічними властивостями.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Авторами [1–8] проведено комплекс досліджень у напрямку розробки багатофункціональних захисних покриттів. Основними вимогами до даних матеріалів є підвищені адгезійна та когезійна міцність водночас із мінімальними значеннями залишкових напружень. Даної мети можливо досягти за допомогою наповнення епоксидної матриці дисперсними частками. При цьому необхідна наявність хімічної та фізичної міжфазової взаємодії при зшиванні композицій для отримання покриттів з поліпшеними властивостями. Перспективним при формуванні епоксидних КМ є використання у вигляді добавки полістиролу «Оазис» (ПО), який має активні групи, подібні до епоксидного олігомера ЕД-20. Це є цікавим з наукової точки зору через можливість створення КМ із покращеними експлуатаційними характеристиками. Крім цього дана робота є актуальною стосовно вирішення сучасних задач сучасної промисловості у напрямку використання вторинних ресурсів.

**Мета роботи** – дослідити вплив полістиролу «Оазис» на адгезійні та когезійні властивості епоксокомпозитних матеріалів.

**Матеріали та методика досліджень.** 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. Структурна формула фрагменту епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 наведена на рис. 1 [5]. Як наповнювач використано частки полістиролу «Оазис». Дисперсні частки вводили у зв'язувач за вмісту від 0,02 до 0,50 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна формула наповнювача:  $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)]_n$ . Молекулярна маса ПО складає 80...100 г/моль. Полістирол «Оазис» відрізняється підвищеною ударною стійкістю та відносно невисокою собівартістю. Крім того, через його широку розповсюдженість, відбувається постійне накопичення виробів, які вийшли з використання. Це надає можливість вторинної переробки полістиролу «Оазис», що, в свою чергу, є перспективним через зменшення рівня забруднення. Структурну формулу наповнювача наведено на рис. 2.

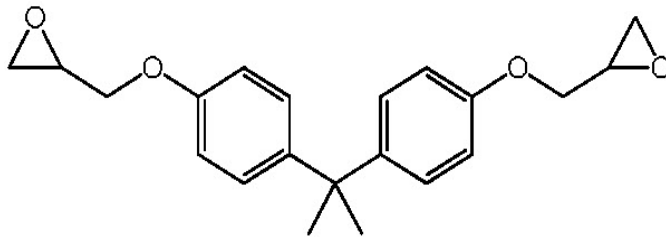


Рисунок 1 – Структурна формула фрагменту епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 [5]

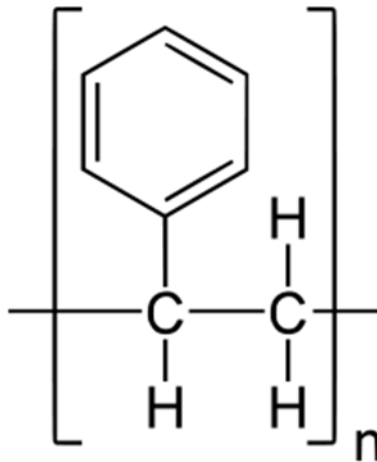


Рисунок 2 – Загальний вигляд хімічних зв'язків полістиролу «Оазис»

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо, що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів:  $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}-]_n$ . Структурну формулу фрагменту твердника ПЕПА наведено на рис. 3. Різні стадії зшивання моделювали і досліджували при введенні твердника у композицію за вмісту 10 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 з метою визначення оптимального для відповідних характеристик співвідношення компонентів у системі «зв'язувач – модифікатор». Характеристики епоксидного діанового олігомеру, модифікатора і твердника наведено у табл. 1 і 2.

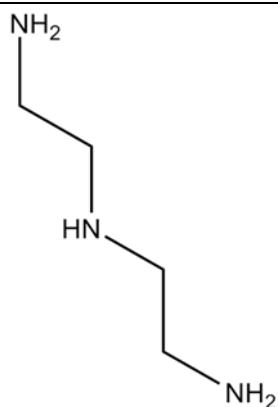


Рисунок 3 – Структурна формула фрагменту твердника ПЕПА [5]

Таблиця 1 – Характеристики компонентів епоксидного зв'язувача

Характеристики	Епоксидний олігомер ЕД-20	Твердник ПЕПА
Молекулярна маса	390...430	230...250
Вміст епоксидних груп, %	20,0...22,5	–
Вміст гідроксильних груп, %	1,25	–
Середня функціональність за епоксидними групами, $f_n$	2,0	–
Вміст азоту, %	–	19,5...22,0
Вміст вуглецю, %	–	–
Вміст кисню, %	–	–
Вміст водню, %	–	–
В'язкість, $\eta$ , Па·с	13...20	0,9
Густина, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,16	1,05

Таблиця 2 – Фізичні властивості полістиролу

Фізичні властивості	Умовні позначення	Одиниці виміру	Числове значення
Густина	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	1050
Температура склування	$T_{ск.}$	К	366
Температура самозаймання	$T_{сз.}$	К	713
Міцність при розтягу	$\sigma_{розг.}$	МПа	40...50
Модуль пружності при згинанні	$E$	ГПа	3,2
Відносне видовження	$\epsilon$	%	1,2...2,0
Теплопровідність	$\lambda$	Вт(м·К)	0,08...0,12
Теплостійкість за Мартенсом	$T$	К	343
Міцність за Бринелем	НВW	МПа	140...200
Усадка при литті	$\alpha$ -	%	0,4...0,8
Питомий електричний опір	$\rho_v$	Ом·м	10 <sup>12</sup>
Діелектрична проникність	$\epsilon$	–	2,5...2,6

Епоксидні композити і покриття на їх основі формували за наступною технологією: підігрівання смоли до температури  $T = 353 \pm 2$  К і витримка при даній температурі впродовж часу  $\tau = 20 \pm 0,1$  хв; суміщення олігомеру і наповнювача впродовж часу  $\tau = 1 \pm 0,1$  хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж

часу  $\tau = 60 \pm 5$  хв; введення твердника і суміщення компонентів 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 матриці зразки витримували впродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі за температури  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань адгезійної міцності на зсув та відрив, залишкових напружень, руйнівних напружень, модуля пружності при згинанні, ударної в'язкості.

Адгезійну міцність матриці до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибоків») 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 матриці визначали консольним методом [9]. 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. Відхилення значень при дослідженнях показників адгезійних властивостей і залишкових напружень у КМ становило 4...6 % від номінального.

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 фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

**Результати досліджень та їх обговорення.** На першому етапі досліджували адгезійну міцність при відриві КМ від сталюї основи Ст3 ( $\sigma_a$ ). Адгезійна міцність при відриві має важливе значення серед практичних характеристик КМ. За допомогою даної властивості можливо проаналізувати характер дії міжмолекулярних сил міжфазової взаємодії. При попередніх дослідженнях встановлено величину адгезійної міцності при відриві модифікованої ультразвуком епоксидної матриці, яка становить  $\sigma_a = 24,4$  МПа. Введення добавки за вмісту  $q = 0,02$  мас.ч. призводить до зменшення показників адгезійної міцності КМ, позаяк її показники становлять  $\sigma_a = 19,3$  МПа. Подальше збільшення вмісту наповнювача ( $q = 0,06$  мас.ч.) приводить до незначного підвищення адгезійної міцності при відриві КМ до  $\sigma_a = 19,5$  МПа. Збільшення вмісту часток до  $q = 0,08$  мас.ч. забезпечує формування КМ із максимальними показниками адгезійної міцності ( $\sigma_a = 37,2$  МПа) серед усього спектру досліджуваних матеріалів. Надалі збільшення вмісту добавки до  $q = 0,10 \dots 0,50$  мас.ч. зумовлює зниження показників адгезійної міцності до  $\sigma_a = 12,7 \dots 13,8$  МПа. Відмітимо, що позитивний вплив наповнювача ПО адгезійні властивості КМ спостерігали лише за вмісту часток у кількості  $q = 0,08$  мас.ч. Передбачали покращення абсорбційної взаємодії за такого вмісту часток, що зумовлено рівномірним розподілом добавки у об'ємі зв'язувача і на поверхні субстрату. В цілому результати дозволяють стверджувати про послаблення сил міжфазової взаємодії у системі «епоксидний олігомер – наповнювач» за введення дисперсних часток. Однак, за вмісту наповнювача у кількості  $q = 0,08$  мас.ч. спостерігали активацію процесів взаємодії бокових груп і сегментів епоксидного олігомеру з металевою основою та центрами на поверхні

дисперсної добавки, що є причиною підвищення показників адгезійної міцності КМ порівняно з епоксидною матрицею.

Надалі досліджували адгезійну міцність при зсуві КМ ( $\tau$ ). Доведено, що остання складає  $\tau = 8,5$  МПа для вихідної матриці. Введення наповнювача в мінімальній кількості  $q = 0,02$  мас.ч. забезпечує формування матеріалу з низькими значеннями дотичних напружень  $\tau = 1,4$  МПа. Навпаки, подальше збільшення кількості часток ПО (у діапазоні  $q = 0,06 \dots 0,08$  мас.ч.) приводить до утворення максимуму ( $\tau = 6,1$  МПа) на кривій залежності адгезійної міцності при зсуві від вмісту наповнювача. Надалі за вмісту часток у кількості  $q = 0,10 \dots 0,50$  мас.ч. відбувається зменшення показників адгезійної міцності при зсуві до  $\tau = 3,9 \dots 4,2$  МПа.

Додатково у роботі досліджували залишкові напруження, які виникають при зшиванні захисних покриттів. Доведено (рис. 4), що введення часток наповнювача за незначного вмісту ( $q = 0,02$  мас.ч.) забезпечує формування КМ з дещо меншими показниками напружень ( $\sigma_3 = 1,0$  МПа) відносно епоксидної матриці ( $\sigma_3 = 1,4$  МПа). Введення часток у діапазоні  $q = 0,06 \dots 0,08$  мас.ч. сприяє збільшенню значень залишкових напружень до  $\sigma_3 = 1,1 \dots 1,2$  МПа, а за вмісту часток у кількості  $q = 0,10 \dots 0,50$  мас.ч. спостерігали зменшення напружень до  $\sigma_3 = 0,8 \dots 1,0$  МПа. Тобто, досягнули позитивного ефекту, оскільки аналіз праць [8, 9] показує, що високі значення залишкових напружень сприяють розтріскуванню або відшаровуванню адгезивів від металевої основи.

Відмітимо наявність симбатної кореляції максимальних показників адгезійної міцності при відриві, зсуві і залишкових напружень у діапазоні вмісту часток  $q = 0,06 \dots 0,08$  мас.ч., що є підтвердженням достовірності проведених дослідів. Доведено, що оптимальним вмістом часток у КМ є  $q = 0,08$  мас.ч., при якому всі три вказані вище параметри набувають максимальних значень.

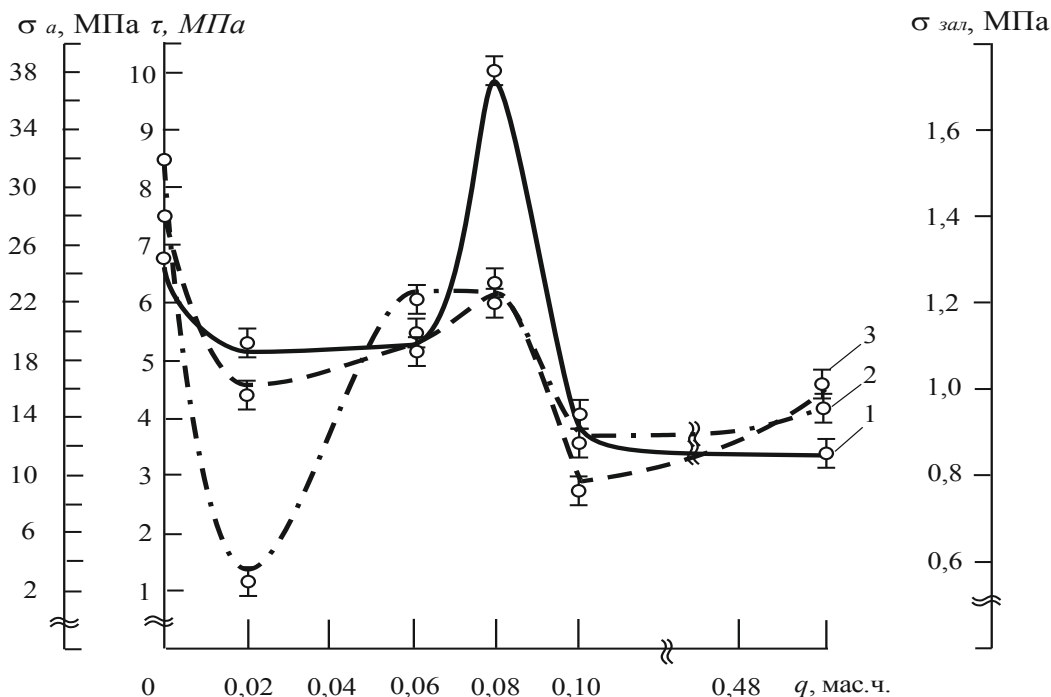


Рисунок 4 – Залежність адгезійної міцності на відрив (1), на зсув (2) і залишкових напружень (3) у КМ від вмісту наповнювача ПО

Наступним етапом було дослідження комплексу фізико-механічних властивостей КМ. Попередньо встановили фізико-механічні властивості обробленої ультразвуком епоксидної матриці: модуль пружності при згинанні  $E = 2,8$  ГПа, руйнівні напруження при згинанні  $\sigma_{z2} = 48,0$  МПа, ударна в'язкість  $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup>. Встановлено (рис. 5), що введення ПО за незначного вмісту ( $q = 0,02$  мас.ч.) призводить порівняно з матрицею до зниження модуля пружності КМ ( $E = 2,1$  ГПа). Мінімум на кривій залежності «E – q»

спостерігали за вмісту часток у кількості  $q = 0,06$  мас.ч. Для такого матеріалу модуль пружності становить  $E = 1,5$  ГПа. Подальше збільшення кількості ПО до  $q = 0,08$  мас.ч. забезпечує часткове збільшення показників досліджуваної характеристики до  $E = 2,1$  ГПа, а за вмісту часток у кількості  $q = 0,10 \dots 0,50$  мас.ч. також формуються КМ із незначними пружними показниками. Для них модуль пружності при згинанні становить  $E = 1,1$  ГПа.

Додатково визначали величину руйнівних напружень при згинанні розроблених КМ. Встановлено (рис. 5), що введення у епоксидний зв'язувач наповнювача ПО за вмісту  $q = 0,02 \dots 0,06$  мас.ч. призводить до зниження значень руйнівних напружень від  $\sigma_{32} = 48,0$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_{32} = 13,0 \dots 25,4$  МПа. Введення часток ПО за вмісту  $q = 0,08$  мас.ч. забезпечує формування КМ із максимальними показниками руйнівних напружень ( $\sigma_{32} = 44,5$  МПа) серед усього спектру досліджуваних КМ. Подальше збільшення кількості наповнювача (у діапазоні  $q = 0,10 \dots 0,50$  мас.ч.) також призводить до зменшення показників руйнівних напружень КМ до  $\sigma_{32} = 31,4 \dots 32,8$  МПа. Відмітимо наявність симбатної кореляції на усьому діапазоні концентрацій добавки ПО на кривих « $\sigma_{32} - q$ » і « $E - q$ ». Слід зазначити, що показники досліджуваних когезійних характеристик розроблених композитів є нижчими порівняно з епоксидною матрицею.

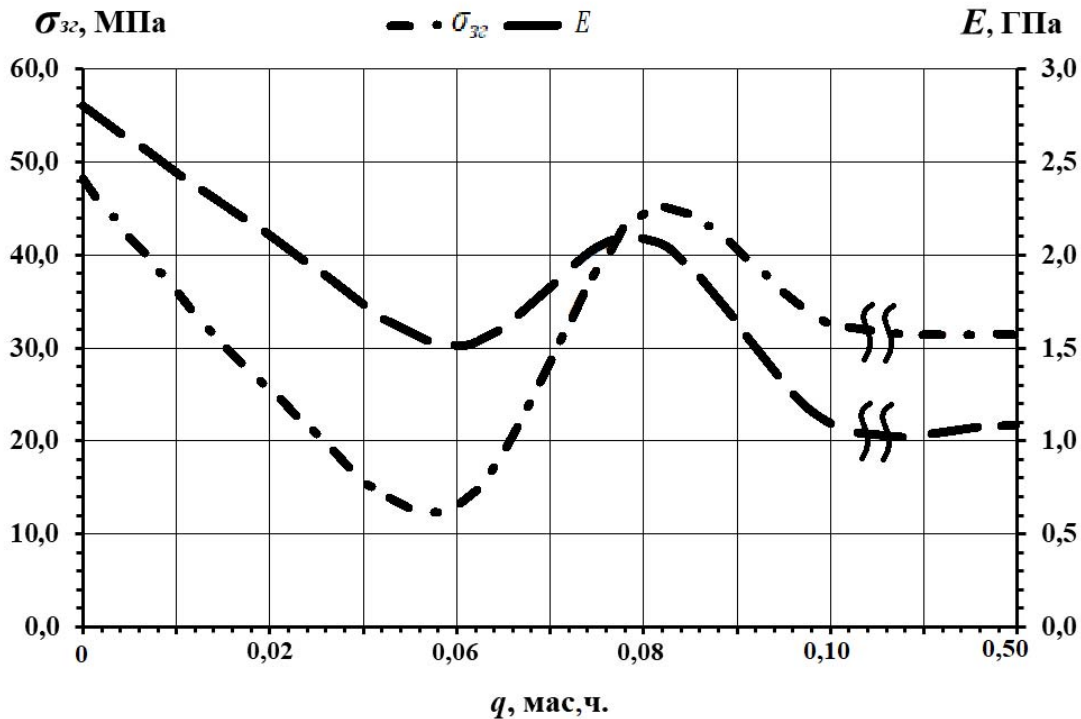


Рисунок 5 – Залежність модуля пружності та руйнівних напружень при згинанні КМ від вмісту наповнювача ПО

Цікаві результати були отримані при дослідженні ударної в'язкості КМ. За незначного вмісту ПО ( $q = 0,02$  мас.ч.) отримали матеріал із максимальним значенням (серед усього спектру досліджуваних матеріалів), ударна в'язкість якого становить  $W = 11,8$  кДж/м<sup>2</sup>. Відмітимо, що ударна в'язкість даного КМ перевищує аналогічні показники для модифікованої УЗО матриці ( $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup>) у 1,6 разів. Додавання часток у кількості  $q = 0,06$  мас.ч. також поліпшує в'язкість КМ при ударі, хоча не так суттєво. Для даного КМ ударна в'язкість становить  $W = 10,3$  кДж/м<sup>2</sup>. Надалі збільшення вмісту ПО ( $q = 0,08 \dots 0,50$  мас.ч.) призводить до монотонного зменшення показників ударної в'язкості КМ до  $W = 6,1$  кДж/м<sup>2</sup>. У цілому відмітимо позитивний вплив полістиролу «Оазис» на в'язкість КМ при ударі. Критичним вмістом обрано кількість наповнювача –  $q = 0,02 \dots 0,08$  мас.ч. Формування таких матеріалів забезпечує суттєве підвищення показників ударної в'язкості порівняно з епоксидною матрицею. Крім того, слід зазначити,

що максимальні значення досліджуваних механічних властивостей отримано для КМ із вмістом часток у кількості  $q = 0,08$  мас.ч., що є підтвердженням достовірності проведених експериментів.

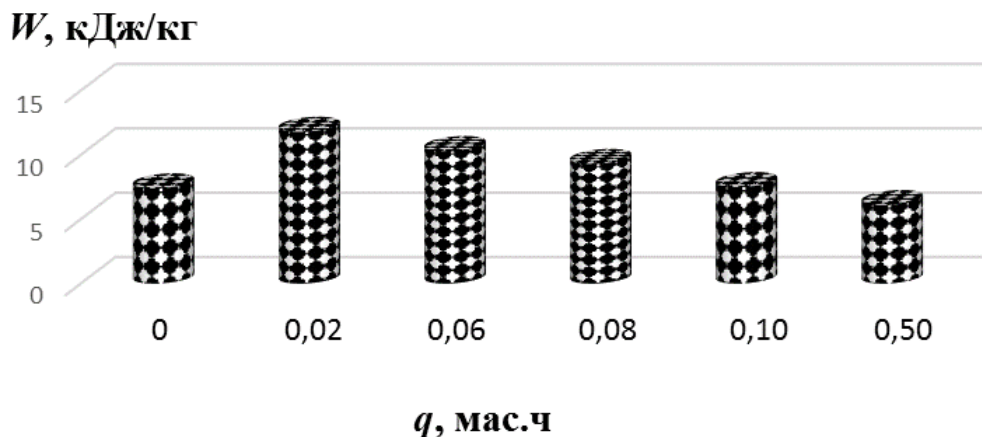
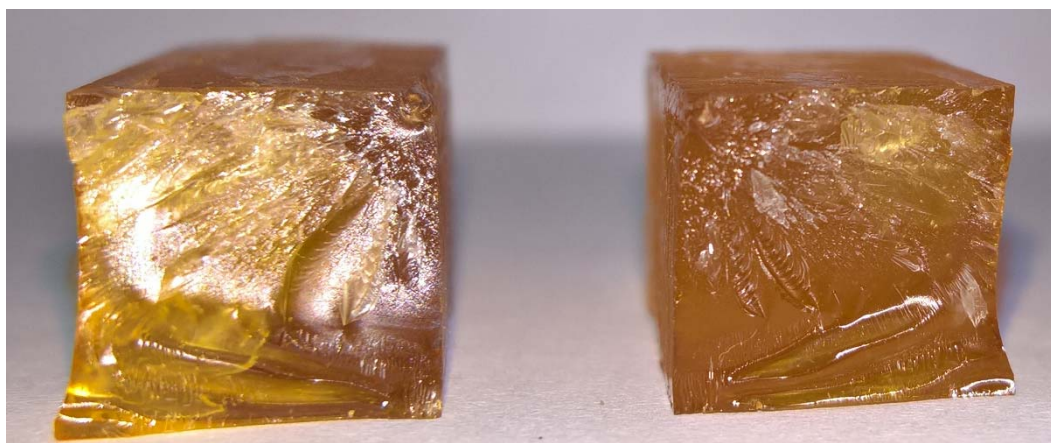


Рисунок 6 – Залежність ударної в'язкості КМ від вмісту наповнювача ПО

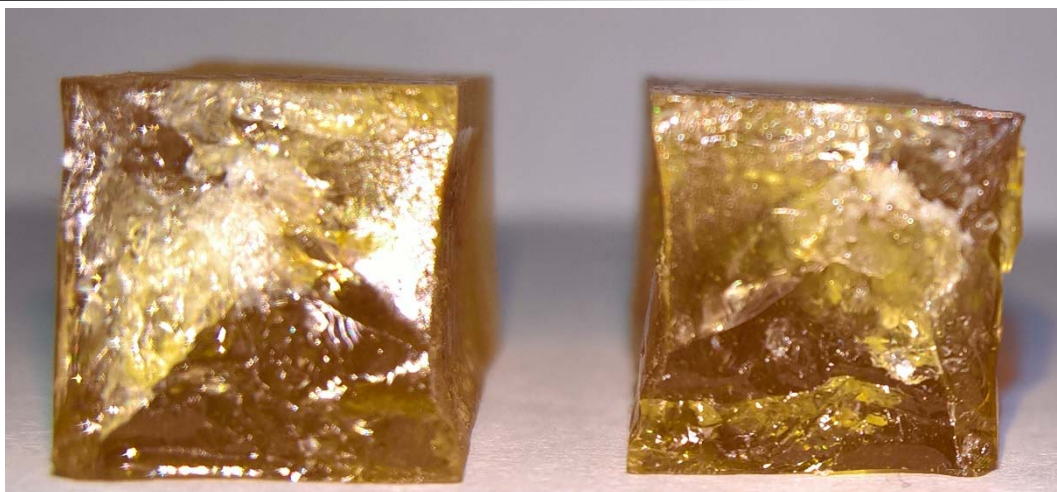
На завершальному етапі аналізували мікросвітлини поверхні зламу КМ (рис.7, а-е). Показано, що поверхня зламу модифікованої УЗО матриці містить переважно ділянки з тріщинами і поперемінно шорсткою поверхнею.



а) епоксидна матриця (контрольний зразок)



б)  $q = 0,02$  мас.ч.



в)  $q = 0,06$  мас.ч.



г)  $q = 0,08$  мас.ч.



д)  $q = 0,10$  мас.ч.



е)  $q = 0,50$  мас.ч.

Рисунок 7 – Мікросвітлини поверхні зламу КМ за різного вмісту наповнювача ПО

При введенні ПО за вмісту  $q = 0,02$  мас.ч. отримали поверхню сколювання гладкого вигляду. Зазвичай подібні поверхні мають зразки із високим запасом когезійної міцності. Поверхня зламу КМ із вмістом часток у кількості  $q = 0,06$  мас.ч. характеризується гетерогенними ділянками, що відрізняються гладкими і водночас шорсткими областями. Це є свідченням крихкого механізму руйнування і зменшення показників когезійних характеристик. Аналіз поверхні сколювання КМ із наповнювачем у кількості  $q = 0,08$  мас.ч. дозволяє констатувати про аналогічні результати із попереднім зразком. При цьому слід зазначити, що відсоток гладкої поверхні стає дедалі меншим. Введення часток ПО у діапазоні  $q = 0,10 \dots 0,50$  мас.ч. забезпечує формування КМ із значним відсотком шорсткої поверхні сколювання, що характерно для механізму крихкого руйнування. Відмітимо наявність збігу зміни вигляду поверхні сколювання із результатами дослідження ударної в'язкості КМ, що додатково підтверджує достовірність проведених досліджень. Крім того, на наведених світлинах макроруйнування чітко простежується тенденція зміни вигляду поверхні залежно від вмісту наповнювача, яка є ідентичною до типових характеристик руйнувань.

**Висновки.** У роботі встановлено вплив дисперсних часток полістиролу «Оазис» у вигляді наповнювача для епоксидного олігомеру ЕД-20 на адгезійні та фізико-механічні властивості композитів. У результаті експерименту можна констатувати наступне.

1. Встановлено, що для отримання матеріалу з підвищеними показниками адгезійних властивостей у епоксидний зв'язувач слід вводити наповнювач у вигляді часток полістиролу «Оазис» за вмісту  $q = 0,08$  мас.ч. Формування такого композиту забезпечує підвищення порівняно з модифікованою ультразвуком епоксидною матрицею адгезійної міцності при відриві від  $\sigma_a = 24,4$  МПа до  $\sigma_a = 37,2$  МПа, адгезійна міцність при зсуві при цьому зменшується від  $\tau = 8,5$  МПа до  $\tau = 6,1$  МПа, а залишкові напруження – від  $\sigma_z = 1,4$  МПа до  $\sigma_z = 1,2$  МПа. Покращення абсорбційної взаємодії за такого вмісту часток зумовлено рівномірним розподілом добавки у об'ємі зв'язувача і на поверхні субстрату. Вважали, що за вмісту наповнювача у кількості  $q = 0,08$  мас.ч. відбувається активація процесів взаємодії бокових груп і сегментів епоксидного олігомеру з металевою основою та центрами на поверхні дисперсної добавки. Це є причиною підвищення показників адгезійної міцності композитів порівняно з епоксидною матрицею.

2. Доведено, що для формування композитів із максимальними показниками фізико-механічних властивостей доцільно використовувати у вигляді наповнювача частки полістиролу «Оазис» за вмісту  $q = 0,06 \dots 0,08$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Такі матеріали характеризуються наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні  $\sigma_{z2} = 32,0 \dots 44,5$  МПа, модуль пружності при згинанні  $E = 1,5 \dots 2,1$  ГПа. Крім

того, зазначимо, що для формування матеріалів, які працюють в умовах ударних навантажень, у епоксидний зв'язувач необхідно вводити як наповнювач полістирол «Оазис» за вмісту  $q = 0,02$  мас. ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Це забезпечує збільшення показників ударної в'язкості від  $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup> (для епоксидної матриці) до  $W = 11,8$  кДж/м<sup>2</sup>.

3. Додатково проведено дослідження макроструктури зламу композитів. Найбільший відсоток площі гладкої поверхні, характерної для матеріалів із високим запасом когезійної міцності, спостерігали за вмісту наповнювача полістиролу «Оазис» у кількості  $q = 0,02 \dots 0,08$  мас. ч., що забезпечує оптимальні показники фізико-механічних характеристик сформованих матеріалів.

4. Спостерігали позитивний ефект у вигляді покращення адгезійних властивостей матеріалів при введенні наповнювача за оптимального вмісту та одночасне погіршення показників фізико-механічних характеристик композитів. Вважали, що надалі є доцільним проводити ультразвукову обробку композицій перед введенням твердника. Це, на наш погляд, дозволить ефективніше змішувати композиції, що приведе до поліпшення когезійних властивостей розроблених епоксикомпозитів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Demchenko V. L., Yurzhenko M. V. Peculiarities of constant magnetic field effect on the nanostructural organization and properties of hard-to-weld polyethylene polypropylene joints. *2017 IEEE Nanomaterials: Applications and Properties*, 2017, P. 03NNSA10-1–03NNSA10-3. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/8190258>

2. Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас / М.В. Юрженко та ін.; за ред. Б.Є. Патона. Київ : Наукова думка, 2018. 368 с.

3. Mamunya Ye., Iurzhenko M., Lebedev E., Levchenko V., Chervakov O., Matkovska O., Sverdlikovska O. *Electroactive polymer materials: monograph*. Kyev : Alpha-Reklama, 2013. 402 p.

4. Юрженко М. В., Кораб М. Г. *Зварювання високотехнологічних пластмас*. Суми : Університетська книга, 2016. 319 с.

5. Букетов А. В., Акимов А. В., Зинченко Д. А. Исследование физико-механических свойств композитных материалов на основе эпоксидиановой смолы, отвержденной полиэтиленполиамином, с добавлением пластификатора-антипирена трихлорэтилфосфата. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2015. № 5. С. 126–134.

6. Букетов А. В., Сапронов О. О. Дослідження залежності властивостей епоксидних композитів від вмісту дисперсних наповнювачів з метою формування захисних покриттів для підйомно-транспортних механізмів. *Підйомно-транспортна техніка*. 2013. №3 (39). С. 92–107.

7. Старокадомский Д. Л. Влияние дисперсности и концентрации аэросила в составе полиэпоксидных композиций на их набухание в кислых средах. *Український хімічний журнал*. 2010. №7–8. С. 89–96.

8. Сапронов О. О., Нігалатій В. Д., Клевцов К. М., Смирнов І. В., Долгов М. А. Вплив вмісту і природи дрібнодисперсного наповнювача на механічні властивості і структуру полімерних захисних покриттів. *Вісник Херсонської державної морської академії*. 2013. №2(9). С. 228–237.

9. Корякина М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. Москва : Химия, 1988. 272 с.

### REFERENCES

1. Demchenko, V.L. & Yurzhenko, M.V. (2017). Peculiarities of constant magnetic field effect on the nanostructural organization and properties of hard-to-weld polyethylene

polypropylene joints. 2017 *IEEE Nanomaterials: Applications and Properties*, 03NNSA10-1 - 03NNSA10-3. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/document/8190258>.

2. Yurzhenko M. V. et al. (2018). *Slovník-dovídník zivariuvannia ta skleiuuvannia plastmas*. Paton B. Ye. (Ed.). Kyev : Naukova dumka.

3. Mamunya Ye et al. (2013). *Electroactive polymer materials: monograph*. Kyev : Alpha-Reklama.

4. Yurzhenko, M. V., & Korab M. G. (2016). *Zvარიuvannia vysokotekhnologichnykh plastmas*. Sumy : Universytetska knyha.

5. Buketov A. V., Akymov A. V., & Zynchenko D. A. (2015). Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv kompozitnykh materialov na osnove epoksidianovoy smolyi, otverzhdennoy polietilenpoliaminom, s dobavleniem plastifikatora-antipirena trihloretilfosfata. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, 5, 126–134.

6. Buketov A. V. & Saprónov O. O. (2013). Doslidzhennia zalezhnosti vlastyvostei epoksydnykh kompozytiv vid vmistu dyspersnykh napovniuvachiv z metoiu formuvannia zakhysnykh pokryttiv dlia pidiomno-transportnykh mekhanizmiv. *Pidiomno-transportna tekhnika*, 3(39), 92–107.

7. Starokadomskiy D. L. (2010). Vliyanie dispersnosti i kontsentratsii aerosila v sostave poliepoksidnykh kompozitsiy na ih nabuhanie v kislykh sredah. *Ukr. him. zhurn*, 7–8, 89–96.

8. Saprónov O. O., Nihalatii V. D., Klevtsov K. M., Smyrnov I. V. & Dolhov M. A. (2013). Vplyv vmistu i pryrody dribnodispersnoho napovniuvacha na mekhanichni vlastyvosti i strukturu polimernykh zakhysnykh pokryttiv. *Visnyk KhDMA*, 2(9), 228–237.

9. Koryakina M. I. (1988). *Ispitanye lakokrasochnnykh materialov i pokrihtiy*. Moskva : Khimiya.

#### Кулинич В. Г. АДГЕЗИОННЫЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИСТИРОЛОМ «ОАЗИС» ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

В работе рассмотрены перспективы использования полистирола «Оазис» для формирования композитных материалов с улучшенными адгезионными и когезионными свойствами на основе эпоксидного дианового олигомера ЭД-20, который характеризуется улучшенной когезионной прочностью и незначительной усадкой. Предусмотрено использование отвердителя ПЕПА для последующего создания комплексных соединений с эпоксидным олигомером. Исследовано влияние полистирола «Оазис» на адгезионные и когезионные свойства эпоксидной матрицы. В результате анализа данных, полученных после проведения эксперимента, установлено оптимальное содержание наполнителя, обеспечивающее максимальные показатели адгезионной прочности при отрыве и сдвиге, остаточных напряжений, модуля упругости, разрушающих напряжений при изгибе и ударной вязкости. Формирование материала с оптимальными показателями адгезионной прочности обеспечивает введение наполнителя содержанием  $q = 0,08$  масс.ч. в эпоксидный олигомер ЭД-20. При таком содержании получили следующие показатели: адгезионная прочность при отрыве  $\sigma_a = 37,2$  МПа, адгезионная прочность при сдвиге –  $\tau = 6,1$  МПа, остаточные напряжения –  $\sigma_{ост} = 1,2$  МПа. Для формирования композитных материалов с оптимальными физико-механическими свойствами целесообразно использование добавки с содержанием  $q = 0,06 \dots 0,08$  масс.ч., что обеспечивает формирование материалов со следующими показателями: разрушительные напряжения при изгибе  $\sigma_{изг} = 32,0 \dots 44,5$  МПа, модуль упругости при изгибе  $E = 1,5 \dots 2,1$  ГПа. Оптимальным содержанием полистирола для формирования материала с максимальным сопротивлением ударным нагрузкам является  $q = 0,02 \dots 0,08$  масс.ч., при котором ударная вязкость составляет  $W = 9,3 \dots 11,8$  кДж/м<sup>2</sup>. Непосредственным подтверждением результатов проведенных исследований является анализ макроструктуры поверхности скалывания сформированных композитных материалов. Выявлено совпадение тенденции развития поверхности, характерной для материалов с высокими показателями когезионной прочности с изменением показателей ударной вязкости в зависимости от содержания полистирола «Оазис». После проведения общей оценки полученных данных установлено оптимальное содержание наполнителя при формировании композитов с улучшенными когезионными и адгезионными свойствами.

**Ключевые слова:** композит, адгезия, разрушающие напряжения при изгибе, ударная вязкость, модуль упругости, наполнитель.

**Kulinich V. G.** ADHESIVE AND PHYSICAL MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS, FILLED BY POLYSTYRENE «OASIS» FOR TRANSPORT EQUIPMENT  
*The prospects of polystyrene «Oasis» usage for the formation of composite materials with improved adhesion and cohesion properties based on epoxy diene oligomer ED-20, which is characterized by improved cohesive strength and low shrinkage. The usage of PEPA hardener is provided for further creation of complex compounds with epoxy oligomer. The influence of "Oasis" polystyrene on the adhesion and cohesion properties of the epoxy matrix was studied. As a result of the data's analysis, obtained after the experiment, the optimal content of filler was established, which provides maximum adhesion strength at shear and shifting, residual stresses, modulus of elasticity, destructive bending stresses and impact strength. Obtaining a material with optimal adhesion strength provides the adding of a filler with a content of  $q = 0,08$  mass.% in epoxy oligomer ED-20. The following parameters were obtained for this content: adhesion strength at separation  $\sigma_a = 37,2$  MPa, adhesive strength at shear –  $\tau = 6,1$  MPa, residual stresses -  $\sigma_{res} = 1,2$  MPa. For the formation of composite materials with maximum physical and mechanical properties, it is advisable to use an additive with a content of  $q = 0,06...0,08$  mass.% including the formation of materials with the following indicators: destructive bending stresses  $\sigma_{dest} = 32,0... 44,5$  MPa, modulus of elasticity in bending  $E = 1,5...2,1$  GPa The optimal content of polystyrene for the formation of material with maximum impact resistance the load is  $q = 0,02...0,08$  ,mass.% including, at which the impact strength is  $W = 9.3...11.8$  kJ/m<sup>2</sup> Indirect confirmation of the research's results is the analysis of the of the shear surfaces' macrostructure of the formed composite materials. The tendency of shear surface development characteristic for materials with high indicators of cohesive strength with the change of impact strength depending on the content of polystyrene "Oasis" is revealed. After a general evaluation of the obtained data, the optimal content of filler in the formation of composites with improved cohesion and adhesion properties was established.*

**Keywords:** composite, adhesion, fracture bending stress, toughness, modulus, filler.

© Кулініч В. Г.

Статтю прийнято  
до редакції 26.08.20