

## ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ ІЗ ПОЛІПШЕНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

**Букетов А. В.**, д.т.н., професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки Херсонської державної морської академії, E-mail: [buketov@tstu.edu.ua](mailto:buketov@tstu.edu.ua);

**Зінченко Д. О.**, аспірант кафедри суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки Херсонської державної морської академії, E-mail: [denim102@bk.ru](mailto:denim102@bk.ru);

**Клевцов К. М.**, д.т.н., професор, професор кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації Херсонського національного технічного університету, E-mail: [buketov@tstu.edu.ua](mailto:buketov@tstu.edu.ua);

**Бень А. П.**, к.т.н., доцент, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, E-mail: [a\\_ben@i.ua](mailto:a_ben@i.ua);

**Наговський Д. А.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії, E-mail: [buketov@tstu.edu.ua](mailto:buketov@tstu.edu.ua)

*Досліджено вплив вмісту дисперсних наповнювачів  $MoS_2$  та  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$  на руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_z$ ), модуль пружності ( $E$ ) та ударну в'язкість ( $W$ ) епоксикомпозитів. Встановлено, що дисперсність і природа наповнювачів визначає їх критичний вміст у зв'язувачі.*

*Доведено, що для формування композитів з поліпшеними фізико-механічними властивостями необхідно у епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.) вводити наповнювач дисульфід молібдену або тальку за вмісту  $q = 5 \dots 15$  мас.ч. У такому випадку формуються матеріали з поліпшеними властивостями. Додатково встановлено, що отримані показники ударної в'язкості композитів при введенні у зв'язувач дисульфиду молібдену збільшуються порівняно з епоксидною матрицею у 2 рази. При цьому максимальною здатністю протидіяти ударним навантаженням і його тріщиностійкості відзначається композитний матеріал за вмісту наповнювача  $q = 5$  мас.ч.*

*Слід зазначити, що при розробці захисних покриттів ефективність, надійність і тривалий час експлуатації досягають створенням багатошарових композитів. Тому доцільно використовувати композит у комплексі наповнений частками дисульфиду молібдену чи мікротальку за оптимального вмісту і наночасток.*

*Підтвердженням результатів дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів є аналіз фрактограм зламу композитів. Показано, що у матеріалах з недостатньою чи надмірною кількістю дисперсних часток спостерігали концентратори напружень. Це, у свою чергу призводить до швидкого старіння і передчасного руйнування композитів.*

**Ключові слова:** епоксикомпозит, наповнювач, руйнівні напруження, модуль пружності, фрактограми зламу.

**Постановка проблеми.** Матеріали на основі епоксидних олігомерів широко застосовують у промисловості завдяки комплексу необхідних властивостей. Висока хімічна стійкість до впливу агресивних середовищ, підвищена зносостійкість зумовлює широке застосування епоксидних композитів у вигляді покриттів для захисту металевих деталей від спрацювання при терті [1]. Експлуатація технологічного устаткування при знакозмінних навантаженнях і підвищених температурах зумовлює підвищені вимоги до експлуатаційних характеристик епоксикомпозитів. При розробленні систем з необхідними характеристиками необхідно раціонально поєднувати властивості матриці, інгредієнтів системи та технологічні режими формування епоксикомпозитних матеріалів. Виходячи з цього, створення нових матеріалів із підвищеною зносостійкістю на основі епоксидного зв'язувача потребує глибокого вивчення механізму їх формування в умовах впливу різних факторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вивченню властивостей епоксидних композитів (КМ) присвячено публікації, у яких в основному висвітлюють питання хімії і

технології формування матеріалів, а також наведено основні характеристики нових композитів [2–4].

На сьогодні постійно збільшується кількість робіт, які присвячені дослідженню фізико-механічних властивостей КМ, зокрема композитів, що містять мікро- та макродисперсні наповнювачі [5–7]. Можна констатувати, що, вводючи у полі- чи олігомер активний до міжфазової взаємодії дисперсний наповнювач, можна отримати композит з наперед заданими і прогнозованими властивостями у комплексі. При цьому вплив наповнювача розповсюджується на увесь об'єм полімеру і суттєво змінює його властивості, особливо у зовнішніх поверхневих шарах навколо дисперсних часток [3, 4]. Окрім того, введення дешевих і активних наповнювачів, таких як дисульфід молібдену та мікротальк, у КМ зменшує можливість поширення тріщин на початковому етапі руйнування матеріалів, що, як наслідок, поліпшує їх надійність у процесі експлуатації [7–10].

**Мета роботи.** На основі залежності властивостей матеріалів від вмісту наповнювачів встановити критичний вміст мікродисперсних часток (дисульфиду молібдену і мікротальку) у зв'язувачі для формування покриттів з покращеними фізико-механічними характеристиками.

**Матеріали та методика дослідження.** Як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах [8]. Зшивали КМ, вводючи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як наповнювачі було використано частки дисульфиду молібдену (ДМ) і мікротальку (МТ) з дисперсністю 7...10 мкм.

ДМ є сухою мастильною речовиною зі стабільними властивостями при експлуатації у середовищі за діапазоном температур  $T = 25...350$  °С. МТ застосовують як наповнювач у гумовій, паперовій, лакофарбовій галузях промисловості.

Епоксидний композит, наповнений частками дисперсних наповнювачів, формували за такою технологією: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20, підігрівання смоли до температури  $T = 353 \pm 2$  К і її витримка при даній температурі впродовж часу  $\tau = 20 \pm 0,1$  хв; дозування дисперсного наповнювача та подальше введення його у епоксидний зв'язувач; гідродинамічне суміщення олігомеру ЕД-20 і дисперсного наповнювача впродовж часу  $\tau = 1 \pm 0,1$  хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу  $\tau_3 = 1,5 \pm 0,1$  хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу  $\tau = 60 \pm 5$  хв; введення твердника ПЕПА і перемішування композиції впродовж часу  $\tau = 5 \pm 0,1$  хв. Надалі затверджували КМ за експериментально встановленим 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 КМ 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.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: руйнівні напруження при згинанні, модуль пружності, ударна в'язкість.

Руйнівні напруження і модуль пружності КМ 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 методом Шарпі відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 за температури  $T = 298 \pm 2$  К і при відносній вологості  $d = 50 \pm 5$  %. Використовували зразки з розміром  $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$  мм.

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

Дослідження структури матеріалів проводили на металографічному мікроскопі моделі XJL-17AT, який обладнаний камерою Levenhuk C310 NG (3,2 Mega Pixels). Діапазон збільшення зображення змінювали в межах від  $\times 100$  до  $\times 1600$  разів. Безпосередньо у роботі зразки досліджували при збільшенні у  $\times 400$  разів. Для обробки цифрових зображень використовували програмне забезпечення «Levenhuk TourView».

**Результати досліджень та їх обговорення.** Для визначення критичного вмісту наповнювачів у епоксидній матриці для формування КМ з поліпшеними властивостями на початковому етапі досліджували руйнівні напруження ( $\sigma_{32}$ ) та модуль пружності при згинанні ( $E$ ). Експериментально встановлено (рис. 1), що руйнівні напруження матриці при наведених вище режимах зшивання становлять  $\sigma_{32} = 48,0$  МПа.

Введення у епоксидний олігомер часток дисперсного наповнювача ДМ за вмісту  $q = 5 \dots 80$  мас.ч. (тут і далі за текстом вміст дисперсних часток наведено у мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру) приводить до монотонного зменшення показників руйнівних напружень КМ до  $\sigma_{32} = 29,5 \dots 39,5$  МПа (рис. 1, крива 1). Такі результати можна пояснити поступовим перенасиченням адсорбенту у композиції, а, отже, зменшенням енергії адсорбції та молекулярної рухливості структурних елементів ланцюгів епоксидного олігомеру, підвищенням в'язкості системи. Авторами [3–5] показано, що введення активних часток за значного вмісту у зв'язувач призводить до зменшення ступеня змочування дисперсного наповнювача олігомером та формування КМ з дефектами.

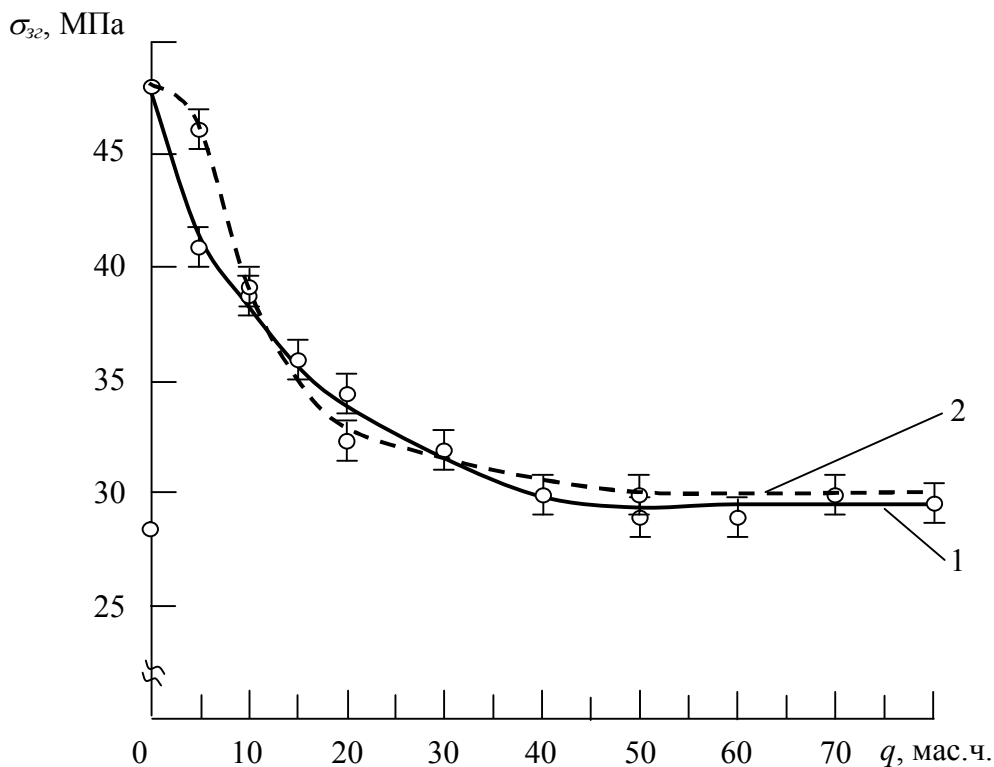


Рисунок 1 – Залежність руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{32}$ ) КМ від вмісту мікродисперсних наповнювачів: 1 – ДМ; 2 – МТ

Стосовно наповнювача МТ встановлена схожа тенденція (рис. 1, крива 2). При введенні дисперсного наповнювача за вмісту  $q = 5 \dots 80$  мас.ч. спостерігали монотонне зменшення показників руйнівних напружень КМ до  $\sigma_{32} = 29,9 \dots 46,1$  МПа. Максимальні значення на кривій залежності руйнівних напружень від кількості МТ спостерігали для КМ, що містить  $q = 5$  мас.ч. дисперсного наповнювача ( $\sigma_{32} = 46,1$  МПа). Як зазначено вище, зменшення показників руйнівних напружень при збільшенні вмісту часток у КМ пов'язано зі зменшенням ступеня змочування наповнювачів. Це також передбачає зменшення ван-дер-ваальсових сил в усьому об'ємі композиції і призводить до передчасного руйнування фізичних зв'язків під час впливу статичних навантажень.

Паралельно досліджували залежність модуля пружності при згинанні від вмісту наповнювачів у КМ (рис. 2). Експериментально встановлено, що модуль пружності при згинанні модифікованої УЗО матриці становить  $E = 2,9$  ГПа. При введенні ДМ (рис. 2, крива 1) за вмісту  $q = 5 \dots 80$  мас.ч. спостерігали монотонне збільшення показників модуля пружності КМ до  $E = 3,0 \dots 4,0$  ГПа. Отримані результати дослідження добре узгоджуються із результатами випробувань руйнівних напружень при згинанні КМ (рис. 1, крива 1). Показано, що введення наповнювача за вмісту  $q = 80$  мас.ч. сприяє максимальному підвищенню модуля пружності до  $E = 4,0$  ГПа у той час, як показники руйнівних напружень є мінімальними. Це свідчить про формування жорстких систем, які відзначаються підвищеними показниками залишкових напружень і незначними пружними та пластичними деформаціями.

Стосовно наповнювача МТ (рис. 2, крива 2) можна констатувати про аналогічну тенденцію. За вмісту часток у кількості  $q = 5 \dots 80$  мас.ч. спостерігали значне підвищення модуля пружності КМ з  $E = 2,9$  ГПа (для епоксидної матриці) до  $E = 3,5 \dots 6,6$  ГПа. Це також добре узгоджується із результатами дослідження руйнівних напружень при згинанні КМ з даним наповнювачем (рис. 1, крива 2).

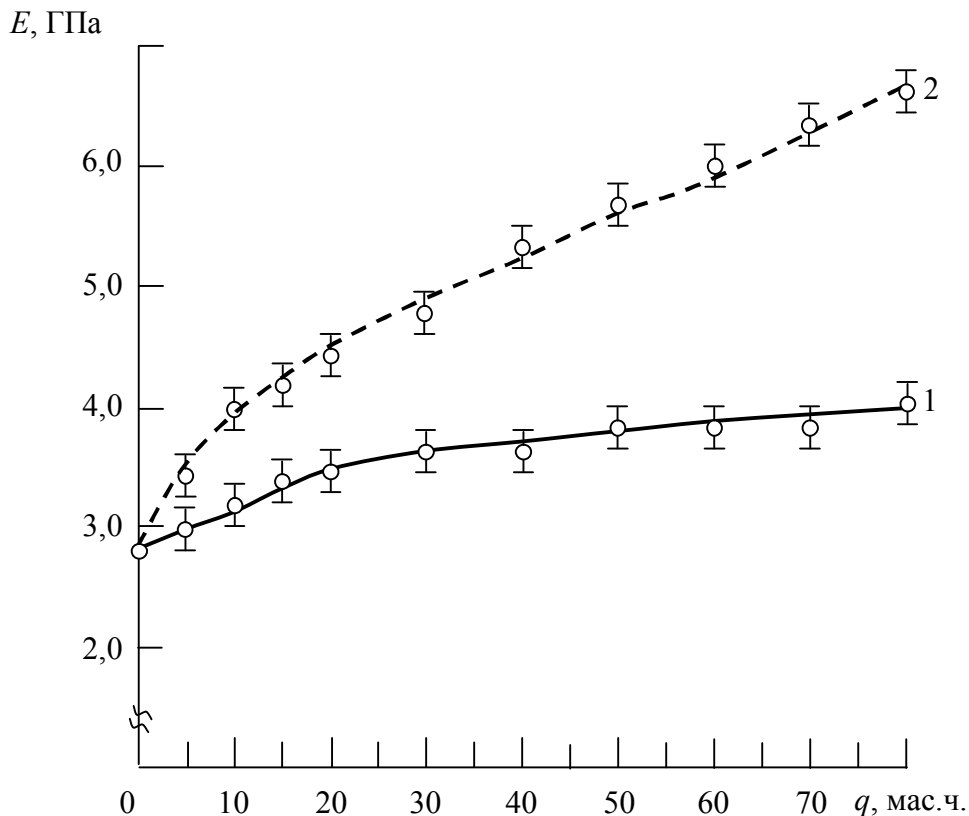


Рисунок 2 – Залежність модуля пружності при згинанні ( $E$ ) КМ від вмісту мікродисперсних наповнювачів: 1 – ДМ; 2 – МТ

Із метою підтвердження наведених вище результатів на наступному етапі досліджували ударну в'язкість епоксикомпозитів, наповнених ДМ та МТ (рис. 3). Експериментально встановлено, що при введенні ДМ (рис. 3, крива 1) за вмісту  $q = 5 \dots 15$  мас.ч. ударна в'язкість зростає відносно вихідної матриці ( $W = 7,3$  кДж/м<sup>2</sup>) і становить  $W = 13,1 \dots 14,3$  кДж/м<sup>2</sup>. Максимум на кривій залежності ударної в'язкості від вмісту ДМ ( $W = 14,3$  кДж/м<sup>2</sup>) виявлено при введенні часток за вмісту  $q = 5$  мас.ч., що додатково узгоджується із результатами досліджень руйнівних напружень при згинанні та свідчить про інтенсифікацію процесів зшивання за даного наповнення КМ. Надалі введення наповнювача за вмісту  $q = 20 \dots 80$  мас.ч. сприяє суттєвому зниженню показників ударної в'язкості КМ до  $W = 7,1 \dots 8,4$  кДж/м<sup>2</sup>. Збільшення вмісту наповнювача до  $q = 80$  мас.ч. призводить до перенасичення композиту дисперсною добавкою. Очевидно,

що у процесі полімеризації погіршується міжфазова взаємодія системи «полімер – наповнювач», внаслідок недостатнього змочування останнього. У свою чергу це зумовлює інтенсивну міжшарову рухливість у матеріалах під час удару і, як наслідок, зменшуються показники ударної в'язкості матеріалів.

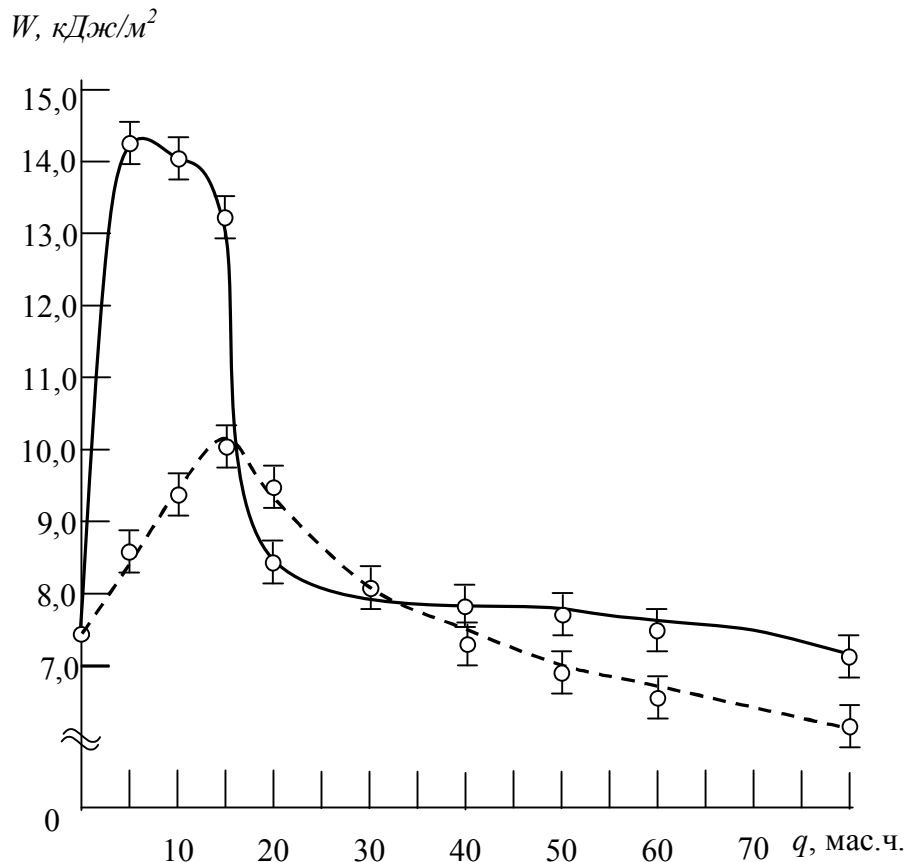


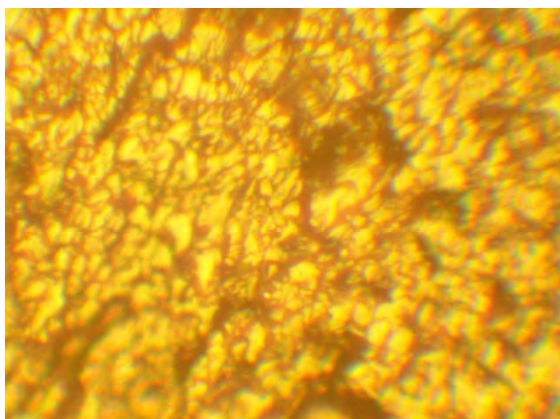
Рисунок 3 – Залежність ударної в'язкості ( $W$ ) КМ від вмісту мікродисперсних наповнювачів: 1 – ДМ; 2 – МТ

Стосовно наповнювача МТ відмічено наступну тенденцію. При введенні МТ (рис. 3, крива 2) за вмісту  $q = 5 \dots 15$  мас.ч. ударна в'язкість КМ зростає відносно вихідної матриці ( $W = 7,3$  кДж/м<sup>2</sup>) і становить  $W = 8,7 \dots 10,1$  кДж/м<sup>2</sup>. Максимум на кривій залежності ударної в'язкості від вмісту МТ ( $W = 10,1$  Дж/м<sup>2</sup>) виявлено при введенні часток за вмісту  $q = 15$  мас.ч. Надалі введення наповнювача за вмісту  $q = 20 \dots 80$  мас.ч. сприяє суттєвому зниженню показників ударної в'язкості КМ до  $W = 6,0 \dots 8,4$  кДж/м<sup>2</sup>.

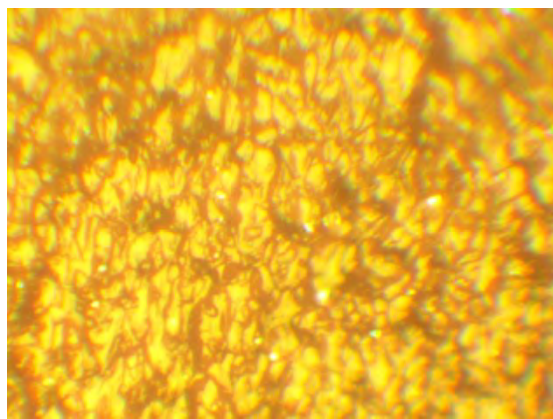
У цілому наведені вище дані добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень властивостей КМ при згинанні. Тобто, динаміка ударної в'язкості КМ від вмісту ДМ і МТ корелює з аналогічною залежністю руйнівних напружень і модуля пружності при згинанні зразків.

Додатково, для підтвердження зазначених вище результатів дослідження проаналізовано фрактограми зламу епоксикомпозитів, наповнених ДМ та МТ (рис. 4).

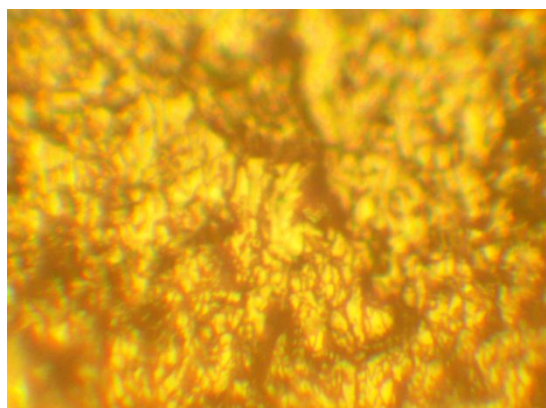
Встановлено (рис. 4), що структура поверхні зламу КМ за різним вмістом наповнювачів має подібний характер. Помітна тенденція, що зі зростанням вмісту ДМ та МТ поверхня зламу зразків відзначається більшою кількістю пор. При цьому лінії сколювання поглиблюються та розширюються, поверхня зламу набуває пластичного характеру. Це свідчить про формування напруженого стану у системах з кінетичної та термодинамічної точки зору.



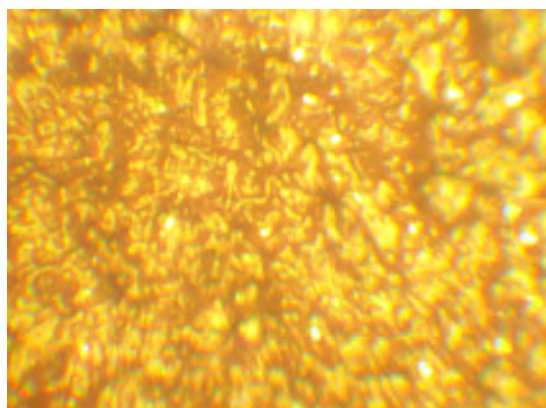
а) 5 мас.ч.



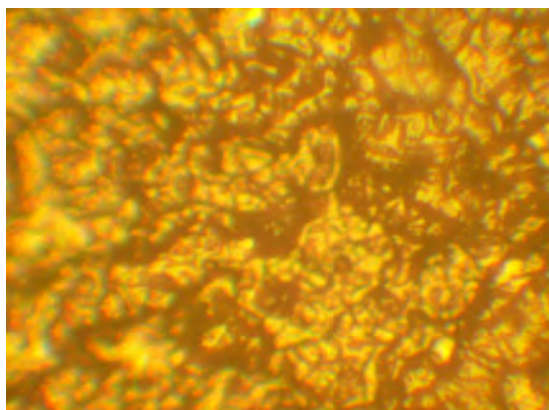
к) 5мас.ч.



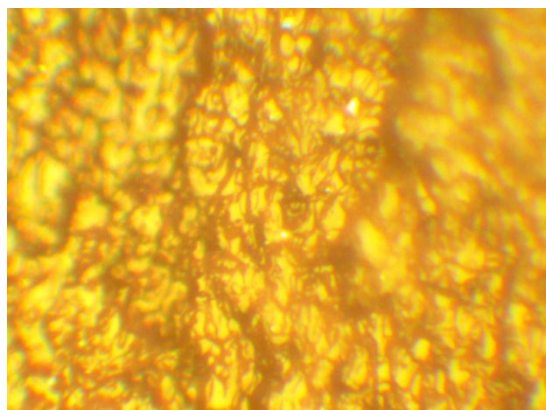
б)10 мас.ч.



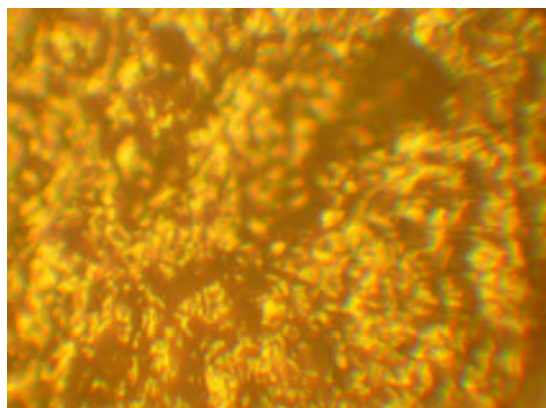
л) 10 мас.ч.



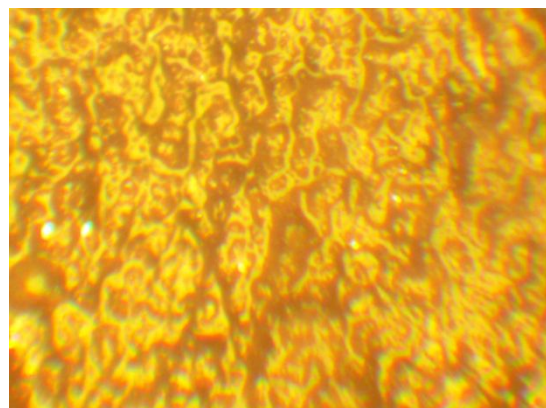
в) 15 мас.ч.



м) 15 мас.ч.

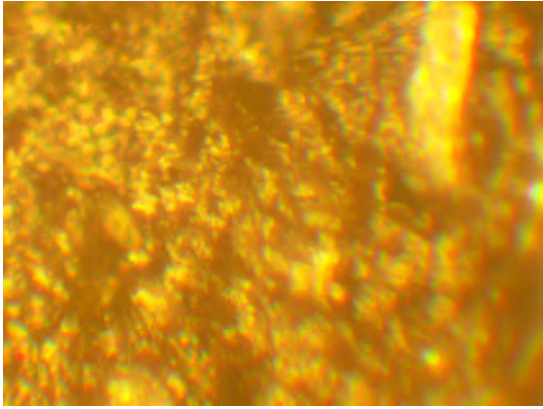


г) 20 мас.ч.

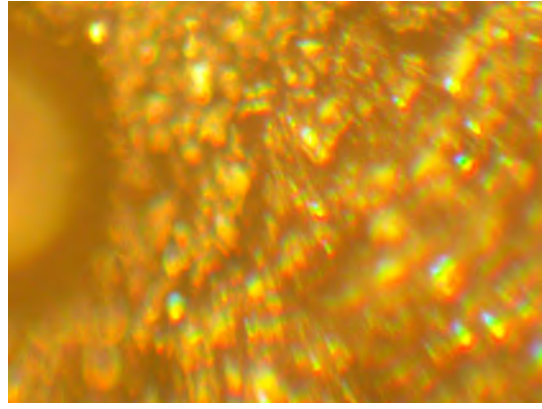


н) 20 мас.ч.

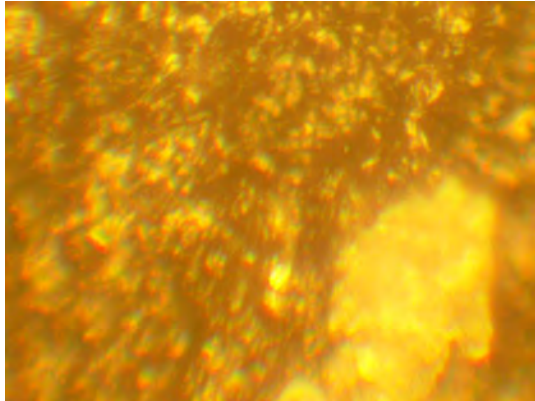




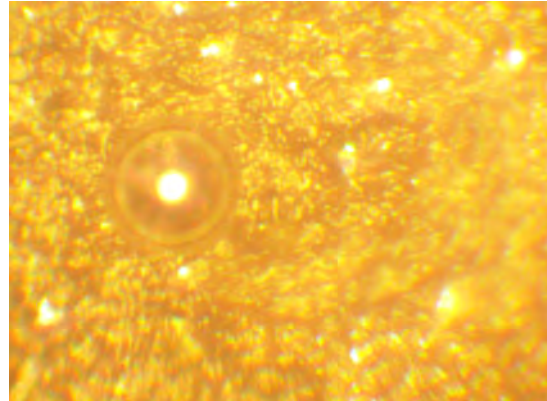
д) 30 мас.ч.



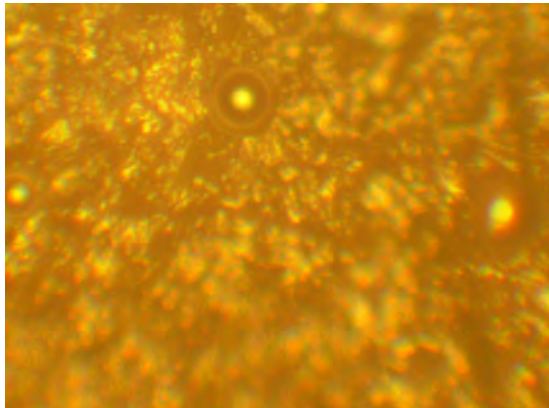
о) 30 мас.ч.



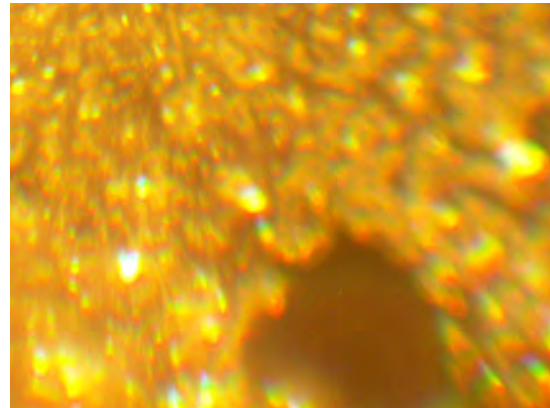
е) 40 мас.ч.



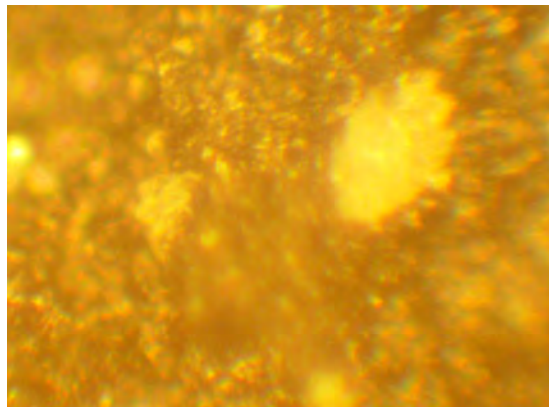
п) 40 мас.ч.



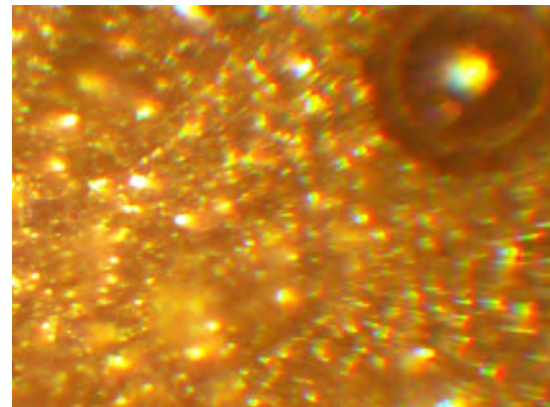
е) 50 мас.ч.



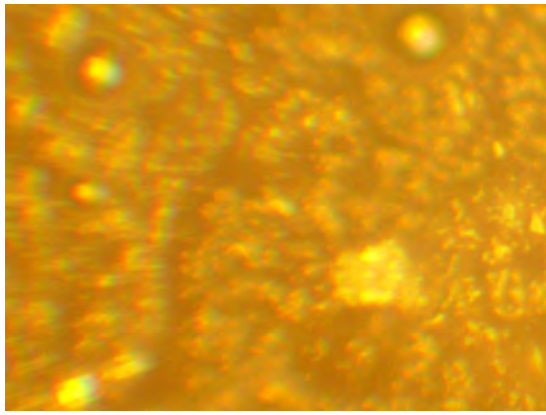
р) 50 мас.ч.



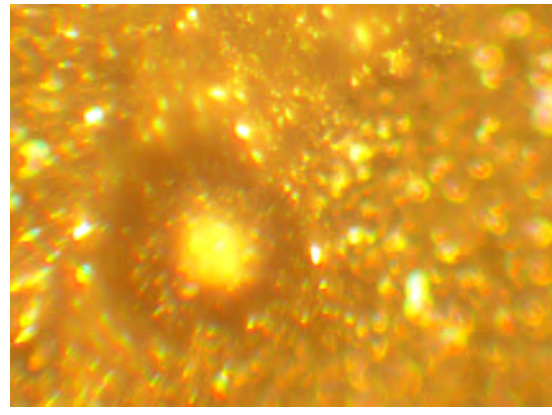
ж) 60 мас.ч.



с) 60 мас.ч.



з) 80 мас.ч.



т) 80 мас.ч.

Рисунок 4 – Фрактограми зламу ( $\times 400$ ) епоксикомпозитів наповнених МТ та ДМ:

а-з) мікротальк; к-т) дисульфід молібдену

Аналіз структурних особливостей композитів, наповнених ДМ та МТ у кількості  $q = 5 \dots 15$  мас.ч. (рис. 4, а-в і к-м відповідно), показав, що у об'ємі КМ частки рівномірно розподілені. Тобто, утворення скупчень часток наповнювачів не спостерігали. Для таких матеріалів відмічено наявність ліній сколювання рівномірного характеру, які направлені у різні боки. При цьому утворюється сітка тріщин із рівномірним їх розподілом у об'ємі матриці та на поверхні сколювання. Лінії сколювання не утворюють глибоких кратерів, вони формуються плавними і без особливо розгалужених та явно виражених траєкторій. Форма зламу відносно рівна, без слідів макроскопічних деформацій. Це додатково підтверджує результати попередніх досліджень і припущення про те, що КМ із вмістом наповнювачів ДМ та МТ у кількості  $q = 5 \dots 15$  мас.ч. відзначаються максимальними значеннями руйнівних напружень при згинанні та показниками ударної в'язкості.

Для епоксикомпозитів, наповнених ДМ і МТ у кількості  $q = 20 \dots 80$  мас.ч., характерний крихкий злам. Можна стверджувати, що такі матеріали є пластичними. Підтвердженням цьому є присутність на поверхні зламу жолобків і кратерів, що є додатковими концентраторами напружень у композитах (рис. 4, г-з і н-т відповідно). При цьому поверхні руйнування залишаються пологими та добре відбивають світлові промені. Мікроструктура даних епоксикомпозитів характеризується наявністю скупчень дисперсних часток мікротальку та дисульфиду молібдену, які нерівномірно розподілені у системах. Такі скупчення можуть бути ініціаторами швидкого руйнування розроблених композитів під впливом статичних та динамічних навантажень.

Отже, можна зробити висновок, що результати, отримані методом оптичної мікроскопії, добре узгоджуються з даними випробувань фізико-механічних властивостей матеріалів. При цьому аналіз фрактограм зламу дозволив констатувати про достовірність попередньо отриманих результатів дослідження фізико-механічних властивостей розроблених композитів.

Згідно результатів дослідження фізико-механічних властивостей наповнених ДМ та МТ епоксидних КМ встановлено, що максимальними значеннями руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{3z} = 46,1$  МПа) відзначаються КМ за вмісту МТ у кількості  $q = 5$  мас. ч., найбільшими показниками модуля пружності при згинанні ( $E = 6,6$  ГПа) – КМ вмісту МТ у кількості  $q = 80$  мас. ч., а максимальними значеннями ударної в'язкості ( $W = 13,1 \dots 14,3$  кДж/м<sup>2</sup>) – композити за вмісту ДМ у кількості  $q = 5 \dots 15$  мас. ч.

Зважаючи на проведені експериментальні дослідження було визначено оптимальний вміст наповнювачів для формування функціонального шару захисних покриттів, який становить  $q = 5 \dots 15$  мас.ч. часток ДМ або  $q = 5 \dots 15$  мас.ч. часток МТ на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20.



**Висновки.** На основі проведених досліджень можна констатувати наступне. Доведено, що для формування композитів із поліпшеними фізико-механічними властивостями необхідно у епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.) вводити наповнювач у вигляді часток дисульфиду молібдену за вмісту  $q = 5 \dots 15$  мас.ч. або часток мікротальку за вмісту  $q = 5 \dots 15$  мас.ч. У такому випадку формуються матеріали з наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні  $\sigma_{3z} = 35,7 \dots 39,5$  МПа (для КМ з дисульфідом молібдену) та  $\sigma_{3z} = 35,1 \dots 46,1$  МПа (для КМ з мікротальком), модуль пружності при згинанні –  $E = 3,0 \dots 3,3$  ГПа (для КМ з дисульфідом молібдену) та  $E = 3,5 \dots 4,2$  ГПа (для КМ з мікротальком).

Додатково встановлено, що отримані показники ударної в'язкості композитів при введенні у зв'язувач часток дисульфиду молібдену збільшуються порівняно з епоксидною матрицею у 2 рази. При цьому максимальною здатністю протидіяти ударним навантаженням і його тріщиностійкості відзначається композитний матеріал за вмісту наповнювача у кількості  $q = 5$  мас.ч. Ударна в'язкість такого композиту становить  $W = 14,3$  кДж/м<sup>2</sup>. Доведено, що показники ударної в'язкості композитів при введенні у зв'язувач часток мікротальку збільшуються несуттєво порівняно з показниками ударної в'язкості матриці. При цьому максимальною здатністю протидіяти ударним навантаженням і його тріщиностійкості відзначається композитний матеріал за вмісту наповнювача мікротальку у кількості  $q = 15$  мас.ч. Ударна в'язкість такого композиту становить –  $W = 10,0$  кДж/м<sup>2</sup>.

Результати, отримані методом оптичної мікроскопії, добре узгоджуються з випробуваннями фізико-механічних властивостей матеріалів. При цьому аналіз фрактограм зламу дозволив констатувати про доцільність застосування композитів за вмісту наповнювачів у кількості  $q = 5 \dots 15$  мас.ч. Такі матеріали є ефективними для практичного застосування у вигляді захисних покриттів, які експлуатують в умовах впливу знакозмінних навантажень, у тому числі й у вузлах тертя.

У майбутньому планується дослідити вплив наповнювачів на теплофізичні характеристики композитів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учеб. пособие для вузов по специальности «Технология перераб. пласт. масс и эластомеров» / [Кербер М. Л. и др.; под общ. ред. Берлина А. А. ] – СПб. : Профессия, 2008. – 557 с.
2. Корякина М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М. И. Корякина. – М. : Химия, 1988. – 272 с.
3. Стухляк П. Д. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості / П. Д. Стухляк, А. В. Букетов, О. І. Редько. – Тернопіль : Крок, 2011. – 165 с.
4. Стухляк П. Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням : монографія / П. Д. Стухляк, А. В. Букетов. – Тернопіль : Збруч, 2009. – 237 с.
5. Букетов А. В. Епоксидні нанокompозити: монографія / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, В. Л. Алексенко. – Херсон : ХДМА, 2015. – 184 с.
6. Белый В. А. Проблема создания композиционных материалов и управление их фрикционными свойствами // Трение и износ. – 1982. – Т. 3. – № 3. – С. 389–395.
7. Липатов Ю. С. Межфазные явления в полимерах / Ю. С. Липатов. – К. : Наукова думка, 1980. – 260 с.
8. Стухляк П. Д. Эпоксидные композиты для защитных покрытий. – Тернополь : Збруч, 1994. – 177 с.
9. Буря А. И. Новые полимерные композиты в узлах трения железнодорожного транспорта / Буря А. И., Дудин В. Ю., Чукаловский П. А. // Вісник Східноукраїнського

національного університету ім. В. Даля. Техн. науки. Серія : Транспорт. – 2004. – № 8. – С. 184–189.

10. Кудина Е. Ф. Получение эпоксиминеральных дисперсных композитов / Е. Ф. Кудина // Материалы 26-й межд. конф. «Композиционные материалы в промышленности» (Ялта, Крым, 2006). – Ялта : Славполиком, 2006. – С. 315–318.

## REFERENCES

1. Kerber M. L. et al. (2008). *Polimerniye kompozicionniye materialih: struktura, svoystva, tekhnologiya: ucheb. posobie dlya vuzov po specialnosti «Tekhnologiya pererab. plast. mass i ehlastomerov»*. Berlina A. A. (Ed.) SPb. : Professiya.
2. Koryakina, M. I. (1988). *Ispitaniye lakokrasochnnikh materialov i pokrihtiyj*. M.: Khimiya.
3. Stukhlyak P. D., Buketov A. V. & Redjko O.I. (2011). *Epoksidno-dianovi kompoziti: tekhnologiya formuvannya, fiziko-mekhanichni i teplofizichni vlastivosti*. Ternopilj : Krok.
4. Stukhlyak P. D., Buketov A. V. (2009). *Epoksikompozitni materialy, modifikovani ultrajioletovim oprominenniyam: monografiya*. Ternopilj: Zbruch.
5. Buketov A. V., Sapronov O. O., Aleksenko V. L. (2015). *Epoksidni nanokompoziti: monografiya*. Kherson : KhDMA.
6. Belihyj V. A. (1982). Problema sozdaniya kompozicionnikh materialov i upravlenie ikh frikcionnihmi svoystvami. *Trenie i iznos. Vol. 3, 3, 389–395*.
7. Lipatov Yu. S. (1980). *Mezhfazniye yavleniya v polimerakh*. K.: Naukova dumka.
8. Stukhlyak P. D. (1994). *Ehpoksidniye kompozitih dlya zathitnikh pokrihtiyj*. Ternopolj: Zbruch.
9. Burya A. I., Dudin V. Yu., Chukalovskiy P. A. (2004). Noviye polimerniye kompozitih v uzlakh treniya zhelezodorozhnogo transtporta *Visnik Shhidnoukrainsjkogo nacionaljnogo universitetu im. V. Dalya. Tekhn. nauki. Seriya : Transport, 8, 184–189*.
10. Kudina E. F. (2006). Poluchenie ehpkosimineralnijnikh dispersnikh kompozitov *Materialih 26-yj mezhd. konf. «Kompozicionniye materialih v promishlennosti» (Slavpolikom). Yalta, Krihm, 315–318*.

**Букетов А. В., Зинченко Д. А., Клевцов К. Н., Бень А. П., Наговский Д. А. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**  
*Исследовано влияние содержания дисперсных наполнителей  $MoS_2$  и  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$  на разрушающие напряжения при изгибе ( $\sigma_{изг}$ ), модуль упругости ( $E$ ) и ударную вязкость ( $W$ ) эпоксикомпозитов. Установлено, что дисперсность и природа наполнителей определяет их критическое содержание в связующем.*

*Доказано, что для формирования композитов с улучшенными физико-механическими свойствами необходимо в эпоксидный олигомер ЭД-20 (100 мас.ч.) вводить наполнитель дисульфид молибдена или тальк при содержании  $q = 5...15$  масс.ч. В таком случае формируются материалы с улучшенными свойствами. Дополнительно установлено, что полученные показатели ударной вязкости композитов, при введении в связующее дисульфида молибдена, увеличиваются по сравнению с эпоксидной матрицей в 2 раза. При этом максимальной способностью противодействовать ударным нагрузкам и трещиностойкостью отличается композитный материал при содержании наполнителя  $q = 5$  масс.ч.*

*Следует отметить, что при разработке защитных покрытий эффективность, надежность и длительное время эксплуатации достигают созданием многослойных композитов. Поэтому целесообразно использовать композит, наполненный в комплексе частицами дисульфида молибдена или микроталька при оптимальном содержании и нанодобавками.*

*Подтверждением результатов исследования физико-механических свойств материалов является анализ фрактограмм излома композитов. Показано, что в материалах с недостаточным или избыточным количеством дисперсных частиц наблюдали концентраторы напряжений. Это в свою очередь, приводит к быстрому старению и преждевременному разрушению композитов.*

**Ключевые слова:** эпоксикомпозиты, наполнитель, разрушающее напряжение, модуль упругости, фрактограммы излома.

**Buketov A. V., Zinchenko D. O., Klevtsov K. M., Ben A. P., Nahovskyy D. A. IMPROVEMENT OF TRANSPORT SYSTEMS EXPLOITATION RELIABILITY THROUGH THE USE OF EPOXY COMPOSITES WITH IMPROVED PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES**

*The influence of content of  $MoS_2$  and  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$  disperse fillers on destructive stresses in bending ( $\sigma_b$ ), the modulus of elasticity ( $E$ ) and toughness ( $W$ ) of epoxycomposites were investigated. It was established that the dispersion and the nature of fillers determine their critical content in binder.*

*It is proved that molybdenum disulfide or talc filler with a content of  $q = 5 \dots 15$  wt % must be entered in epoxy oligomer ED-20 (100 wt %) for producing composites with improved physico-mechanical properties. In this case the materials with improved properties are formed. Additionally found that when inputting molybdenum disulfide in binder, the obtained toughness indexes of the composites are increasing 2-fold compared with the epoxy matrix. Also the composite material with the filler content of  $q = 5$  wt % is marked by maximum ability to counteract shock loads and cracking resistance.*

*It should be noted that the effectiveness, reliability and long operating time are achieved by creating the multilayered composites during the development of protective coatings. So it is therefore advisable to use the composite in a complex filled with molybdenum disulfide or microtalc particles with optimal content and nanoparticles.*

*The fracture-graphical analysis of composites is the confirmation of study results of physico-mechanical properties. It is shown that stress concentrators were observed in materials with insufficient or excessive amount of disperse particles. This in turn leads to rapid aging and premature destruction of composites.*

**Keywords:** epoxycomposite, filler, destructive stresses, modulus of elasticity, fracture-graphical analysis.

© Букетов А. В., Зинченко Д. О., Клевцов К. М., Бень А. П., Наговський Д. А.

Статтю прийнято  
до редакції 30.05.16