



УДК 667.64:678.026

ДОСЛІДЖЕННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Брайло М.В.

Херсонська державна морська академія

Проаналізовано динаміку ударної в'язкості композитних матеріалів при введенні різних за природою та дисперсністю часток наповнювачів. Обґрунтовано, що у композитах, при наповненні частками з розмірами 63...80 мкм за критичного вмісту, показники ударної в'язкості є достатньо великими ($a = 3,2...5,6$ кДж/м²). Проте, встановлено, що серед усіх досліджуваних у роботі матеріалів максимальними показниками ударної в'язкості відзначаються композити, які містять наповнювачі з дисперсністю 5...10 мкм ($a = 4,0...7,6$ кДж/м²). Доведено, що при формуванні епоксидних матеріалів з поліішеними властивостями щодо експлуатації в умовах динамічних та ударних навантажень необхідно у зв'язувач вводити 40...50 мас.ч. часток перліту з дисперсністю 5...10 мкм на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Ударна в'язкість такого композиту становить – $a = 7,6$ кДж/м². Отримані результати механічних випробувань підтверджено дослідженнями методом оптичної мікроскопії.

Ключові слова: епоксидний композит, ударна в'язкість, наповнювач.

Постановка проблеми. Відомо, що сучасна промисловість широко використовує полімерні композитні матеріали у різних галузях [1]. Проте, питання підвищення експлуатаційних характеристик і економічності матеріалів завжди є актуальним. Одним із методів поліпшення властивостей та зменшення собівартості композитних матеріалів (КМ) є додавання до їх складу часток наповнювачів різної природи та дисперсності, які легкодоступні та економічно вигідні для виробника [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попередньо нами було розроблено матрицю для КМ шляхом поєднання твердників ПЕПА (5 мас.ч.) і Telalit 410 (5 мас.ч.) в епоксидному олігомері СНS-Ероху 525 [3, 4]. Доведено поліпшення властивостей розробленої матриці порівняно з показниками властивостей адгезиву на основі олігомеру ЕД-20 та твердника ПЕПА. Крім того, проаналізовано вплив наповнювачів різної природи та дисперсності на фізико-механічні, адгезійні та теплофізичні властивості матеріалів. Проте, при використанні матеріалів в умовах тертя додатково виникають ударні навантаження [5]. Тому цікавим і водночас актуальним є створення КМ, які будуть мати підвищену тріщиностійкість при динамічних та ударних навантаженнях.

Мета роботи – дослідити вплив дисперсних наповнювачів різної природи на ударну в'язкість епоксикомпозитних матеріалів.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача вибрано низькомолекулярний епоксидний олігомер марки СНS-Ероху 525, який немає модифікаторів і є аналогом епоксидного діанового олігомера ЕД-20. Слід зазначити, що молекули епоксидних олігомерів містять гліцидилові та епоксидні групи, які здатні, взаємодіючи з твердником, формувати зшиту структуру матеріалу у вигляді сітки [1, 2]. Для зшивання епоксидних композицій використано у поєднанні вітчизняний твердник ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78) та модифікований аміноаддуктовий твердник на основі аліфатичного поліаміну марки Telalit 410 у визначених пропорціях, мас.ч. [4]: ЕД-20: ПЕПА : Telalit 410 – 100 : 5 : 5.

При дослідженні використовували наповнювачі різної дисперсності (5...10 мкм та 63...80 мкм). Як дисперсні наповнювачі (5...10 мкм) використовували наступні хімічні порошки.

1. Перліт – матеріал, отриманий в результаті термічної обробки водовмісної алюмосилікатної перлітової породи вулканічного походження. Хімічний склад, згідно ГОСТ 25226-96, є наступним: оксид кремнію (SiO₂) – 65...77 %, оксид алюмінію (Al₂O₃) – 11...16 %, оксид заліза (FeO + Fe₂O₃) – 0,5...6,0 %, оксид кальцію (CaO) – 0,1...3,5 %, оксид калію і натрію (K₂O + Na₂O) – 3...10 %.



2. Охра (жовта) – природна мінеральна композиція наступного складу: гігроскопічна вода – 7...8 %, глина – 20...50 %, крейда – 2...3 %, пісок – до 45 %, окис заліза – 5...40 %.

3. Деревне вугілля (ГОСТ 7657-84) – макропористий високовуглецевий продукт, який отримують піролізом деревини без доступу повітря. Даний аморфний високомолекулярний продукт містить аліфатичні й ароматичні структури. Хімічний склад деревного вугілля є наступним: С – 80...92 %, Н – 4,0...4,8 %, О – 5...15 %. Вугілля додатково містить 1...3 % мінеральних домішок, головним чином, карбонатів та оксидів: К, Na, Ca, Mg, Si, Al, Fe.

Як дисперсні наповнювачі (63...80 мкм) використовували наступні хімічні порошки.

1. Перліт (хімічний склад наповнювача описано вище).

2. Графіт антифрикційний марки АГ-1500 (ТУ 48-20-4-87) – виготовлений з непрокаленого нафтового коксу, кам'яновугільного пеку з добавкою природного графіту. Використовують для виготовлення деталей і вузлів, які працюють в умовах сухого, напівсухого і рідинного тертя.

3. Сірий шлам (СШ) – тверда або пастоподібна суміш відходів (шлам) процесу Байєра – технології видалення та очищення оксиду алюмінію (сировини для видобутку алюмінію) з бокситів. Складається з суміші оксидів (мас. ч.): заліза – 32...35, алюмінію – 6...9, кремнію – 13...14, кальцію – 14...16, титану – 5...6, ванадію – 1,0...2,0, олова – 1,0...1,3 та інші оксиди – до 100 мас.ч.

Додатково досліджували властивості КМ, наповненого гранулами поліаміду 6 (ПА-6 первинний) (ОСТ 6-06-С9-93), який є полімером на основі синтетичних високомолекулярних сполук, що містять в основному ланцюгу амідні групи -CONH-. Розміри гранул: діаметр $d = 3,2 \pm 0,1$ мм, довжина $l = 3,5 \pm 0,1$ мм.

Вміст наповнювачів змінювали у межах: $q = 0...100$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру СНS-Ероху 525.

Ударну в'язкість визначали за допомогою маятнікового 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.

Структуру зламу КМ досліджували на металографічному мікроскопі моделі ХЛ-17АТ, який обладнаний камерою Levenhuk C310 NG (3,2 Mega Pixels). Діапазон збільшення зображення від $\times 100$ до $\times 1600$ разів. У роботі зразки досліджували при збільшенні у $\times 100$, $\times 200$ та $\times 400$ разів. Для обробки цифрових зображень використовували програмне забезпечення «Levenhuk TourView».

Затверджували матеріали 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 $T = 433 \pm 2$ К, витримання зразків за даної температури впродовж часу $t = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу $t = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Результати досліджень та їх обговорення. Як було зазначено вище, згідно результатів попередніх досліджень встановлено оптимальну концентрацію твердників ПЕПА (5 мас.ч.) і Telalit 410 (5 мас.ч.) у епоксидному олігомері СНS-Ероху 525 (100 мас.ч.) для формування КМ з поліпшеними когезійними властивостями [3, 4]. Також досліджено вплив наповнювачів різної природи і дисперсності на фізико-механічні властивості та теплостійкість (за Мартенсом) КМ. Проте відомо [1, 5], що важливою характеристикою матеріалів в умовах експлуатації при знакозмінних навантаженнях є показники їх ударної в'язкості. Тому нами було



досліджено ударну в'язкість КМ за різного вмісту наповнювачів з дисперсністю 5...10 мкм (рис. 1).

Відповідно до отриманих результатів можна констатувати, що показники ударної в'язкості матеріалів (рис. 1) при додаванні дрібнодисперсних наповнювачів різної природи зростають (рис. 1). Причому значення ударної в'язкості матеріалів з частками наповнювачів перліту (рис. 1, крива 1) та охри (рис. 1, крива 2) зростають за незначного вмісту добавок ($q = 10$ мас.ч. наповнювача на 100 мас.ч. олігомеру) (тут і далі за текстом вміст твердника і наповнювача наведено у мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру). Для КМ, наповненого частками перліту (за наведеного вище вмісту добавки), показники збільшуються від $a = 1,8$ кДж/м² (для епоксидної матриці) до $a = 7,6$ кДж/м², а для КМ, наповненого частками охри, – до $a = 4,5$ кДж/м². Далі збільшення вмісту часток, призводить до погіршення показників ударної в'язкості. Виходячи з цього можна констатувати, що за вмістом перліту у КМ $q = 10$ мас.ч. матеріал характеризується найвищими показниками ударної в'язкості. Отриманий результат можна пояснити тим, що при даному вмісті частки дрібнодисперсного наповнювача максимально рівномірно розташовуються у об'ємі КМ. При цьому навколо часток наповнювача утворюються зовнішні поверхневі шари максимального об'єму [6]. Це зумовлено не лише рівномірним розташуванням наповнювача в об'ємі композиції, але й формуванням кінетичної та термодинамічної рівноваги у системі. У результаті підвищується ступінь гелеутворення у матриці, що приводить, відповідно, до підвищення показників ударної в'язкості таких КМ [7]. Збільшення вмісту наповнювача призводить до перенасичення композиту наповнювачем, погіршення його змочування макромолекулами зв'язувача, в результаті чого вони стають концентраторами напружень у КМ. У свою чергу це призводить до інтенсивного поширення тріщин у матеріалі під час удару і, як наслідок, зменшуються показники їх ударної в'язкості.

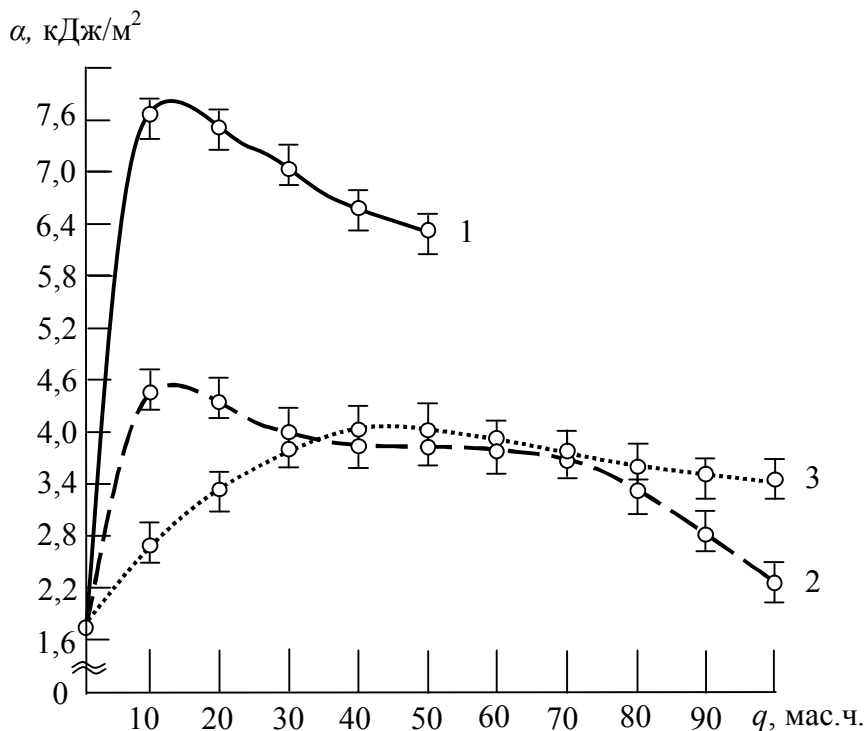


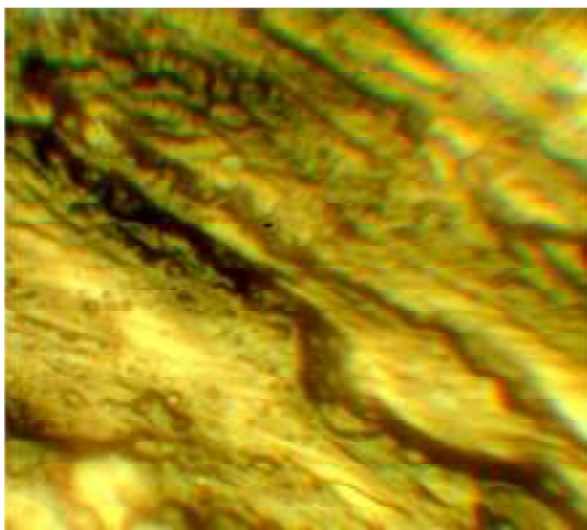
Рисунок 1 – Залежність ударної в'язкості КМ від вмісту наповнювачів (5...10 мкм), мас.ч:
1 – перліт; 2 – охра; 3 – деревне вугілля

Показники ударної в'язкості КМ, наповненого частками деревного вугілля (рис. 1, крива 3), також монотонно зростають при збільшенні вмісту добавки. Максимальні значення ударної в'язкості ($a = 4,0$ кДж/м²) матеріалів з частками деревного вугілля спостерігали за вмісту останніх – $q = 40...50$ мас.ч. Це пояснюють тим, що

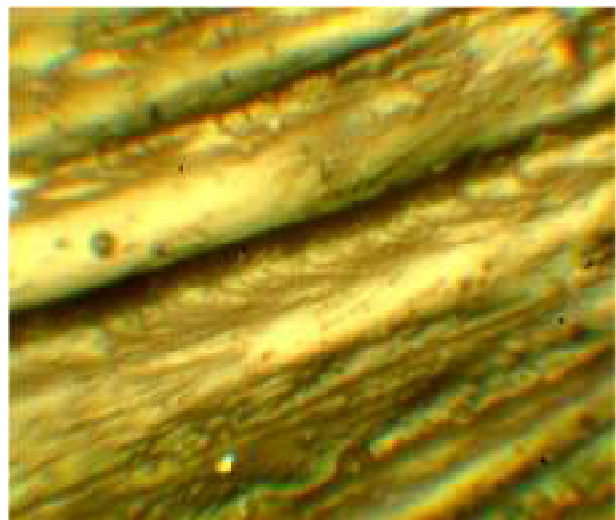


деревне вугілля є продуктом згорання і завдяки значній кількості атомів вуглецю частки даної добавки є активними до взаємодії з групами та сегментами макромолекул епоксидного олігомеру. Слід зазначити, що поліпшення властивості КМ спостерігали за підвищення вмісту часток до $q = 50$ мас. ч. Надалі збільшення вмісту часток призводить до погіршення міцності при ударі КМ з даним наповнювачем, що, у свою чергу, зумовлено підвищенням крихкості матеріалів.

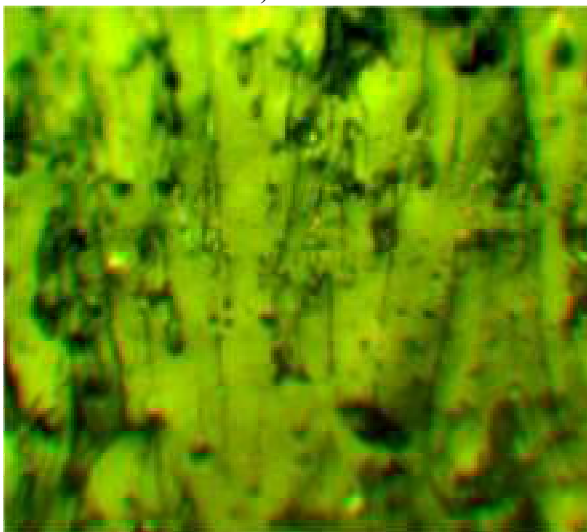
Для підтвердження отриманих результатів додатково досліджували поверхню зламу зразків з наповнювачами різної природи та безпосередньо матриці (рис. 2). Аналізуючи отримані фрактограми зламу, встановили, що поверхня матриці відзначається лініями сколювання, які загалом характеризують її напружений стан (рис. 2, а, б). Причому, лінії сколювання матриці чіткі і яскраво виражені. Це дозволяє стверджувати про утворення в матеріалі підвищених залишкових напружень, які призводять до збільшення крихкості і, як наслідок, до підвищення швидкості поширення тріщин. Тобто, аналіз фрактограм зламу додатково підтверджує результати випробувань ударної в'язкості епоксидної матриці, показники якої є незначними (рис. 1).



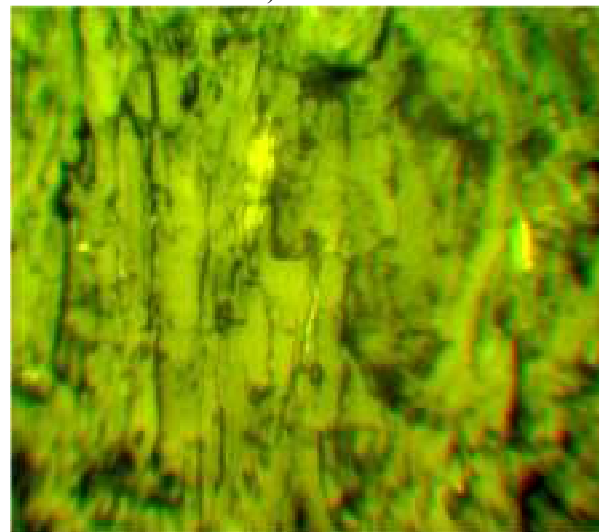
а) $\times 100$



б) $\times 200$



в) $\times 400$



г) $\times 400$

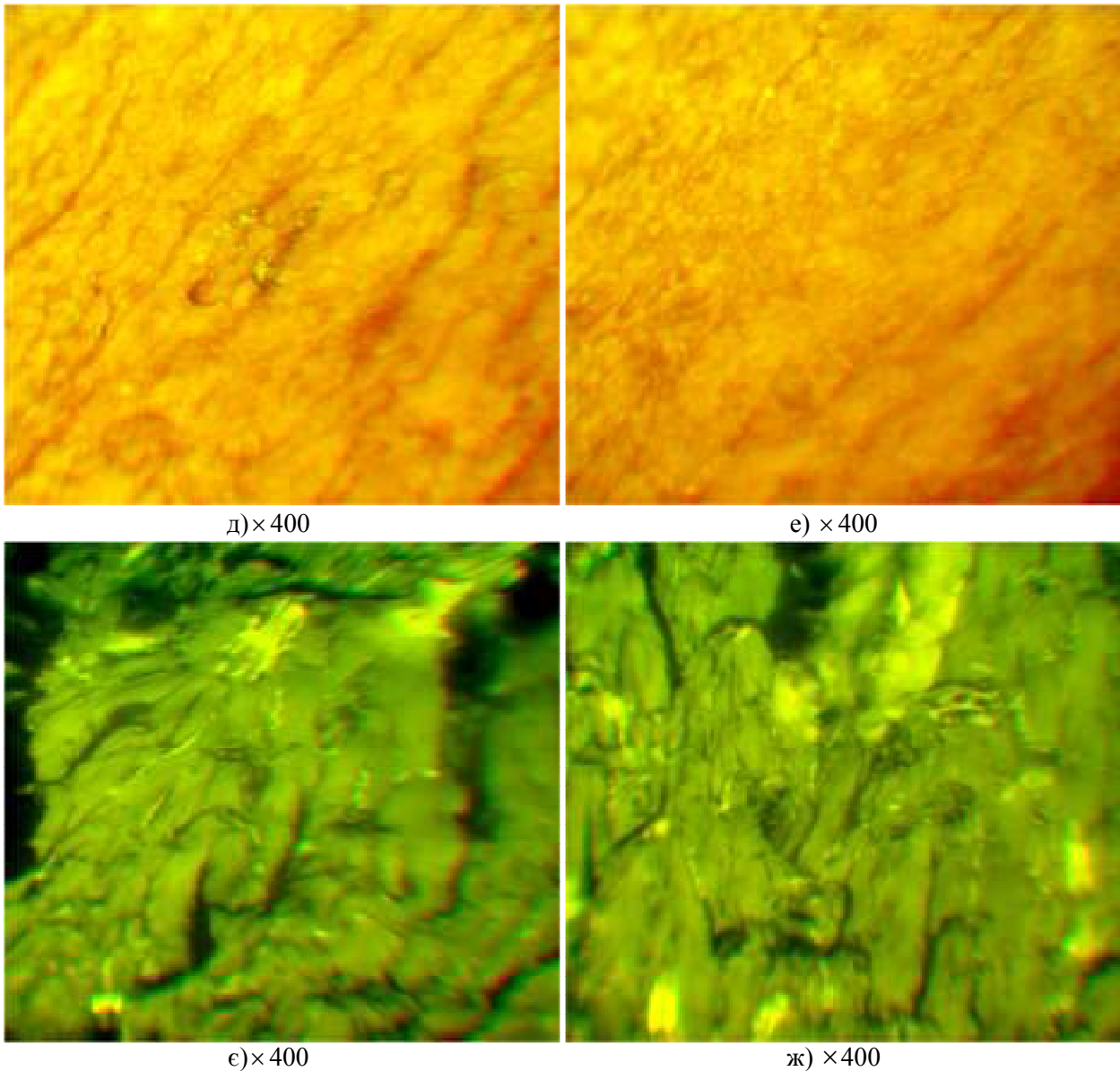


Рисунок 2 – Фрактограми зламу КМ (дисперсність часток – 5...10 мкм, $q = 10$ мас. ч.): а), б) матриця (контрольний зразок); в), г) КМ з частками перліту; д), е) КМ з частками охри; є) ж) КМ з частками деревного вугілля

Встановлено, що поверхня зламу матеріалів з частками перліту характеризується вираженими плавними лініями переходу і неглибокими утвореннями (рис. 2в, г). Можна констатувати про формування матеріалу з незначним напруженим станом, що зумовлює підвищення його в'язкості. Відповідно такі КМ характеризуються підвищеним ступенем зшивання на межі поділу фаз «полімер-наповнювач». Тобто, зі збільшенням в'язкості матеріалу швидкість поширення тріщини зменшується, а, отже, й збільшуються показники його ударної в'язкості (рис. 1).

Аналогічні висновки можна зробити при аналізі фрактограм зламу КМ з частками охри (рис. 2д, е). Однак, на поверхні зламу таких зразків спостерігали лінії, які мають розгалужений характер. Помітні мікротріщини, що свідчить про наявність локальних і залишкових напружень у матеріалі.

На фрактограмах зламу КМ, наповненого частками деревного вугілля (рис. 2є, ж), відмічено лінії сколювання хаотичного розташування. Це дозволяє стверджувати про значний напружений стан такого матеріалу і, відповідно, про високу швидкість поширення тріщин під час впливу ударних навантажень. Відповідно, такі КМ відзначаються не достатньо високими показниками ударної в'язкості (рис. 1, крива 3).



Отже, можна констатувати, що наповнювачі з дисперсністю 5...10 мкм є активними до взаємодії з епоксидними та гідроксильними групами епоксидного зв'язувача. Показники ударної в'язкості КМ при введенні у зв'язувач наповнювачів за оптимального вмісту збільшуються, порівняно з епоксидною матрицею, у 2,0...3,5 разів. Проте максимальною здатністю протидіяти ударним навантаженням і його тріщиностійкості відзначається епоксидний матеріал з частками перліту ($q = 10$ мас.ч.). Ударна в'язкість такого композиту становить $a = 7,6$ кДж/м².

На наступному етапі досліджували ударну в'язкість КМ за різного вмісту наповнювачів з дисперсністю 63...80 мкм та гранул поліаміду ($d = 3,2 \pm 0,1$ мм, $l = 3,5 \pm 0,1$ мм). Встановлено (рис. 2), що при введенні у зв'язувач часток з дисперсністю 63...80 мкм показники ударної в'язкості КМ монотонно зростають до критичних значень наповнювача. Крім того, максимуми на кривих залежності ударної в'язкості КМ від вмісту часток з дисперсністю 63...80 мкм зміщені праворуч, порівняно з аналогічними піками залежності $a - q$ для часток з дисперсністю 5...10 мкм. Доведено (рис. 1), що при введенні у зв'язувач дрібнодисперсних (5...10 мкм) часток максимальні значення ударної в'язкості КМ спостерігали за критичного вмісту наповнювача $q = 10$ мас.ч. Водночас при введенні у зв'язувач часток з дисперсністю 63...80 мкм максимальні значення ударної в'язкості КМ спостерігали за критичного вмісту наповнювача $q = 30...50$ мас.ч. (рис. 3). Виняток становлять лише КМ з частками графіту марки АГ-1500, ударна в'язкість якого збільшується до максимального можливого наповнення ($q = 80$ мас.ч.) при гідродинамічному суміщенні компонентів без застосування допоміжних засобів і становить $a = 4,4$ кДж/м² (рис. 3, крива 2). Це пояснюють тим, що питома площа поверхні наповнювачів при збільшенні розмірів часток зменшується. Відповідно, для поліпшення міжфазової взаємодії при зшиванні КМ необхідно збільшити критичний вміст часток. Отже, для поліпшення когезійної міцності КМ, а, отже, й підвищення показників їх ударної в'язкості необхідним є формування структури композитів із щільним розташуванням макромолекул. Цього досягають збільшенням вмісту наповнювачів у КМ до критичних значень.

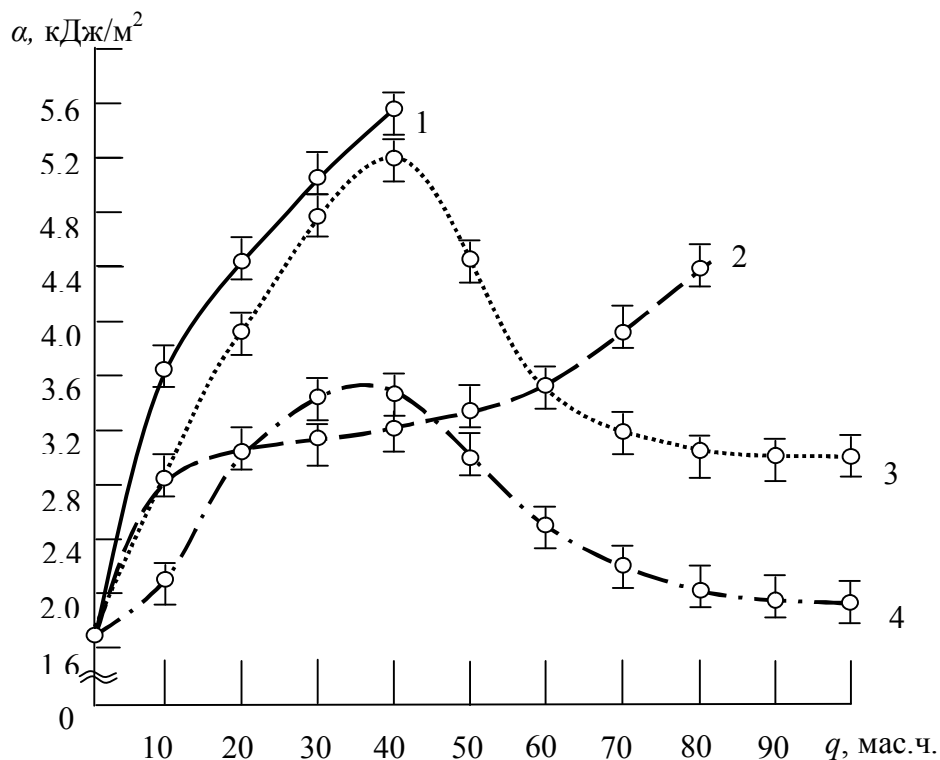


Рисунок 3 – Залежність ударної в'язкості КМ від вмісту наповнювачів (63...80 мкм), мас.ч:
 1 – перліт; 2 – графіт АГ-1500; 3 – СШ; 4 – поліамід
 (гранули: $d = 3,2 \pm 0,1$ мм, $l = 3,5 \pm 0,1$ мм)

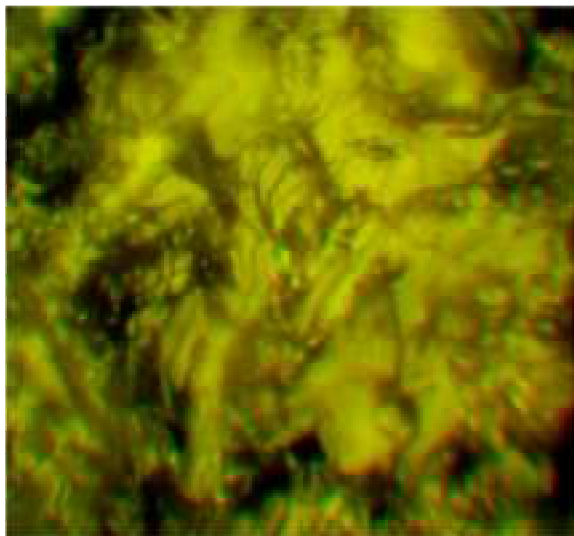


Додатково встановлено, що найвищими показниками ударної в'язкості відзначається композит, наповнений частками перліту (рис. 3, крива 1). Максимум на кривій залежності ударної в'язкості від кількості часток перліту (63...80 мкм) спостерігали за вмістом останніх $-q = 40$ мас.ч. У такому випадку формується матеріал із значеннями ударної в'язкості $a = 5,5$ кДж/м². Слід зазначити, що гідродинамічне розмішування композицій з частками перліту (63...80 мкм) без застосування допоміжного обладнання (аналогічно, як і сумішей з частками перліту з дисперсністю 5...10 мкм) можливе за максимального наповнення зв'язувала даними добавками за вмістом $q = 40...50$ мас.ч. Це зумовлено високою адсорбційною здатністю наповнювача щодо епоксидного олігомеру.

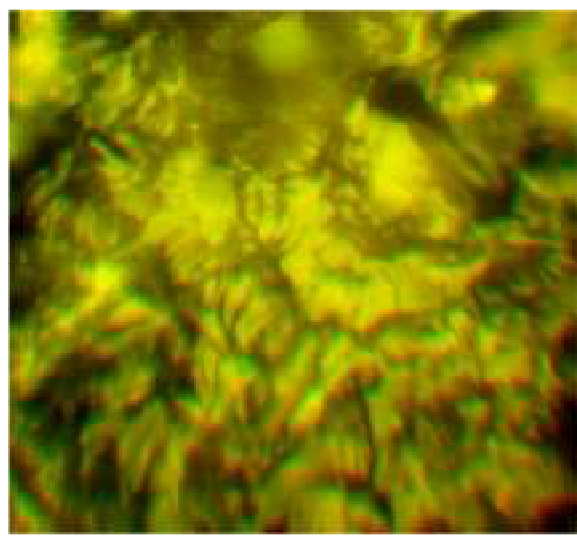
Максимальні значення ударної в'язкості КМ, наповненого частками СШ (рис. 3, крива 3), майже не відрізняються від показників КМ з перлітом і становлять $a = 5,2$ кДж/м² (за вмістом наповнювача $q = 40$ мас.ч.).

Додатково досліджували ударну в'язкість КМ, що містять гранули поліаміду (рис. 3, крива 4). Встановлено несуттєве поліпшення показників міцності при ударі композитів з даними добавками. Максимум ударної в'язкості спостерігали для КМ, наповнених поламідом, за вмісту гранул $q = 30...40$ мас.ч. У цьому випадку показники зростають від $a = 1,8$ кДж/м² (для епоксидної матриці) до $a = 3,4$ кДж/м². Гранули такого наповнювача, порівняно з іншими досліджуваними у роботі частками, мають достатньо значний розмір. При структуроутворенні вони армують епоксидні композити і є бар'єром для поширення тріщин у матеріалах, що зумовлює, хоч і не суттєве, підвищення показників ударної в'язкості КМ. На наш погляд, це зумовлено тим, що при структуроутворенні композитів не відбувається міжфазової хімічної взаємодії (лише фізична) поліаміду з епоксидним олігомером. При цьому формуються матеріали з незначною ударною в'язкістю. Можливо, такі матеріали відзначатимуться підвищеними показниками зносостійкості, що буде досліджено у майбутньому і в рамках даної роботи не розглядається.

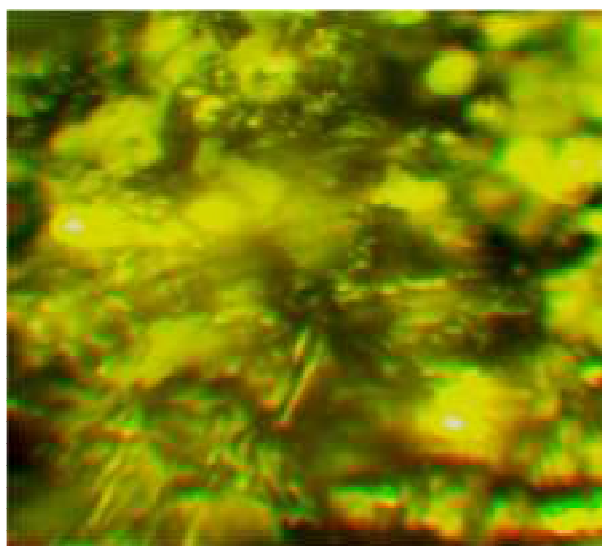
Для підтвердження наведених вище теоретичних положень і результатів експерименту надалі досліджували поверхню зламу композитів методом оптичної мікроскопії. Показано (рис. 4), що топологія поверхні композитів з частками перліту (рис. 4а, б) і СШ (рис. 4д, е) має подібний і, водночас, в'язкий характер. Це свідчить про те, що такі матеріали відзначаються рівномірним розподілом наповнювача й, відповідно, структура таких КМ характеризується термодинамічною рівновагою. Слід зазначити, що показники ударної в'язкості матеріалів з частками перліту та СШ (за вмісту $q = 40$ мас.ч.) практично не відрізняються (різниця становить $\Delta a = 0,3$ кДж/м²).



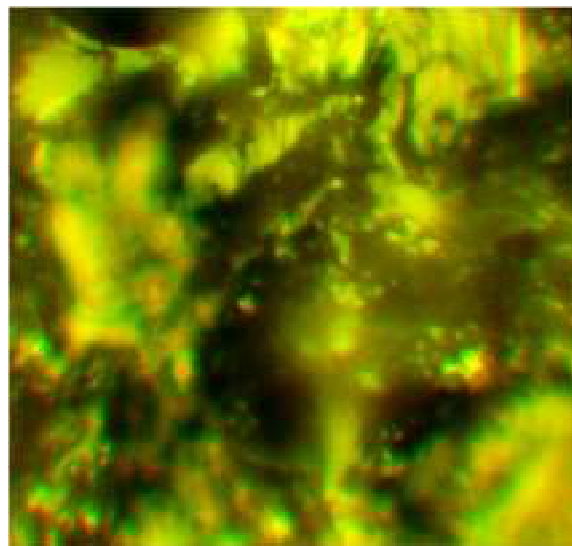
а) $\times 400$



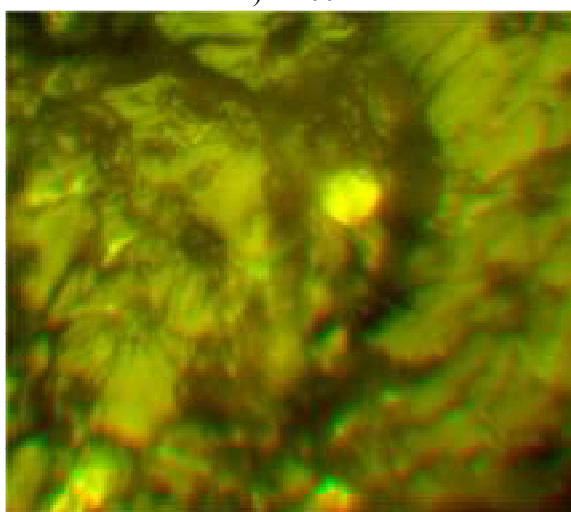
б) $\times 400$



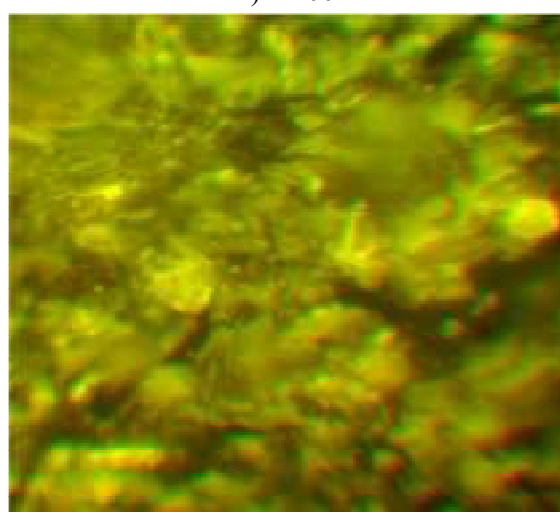
в) $\times 400$



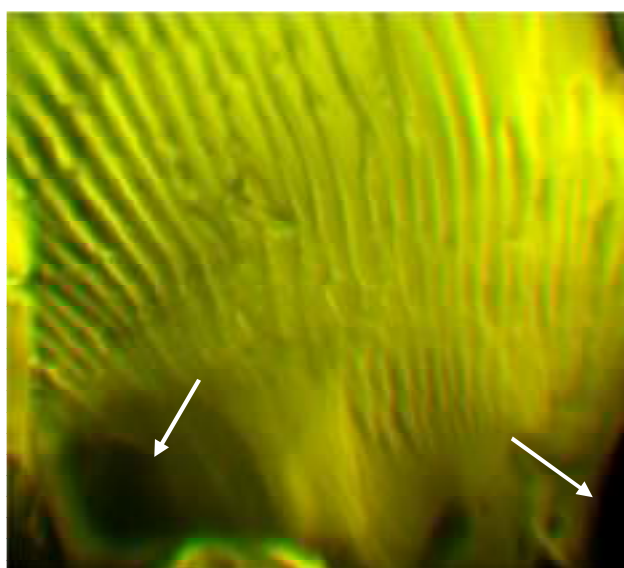
г) $\times 400$



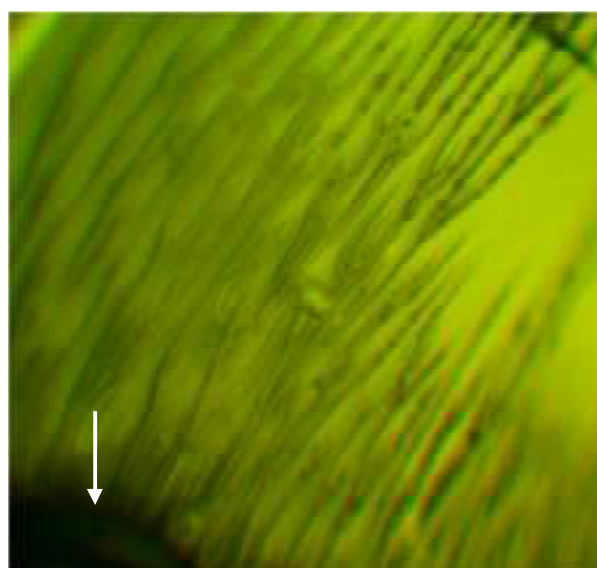
д) $\times 400$



е) $\times 400$



з) $\times 400$



ж) $\times 400$

Рисунок 4 – Фрактограми зламу КМ (дисперсність часток – 63...80 мкм, $q = 40$ мас.ч.):
а), б) КМ з часками перліту в), г) КМ з часками графіту АГ-1500; д), е) КМ з частками СШ;
є) ж) КМ з гранулами поліаміду ($d = 3,2 \pm 0,1$ мм, $l = 3,5 \pm 0,1$ мм)



Поверхня зламу КМ з частками графіту АГ-1500 (рис. 4, в, г) характеризується наявністю кратерів значної глибини та хаотичністю ліній сколювання. Це дозволяє стверджувати про активацію процесів полімеризації за наявності часток графіту, що поліпшує когезійну міцність матеріалів. Водночас матеріали характеризуються градієнтом напружень, що призводить до погіршення показників ударної в'язкості.

Результати аналізу поверхні зразків на основі епоксидної матриці і поліаміду дозволяють констатувати про те, що гранули є концентраторами напружень. З рис. 4є, ж помітно, що лінії сколювання мають направлений характер і беруть початок у міжфазовій області «наповнювач–епоксидна матриця» (показано стрілками). Тріщини мають глибокі, яскраво виражені лінії, що характерно для КМ зі значним напруженим станом. Відповідно, швидкість поширення тріщин у таких композитах при ударних навантаженнях є високою.

Отже, можна констатувати, що у КМ, при наповненні частками з розмірами 63...80 мкм за критичного вмісту, показники ударної в'язкості є достатньо великими. Проте, слід зазначити, що серед усіх досліджуваних у роботі матеріалів максимальними показниками ударної в'язкості відзначаються композити, які містять наповнювачі з дисперсністю 5...10 мкм. Це, у першу чергу, зумовлено тим, що такі частки при введенні у зв'язувач за критичного вмісту рівномірно розподіляються у об'ємі композиту. Відповідно, матеріали характеризуються поліпшеною когезійною міцністю, а, отже, й ударною в'язкістю.

Виходячи з цього, цікавим для подальших досліджень є створення матеріалів з комплексним двокомпонентним наповнювачем (частки різної природи і дисперсності). Введення такого наповнювача за критичного вмісту, на наш погляд, забезпечить не лише рівномірний розподіл часток у об'ємі композиту, але й сприятиме утворенню навколо часток повеневих шарів з поліпшеними властивостями максимальної товщини.

Висновки. На основі результатів експериментальних досліджень можна констатувати наступне:

1. Доведено, що наповнювачі з дисперсністю 5...10 мкм є активними до взаємодії з епоксидними та гідроксильними групами епоксидного зв'язувача. Показники ударної в'язкості композитів при введенні у зв'язувач наповнювачів за оптимального вмісту збільшуються, порівняно з епоксидною матрицею, у 2,0...3,5 разів. Проте максимальною здатністю протидіяти ударним навантаженням і його тріщиностійкості відзначається епоксидний матеріал з частками перліту ($q = 10$ мас.ч.). Ударна в'язкість такого композиту становить – $a = 7,6$ кДж/м².

2. Встановлено, що у композитах, при наповненні частками з розмірами 63...80 мкм за критичного вмісту, показники ударної в'язкості є достатньо великими ($a = 3,2...5,6$ кДж/м²). Проте, слід зазначити, що серед усіх досліджуваних у роботі матеріалів максимальними показниками ударної в'язкості відзначаються композити, які містять наповнювачі з дисперсністю 5...10 мкм. Це, у першу чергу, зумовлено тим, що такі частки при введенні у зв'язувач за критичного вмісту рівномірно розподіляються у об'ємі композиту. Відповідно, матеріали характеризуються поліпшеною когезійною міцністю, а, отже, й ударною в'язкістю.

3. Обґрунтовано, що для стабілізації термодинамічного стану систем після їх зшивання та підвищення показників ударної в'язкості композитів доцільно у епоксидний зв'язувач вводити комплексний двокомпонентний наповнювач (частки різної природи і дисперсності). Введення такого наповнювача за критичного вмісту, на наш погляд, забезпечить не лише рівномірний розподіл часток у об'ємі композиту, але й сприятиме утворенню навколо часток повеневих шарів з поліпшеними властивостями максимальної товщини.



СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Полимерные композиционные материалы : структура, свойства, технология : учеб. пособие / [М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др.] ; под ред. А. А. Берлина. – СПб. : Профессия, 2008. – 560 с.
2. Тхір І. Г. Фізико-хімія полімерів : навч. посібник / І. Г. Тхір, Т. В. Гуменецький. – Львів : вид. Нац. універ. «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
3. Браїло М. В. Дослідження впливу твердників у комплексі на фізико-механічні властивості епоксидної матриці / М. В. Браїло, В. М. Красенький // Матеріали 4-ї Всеукр. наук.-практ. конф. «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування». – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2013. – С. 83-86.
4. Браїло М. В. Дослідження впливу вмісту твердника і температури зшивання на властивості епоксидних зв'язувачів / М. В. Браїло // Вісн. Житом. держ. технол. універ. Серія : Технічні науки. – 2013. – № 2 (65). – С. 3-12.
5. Марущак П. О. Масштабные уровни деформации и разрушения теплостойких сталей / П. О. Марущак, С. В. Панин, А. З. Студент, Б. Б. Овечкин ; отв. ред. В. Ф. Пичугин. – Томск : Изд-во национального исследовательского Томского политехнического университета, 2013. – 236 с.
6. Букетов А. В. Влияние ультразвуковой обработки на физико-механические и теплофизические свойства эпоксидных нанокompозитов / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, М. В. Браїло, В. Л. Алексенко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – № 5. – С. 126-132.
7. Курта С. А. Наповнювачі – синтез, властивості та використання : навч. посіб / С. А. Курта – Івано-Франківськ : Вид-во Прикарпат. нац. ун-ту ім. В. Стефаника, 2012. – 296 с.

Браїло М.В. ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ЭПОКСИКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проанализирована динамика ударной вязкости композитных материалов при введении различных по природе и дисперсности частиц наполнителей. Обосновано, что в композитах, наполненных частицами с размерами 63...80 мкм при критическом содержании, показатели ударной вязкости являются достаточно большими ($a = 3,2...5,6 \text{ кДж/м}^2$). Однако, установлено, что среди всех исследуемых в работе материалов максимальными показателями ударной вязкости отличаются композиты, которые содержат наполнители с дисперсностью 5...10 мкм ($a = 4,0...7,6 \text{ кДж/м}^2$). Доказано, что при формировании эпоксидных материалов с улучшенными свойствами при эксплуатации в условиях динамических и ударных нагрузок необходимо в связующее вводить 40...50 мас.ч. частиц перлита дисперсностью 5...10 мкм на 100 мас.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Ударная вязкость такого композита составляет $a = 7,6 \text{ кДж/м}^2$. Полученные результаты механических испытаний подтверждены исследованиями методом оптической микроскопии.

Ключевые слова: эпоксидный композит, ударная вязкость, наполнитель.

Brailo M.V. STUDY TOUGHNESS OF EPOXY COMPOSITE MATERIALS

The dynamics of the toughness of the composite material with the introduction of various nature and particulate fillers. It is proved that in composites filled with particles of size 63...80 microns at the critical content, toughness indices are large enough ($a = 3.2...5.6 \text{ kJ/m}^2$). However, it was found that among all study materials in the maximum rates observed toughness composites which contain fillers dispersion 5...10 microns ($a = 4.0...7.6 \text{ kJ/m}^2$). It is proved that the formation of epoxy materials with improved properties in operation and under dynamic impact loads must be administered in a binder 40...50 parts perlite particle dispersion 5...10 microns by weight per 100 parts epoxy oligomer ED-20. Toughness of the composite is $a = 7,6 \text{ kJ/m}^2$ The obtained results of mechanical tests confirmed by studies by optical microscopy.

Keywords: epoxy composite, the toughness, the filler.

Статтю прийнято
до редакції 19.04.14.